

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



**Tese de Doutorado**

**PÉRICLES DE FARIAS BORGES**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DO  
ALGODOEIRO HERBÁCEO (*Gossypium hirsutum* L.)  
CULTIVAR BRS 187 8H NA CHAPADA DO APODI - RN**

**Campina Grande, Maio de 2011**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
CAMPINA GRANDE



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DO  
ALGODOEIRO HERBÁCEO (*Gossypium hirsutum* L.)  
CULTIVAR BRS 187 8H NA CHAPADA DO APODI - RN**

**PÉRICLES DE FARIAS BORGES**

**Orientador: Dr. Bernardo Barbosa da Silva**

Campina Grande - PB

Maio de 2011

**PÉRICLES DE FARIAS BORGES**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DO  
ALGODOEIRO HERBÁCEO (*Gossypium hirsutum* L.) CULTIVAR  
BRS 187 8H NA CHAPADA DO APODI - RN**

Tese apresentada ao Programa  
de Pós-Graduação em  
Meteorologia da Universidade  
Federal de Campina Grande  
em cumprimento às exigências  
do Regulamento do Curso para  
a obtenção do título de Doutor.

Área de Concentração: **Agrometeorologia**

Subárea: **Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia**

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Campina Grande – PB

Maio de 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B732e

Borges, Péricles de Farias.

Evapotranspiração e coeficiente de cultura do algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L.) cultivar BRS 187 8H na Chapada do Apodi – RN / Péricles de Farias Borges. – Campina Grande, 2011.

101 f. : il. col.

Tese (Doutorado em Meteorologia)- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva.

1. Agricultura Irrigada. 2. Calor Latente. 3. Razão de Bowen. 4. Cotonicultura. I. Título.

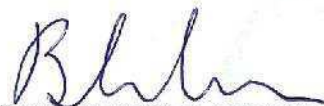
CDU - 631.674.5(043)

PÉRICLES DE FARIAS BORGES

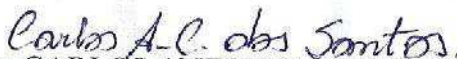
EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA DO ALGODOEIRO  
HERBÁCEO (*Gossypium hirsutum*, L.) CULTIVAR BRS 187 8H NA CHAPADA DO  
APODI – RN

TESE APROVADA EM 30/05/2011

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. CARLOS ANTONIO COSTA DOS SANTOS  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. CLEBER BRITO DE SOUZA  
Departamento de Agropecuária  
Universidade Federal da Paraíba



Dr. JOSÉ RENATO CORTEZ BEZERRA  
Centro Nacional de Pesquisa do Algodão  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária



Prof. Dr. JOSÉ FERREIRA COSTA FILHO  
Departamento de Solos e Engenharia Rural  
Universidade Federal da Paraíba

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, razão do meu viver, por seu imenso amor e dedicação, agradeço-lhes de coração tudo o que Pedro Borges Souto e Elizabete de Farias Souto representam para mim.

À minha esposa que sempre esteve me apoiando em todos os momentos de minha jornada e à benção do meu filho.

À minha irmã por ter sempre me dado forças para continuar a minha luta.

Aos meus colegas e amigos que me ajudaram ao longo deste Curso de Doutorado e a Secretária do Curso Divanete.

Aos meus amigos norte rio-grandenses de Apodi - RN, pela ajuda nos trabalhos de campo da Unidade Experimental da EMPARN-RN.

Em especial ao grande amigo Bergson Guedes Bezerra, pelo grande apoio dado durante a minha caminhada.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus que é a força que me faz caminhar seguro e o grande responsável pela minha existência.

À Embrapa – Algodão, pela imprescindível cooperação, sem a qual não teria sido possível realizar a pesquisa; e aos seus técnicos e cientistas, particularmente ao Dr. José Renato Cortez Bezerra e ao Dr. Napoleão Esberard de Macedo Beltrão.

Ao saudoso Dr. Malaquias da Silva Amorim Neto, que juntamente com os professores Dr. Bernardo Barbosa da Silva e o Dr. José Renato Cortez Bezerra, projetaram a realização do experimento para Apodi, RN.

Ao professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva, pela brilhante orientação, pelos ensinamentos ministrados, pelo incentivo constante, principalmente, pela amizade.

A Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade de da realização do curso.

Aos professores do curso de doutorado em Meteorologia da UFCG pelos ensinamentos e incentivos.

A CAPES por ter custeado a campanha experimental em Apodi - RN ao nível de Doutorado.

A EMPARN-RN pelo fornecimento de toda a estrutura que me foi concedida para a realização desta pesquisa, pois sem seu apoio teria sido impossível a realização da mesma.

Ao grande amigo Dr. Cleber Brito de Souza.

Aos colegas de curso de doutorado em Meteorologia pelo apoio em todas as etapas do curso e pela amizade.

A toda minha família, representada pelos meus pais, irmã, esposa, filho e sogra, pelo apoio e incentivo constantes.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	vi
RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
<b>1.0 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2.0 - REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1 - A cultura do algodão.....	5
2.2 - Necessidades hídricas.....	11
2.3 - Consumo hídrico da cultura baseado na razão de Bowen.....	14
2.4 – Evapotranspiração.....	22
2.5 - Coeficiente de cultura.....	29
<b>3.0 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
3.1 - Características da área experimental.....	34
3.2 - Práticas agrícolas.....	36
3.3 - Evapotranspiração de referência.....	38



3.4 - Evapotranspiração da cultura pelo balanço de energia.....	42
3.5 - Curva do coeficiente de cultura.....	45
3.5.1 - Valores do $K_c$ (médio e final) para a cultura do algodão segundo a FAO Tabela 12.....	47
3.5.2 - O $K_{c-inicial\ FAO}$ foi obtido graficamente a partir dos dados de $ET_0$ calculado no período e da frequência de irrigação, para solos de textura média (Figura 30) do boletim FAO-56 (Allen et al., 1998).....	48
<b>4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
4.1 - Fenologia do algodoeiro cultivar BRS 187 8H.....	49
4.2 - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo para condições de céu claro e com nebulosidade para os anos de 2008 e 2009.....	51
4.3 - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo para os ciclos completos e estágios fenológicos para os anos de 2008 e 2009.....	56
4.4 - $ET_0$ , Irrigação e $ET_c$ .....	64
4.5 - $K_{c\ FAO}$ versus $K_{c\ Local}$ .....	72
<b>5.0 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Páginas
<b>Figura 1</b> – Diagrama de Evaporação (E) e Transpiração (T). Fonte Allen, 1998.....	24
<b>Figura 2</b> - Localização da Fazenda Experimental da EMPARN. A) no Globo Terrestre; B) No município de Apodi-RN. Fonte Google Mapas.....	35
<b>Figura 3</b> – Estação Meteorológica de Observação de Superfície.....	37
<b>Figura 4.1</b> - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008, para dias sem nebulosidade.....	54
<b>Figura 4.2</b> - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008, para dias com nebulosidade.....	54
<b>Figura 4.3</b> - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009, para dias sem nebulosidade.....	55
<b>Figura 4.4</b> - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009, para dias com nebulosidade.....	55

<b>Figura 4.5</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para o ciclo completo do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008.....	59
<b>Figura 4.6</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para o ciclo completo do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009.....	59
<b>Figura 4.7</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 1º estágio de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008.....	60
<b>Figura 4.8</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 1º estágio de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009.....	60
<b>Figura 4.9</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 2º estágio de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008.....	61
<b>Figura 4.10</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 2º estágio de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009.....	61
<b>Figura 4.11</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 3º estágio de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008.....	62

<b>Figura 4.12</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 3º estágio de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009.....	62
<b>Figura 4.13</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para o 4º estágio de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008.....	63
<b>Figura 4.14</b> - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para o 4º estágio de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009.....	63
<b>Figura 4.15</b> - Evapotranspiração de referência observada durante os períodos experimentais em 2008 e em 2009.....	64
<b>Figura 4.16</b> - Temperatura média observada das 24 horas nos períodos experimentais de 2008 e 2009.....	66
<b>Figura 4.17</b> - Temperatura média observada diurna nos períodos experimentais de 2008 e 2009.....	66
<b>Figura 4.18</b> - Volume diário de irrigação aplicada durante as campanhas experimentais de 2008 e 2009.....	68
<b>Figura 4.19</b> - $ET_c$ diária do algodão herbáceo (cultivar BRS 187 8H) irrigado em Apodi - RN nos anos de 2008 e 2009.....	69

**Figura 4.20** - Curvas do  $K_c$  desenvolvidas localmente durante os períodos experimentais de 2008 e 2009 (a) e sua curva média comparada com a curva do  $K_c$  FAO ajustado (b)..... 75

**Figura 4.21** - Evapotranspiração do algodão observada (Razão de Bowen) e estimada (multiplicando o  $K_{c-FAO\ Ajustado}$  pela  $ET_0$ ) em 2008 (a) e 2009 (b)..... 77

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 4.1</b> – Ciclo do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H, Apodi - RN, 2008.....	49
<b>Tabela 4.2</b> – Radiação solar (RS), temperatura do ar (Tar), umidade relativa (UR), velocidade do vento a 2 m ( $u_2$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), observados durante o ciclo fenológico do algodoeiro herbáceo em Apodi-RN nas duas campanhas experimentais.....	50
<b>Tabela 4.3</b> - Data da emergência e da maturação total, e do GDD requerido pelo algodoeiro em Apodi-RN.....	51
<b>Tabela 4.4</b> - Data da semeadura, temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa e GDD (Graus Dias de Desenvolvimento) observado durante o ciclo fenológico da cultura em ambas as campanhas experimentais.....	65
<b>Tabela 4.5</b> - Valores médios da evapotranspiração $ET_c$ do algodoeiro herbáceo BRS 187 8H, por fase fenológica em Apodi - RN, 2008.....	70
<b>Tabela 4.6</b> - Valores médios da evapotranspiração $ET_c$ do algodoeiro herbáceo BRS 187 8H, por fase fenológica em Apodi - RN, 2009.....	70
<b>Tabela 4.7</b> - Irrigação total aplicada (mm), evapotranspiração do algodão $ET_c$ (mm) e evapotranspiração de referência $ET_0$ (mm) calculada por FAO-Penman-Monteith em Apodi - RN durante os dois períodos experimentais.....	72

<b>Tabela 4.8</b> - $K_{C_{FAO\ Ajustado}}$ e $K_{C_{Local}}$ para a cultura do algodão irrigado por aspersão no semiárido brasileiro.....	72
<b>Tabela 4.9</b> - Valores médios de elementos meteorológicos e totais da irrigação aplicada durante os estágios inicial, médio e final do algodão em Apodi – 76 RN.....	76
<b>Tabela 4.10</b> - ET (mm) sazonal do algodão observada (Razão de Bowen) e estimada (mm) (multiplicando o $K_{C-FAO\ Ajustado}$ pela $ET_0$ ).....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### GREGOS

Símbolo	Descrição	Unidade
$\beta$	Razão de Bowen	
$\gamma$	Fator psicrométrico	
$\delta$	Declinação solar	rad
$\Delta$	Inclinação da curva de pressão de saturação de vapor d'água	kPa °C <sup>-1</sup>
$\varepsilon$	Razão entre as massas moleculares da água e do ar seco	
$\pi$	Constante trigonométrica	rad
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	4,90x10 <sup>-9</sup> MJ m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> dia <sup>-1</sup>
$\phi$	Latitude local	rad
$\omega_s$	Ângulo horário	rad
$\rho$	Densidade do ar	kg m <sup>-3</sup>
$\alpha$	Albedo	%

### LATINOS

Símbolo	Descrição	Unidade
arc cos	Função trigonométrica	rad
BE	Balanço de energia	
BERB	Balanço de energia baseado na razão de Bowen	
BOC	Balanço de onda curta	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
BOL	Balanço de onda longa	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
cos	Função trigonométrica em	rad
$c_p$	Calor específico do ar seco à pressão constante	1,013x10 <sup>-3</sup> MJ kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup>
CPATSA	Centro de Pesquisa Agropecuário do Trópico Semiárido	



DAE	Dias Após a Emergência	
$d_r$	Inverso da distância relativa Terra-Sol	rad
$e$	Pressão de vapor d'água	kPa
$e_a$	Pressão parcial do vapor d'água em média diária	kPa
$e_s$	Pressão de saturação do vapor d'água média diária	kPa
$E_s(t_u)$	Pressão de saturação de vapor d'água correspondente a temperatura $T_u$	kPa
$e_s - e_a$	Déficit de saturação	kPa
$e^0(t_{\min})$	Pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura mínima	kPa
$e^0(t_{\max})$	Pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura máxima	kPa
$e(t)$	Pressão atual (parcial) do vapor d'água	kPa
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária	
$E$	Evaporação	mm dia <sup>-1</sup>
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte	
$ET$	Evapotranspiração	mm dia <sup>-1</sup>
$ET_c$	Evapotranspiração da cultura	mm dia <sup>-1</sup>
$ET_m$	Evapotranspiração máxima da cultura	mm dia <sup>-1</sup>
$ET_0$	Evapotranspiração de referência diária	mm dia <sup>-1</sup>
$ET_p$	Evapotranspiração potencial	mm dia <sup>-1</sup>
$ET_r$	Evapotranspiração real	mm dia <sup>-1</sup>
EUA	Estados Unidos da América	
$F$	Energia utilizada na fotossíntese	
FAO	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação	
$G$	Fluxo diário de calor no solo	MJ m <sup>-2</sup> ou W m <sup>-2</sup>
GDD	Graus Dias de Desenvolvimento	
$G_{sc}$	Constante solar	0,082 MJ m <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup>
$h$	Altura das plantas em cada período	
$H$	Fluxo diário de calor sensível	MJ m <sup>-2</sup> ou W m <sup>-2</sup>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística	

ICID	Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem	
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia	
j	Dia Juliano	
$k_c$	Coeficiente da cultura	
$K_{cinicial}$	Coeficiente de cultura inicial	
$K_{cmédio}$	Coeficiente de cultura médio	
$K_{cfinal}$	Coeficiente de cultura final	
$K_{cinicialLOCAL}$	Coeficiente de cultura inicial LOCAL	
$K_{cmédioLOCAL}$	Coeficiente de cultura médio LOCAL	
$K_{cfinalLOCAL}$	Coeficiente de cultura final LOCAL	
$K_{cinicialFAO}$	Coeficiente de cultura inicial ajustado pela FAO	
$K_{cmédioFAO}$	Coeficiente de cultura médio ajustado pela FAO	
$K_{cfinalFAO}$	Coeficiente de cultura final ajustado pela FAO	
$K_{cinicialFAO}$	Coeficiente de cultura inicial tabelado	
$K_{cfinalFAO}$	Coeficiente de cultura final tabelado	
$K_h$	Coeficiente de difusão turbulenta de calor sensível	$m^2 s^{-1}$
$K_w$	Coeficiente de difusão turbulenta de calor latente	$m^2 s^{-1}$
L	Calor latente de vaporização da água	$2,45 MJ kg^{-1}$
$Le$	Fluxo diário de calor latente em	$MJ m^{-2}$ ou $W m^{-2}$
N	Número máximo de horas de brilho solar	
n	Número efetivo de horas de brilho solar	
P	Energia utilizada pelas plantas	
Pe	Pernambuco	
$P_o$	Pressão atmosférica média local	kPa
q	Umidade específica do ar	$kg kg^{-1}$
rc	Resistência do dossel do cultivo	
ra	Resistência aerodinâmica	
Ra	Irradiância solar extraterrestre	$MJ m^{-2} dia^{-1}$
Rg	Radiação de onda curta incidente	$MJ m^{-2}$ ou $W m^{-2}$
Rla	Radiação de onda longa incidente	$MJ m^{-2}$ ou $W m^{-2}$
Rnl	Balanço de radiação de ondas longas	$MJ m^{-2}$ ou $W m^{-2}$
Rn	Saldo de radiação à superfície	$MJ m^{-2}$ ou $W m^{-2}$
$R_{ns}$	Balanço de radiação de ondas curtas	$MJ m^{-2}$ ou $W m^{-2}$

$R_r$	Radiação refletida pela cultura	$\text{MJ m}^{-2}$ ou $\text{W m}^{-2}$
$R_s$	Irradiância solar global	$\text{MJ m}^{-2}$ ou $\text{W m}^{-2}$
$R_{so}$	Radiação solar para dias de céu claro	$\text{MJ m}^{-2}$ ou $\text{W m}^{-2}$
$R_n$	Estado do Rio Grande do Norte	
$S$	Energia armazenada na copa das árvores	
$\text{sen}$	Função trigonométrica	
$\text{tan}$	Função Trigonométrica	
$T$	Transpiração	$\text{mm dia}^{-1}$
$T_{\text{med}}$	Temperatura média do ar a 2 m de altura	$\text{m s}^{-1}$
$T_{\text{max}}$	Temperatura máxima do ar diária em °C	°C
$T_{\text{min}}$	Temperatura mínima do ar diária em	°C
$T_{\text{max,k}}$	Temperatura máxima do ar	Kelvin
$T_{\text{min,k}}$	Temperatura mínima do ar	Kelvin
$T_s$	Temperatura da termojunção do ar do bulbo seco	°C
$T_u$	Temperatura da termojunção do ar do bulbo úmido	°C
$u_2$	Velocidade média diária do vento a 2 m de altura	$\text{m s}^{-1}$
$UR_{\text{med}}$	Umidade relativa média diária	%
$UR_{\text{max}}$	Umidade relativa máxima diária	%
$UR_{\text{min}}$	Umidade relativa mínima diária	%
$z$	Altitude local	m
$\Delta e$	Diferença de pressão real de vapor d'água em dois níveis acima da superfície vegetada	
$\Delta T$	Diferença de temperatura do ar em dois níveis acima da superfície vegetada	
$\lambda_{\text{et}}$	Densidade de fluxo de calor latente	$\text{MJ m}^{-2}$ ou $\text{W m}^{-2}$

## RESUMO

As campanhas experimentais de campo foram realizadas na Chapada do Apodi, a oeste do Rio Grande do Norte, na estação experimental da EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, localizada no município de Apodi - RN. O objetivo da pesquisa foi determinar as necessidades hídricas do algodão herbáceo irrigado (*Gossypium hirsutum* L.), cultivar BRS 187 8H. Para esta finalidade, duas campanhas experimentais de campo, foram realizadas durante as estações secas dos anos 2008 e 2009, em que, foi empregado o método do balanço de energia baseado na razão de Bowen (BREB). Foram obtidas a  $ET_c$  e o coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) nas condições da Chapada do Apodi. A  $ET_0$  foi estimada pela FAO - Penman - Monteith utilizando os dados meteorológicos, obtidos da estação automática do INMET, em Apodi - RN. Os resultados mostraram que a  $ET_c$  acumulada foi de 717 mm em 2008 e 751 mm em 2009, correspondendo a uma média de 6,5 mm dia<sup>-1</sup> em 2008 e 6,45 mm dia<sup>-1</sup> em 2009. O estágio de desenvolvimento, foi o que apresentou maior demanda hídrica, foi o estágio médio, com 8,0 mm dia<sup>-1</sup> para o ano de 2008 e 7,7 mm dia<sup>-1</sup> em 2009 e os valores do  $K_c$  para o ano de 2008 foram: 0,65 no estágio inicial, 1,01 estágio médio e 0,78 no estágio final. Os valores do  $K_c$  determinados experimentalmente foram inferiores aos da FAO - 56, mesmo ajustado às condições locais. As médias das diferenças observadas foram da ordem dos 13, 18 e 10% para o  $K_{c-ini}$ ,  $K_{c-med}$  e  $K_{c-fin}$ , respectivamente. O uso do  $K_{c-FAO-Ajustado}$  para estimar os valores da  $ET_c$  do algodão resultou em uma superestimativa da  $ET_c$  com diferenças superiores a 10% em comparação com os valores obtidos pela técnica do BREB em ambos os anos de observação. Também foi demonstrado que o  $K_{c-ini}$  foi o mais suscetível à variação da irrigação aplicada, confirmando o que já é conhecido da literatura. O uso de  $K_{cLocal}$  oferece uma economia de aproximadamente 15% do volume de água aplicado nos anos das campanhas experimentais.

**Palavras chave:** calor latente, razão de Bowen, agricultura irrigada, cotonicultura

## ABSTRACT

The experimental field campaigns were conducted in the Apodi Plateau, west of Rio Grande do Norte State, at the experimental station of EMPARN - Agricultural Research Corporation of Rio Grande do Norte, located in Apodi-RN county. The research objective was to determine the water requirements of irrigated upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.), cultivar BRS 187 8H. For this purpose, two experimental field campaigns were carried out during the dry seasons of 2008 and 2009 years in which the Bowen Ratio Energy Balance method (BREB) was employed. Were obtained  $ET_c$  and crop coefficient ( $K_c$ ) at Apodi Plateau conditions. The  $ET_0$  was estimated by FAO-Penman-Monteith method using the meteorological data obtained from the INMET automatic station in Apodi-RN. The results showed that the accumulated  $ET_c$  was 717 mm in 2008 and 751 mm in 2009, corresponding to an average of  $6.5 \text{ mm day}^{-1}$  in 2008 and  $6.45 \text{ mm day}^{-1}$  in 2009. The growth stage of highest water demand was middle stage, with  $8.0 \text{ mm day}^{-1}$  for in 2008 year and  $7.7 \text{ mm day}^{-1}$  in 2009 year and the  $K_c$  values for the 2008 year were: 0.65 in the initial stage, 1.01 in the middle stage and 0.78 in the end stage. The  $K_c$  values experimentally determined were lower than those of the FAO-56, even adjusted for local conditions. Mean differences observed in the order of 13, 18 and 10% for  $K_{c\text{-ini}}$ ,  $k_{c\text{-mid}}$  and  $k_{c\text{-end}}$ , respectively. The use of  $K_{c\text{-FAO}}$ -adjusted values for estimate the cotton  $ET_c$  resulted in overestimation of  $ET_c$  with differences exceeding 10% compared with values obtained by BREB technique in the both observation years. It also was demonstrated that the  $K_{c\text{-ini}}$  was the most susceptible to irrigation applied variation, confirming what is already known from the literature. The use of  $K_{c\text{-Local}}$  provides a savings of approximately 15% of water applied volume of in the both experimental campaign.

**Keywords:** Latent heat flux, Bowen ratio, irrigated agricultural, cotton sowing.

## 1.0 – INTRODUÇÃO

O algodão (*Gossypium hirsutum L.*) é a fibra têxtil mais importante do planeta, sendo cultivada em mais de cem países e responsável por mais de 40% do total da produção mundial de fibras têxteis (Macdonald e Vollrath, 2005; Esparza et al., 2007; Bezerra, 2011). Durante o século XX, o algodão foi o principal produto agrícola do Semiárido brasileiro, com mais de 3,2 milhões de hectares plantados. No entanto, o sistema de produção era bastante rudimentar dotado de manejos culturais sem nenhum padrão tecnológico que rendia baixa produtividade, tornando a cotonicultura pouco competitiva e inviável economicamente, aliado a esses fatores, preços subsidiados no mercado internacional, a abertura do mercado brasileiro a importação de fibras subsidiadas do exterior, as atrativas condições de financiamento externo do produto e a incapacidade de convivência com a praga do bicudo (*Anthonomus grandis Boheman*). A combinação desses fatores levou a cotonicultura do Semiárido brasileiro a uma crescente decadência e vir a ser praticamente dizimada na década de oitenta.

A retomada do cultivo do algodão no Semiárido brasileiro é de essencial importância para a economia da região; porém, está condicionada a adoção de tecnologias que garantam a sua sustentabilidade, principalmente relacionada à eficiência do uso da água, que implicará em redução de custos de produção além de benefícios ambientais (Silva e Rao, 2005; Bezerra, 2011).

A determinação da evapotranspiração real diária das culturas ( $ET_c$ ) irrigadas é de fundamental importância para a adoção de manejo de água sustentável na irrigação. O método do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) x evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) constitui uma técnica prática e confiável para estimar a  $ET_c$ , sendo amplamente empregado (Hunsaker et al., 2003; Allen et al., 2005; Allen e Pereira, 2009; Bezerra, 2011). Além da precisão e confiabilidade, o método tem em seu favor, a vantagem de ser pouco oneroso, uma vez que requer apenas dados meteorológicos para estimar a ET para uma condição de referência e que é multiplicada por um coeficiente de cultura que representa a taxa relativa da  $ET_c$  da cultura de interesse e de uma condição específica (Allen et al., 1998; Allen e Pereira, 2009). Além dos dados meteorológicos também se faz necessário a identificação do estágio de crescimento da cultura e o conhecimento dos respectivos valores do  $K_c$ .

O conceito do  $K_c$  foi introduzido por Jensen (1968), sendo amplamente discutido e refinado pela Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação em seu Boletim FAO-56 (Allen et al., 1998). Neste boletim são enumerados os valores do  $K_c$  para os estágios fenológicos inicial, médio e final,  $K_{c-inicial}$ ,  $K_{c-médio}$  e  $K_{c-final}$ , respectivamente, de inúmeras culturas, incluindo o algodão. Os valores para o  $K_{c-inicial}$  são válidos para culturas não estressadas e cultivadas sob boas condições hídricas e agrônômicas, enquanto que os valores do

$K_{c-m\u00e9dio}$  e  $K_{c-final}$  s\u00e3o representativos de climas sub-\u00famid\u00f3s com a m\u00e9dia da umidade relativa do ar m\u00ednima em torno de 45% e com ventos moderado em torno de  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Para climas \u00famid\u00f3s, \u00e1ridos e semi\u00e1ridos s\u00e3o sugeridas corre\u00e7\u00f5es dos seus respectivos valores atrav\u00e9s de equa\u00e7\u00f5es propostas na pr\u00f3pria FAO-56 (Allen et al., 1998). Por outro lado, as curvas do  $K_c$  do algod\u00e3o t\u00eam sido determinadas experimentalmente para diferentes condi\u00e7\u00f5es clim\u00e1ticas e de cultivo (Azevedo et al., 1993; Hunsaker, 1999; Farahani et al., 2008; Ko et al., 2009; Hribal, 2009; Bezerra, 2011). A import\u00e2ncia de determinar os valores da curva do  $K_c$  de uma cultura experimentalmente \u00e9 que os mesmos apresentem maior representatividade das condi\u00e7\u00f5es clim\u00e1ticas locais, al\u00e9m de maior confiabilidade. De acordo com Hunsaker et al. (2003), o uso dos valores generalizados da curva do  $K_c$  pode gerar incertezas na determina\u00e7\u00e3o da  $ET_c$ . Para a determina\u00e7\u00e3o de valores da curva do  $K_c$  experimentalmente mais representativos Allen et al. (1998) sugerem no m\u00ednimo dois anos de observa\u00e7\u00e3o da  $ET_c$  com boa precis\u00e3o.

A evapotranspira\u00e7\u00e3o das culturas tem sido determinada experimentalmente por meios de diferentes m\u00e9todos, como as medidas lisim\u00e9tricas, balan\u00e7o de \u00e1gua no solo e os m\u00e9todos micrometeorol\u00f3gicos. O m\u00e9todo micrometeorol\u00f3gico da raz\u00e3o de Bowen, em particular, tem sido amplamente usado na determina\u00e7\u00e3o dos fluxos verticais de vapor de \u00e1gua em diferentes sistemas solo-vegeta\u00e7\u00e3o e em diferentes condi\u00e7\u00f5es clim\u00e1ticas (Steduto e Hsiao, 1998; Todd et al., 2000; Azevedo et al., 2003, Inmam-Bamber e Mcglichey, 2003; Silva et al., 2007; Azevedo et al., 2007; Teixeira et al., 2007; Savage et al., 2009 e Hou et al., 2010). Em alguns estudos a  $ET_c$  obtida segundo a raz\u00e3o de Bowen tem sido utilizada para definir a curva do  $K_c$  (Inmam-Bamber e Mcglinchey, 2003; Hou et al., 2010). A ampla aplica\u00e7\u00e3o deste m\u00e9todo \u00e9 atribu\u00edda a sua relativa simplicidade, praticidade, robustez e precis\u00e3o (Todd et al.,



2000; Silva et al., 2007; Gavilán e Berengena, 2007), pois são requeridas apenas medições dos gradientes de temperatura do ar e de umidade, saldo de radiação e fluxo de calor no solo para estimar a evapotranspiração real (Hou et al., 2010).

Este trabalho é de extrema importância para a Agrometeorologia, pois procura colocar a ciência da meteorologia a serviço da agricultura para viabilizar a otimização dos recursos hídricos na agricultura, buscando assim minimizar os gastos com água e insumos, melhorando a produtividade de pluma de algodão e obtendo o máximo de produção, vindo a proporcionar condições para o manejo sustentável dos recursos naturais água e solo.

Esta pesquisa tem por objetivo determinar as necessidades hídricas do algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum L.*) variedade BRS 187 8H em condições irrigadas da Chapada do Apodi - RN. Para tanto, foram realizadas duas campanhas experimentais com a cultura nos anos de 2008 e 2009, nas quais foi empregado o balanço de energia baseado na razão de Bowen – BERB. Com os componentes do BERB, obteve-se a  $ET_c$  e o coeficiente de cultura nas condições edafoclimáticas daquela localidade. As duas campanhas experimentais foram de relevância fundamental para a identificação das diferentes fases fenológicas e quantificação das necessidades hídricas daquela variedade.

## **2.0 – REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 - A CULTURA DO ALGODÃO**

O algodoeiro é uma planta de origem tropical, classificada como uma dicotiledônea pertencente à ordem das Malvales, família das Malváceas, tribo Hibisceae e gênero *Gossypium*. Este gênero é bastante variado e inclui aproximadamente cinquenta espécies distribuídas em regiões áridas e semiáridas dos trópicos e subtropicais (Wendel & Cronn, 2003). São conhecidas quatro espécies de algodoeiros cultivados: *Gossypium arboreum*, *Gossypium herbaceum*, *Gossypium hirsutum* e *Gossypium barbadense*. As duas primeiras são conhecidas como algodoeiro do velho mundo e as outras duas conhecidas como algodoeiro do novo mundo (Fuzatto, 1999). Cerca de 90% da produção mundial de algodão são devido à espécie *Gossypium hirsutum*, conhecida como algodoeiro de terras altas, com distribuição praticamente em todos os países produtores. No Brasil, esta espécie representa quase a totalidade do algodoeiro cultivado comercialmente, (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium hutch*) (Beltrão & Souza, 1999).

O cultivo do algodoeiro herbáceo, no Brasil, iniciou-se em 1860, mas consolidou-se a partir do início da década de 1930, em razão de ter sido a cultura alternativa para a crise na produção do café, marcando a época do grande crescimento da cotonicultura no estado de São Paulo e elevando o Brasil à condição de importante exportador de pluma (Coelho, 2004). Contudo, em razão de políticas de exportação e importação adotadas pelo Governo Federal, aliadas aos problemas de infestações de pragas em regiões tradicionais de cultivo e perda de competitividade frente à pluma importada, o cultivo do algodoeiro sofreu decréscimo expressivo em área e produção, levando o país a passar da condição de exportador para importador de fibra na década de 1990 (Nogueira Júnior & Barbosa, 2005).

O cultivo do algodão (*Gossypium Hirsutum L.*) foi até o início da década de 80 a principal atividade agrícola e econômica do Nordeste brasileiro. A partir de então a área plantada foi reduzida drasticamente, cujas causas principais, de acordo com Kouri e Santos (2007), foram o tradicionalismo da estrutura de produção, a incapacidade de convivência com a praga do bicudo (*Anthonomus grandis Boheman*) e a política agrícola do Governo Federal que inviabilizava economicamente a cultura. Durante todo o apogeu do algodão no Nordeste do Brasil, o seu cultivo era realizado em regime de sequeiro e a variedade utilizada era o mocó, semiarbóreo e de ciclo semiperene. Com o surgimento do bicudo no início da década de 80 fez-se necessária à adoção de variedades herbáceas e precoces, que mesmo adaptada às condições de sequeiro, têm sua produtividade afetada pelo regime pluviométrico bastante irregular.

A partir da segunda metade da década de 1990, começou a recuperação da atividade algodoeira no Brasil, com a produção nacional deslocando-se das regiões

tradicionais de cultivo para a região dos Cerrados, estabelecendo-se nos estados de Mato Grosso, Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais (Alves, 2006).

Atualmente, a cultura do algodoeiro herbáceo tem relevante importância econômica e social no Brasil, estando entre as dez maiores fontes de riquezas do setor agropecuário brasileiro.

De acordo com a pesquisa realizada pela CONAB no 10º levantamento que abrangeu todas as regiões produtoras do País, definindo desta forma a área plantada com algodão para a safra 2010/11 em 1390,7 mil hectares, superior em 66,4% à cultivada na safra 2009/10. Conforme já relatado em boletins anteriores, o referido incremento foi motivado principalmente pela alta de preços provocada pela forte redução dos estoques mundiais. Em valores absolutos representam 555,0 mil hectares a mais.

O maior incremento de área foi constatado na região Centro-Oeste, que participa com 64,0% no total da área plantada. Nessa região, o incremento foi na ordem de 68,6%, com destaque para os Estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, com aumentos de 84,8%, 67,0% e 61,1%, respectivamente. Em Mato Grosso, principal produtor nacional, o crescimento na área ocorre principalmente no plantio de Primeira Safra, consequência do retardamento do plantio da soja, ocasionado pela falta de chuva, reduzindo desta forma, a janela de plantio para o cultivo do algodão Segunda Safra.

Importantes crescimentos de áreas são verificados também na região Nordeste, que contribui com 33,0% da área plantada do País, destacando os Estados da Bahia (região de Barreiras), Piauí e Maranhão, onde os dados da pesquisa indicam elevação na ordem de 55,4%, 185,3% e 60,0%, respectivamente.

Em nível nacional, estima-se que o índice de produtividade média do algodão em caroço, deverá alcançar 3775 kg/ha, contra 3634 kg/ha obtida na safra passada, representando um incremento médio de 3,9%. Além do fator clima, contribui para o incremento de produtividade, o pacote tecnológico aplicado pelos agricultores das diversas regiões do País, notadamente nos Estados de Goiás e Mato Grosso do Sul, cujas médias estimadas de produtividade são de 4045 kg/ha e 3900 kg/ha, respectivamente.

Quanto à produção brasileira de pluma, o acréscimo deverá ser na ordem 71,8%. Na safra 2009/10, a produção totalizou 1194,1 mil toneladas. Para esta safra, a produção nacional deverá alcançar 2051,6 mil toneladas. Em valores absolutos, serão ofertadas para o mercado mais 857,5 mil toneladas. De acordo com a CONAB, 2011.

Visando o restabelecimento da produção, principalmente no semiárido, a Embrapa Algodão vem promovendo pesquisas com o objetivo de ampliar as opções de cultivo para o Nordeste e, principalmente, com vistas ao atendimento da agricultura familiar. Porém, a remontada da produção do algodão, implica na incorporação de novas tecnologias ao sistema produtivo, sendo parte importante dessas tecnologias o manejo hídrico da cultura.

A fibra é o principal produto do algodoeiro e tem uma grande importância para a indústria têxtil, representando 46% da fibra natural utilizada pela indústria mundial e 74% no Brasil (Santana, 2002). As características tecnológicas da fibra do algodoeiro são determinadas, basicamente, por fatores genéticos, embora fatores ambientais e de manejo como condições climáticas, fertilidade de solo, incidência de pragas e doenças e o suprimento hídrico, definam estas características (Santana et

al., 1999). Marois et al. (2004) afirmam que o microclima formado pela copa do algodoeiro causa significativo impacto sobre a qualidade da fibra. Para estes autores a interação entre a luz e a temperatura afeta as características da fibra do algodoeiro, como a uniformidade, que é produzida devido à alta luminosidade e baixa temperatura.

Em relação ao ciclo de desenvolvimento, os cultivares mais utilizados são os de ciclo médio e tardio, com produtividades de 3925 kg ha<sup>-1</sup> e 4547 kg ha<sup>-1</sup> de algodão em caroço, respectivamente, obtidas em ensaios experimentais em condições de sequeiro (Freire et al., 2004a; Freire et al., 2004b). Em casos de extrema deficiência hídrica ou distribuição irregular das precipitações, o ciclo do algodoeiro é, também, abreviado (Ferry et al., 1967; Santos et al., 2006). O algodoeiro suporta níveis baixos de disponibilidade de água no solo, podendo se desenvolver, normalmente, até atingir um esgotamento de 85% da água disponível no solo (Guerra et al., 2002). Em condições normais, o ciclo do algodoeiro pode ser dividido em cinco estágios: o primeiro estágio compreende do plantio à emergência, variando de quatro a nove dias; o segundo estágio, da emergência ao aparecimento do primeiro botão floral, variando de vinte e sete a trinta e oito dias; o terceiro estágio, do aparecimento do primeiro botão floral ao aparecimento da primeira flor, variando de vinte a vinte e cinco dias; o quarto estágio, do aparecimento da primeira flor ao primeiro capulho, variando de quarenta e cinco a sessenta e seis dias; e finalmente, o quinto estágio, do aparecimento do primeiro capulho até a abertura completa das maçãs, variando de vinte e quatro a quarenta e dois dias (Rosolem, 2001).

Como a planta do algodoeiro tem seu crescimento e desenvolvimento fortemente influenciados pela temperatura, à determinação das exigências térmicas em cada estágio de crescimento é de grande importância, pois possibilita que se possa prever a ocorrência de condições climáticas que venham afetar os diferentes estágios de crescimento e desenvolvimento. Nos Estados Unidos as exigências térmicas das diferentes cultivares do algodoeiro utilizadas, são aproximadamente 2600 graus-dias (Oosterhuis, 1999).

As condições ambientais de clima, solo e localização geográfica influem na produção do algodoeiro, tanto no aspecto quantitativo como qualitativo e, em condições naturais, as plantas exteriorizam seu potencial produtivo quando esses fatores entram em equilíbrio ecológico. Fatores climáticos como chuva, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e intensidade de luz, interferem na cultura do algodoeiro, de modo que o plantio deve ser feito no período em que os elementos climáticos forem mais favoráveis (Beltrão et al., 2007). Plantios tardios aumentam o número de dias para abertura dos primeiros capulhos devido às temperaturas mais baixas, causando retardamento no desenvolvimento da cultura e atraso do ponto de colheita (Gridi - Papp et al., 1985).

O desenvolvimento do algodoeiro herbáceo no seu ciclo produtivo é o que apresenta um dos maiores graus de complexidade na natureza (Oosterhuis, 1999). Durante a maior parte do ciclo da planta, há diversos eventos ocorrendo ao mesmo tempo, como crescimento vegetativo, aparecimento de gemas reprodutivas, florescimento, crescimento e maturação dos frutos. Cada um destes eventos é importante para a produção final, mas é necessário que eles ocorram de modo

balanceado. Durante boa parte do ciclo da planta ocorre uma forte competição interna pelos carboidratos da fotossíntese (Rosolem, 2001).

## **2.2 - NECESSIDADES HÍDRICAS**

Reichardt & Timm (2004) afirmam que qualquer cultura durante seu ciclo de desenvolvimento consome um enorme volume de água, sendo que aproximadamente 98% deste volume apenas passam pela planta, perdendo-se posteriormente na atmosfera pelo processo de transpiração. Este fluxo de água é, porém, necessário para o desenvolvimento vegetal e por este motivo sua taxa deve ser mantida dentro de limites ótimos para cada cultura.

Conforme Silveira & Stone (1979), a planta do algodoeiro em crescimento transpira uma grande quantidade de água que é extraída do solo. Em solos bem drenados, com baixa capacidade de retenção de água, como aqueles de textura arenosa, poderá observar-se uma baixa produtividade das culturas. Em relação a demanda de água, sua necessidade é maior nas regiões mais quentes e secas, onde a demanda evaporativa da atmosfera é maior. O aumento excessivo de transpiração diminui o conteúdo de água disponível no solo e, caso haja deficiência de chuva, poderão ocorrer dias de estresse hídrico. Por intermédio do balanço de água no solo, é possível determinar dias de estresse ou períodos em qual a cultura dentro do seu ciclo necessita de água e, ainda mais, quantificar tal necessidade, avaliando a deficiência de chuvas em relação às exigências de água pela planta.

Hillel (1970) descreve que a quantidade de água extraída pelos vegetais está na dependência de propriedades da cultura tais como densidade do sistema radicular e sua profundidade, bem como, da sua aptidão fisiológica de aumentar suficientemente a capacidade de extrair água do solo em regime capaz de impedir



sua murcha, e de propriedades do solo, como a condutividade hidráulica, difusibilidade, sucção e teor de água. Dependem, ainda, das condições micrometeorológicas que determinam o regime de transpiração da cultura. Já Folegatti et al. (1997) comentam que a maioria das culturas possui períodos críticos quanto à deficiência hídrica, durante os quais a falta de água causa sérios decréscimos na produção final. A maneira como a planta se desenvolve com o déficit hídrico é bastante complexa, pois afeta praticamente todos os aspectos de crescimento, incluindo modificações anatômicas, morfológicas, fisiológicas e bioquímicas. Os prejuízos causados estão em função direta da sua duração, severidade e do estágio de desenvolvimento da planta.

O fornecimento artificial de água às culturas requer controle e manejo adequados, pois embora sendo a água crucial para incrementos positivos na produção, seu excesso ou escassez contribuem para baixos rendimentos dos cultivos. Nesse contexto, a adoção de tecnologias de irrigação para o cultivo do algodão no semiárido do Nordeste brasileiro é predominante, principalmente no contexto da busca da sustentabilidade da relação água-solo-planta-atmosfera (Bezerra, 2011). Para a utilização desta tecnologia, o conhecimento com a máxima precisão do consumo hídrico do algodoeiro é uma necessidade predominante.

A água é um elemento de fundamental importância para o desenvolvimento de qualquer cultura e o seu uso adequado favorece a obtenção de altos rendimentos. Por outro lado, o manejo da água exige conhecimentos sobre o seu efeito no crescimento e rendimento das culturas (Freitas, 1999). Esse autor ainda comenta que as plantas são capazes de desenvolver mecanismos de resistência de

modo a garantir o seu desenvolvimento vegetativo e produtivo em condições de estresse hídrico causado por excesso ou falta de água.

Como nas regiões áridas e semiáridas a disponibilidade de água no solo condiciona significativamente a produção agrícola, a utilização da irrigação tem assegurado o crescimento e o desenvolvimento das culturas, melhorando substancialmente a produtividade. Todavia, considerando-se que a irrigação é a principal atividade consumidora de água e que aumenta os custos com energia, ou seja, é concorrente pelos recursos hídricos e energéticos com os setores industrial e urbano, torna-se importante a realização de estudos que definam o momento de se efetuar as irrigações e a quantidade de água que deverá ser aplicada, visando atender as necessidades hídricas das plantas. Para Doorenbos & Kassam (2000), tanto a falta como o excesso de água são prejudiciais ao desenvolvimento das plantas. A determinação das necessidades hídricas das culturas, em seus diferentes estágios de desenvolvimento, é uma etapa importante para o manejo de irrigação (Amorim Neto, 1995).

A estimativa das necessidades hídricas de uma determinada cultura é feita com base nas perdas de água do sistema solo-planta para a atmosfera, através dos processos de evaporação e transpiração. Conforme Rosenberg et al. (1983) e Allen et al. (1998), a evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente na natureza e não é fácil distinguir o vapor d'água produzido pelos dois processos separadamente. Deste modo, o termo evapotranspiração é usado para descrever o processo total de transferência de água na forma de vapor de superfícies vegetadas para a atmosfera. Para Doorenbos & Kassam (2000), a evapotranspiração é um processo dinâmico, sendo representado pelas perdas de água ocorridas sob a forma de vapor, através

da superfície do solo (evaporação) e da superfície das folhas (transpiração), com variações locais e espaciais provocadas pelas condições de solo, clima e estágio de desenvolvimento da cultura.

Silva et al. (2003) obtiveram para o algodoeiro herbáceo cultivar BRS 201, um consumo de 450,9 mm, utilizando lisímetro de drenagem e 517,1 mm quando estimaram o seu consumo pelo balanço de energia baseado na razão de Bowen.

O consumo hídrico das culturas também pode ser determinado a partir da evapotranspiração obtida por meio de lisímetros, ou evapotranspirômetros, que consistem em tanques vegetados onde são contabilizadas as entradas e saídas de água no seu interior, sendo considerado o método padrão por muitos pesquisadores. A evapotranspiração que se verifica em um solo cultivado depende das condições meteorológicas reinantes, da atividade biológica da vegetação presente e da umidade disponível na zona das raízes (Varejão-Silva, 2001). Portanto, pode-se estimar o consumo hídrico das culturas utilizando-se diversos métodos na estimativa da evapotranspiração de referência –  $ET_0$  (Doorenbos & Pruitt, 1979; Rosenberg et al., 1983; Varejão-Silva, 2001). A escolha do método baseia-se na disponibilidade de equipamentos e na precisão requerida na determinação do consumo hídrico da cultura (Sedyama, 1987).

### **2.3 - CONSUMO HÍDRICO DA CULTURA BASEADO NA RAZÃO DE BOWEN**

A aplicação do método do balanço de energia na estimativa do consumo hídrico de culturas agrícolas tem sido uma prática de muitos institutos de pesquisa e universidades em diferentes países (Angus & Watts, 1984; Cunha et al., 1996; Azevedo et al., 2003; Rodrigues, 2003; Silva et al., 2003; Soares, 2003; Souza, 2003; Cardoso et al., 2005; Moura, 2005; Souza, 2005; Silva et al., 2006). Esse

método se baseia no princípio da conservação de energia, em que o balanço dos fluxos de entrada e saída de energia no volume de controle representado pela área vegetada, permite, através, de sua contabilização, a determinação da energia utilizada pela cultura no processo de transferência de água, sob a forma de vapor, para a atmosfera.

De acordo com Moura (2005), o saldo de radiação é o resultado das trocas de energia radiativa que se estabelecem na interface solo-planta-atmosfera e sob o ponto de vista energético, a evapotranspiração pode ser considerada como a energia utilizada para transferir água do conjunto solo-planta, para a atmosfera, sob a forma de vapor. De acordo com Tubelis & Nascimento (1992), o saldo de radiação à superfície representa a contabilização entre a radiação de onda curta incidente ( $R_g$ ) e refletida ( $R_r$ ) e a radiação de onda longa incidente ( $R_{la}$ ) e emitida pela superfície ( $R_{ls}$ ). Para esses autores, o saldo de radiação num dossel vegetal representa a quantidade de energia disponível repartida entre os diversos fluxos de energia necessários aos processos de evapotranspiração, de aquecimento do ar e do solo e da fotossíntese.

Para Arya (1988) e Silberstein et al. (2003), os fluxos de energia que ocorrem em uma superfície vegetada são: saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G), energia armazenada na copa das árvores (S) e energia utilizada no processo fotossintético (P). Do ponto de vista do balanço de energia de um dossel vegetal, os dois últimos fluxos são negligenciados devido à pequena representatividade em relação ao saldo de radiação e a sua difícil contabilização (Heilman et al., 1994).

Wang & Bras (2001), Moura (2005) e Silva (2005) reafirmaram que o fluxo de calor latente (LE) envolve transferência de massa do sistema solo-planta para a atmosfera, sendo o resultado da evaporação da água do sistema ou condensação do vapor d'água obtido pelo produto do calor latente de evaporação ou condensação pela massa de água evaporada ou condensada. A evaporação pode ocorrer em superfícies com água, em solo úmido ou em superfícies vegetadas, quando o ar se encontra com déficit de saturação de vapor d'água. O fluxo de calor sensível geralmente é dirigido para fora da superfície no período diurno, quando a superfície está mais aquecida que o ar, ocorrendo o contrário durante o período noturno.

A razão entre os fluxos de calor sensível e calor latente foi proposta por Bowen em 1926, como forma de estudar o fracionamento de energia disponível, possibilitando o cálculo da evapotranspiração. A razão de Bowen ( $\beta$ ) é frequentemente inferida pela medição das diferentes médias de temperatura e umidade através de uma distância vertical fixada acima de uma superfície homogênea qualquer (Pieri & Fuchs, 1990; Souza, 2003; Cardoso et al., 2005).

A razão de Bowen é um método indireto de determinação da evapotranspiração ( $ET_c$ ) das culturas (Todd et al., 2000) e constitui-se num método simples, mas capaz de determinar de forma prática e precisa a evapotranspiração das culturas em diferentes ambientes (Casa et al., 2000; Todd et al., 2000; Rana & Katerji, 2000; Lopes et al., 2001; Teixeira et al., 2003).

Todd et al. (2000) relatam que a utilização da razão de Bowen pode ser vantajosa em relação a outros métodos, porque possibilita medidas simples e contínuas; não necessitam de informações sobre as características aerodinâmicas da superfície em estudo; possibilita a integração do fluxo de calor latente sobre

extensas áreas; e fornecem medidas em pequeno espaço de tempo (menor que uma hora). Relatam, ainda, que o método apresenta como desvantagens: a influência de sensibilidade dos instrumentos que medem os gradientes e termos do balanço de energia, a necessidade de assumir a igualdade entre os coeficientes de difusividade de calor sensível e latente, a descontinuidade dos dados quando  $\beta$  aproxima-se de -1, e ao mesmo tempo precisa de uma bordadura (fetch) adequada. Esses autores, trabalhando com alfafa em região semiárida dos Estados Unidos da América, observaram que os dados obtidos através da razão de Bowen não foram consistentes quando o valor de  $\beta$  foi menor que zero; isso ocorreu em dias quentes, secos e com vento ou quando o LE excedeu o  $R_n - G$ .

Cardoso et al. (2005) reportam que a distância entre o sensor e a superfície vegetada também pode ter influência nos resultados obtidos, pois a colocação de sensores muito próximos da superfície da grama provocou erros nos valores de evapotranspiração pela razão de Bowen, quando o solo estava muito úmido ou próximo a capacidade de campo. Para Pieri & Fuchs (1990), a maior dificuldade na utilização da razão de Bowen está associada à precisão dos instrumentos de medida, que devem detectar os gradientes de temperatura e pressão de saturação do vapor de água em uma magnitude que possa ser detectada pelos sensores. Eles recomendam que para minimizar estes erros seja realizada alternância dos sensores empregados no cômputo da temperatura e pressão de vapor nos dois níveis acima da superfície evapotranspirante, ao longo da etapa de coleta de dados.

O valor da razão de Bowen ( $\beta$ ) depende das condições de umidade da superfície evaporante. Se a superfície estiver úmida, uma fração maior do saldo de radiação ( $R_n$ ) é utilizada na forma de calor latente (LE), o que acarretará valores

pequenos de  $\beta$ ; se a superfície evaporante estiver seca, uma maior fração de  $R_n$  será utilizada para o aquecimento do ar, acarretando um elevado valor de  $\beta$ . Se os valores de calor latente (LE) e calor sensível (H) são negativos, o fluxo ocorre da superfície para a atmosfera e se são positivos, no sentido contrário. Desse modo, o sinal de  $\beta$ , depende apenas do sinal de H. Se este for positivo,  $\beta$  será negativa; se for negativo,  $\beta$  será positiva. Isso implica em que o fluxo de calor sensível ocorre do ar mais quente para a superfície mais fria, condição que geralmente caracteriza advecção ou inversão térmica. Para Pereira et al. (1997), o valor de LE pode até ser superior a  $R_n$ , uma vez que H representa um adicional de energia disponível à superfície evaporante.

Na determinação das necessidades hídricas da mangueira irrigada na região semiárida do rio São Francisco, nos anos de 1998 e 1999, utilizando a razão de Bowen para estimar a evapotranspiração da cultura, Silva et al. (2006) obtiveram evapotranspiração média de  $4,4 \text{ mm dia}^{-1}$  e partição do saldo de radiação de 77,68% para o fluxo de calor latente (LE), 18,01% para o fluxo de calor sensível (H) e 4,36% para o fluxo de calor no solo (G). Em 1999, o consumo médio diário da mangueira foi de  $4,2 \text{ mm dia}^{-1}$ , com um fracionamento do saldo de radiação de 83,37% para o LE, 11,40% para H e 5,66% para G.

Rodrigues (2003), trabalhando em Barbalha - CE, com o algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 201, utilizando o método da razão de Bowen na estimativa da evapotranspiração, observou um consumo de água durante o ciclo da cultura de 517,07 mm; o fluxo de calor latente (LE) correspondeu a 89% do saldo de radiação, o de calor sensível (H) a 7% e o fluxo de calor no solo (G) a 4%. Já Soares (2003), no Vale do São Francisco, utilizando a mesma metodologia para determinar a

evapotranspiração da videira, obteve valores de 496,87 mm e 472,81 mm, para os anos de 2000 e 2001, respectivamente.

A compreensão dos processos que influenciam a interação biosfera *versus* atmosfera, pode ser obtida por meio de medições micrometeorológicas (Qin et al., 2008; Todd et al., 2000), a partir das quais é possível conhecer a fração destinada a aquecer o ar e o solo, bem como a utilizada no processo de transferência de vapor de água para a atmosfera (Asseng & Hsiao, 2000; Shen et al., 2004).

Esta partição de energia também permite fornecer informações a respeito da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e, em seguida, por meio da relação da  $ET_c$  com a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), obter o coeficiente de cultura ( $K_c$ ) a ser utilizado no manejo de irrigação (Kjaersgaard et al., 2008; Teixeira et al., 2007).

Para a partição da energia disponível ( $R_n$ ,  $LE$ ,  $G$  e  $H$ ) entre os fluxos de calor latente ( $LE$ ) e de calor sensível ( $H$ ), o método do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB) se destaca como um dos mais utilizados, tendo como referência os gradientes de temperatura e vapor d'água acima da cultura. É uma técnica indireta quando comparada à dos vórtices turbulentos, que mede diretamente os fluxos, ou à lisimétrica, que quantifica a variação de massa de um volume de solo (Rana & Katerji, 2000).

O método do balanço de energia baseado na razão de Bowen - BERB tem sido aplicado frequentemente em várias culturas, tais como: abacaxi (Souza et al., 2008), milho (Steduto & Hsiao, 1998), feijão caupi (Lima et al., 2005), videira (Teixeira et al., 2007), forrageira (Silva et al., 2005), bananeira (Teixeira, 2001) e café (Righi et al., 2007). Dentre as vantagens desta técnica se destacam sua simplicidade, baixo custo e o fato de apresentar bons resultados quando



comparados aos métodos dos vórtices turbulentos e lisimétrico (Gavilán & Berengena, 2007; Silva et al., 2005; Todd et al., 2000), tal como desempenho superior ao método aerodinâmico (Molder et al., 1999). Contudo, o cálculo dos fluxos de H e de LE, por meio do método BERB, depende da determinação correta da razão de Bowen ( $\beta$ ) que, por sua vez, é afetada pela precisão e exatidão das medições de temperatura e umidade do ar acima da cultura (Ohmura, 1982; Oliveira & Leitão, 2000; Perez et al., 1999).

Este método se baseia no princípio da conservação de energia onde o balanço dos fluxos de entrada e saída de energia no volume de controle, representado pela área vegetada, permite a determinação da energia utilizada pela cultura no processo de transferência de água sob a forma de vapor para a atmosfera (Cardoso et al., 2005).

A evapotranspiração de culturas agrícolas tem sido frequentemente medida fazendo o uso do método do balanço de energia baseado na razão de Bowen (Azevedo et al., 2003; Perez et al., 2008; Silberstein et al., 2003; Silva et al., 2007, Teixeira et al., 2007, Zhang et al., 2008,). Gavilán e Berengena (2007) atribuem o fato da técnica de razão ser tão difundida a sua relativa simplicidade e precisão para estimativa do fluxo de vapor de água.

No entanto, tem sido recomendada certa cautela na aplicação dessa técnica, uma vez que a mesma não reproduz a natureza turbulenta do processo de evapotranspiração (Steduto e Hsiao, 1998). Perez et al. (1999), estudando erros associados à técnica, observaram que, em média, 40% do total de dados do período noturno e durante eventos de irrigação e precipitação devem ser frequentemente rejeitados. Ainda no mesmo trabalho é sugerido que o cálculo da  $ET_c$  através da

técnica de razão de Bowen considere apenas os dados coletados durante o período diurno e quando  $R_n - G > 0$ .

Gavilán e Berengena (2007) compararam dados da  $ET_c$  obtidos com a técnica da razão de Bowen e com medidas lisimétricas em áreas que apresentavam fortes eventos advectivos e constataram que as mesmas foram superestimadas em até 5,7% quando apenas dados diurnos foram considerados.

O estudo do balanço de energia de superfícies com água livre, com ou sem vegetação natural ou culturas irrigadas ou não, tem grande importância em estudos de trocas de energia. Para Gay (1988), as limitações do método do balanço de energia baseado na razão de Bowen geralmente ocorrem próximo ao nascer e pôr-do-sol, devido aos pequenos valores obtidos dos gradientes de temperatura e pressão atual de vapor d'água, que resultam em grandes erros na razão de Bowen ( $\beta \rightarrow -1$  ou  $LE \rightarrow \infty$ ). As limitações podem ocorrer, também, com culturas de cobertura não uniforme e sobre condições de advecção, comumente verificada em regiões semiáridas.

De acordo com Heilman et al. (1989), ao contrário de outras técnicas utilizadas para estimar a evapotranspiração de uma determinada cultura, o método BERB não necessita de informações sobre a velocidade do vento nem de propriedades aerodinâmicas da superfície do solo, visto que os fluxos são independentes da estabilidade do ar atmosférico, quando é considerada a igualdade entre os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água.

Segundo Pereira et al. (1997) o balanço de energia representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia com a superfície. Em condições atmosféricas normais, o suprimento principal de energia para a superfície é dado

pela radiação solar. O saldo de radiação é, então, utilizado pela superfície nos processos de evaporação (LE, calor latente), aquecimento do ar (H, calor sensível), do solo (G, calor sensível) e das plantas (P, calor sensível), e na fotossíntese (F, fotoquímica).

## **2.4 - EVAPOTRANSPIRAÇÃO**

A água é o elemento essencial ao metabolismo vegetal, pois participa principalmente da constituição celular e do processo de fotossíntese. A planta, todavia, transfere para a atmosfera aproximadamente 98% da água retirada do solo. Por isso, o consumo de água das plantas normalmente se refere à água perdida pela evaporação (Ev) da superfície do solo e pela transpiração (T). Esses processos, embora independentes, ocorrem simultaneamente dando origem ao termo evapotranspiração (ET) (Pereira et al., 1997).

A evaporação (E) é o processo pelo qual a água líquida é convertida em vapor (vaporização), consumindo para isso uma determinada quantidade de energia. A água evapora de superfícies diversas como mares, oceanos, lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação úmida, estando este fenômeno diretamente ligado a fatores ambientais, como a radiação incidente, temperatura, umidade do ar e velocidade do vento.

A transpiração (T) consiste na vaporização e remoção para a atmosfera da água contida no tecido vegetal (Allen et al., 1998). No sistema solo-água-planta, os vegetais constituem vias intermediárias de circulação d'água do solo para a atmosfera (Rivas, 2004). Na fase final de circulação no tecido vegetal, as plantas perdem água na forma de vapor, caracterizando assim a transpiração vegetal. A água retirada do solo é absorvida pelas plantas, atuando como um meio de

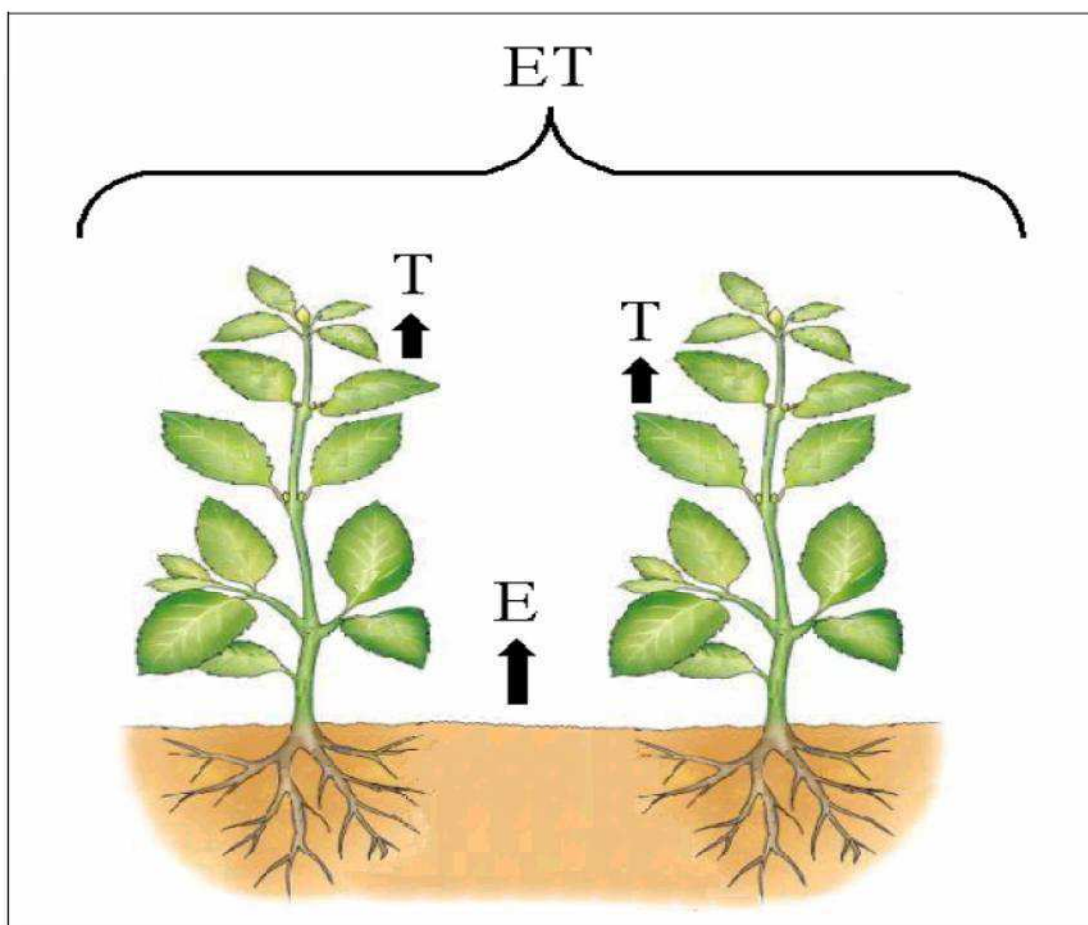
transporte para os nutrientes e sendo quase totalmente eliminada pelo processo de transpiração vegetal. Gases e vapor d'água são liberados pelos estômatos localizados nas folhas das plantas, servindo este processo para eliminar calor da massa vegetal (Allen et al., 1998).

Com a finalidade de reduzir ambiguidades de interpretação sobre a máxima demanda de água pela atmosfera, uma vez que o conceito de  $ET_p$  é bastante amplo, surgiu o conceito de  $ET_0$ , que é a evapotranspiração máxima de um cultivo de referência. Os conceitos de  $ET_0$  e  $ET_p$  são similares, sendo apresentados como equivalentes por Mckenney e Rosenberg (1993). De fato, estes se diferenciam pela aplicação da  $ET_0$  a um cultivo específico, enquanto o conceito de  $ET_p$  tem aplicação genérica (Burman e Pochop, 1994; Sánchez, 1992).

Ainda analisando-se os conceitos propostos por diversos autores, há alguma controvérsia com relação ao estabelecimento do cultivo de referência. Segundo Doorenbos e Pruitt (1997) utilizam-se gramíneas por convenção; entretanto, outros autores como Jensen et al. (1990) propõem a utilização de alfafa. Por último, com base na equação do modelo Penman-Monteith, há a proposição de uma superfície hipotética com características específicas. Nesta última proposta, a  $ET_0$  é definida como a taxa de evapotranspiração de um cultivo hipotético em perfeitas condições, com uma altura de 12 cm e em estágio de crescimento, o qual deve proporcionar uma cobertura total do solo em uma área extensa e com boa disponibilidade de água. A partir destas condições, definem-se características específicas para a superfície proposta, como uma resistência de cultivo de  $70 \text{ s m}^{-1}$  e um albedo de 0,23 (Allen et al., 1998). A resistência de cultivo refere-se ao grau de oposição da vegetação a perda de água em forma de vapor e o conceito de albedo.

Conforme Allen et al. (1994), a evapotranspiração (ET) é um processo governado por trocas de energia de uma superfície vegetada e é limitado pela quantidade de energia disponível. Por isso, é possível prever a taxa de ET através do balanço dos fluxos de energia, conforme a equação:  $\lambda ET = R_n - H - G$ , em que:  $\lambda ET$  é a densidade de fluxo de calor latente;  $H$  é densidade de fluxo do calor sensível;  $G$  é densidade de fluxo do calor do solo;  $R_n$  é o saldo de radiação.

A evapotranspiração (ET) consiste na transferência da água para a atmosfera, tanto através da evaporação do solo (E), como da transpiração das plantas (T). Este fenômeno pode ser visualizado no diagrama elaborado por Allen et al. (1998), expresso na Figura 1.



**Figura 1:** Diagrama de Evaporação (E) e Transpiração (T). Fonte Allen, 1998

As necessidades hídricas das plantas são estimadas geralmente com base no processo da evapotranspiração. O processo de evapotranspiração é de grande importância no ciclo hidrológico, principalmente em áreas cultivadas. Pois, quando da absorção de um grama de nutrientes do solo pela planta, centenas de gramas de água necessitam ser absorvidas, daí ser a transpiração chamada comumente de evaporação produtiva e a evaporação do solo de não produtiva (Reichardt & Timm, 2004).

Reichardt & Timm (2004) explicam que um volume de água contido no solo pode evaporar-se, sendo o processo regido por leis puramente físicas e cognominado de evaporação. Quando o processo ocorre através de uma planta, fenômenos biológicos limitam as leis físicas, e cognomina-se de transpiração. Quando ambos os processos ocorrem simultaneamente, emprega-se o termo evapotranspiração.

A evapotranspiração pode ser expressa como calor latente transferido para o ar atmosférico por unidade de área ( $W\ m^{-2}$ ) ou a quantidade equivalente de água evapotranspirada por unidade de tempo, geralmente expressa como lâmina por unidade de tempo ( $mm\ dia^{-1}$ ) (Saad & Scaloppi, 1988). Miranda (1998) comenta que a evapotranspiração de uma cultura é função das diferentes condições de disponibilidade hídrica e cobertura vegetal. Portanto, podem-se estabelecer quatro conceitos de evapotranspiração: evapotranspiração potencial ( $ET_p$ ); evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ); evapotranspiração máxima ( $ET_m$ ) e evapotranspiração real ( $ET_r$ ).

O conceito de evapotranspiração potencial foi introduzido por Thornthwaite (1948), como sendo a perda de água de uma superfície de solo úmido com

suprimento contínuo e adequado de água, coberto completamente por vegetação, em crescimento ativo, rasteiro e suficientemente grande, de tal modo, que possa tornar desprezível o “efeito de fetch”. A evapotranspiração depende de forma significativa da capacidade do ar em remover vapor d’água, da natureza da vegetação, da natureza do solo, especialmente da disponibilidade de água na zona radicular, e do suprimento externo de energia para a superfície evaporante, principalmente pela radiação solar (Azevedo et al., 1993).

Penman (1956) define a evapotranspiração potencial como sendo a quantidade de água transpirada por unidade de tempo por uma cultura de porte baixo e altura uniforme, cobrindo totalmente o solo em condição satisfatória de umidade. E, considera que a mesma quantifica a demanda evaporativa da atmosfera. Não havendo suficiente disponibilidade de água, a evapotranspiração deixa de ser potencial, passando a ser chamada de evapotranspiração real ( $ET_r$ ). De uma maneira geral, pode-se dizer que a  $ET_r \leq ET_p$ . A interpretação da evapotranspiração potencial por diferentes autores tem causado grande ambiguidade no meio científico, principalmente no que concerne ao tipo de vegetação utilizada, em específico: o grau e a altura de cobertura vegetal do solo, as dimensões da superfície e as condições da bordadura.

Doorenbos & Pruitt (1997) defendem o uso da grama (*Paspalum notatum* L.) como cultura de referência para estimar a evapotranspiração, desde que presente entre 0,08 m e 0,15 m de cobertura vegetal, crescimento ativo cobrindo toda a superfície do solo e sem restrição de água. Se for uma cultura de interesse agrícola, cultivada com condições adequada de água, define-se como evapotranspiração máxima ( $ET_m$ ). Já Wright & Jensen (1972) sugeriram como ideal o uso da alfafa

(*Medicago sativa* L.) como cultura de referência para determinar a evapotranspiração, com altura variando de 0,30 m a 0,50 m, em estágio de crescimento ativo, cultivada sem restrições de umidade do solo. Estes autores baseiam-se no fato de que a alfafa apresenta valores de evapotranspiração semelhante ao valor máximo obtido para a maioria das culturas das regiões áridas e semiáridas.

A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) tem sido definida como a quantidade de água perdida por uma cultura desenvolvendo-se em condições bem caracterizadas. Estas condições devem proporcionar uma perda de água acentuadamente dependente das condições meteorológicas prevalentes, podendo, portanto, ser determinada através de relações climatológicas conhecidas (Saad & Scaloppi, 1988).

Doorenbos & Kassam (2000) definiram como evapotranspiração máxima ( $ET_m$ ), a transferência de água para atmosfera por uma superfície onde a cobertura vegetal é uma cultura agrônômica, em qualquer estágio de seu desenvolvimento e em condições ideais de umidade do solo e de manejo agrônômico.

Pereira et al. (1997) definiram evapotranspiração real ( $ET_r$ ) como sendo aquela que ocorre numa superfície vegetada, independentemente de sua área, de seu porte e das condições de umidade do solo. Portanto,  $ET_r$  é aquela que ocorre em qualquer circunstância, sem imposição de qualquer condição de contorno. Hargreaves (1974) descreve a evapotranspiração real ( $ET_r$ ) como o uso real da água pelas culturas incluindo a evaporação direta a partir do solo e da vegetação, dependendo do clima, da cultura e da umidade do solo na zona radicular.



Entre os diversos métodos utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência, o de Penman (1948) foi considerado por muitos pesquisadores, como sendo um método padrão, por ser o primeiro a combinar os efeitos do balanço vertical de energia (termo energético) com aqueles do poder evaporante do ar (termo aerodinâmico). Monteith (1965) incorporou modificações no termo aerodinâmico da equação de Penman, incluindo dois valores de resistência ao fluxo de vapor d'água. A resistência do dossel do cultivo ( $r_c$ ), decorrente das características fisiológicas da planta, e a resistência aerodinâmica ( $r_a$ ), que incluem o papel do vento na difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água. As Nações Unidas e a FAO (Food and Agriculture Organization) adotaram por mais de uma década o conceito e a forma de cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) proposta por Doorenbos & Pruitt (1997). Allen et al. (1989), comparando as estimativas de  $ET_0$  obtidas pelos métodos de Penman, Kimberly-Penman, Penman corrigido e Penman-Monteith, com medições lisimétricas, observaram que o modelo de Penman-Monteith foi o modelo que melhor se adequou às medições diárias e mensais de  $ET_0$  e a alfafa como a planta que melhor se ajustou como cultura de referência, visto que a altura e a rugosidade da mesma, se aproximam mais da maioria das culturas. No Brasil, sua utilização já é bastante difundida dentre os pesquisadores que já se utilizaram desse método, com o objetivo de estimar a evapotranspiração de referência, destacando-se, entre outros: Teixeira (1997), Silva (2000), Fronza (2001) e Moura (2001).

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), consideram o método de Penman-Monteith como padrão de cálculo da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos (Smith, 1991; Allen et al., 1998). Allen et al. (1998) relatam, ainda, que estudos realizados nos EUA e na Europa confirmam a precisão e

consistência do método de Penman-Monteith, para climas úmidos e áridos.

Vários autores encontraram boa correlação entre dados medidos em lisímetros e estimados pela equação de Penman-Monteith como: Allen (1986), Maggiotto (1996), Sentelhas (1998), Pereira (1998), Camargo e Sentelhas (1997), Jensen et al. (1990), Ribeiro (1996), Hussein (1999) e Azevedo (1999).

Para Baselga & Allen (1996), a equação de Penman-Monteith tem provado ser altamente sensível às variações no nível de umidade no solo e altura da cultura de referência, quando usando essas duas variáveis para estimativa da resistência da cobertura vegetal e aerodinâmica.

#### **2.4 - COEFICIENTE DE CULTURA**

O coeficiente de cultura ( $K_c$ ) é um índice adimensional que representa a razão entre a evapotranspiração de uma cultura específica ( $ET_c$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ). Geralmente, os valores de  $ET_0$  podem ser obtidos em estações experimentais ou podem ser calculados por meio de equações, tornando prático o uso deste índice.

O  $K_c$  representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a  $ET_c$  da  $ET_0$ : 1) a altura da cultura, que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; 2) a resistência da superfície relativa ao par cultura-solo, que é afetada pela área foliar, pela fração de cobertura do solo pela vegetação, pela idade e condição das folhas e pelo teor de umidade à superfície do solo; 3) o albedo da superfície cultura-solo, que é influenciado pela fração de cobertura do solo pela vegetação e pela umidade à superfície do solo (Pereira e Allen, 1997).

Doorenbos e Pruitt (1997) e Allen et al. (1998) apresentaram uma metodologia para estabelecer os valores de  $K_c$  para culturas anuais. Tal metodologia divide o ciclo da cultura em quatro estágios de desenvolvimento: 1) estágio inicial, correspondente à germinação e ao crescimento inicial (cobertura do solo atingindo cerca de 10%); 2) estágio de desenvolvimento, compreendido entre o final do estágio inicial e efetiva cobertura do solo pela cultura (cerca de 70% a 80%); 3) estágio de meia-estação ou reprodutivo (floração); inicia-se quando a cultura atinge plena cobertura até a maturação, como no caso de feijão, indicado pela descoloração das folhas, ou em algodão, quando as folhas começam a cair. Em algumas culturas, esse estágio pode se estender até próximo à colheita; 4) estágio final, referente ao final do estágio anterior até a plena maturação e colheita.

Segundo essa divisão do ciclo da cultura, geralmente no estágio inicial (germinação), o coeficiente de cultura apresenta valores baixos ( $K_c < 1$ ), visto que  $ET_c$  é bem menor que  $ET_0$ , pois a área foliar é muito pequena e cobre apenas uma pequena porcentagem do terreno. Durante o estágio de desenvolvimento vegetativo, a diferença entre a evapotranspiração da cultura e a de referência diminui devido ao aumento crescente da área foliar, acarretando num acréscimo dos valores de  $K_c$  ( $K_c < 1$ ). Ao chegar ao terceiro estágio do ciclo, em muitos casos, o valor da  $ET_c$  ultrapassa o da  $ET_0$  ( $K_c > 1$ ), permanecendo assim até o término do estágio de enchimento de grãos. Finalmente, no último estágio (maturação), os valores de  $K_c$  decrescem até o final do ciclo da cultura ( $K_c < 1$ ).

A determinação da evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) são extremamente úteis na quantificação das necessidades hídricas das culturas, tanto em termos de manejo de água de irrigação quanto no planejamento

de sistemas hidroagrícolas. A FAO possui estes parâmetros tabelados para diversas culturas em várias partes do mundo, tornando importante estes estudos regionalmente, visto que tais valores são influenciados por diversas características já mencionadas.

De acordo com Allen et al. (1998), a evapotranspiração da cultura é examinada sob condições padrão, sendo determinada em condições de cultivo livres de doenças, bem fertilizadas, associadas ao suprimento adequado de água que atenda às necessidades hídricas da cultura e alcançando alta produção, sob determinadas condições climáticas em grandes campos. Segundo os autores, as consequências de várias condições de tempo na evapotranspiração estão incorporadas pela  $ET_0$  e os efeitos das características que distinguem a superfície cultivada da superfície de referência integrados no coeficiente de cultura. Assim, multiplicando-se a  $ET_0$  pelo coeficiente de cultura, obtém-se a  $ET_m$ .

A distribuição temporal do  $K_c$ , para cada cultura irrigada, constitui a curva da cultura em que, idealmente, a  $ET_0$  deveria caracterizar a demanda evaporativa determinada pela condição meteorológica, enquanto o  $K_c$  seria a medida da restrição imposta pelo sistema solo-planta para atender a tal demanda hídrica (Sediyama et al., 1998).

Para que os valores de coeficientes de cultura sejam significativos, eles precisam ser válidos para qualquer local. Quando os coeficientes de cultura são relacionados com graus-dia de crescimento, em vez de dias julianos, uma curva de cultura comum pode ser desenvolvida e aplicável para anos diferentes e locais que têm condições climáticas diferentes. De acordo com Sammis et al. (1985), o conceito do  $K_c$  relativo para graus-dia é superior no estudo de determinação do requerimento

de água pela cultura, para os quais os dados não estão prontamente disponíveis, em relação ao conceito do  $K_c$  relativo para dias julianos.

Sediyama (1987) acrescenta que o coeficiente de cultura pode variar, também, com a textura e umidade do solo e com a profundidade e densidade radicular. Já Villa Nova (1983) enfatiza que o índice de área foliar é a principal característica que pode resultar em diferentes valores de coeficientes de cultura. Para a maioria das culturas, os valores de  $K_c$ , segundo Doorenbos & Kassan (1979), assumem valores baixos na emergência, valores máximos durante o período de desenvolvimento vegetativo e declinam no estágio de maturação.

Da razão entre ET da cultura cultivada sob ótimas condições de manejo (inclusive hídrica) e  $ET_0$  resulta o coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) (Allen et al., 1998; Doorenbos e Kassam, 1979), que reflete a habilidade de um cultivo em atender a demanda da atmosfera (Jensen et al., 1990) e pode ser usado para estimar  $ET_r$  para outros períodos e localidades. Tanto  $K_c$  como  $ET_r$  variam principalmente em função do tipo da cultura e do estágio fenológico. No estágio inicial de desenvolvimento ocorrem baixos valores, uma vez que a cultura cobre parcialmente o solo, sendo E praticamente o único componente de  $ET_c$ . Com o crescimento progressivo da área foliar, elevam-se as taxas de T, aumentando os valores de  $ET_c$  e  $K_c$ . Com a queda das folhas no período de senescência da cultura, há diminuição nas taxas de ET e  $K_c$  devido à redução de T, tornado novamente E o componente principal de  $ET_c$ .

Os valores de  $ET_c$  e  $K_c$  são também influenciados pela fertilidade do solo e ocorrência de pragas, doenças e plantas daninhas, uma vez que esses fatores afetam o desenvolvimento de área foliar (Allen et al., 1998). Outros fatores que influenciam  $ET_c$  e  $K_c$  são as condições meteorológicas que determinam a  $ET_0$ , tais

como a radiação solar, temperatura e, em menor proporção, a umidade relativa do ar e o vento (Allen et al., 1998). Finalmente, chuva e irrigação afetam significativamente a  $ET_c$  e o  $K_c$ , devido ao aumento da taxa de E nos períodos imediatamente após o molhamento da superfície do solo, principalmente em condições de cobertura parcial do solo (Jensen et al., 1990).

A simplicidade prática de utilizar a abordagem do  $K_c$  é indiscutível, mas a adoção de curvas do  $K_c$  generalizadas podem levar a erros (Hunsaker et al. 2003). O coeficiente de cultura em função das unidades térmicas (isto é, Graus Dias de Desenvolvimento, GDD), tem sido sugerido para melhorar a confiabilidade da variabilidade climática e aumentando o uso das curvas do  $K_c$  de forma significativa (Sammis et al., 1985; Slack et al., 1996; Hunsaker et al., 1999; Howell et al., 2004).

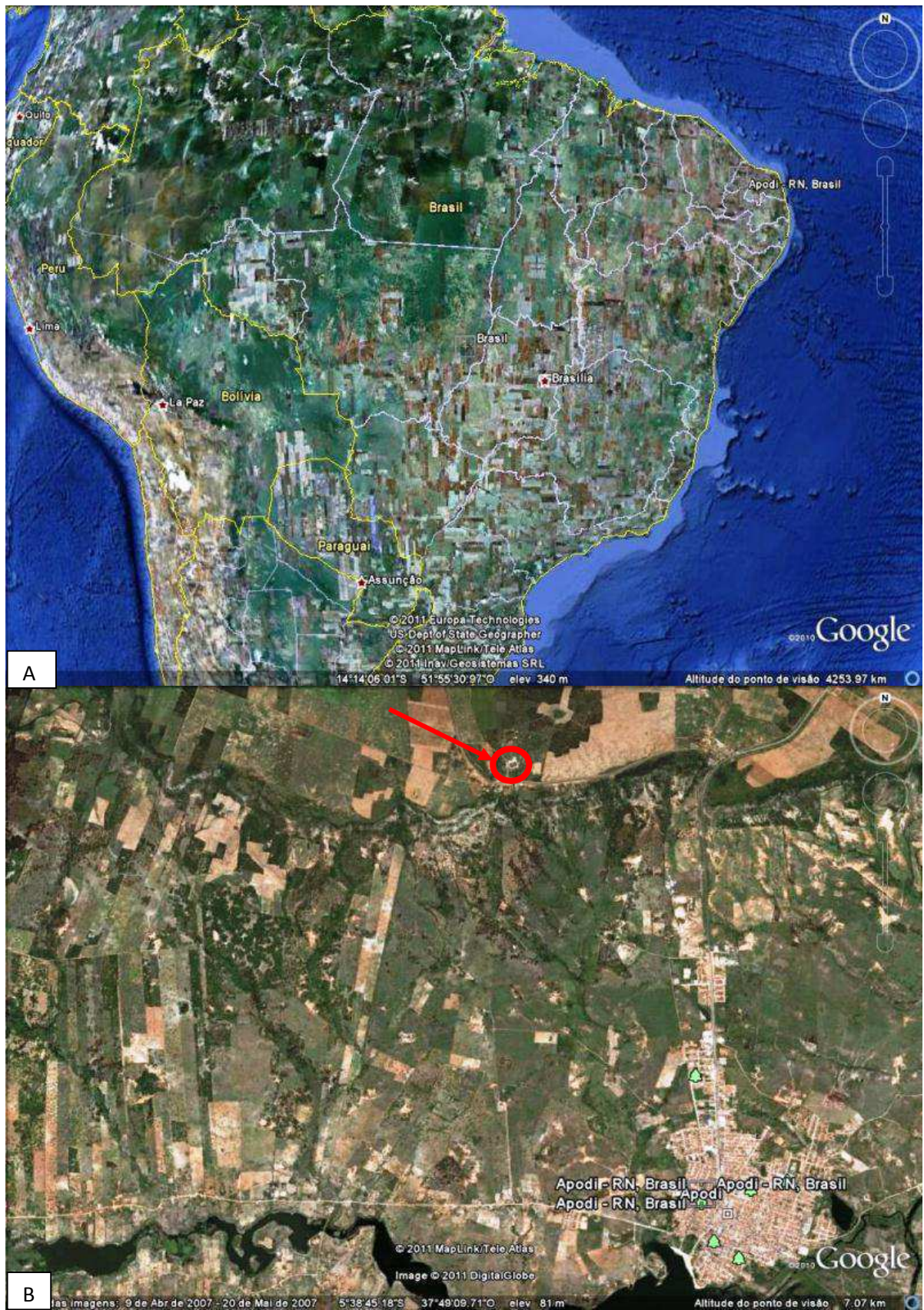
De acordo com Jensen et al. (1990), deve-se usar geralmente com cuidado um modelo adequado para a determinação da  $ET_0$  e confiável para o  $K_c$ , para que se possa produzir estimativas da  $ET_c$ , dentro da precisão dos sistemas de irrigação, para o adequado manejo da água.

No boletim FAO-56, os valores da curva do  $K_c$  generalizada para o algodão são  $K_{c\text{inicial}} = 0,35$ ;  $K_{c\text{médio}} = 1,15-1,20$  (média = 1,17), e  $K_{c\text{final}} = 0,70-0,50$  (média = 0,60). A FAO-56 sugere vários ajustes desses valores do  $K_c$  causados por variações locais de clima, solo e manejo da irrigação. Os valores do  $K_{c\text{inicial}}$  são geralmente inferiores a 0,4 para frequências médias de umedecimento, mas pode aproximar-se de valores tão altos quanto 1,0-1,2 (FAO-56) para irrigações de alta frequência. Os valores do  $K_c$  desenvolvidos localmente são referidos como locais  $K_{c\text{inicial LOCAL}}$ ,  $K_{c\text{médio LOCAL}}$  e  $K_{c\text{final LOCAL}}$ , para ser distinguido do ajustado da FAO (ou seja,  $K_{c\text{inicial-FAO}}$ ,  $K_{c\text{médio-FAO}}$ , e  $K_{c\text{final-FAO}}$ ).

### **3.0 – MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 - Características da Área Experimental**

As campanhas experimentais foram realizadas na Chapada do Apodi, oeste do estado do Rio Grande do Norte, na estação experimental da EMPARN – Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte, localizada no município de Apodi - RN (5°37'37"S; 37°49'54"W; 138 m) (Figura 2), Nordeste do Brasil, durante a estação seca dos anos de 2008 e 2009. O clima da região, de acordo com Thornthwaite (1948), é semiárido, tipo DA'da', com precipitação média anual de 920 mm, concentrada no verão e outono. As temperaturas, máxima, mínima e média são 33,8°C, 22,9°C e 28,35°C, respectivamente. A textura do solo da área experimental é Franco-Argilo-Arenoso, com 56,8% de areia, 33,7% de argila e 9,5% de silte. Durante o período experimental foram registradas temperaturas médias de 30°C em 2008 e de 29°C em 2009, enquanto que a umidade relativa do ar média foi de 52% e 56% em 2008 e 2009, respectivamente.



**Figura 2:** Localização da Fazenda Experimental da EMPARN. A) no Globo Terrestre; B) No município de Apodi-RN. Fonte Google Maps



### 3.2 - Práticas Agrícolas

As campanhas experimentais foram realizadas em uma área de 3,0 ha, semeada com algodão herbáceo (*Gossipium hirsutum L.*, cultivar BRS 187 8H) irrigado por aspersão convencional três vezes por semana, de modo a manter o conteúdo de água no solo acima de 60% da água disponível que é o nível de esgotamento de água recomendada para a cultura do algodão conforme Sousa et al. (2002). A cultura foi semeada obedecendo a um espaçamento de 0,9 m entre fileiras e uma densidade de 12 plantas  $m^{-2}$ , perfazendo um total de aproximadamente 133.000 plantas  $ha^{-1}$ .

A fertilização em 2008 foi de 20,0 kg  $ha^{-1}$  de Nitrogênio (N), 60,0 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , 40,0 kg  $ha^{-1}$  de  $K_2O$  e 2,0 kg  $ha^{-1}$  de Boro (B) na semeadura e 90,0 kg  $ha^{-1}$  de N de adubação de cobertura aos 40 dias após a emergência – DAE. Na campanha de 2009 foram aplicados 18 kg  $ha^{-1}$  de N, 100 kg  $ha^{-1}$  de  $P_2O_5$ , 54 kg  $ha^{-1}$  de  $K_2O$  e 2 kg  $ha^{-1}$  de B na semeadura e duas adubações de cobertura de 100 e 60 kg  $ha^{-1}$  de N aos 28 e 59 DAE, respectivamente.

As medições de  $Rn$  foram obtidas através de um saldo radiômetro NR-LITE, enquanto que G foi medido por duas placas HFP01SC-L Hukseflux Self-Calibrating Soil Heat Flux Plate (Campbell Sci., Logan-UT, USA) a 0,02 m de profundidade. As taxas de variação vertical da temperatura do ar ( $^{\circ}C$ ) e da pressão de vapor (kPa) foram medidas através de psicrômetros construídos de termopares tipo T (cobre-constantan). Os sinais elétricos dos sensores empregados no cômputo de LE foram coletados a cada 5 segundos e extraídas médias a cada 20 minutos, por meio de um sistema de aquisição de dados CR3000 (Campbell Sci., Logan-UT, USA), alimentado por um painel solar de 20 W.

Na estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) foram utilizados dados obtidos pela Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática (Apodi – A340), pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET

Localizada na Fazenda Experimental da EMPARN, essa estação é composta de uma unidade de memória central (datalogger) conectado à sensores de temperaturas do ar e do ponto de orvalho, umidade relativa, pressão atmosférica, condições do vento à 10m de altura, radiação solar global e precipitação. O datalogger realizou a leitura dos sinais analógicos a cada 5 segundos, armazenando suas médias em intervalos horários.



**Figura 3:** Estação Meteorológica de Observação de Superfície

### 3.3 - Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência diária –  $ET_0$ , foi obtida através método da FAO – Penman-Monteith ( $ET_0$ ) que trata de uma cultura hipotética com altura de 12 cm, resistência aerodinâmica da superfície  $70 \text{ s m}^{-1}$  e albedo de 23%. A equação utilizada na determinação dos valores da evapotranspiração de referência é aquela descrita por Allen et al. (1998), ou seja:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \left( \frac{900}{T_{med} + 273} \right) U_{2m} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_{2m})} \quad (3.1)$$

em que:  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência diária (mm);  $R_n$  é o saldo de radiação à superfície ( $\text{MJ m}^{-2}$ );  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2}$ ), considerado nulo para período diário;  $T_{med}$  é a temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $U_{2m}$  é a velocidade média diária do vento a 2 metros de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );  $e_a$  é a pressão parcial do vapor d'água (kPa) média diária;  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa) média diária;  $(e_s - e_a)$  é o déficit de saturação (kPa);  $\Delta$  é a inclinação da curva de pressão de saturação de vapor d'água ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ); 900 é um fator de conversão e  $\gamma$  é o fator psicrométrico ( $\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Todas as variáveis da equação (3.1) são estimadas de acordo com Allen et al. (1998), isto é:

$$P_0 = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (3.2)$$

onde:  $P_0$  e  $z$  são, respectivamente, a pressão atmosférica (kPa) e a altitude (m) do local.

$$\gamma = \frac{c_p P_0}{L \varepsilon} = 0,665 \times 10^{-3} P_0 \quad (3.3)$$

em que: L é o calor latente de evaporação da água (2,45 MJ kg<sup>-1</sup> a 20°C), c<sub>p</sub> é o calor específico do ar seco à pressão constante (1003 J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>), P<sub>0</sub> é a pressão atmosférica local (kPa) e ε é a razão entre as massas moleculares de d'água e do ar seco, igual a 0,622. A temperatura do ar média diária – T<sub>med</sub> (°C) é igual à média aritmética entre as temperaturas máxima – T<sub>max</sub> (°C) e mínima - T<sub>min</sub> (°C), ou seja:

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (3.4)$$

A pressão de saturação do vapor d'água – e<sub>s</sub> (kPa) média diária corresponde à média aritmética das pressões de saturação do vapor d'água relativas às T<sub>max</sub> e T<sub>min</sub>, qual seja:

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (3.5)$$

onde e<sup>0</sup> simboliza a pressão de saturação obtida pela equação de Clausius-Clapeyron. Já a tangente à curva de saturação do vapor d'água - Δ (kPa °C<sup>-1</sup>) no ponto T<sub>med</sub>, é dada por:

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 \exp \left( \frac{17,27 T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right) \right]}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (3.6)$$

A pressão parcial do vapor d'água atmosférico –  $e_a$  (kPa) é obtida com base na umidade relativa média diária –  $UR_{med}$  (%) e a pressão de saturação média diária –  $e_s$  (kPa), qual seja:

$$e_a = \frac{e_s UR_{med}}{100} \quad (3.7)$$

O saldo de radiação em superfícies vegetadas pode ser medido com um saldo radiômetro ou estimado a partir de relações empíricas, em função de elementos meteorológicos.

$$Rn = BOC - BOL \quad (3.8)$$

onde BOC é o balanço de onda curta ( $MJ m^{-2} dia^{-1}$ ) e BOL é o balanço de onda longa ( $MJ m^{-2} dia^{-1}$ ). No caso da cultura de referência, tem-se:

$$BOC = (1 - \alpha) R_s \quad (3.9)$$

em que:  $\alpha$  é o albedo (0,23) e  $R_s$  é a irradiância solar global, resultante da soma das irradiâncias direta e difusa, expressa em  $MJ m^{-2} dia^{-1}$ . O balanço de onda longa -  $BOL$ , é dado por:

$$BOL = \sigma \left[ \frac{T_{max}^4 + T_{min}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (3.10)$$

em que:  $T_{max}$  e  $T_{min}$  são, respectivamente, as temperaturas máxima e mínima absoluta do ar durante o dia (K),  $\sigma$  é constante de Stefan Boltzmann ( $4,90 \times 10^{-9} MJ m^{-2} K^{-4} dia^{-1}$ ),  $e_a$  é a pressão atual do vapor d'água média diária (kPa) e  $R_{so}$  é a irradiância solar para dias de céu claro, isto é, quando  $n = N$ , expressa em  $MJ m^{-2}$

dia<sup>-1</sup>. N é o fotoperíodo ou número máximo de horas de brilho solar e n é o número efetivo de horas de brilho solar (insolação).

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (3.11)$$

onde:  $R_a$  é a irradiância solar extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e  $z$  é a altitude do local, onde foram realizados os experimentos de campo, e  $R_a$  foi obtido segundo expressão:

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} [\omega_s \text{sen}(\phi) \text{sen}(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (3.12)$$

em que:  $G_{sc}$  é a constante solar ( $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ),  $d_r$  é o inverso da distância relativa Terra-Sol (rad),  $\omega_s$  é o ângulo horário (rad),  $\phi$  é a latitude (rad) e  $\delta$  é a declinação solar (rad), obtidos pelas seguintes expressões:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (3.13)$$

em que:  $J$  é o número de ordem do dia do ano.

$$\delta = 0,409 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (3.14)$$

$$\omega_s = \text{arc cos}[-\tan g(\phi) \tan g(\delta)] \quad (3.15)$$

### 3.4 - Evapotranspiração da cultura pelo balanço de energia

Neste estudo a evapotranspiração diária da cultura ( $ET_c$ ) foi estimada através do método do balanço de energia baseado na Razão de Bowen - BERB, cujos componentes foram obtidos para períodos diários. As densidades de fluxo de energia utilizadas no cálculo da evapotranspiração do algodoeiro herbáceo foram integradas para o período em que o saldo de radiação foi positivo, critério também adotado por Heilman et al. (1989), Prueger et al. (1997), Lopes (1999), Silva (2000), Moura (2001) e outros. Os componentes do balanço de energia foram analisados para os quatro estágios de desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H, quais sejam: 1º estágio, semeadura a emergência, 2º estágio, da emergência ao primeiro botão floral, 3º estágio, primeiro botão floral a primeira flor aberta e 4º estágio, primeira flor aberta ao primeiro capulho. As análises foram feitas de acordo com os estágios fenológicos da cultura.

A evapotranspiração diária da cultura –  $ET_c$  foi obtida a partir da equação simplificada do balanço de energia, de acordo com Rosenberg et al. (1983), isto é:

$$R_n + LE + H + G = 0 \quad (3.16)$$

em que:  $R_n$  é o saldo de radiação;  $LE$  é a densidade de fluxo de calor latente;  $H$  é a densidade de fluxo de calor sensível para o ar e  $G$  é a densidade de fluxo de calor sensível para o solo. Todos os termos da Equação (3.16) são expressos em  $W\ m^{-2}$ . A energia armazenada no dossel vegetativo e a utilizada no processo fotossintético não foram consideradas, visto que representam menos de 2% do saldo de radiação (Heilman et al., 1994).

A razão entre as densidades de calor sensível ( $H$ ) e latente ( $LE$ ) foi proposta por Bowen, em 1926, como forma de estudar a partição da energia disponível, isto é:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (3.17)$$

Na camada limite superficial, as densidades de fluxo de calor sensível (H) e latente (LE), podem ser obtidas através das seguintes equações:

$$H = -K_h \rho c_p \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3.18)$$

e

$$LE = -K_w \rho L \frac{\partial q}{\partial z} \quad (3.19)$$

em que  $k_h$  e  $k_w$  são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água, respectivamente ( $m^2 s^{-1}$ );  $\rho$  é a densidade do ar ( $kg m^{-3}$ );  $c_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $MJ kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ );  $L$  é o calor latente de evaporação da água ( $MJ kg^{-1}$ );  $T$  é a temperatura do ar (K) e  $q$  é a umidade específica do ar ( $kg kg^{-1}$ ), que de acordo com Pereira et al. (1997) pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$q = \frac{0,622e}{P_0 - 0,378e} \cong \frac{0,622e}{P_0} \quad (3.20)$$

uma vez que  $e \ll P$ . Portanto, substituindo a Equação (3.20) na Equação (3.19) e reunindo em seguida a equação resultante juntamente com a Equação (3.18) na Equação (3.17), tem-se que:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{P_0 c_p}{L \varepsilon} \left( \frac{K_h}{K_w} \right) \frac{\partial T / \partial z}{\partial e / \partial z} \quad (3.21)$$



Finalmente, assumindo-se que os coeficientes de transferência turbulenta nos processos de difusão de calor sensível e vapor d'água são aproximadamente iguais, isto é,  $k_h \cong k_w$  (Verma et al., 1978) e, considerando-se que  $(\partial T/\partial z)/(\partial e/\partial z) \cong \Delta T/\Delta e$ , a razão de Bowen pode ser escrita da seguinte forma:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (3.22)$$

onde  $\beta$  é a razão de Bowen;  $\gamma$  é o fator psicrométrico ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ );  $\Delta T = T_2 - T_1$  e  $\Delta e = e_2 - e_1$  são as diferenças de temperatura do ar e da pressão atual de vapor d'água, medidas em dois níveis acima da superfície vegetada ( $\Delta z = z_2 - z_1$ ). A pressão atual do vapor d'água (kPa) foi obtida em dois níveis acima da copa da planta por meio da equação de Ferrel (Varejão-Silva, 2000):

$$e(T) = e_s(T_u) - 0,00066(1 + 0,00115T_u)(T_s - T_u)P_0 \quad (3.23)$$

em que  $e(T)$  é a pressão atual (parcial) do vapor d'água (kPa),  $P_0$  é a pressão atmosférica local (kPa),  $T_s$  e  $T_u$  são, respectivamente, as temperaturas das termojunções seca e úmida, ambas expressas em  $^\circ\text{C}$  e  $e_s(T_u)$  é a pressão de saturação do vapor d'água (kPa) correspondente à temperatura  $T_u$ .

De acordo com Perez et al., (1999), Azevedo et al. (2003), Inmam-Bamber e McGlinchey (2003), Silva et al., (2007) e Hou et al., (2010), dividindo a Eq. 3.16 por LE e resolvendo a equação resultante, obtém-se uma expressão para calcular a densidade de fluxo de calor latente – LE em função do saldo de radiação, fluxo de calor sensível no solo e dos gradientes verticais de temperatura e vapor d'água, ou seja:

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (3.24)$$

É importante observar que através da equação acima se determinou apenas os valores da densidade de fluxo de calor latente (LE) em  $W\ m^{-2}$ . Para obter a evapotranspiração em unidades de lâmina d'água (mm) em um dado intervalo de tempo, divide-se o valor do LE obtido pelo calor latente de vaporização da água (L) e se multiplica o resultado pelo tempo (seg) relativo ao período em que são obtidos os gradientes de temperatura e umidade. Considerou-se, no cômputo da  $ET_c$  diária os intervalos de tempo de um mesmo dia em que houve energia disponível, isto é,  $Rn - G > 0$ .

### 3.5 - Curva do Coeficiente de cultura

Para determinação da curva do  $K_c$  foi necessário identificar os quatro estágios de crescimento da cultura, os quais foram elaborados com base em observações de campo e metodologia da FAO-56 (Allen et al., 1998), como segue:

- Estágio Inicial: período da emergência até a cultura propiciar aproximadamente 10% de cobertura do solo;
- Desenvolvimento da cultura: período dos 10% cobertura do solo até efetiva cobertura do solo ou início da floração;
- Estágio Médio: início da floração até início da maturação;
- Último Estágio: Início da maturação até o final da maturação.

A curva do  $K_c$  foi construída a partir dos valores do  $K_c$  dos estágios inicial ( $K_{c-ini}$ ), médio ( $K_{c-med}$ ) e final ( $K_{c-fin}$ ). O valor do  $K_c$  foi calculado pela equação seguinte:

$$K_{LOCAL} = \frac{ET}{ET_0} \quad (3.25)$$

Os valores do  $K_{c-inicial Local}$  e  $K_{c-m\u00e9dio Local}$  correspondem as m\u00e9dias dos est\u00e1gios inicial e m\u00e9dio, respectivamente, enquanto que  $K_{c-final Local}$ , por sua vez, corresponde ao valor observado na maturação total no final do ciclo da cultura.

Os resultados obtidos a partir dos dados experimentais foram comparados com os respectivos valores do Boletim FAO-56, ajustados às condições locais segundo Allen et al. (1998). Essas correções se fazem necessárias uma vez que o estudo foi realizado em clima semi\u00e1rido, com m\u00e9dias observadas nos per\u00edodos experimentais da  $UR_{min}$  iguais a 24% em 2008 e 27% em 2009 e  $u_2$  de 2,8 e 2,6 m s<sup>-1</sup> em 2008 e 2009, respectivamente.

$$K_{c-m\u00e9dio FAO} = K_{c-m\u00e9dio(Tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (3.26)$$

$$K_{c-final FAO} = K_{c-final(Tab)} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(UR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (3.27)$$

onde:  $K_{c-m\u00e9dio(Tab)}$  e  $K_{c-final(Tab)}$  s\u00e3o os valores dos coeficientes da cultura do algod\u00e3o para os est\u00e1gios m\u00e9dio e final, respectivamente, obtidos na Tabela 12 do Boletim FAO-56;  $u_2$  \u00e9 a m\u00e9dia di\u00e1ria da velocidade do vento a 2,0 m;  $UR_{min}$  \u00e9 a m\u00e9dia di\u00e1ria da umidade relativa do ar m\u00ednima e  $h$  \u00e9 altura das plantas em cada per\u00edodo, que variou de 0,46 m a 0,96 m no est\u00e1gio fenol\u00f3gico m\u00e9dio enquanto que no est\u00e1gio final a altura observada foi de 1,12 m.

### 3.5.1 - Valores do $K_c$ (médio e final) para a cultura do algodão segundo a FAO

Tabela 12.

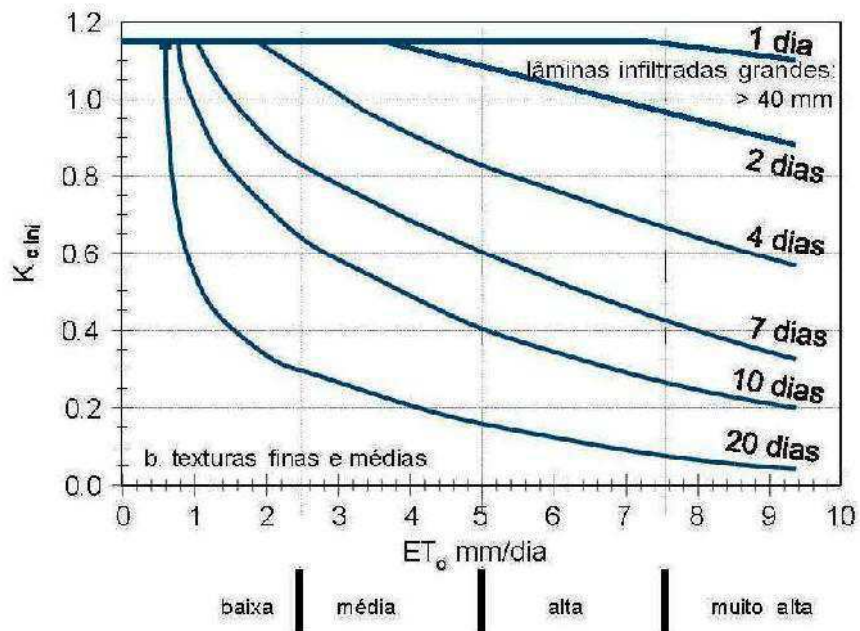
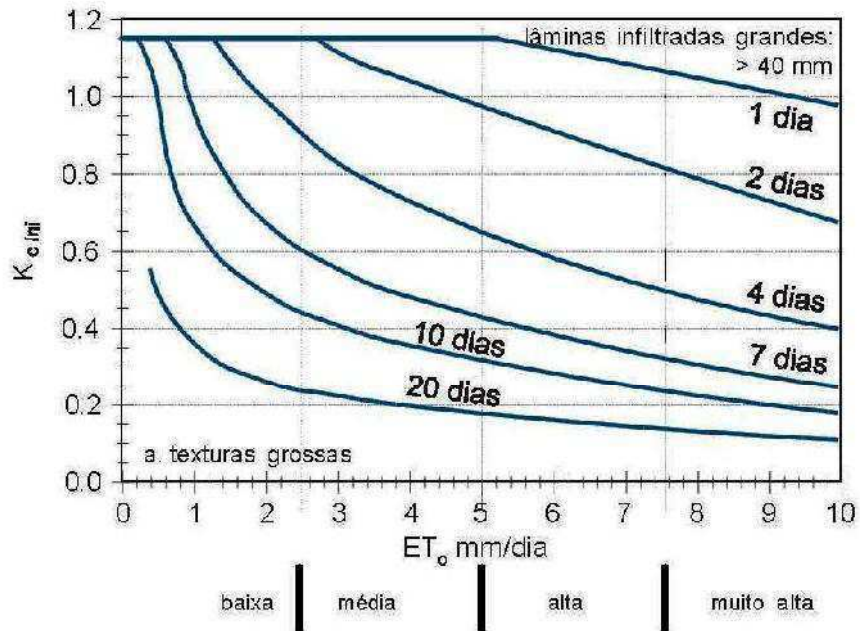
Cultura	$K_{cini}$	$K_{cmed}$	$K_{cfin}$
Algodão		1,15-1,20	0,70-0,50

Fonte:  $K_{cini}$ : Doorenbos and Kassam (1979).  $K_{cmed}$  and  $K_{cfin}$ : Doorenbos and Pruitt (1977); Pruitt (1986); Wright (1981, 1982); e Snyder et al., (1989), citados por Allen et al. (1998) (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56)

3.5.2 - O  $K_{c-inicial\ FAO}$  foi obtido graficamente a partir dos dados de  $ET_0$  calculado no período e da frequência de irrigação, para solos de textura média (Figura 30) do boletim FAO-56 (Allen et al., 1998).

FIGURA 30

Valor médio do  $K_c ini$  relacionado com o nível de  $ET_o$  e o intervalo entre as irrigações para eventos de umedecimento maiores ou iguais a 40 mm durante o estágio inicial para a) solos de textura grossa; b) solos de textura média e fina



## 4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 - Fenologia do algodoeiro, cultivar BRS 187 8H

As diferentes fases do ciclo vegetativo da cultura do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H, cultivado em Apodi - RN, elaborado com base em observações de campo seguindo a metodologia sugerida por Allen et al. (1998), estão apresentadas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Ciclo do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H, Apodi - RN, 2008 e 2009

Fase Fenológica	Estágios	Duração (dias) 2008	Duração (dias) 2009
I	Emergência das plântulas a 10% de cobertura de solo	15	17
II	10% de cobertura de solo ao início da floração	28	19
III	Início da floração ao início da maturação	38	44
IV	Início da maturação ao final da maturação	24	32
Totais		105	112

O comprimento do ciclo fenológico do algodoeiro herbáceo cultivar BRS 187 8H em Apodi-RN, foi de 105 e 112 dias em 2008 e 2009, conforme (Tabela 4.1). A diferença de 7 a mais na campanha experimental do ano de 2009 em relação ao ano de 2008, ocorreu devido ao fator térmico, uma vez que em 2009 a temperatura média observada durante o período experimental foi aproximadamente de 1°C inferior a 2008 (Tabela 4.2). Ficou constatado que a temperatura foi determinante no estabelecimento do comprimento do ciclo fenológico da cultura, tendo em vista que a unidade térmica, ou Graus-Dias-Desenvolvimento (GDD), utilizados pela cultura em ambos os anos apresentaram valores muito próximos um do outro (Tabela 4.3).

**Tabela 4.2:** Radiação solar (RS), temperatura do ar (Tar), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a 2m ( $u_2$ ), evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), observados durante o ciclo fenológico do algodoeiro herbáceo em Apodi-RN nas duas campanhas experimentais

Mês	RS (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	Tar (°C)	UR (%)	$u_2$ (m s <sup>-1</sup> )	$ET_0$ (mm dia <sup>-1</sup> )
Out/2008	28,7	29,6	50,3	2,9	8,3
Nov/2008	28,6	29,9	51,8	2,9	8,2
Dez/2008	24,5	29,9	52,3	2,7	7,5
Jan/2009	24,5	30,3	52,1	2,8	7,6
<b>Média</b>	<b>26,6</b>	<b>29,9</b>	<b>51,6</b>	<b>2,8</b>	<b>7,9</b>
Mês	RS (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	Tar (°C)	UR (%)	$u_2$ (m s <sup>-1</sup> )	$ET_0$ (mm dia <sup>-1</sup> )
Set/2009	24,3	27,8	56,9	2,2	6,4
Out/2009	25,2	29,0	56,6	2,6	7,2
Nov/2009	25,3	29,5	54,0	2,8	7,6
Dez/2009	21,9	29,6	56,6	2,5	6,8
<b>Média</b>	<b>24,2</b>	<b>29,0</b>	<b>56,8</b>	<b>2,5</b>	<b>7,1</b>

**Tabela 4.3:** Datas da emergência e da maturação total e do GDD requerido pelo algodoeiro em Apodi-RN

	<b>2008</b>	<b>2009</b>
Emergência	29/set/2008	08/set/2009
Maturação total	12/jan/2009	28/dez/2009
Duração do ciclo (dias)	105	112
GDD (°C) <sup>a</sup>	1499	1506

<sup>a</sup>O GDD foi determinado usando a temperatura base de 15,6°C (Howell et al., 2004; Ko et al., 2009) utilizando do método padrão (Mavi e Tupper, 2004):  $GDD = \sum (T_{max} - T_{min}) / 2 - 15,6$ .

#### **4.2 - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo para condições de céu claro e com nebulosidade para os anos de 2008 e 2009**

Nas Figuras 4.1 a 4.4 estão representados os componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo para condições de céu sem e com nebulosidade respectivamente para os anos de 2008 e 2009. Nas Figuras 4.1 e 4.3, o caminho descrito pelos componentes do balanço de energia, assemelha-se a de uma parábola com concavidade voltada para baixo. Entretanto nas Figuras 4.1 e 4.3, observam-se oscilações mínimas durante todo o percurso diário dos componentes analisados.

Na Figura 4.1, para a condição de céu claro, observa-se que os componentes das curvas das densidades de fluxo de calor latente e sensível acompanham de forma similar a trajetória do saldo de radiação (Rn). Nesta condição, os componentes do balanço de energia alcançam seus valores máximos médios por volta do meio dia, hora local, para em seguida, assumirem valores decrescentes até atingir o mínimo, em torno das 18h00. Na ausência de nebulosidade, os



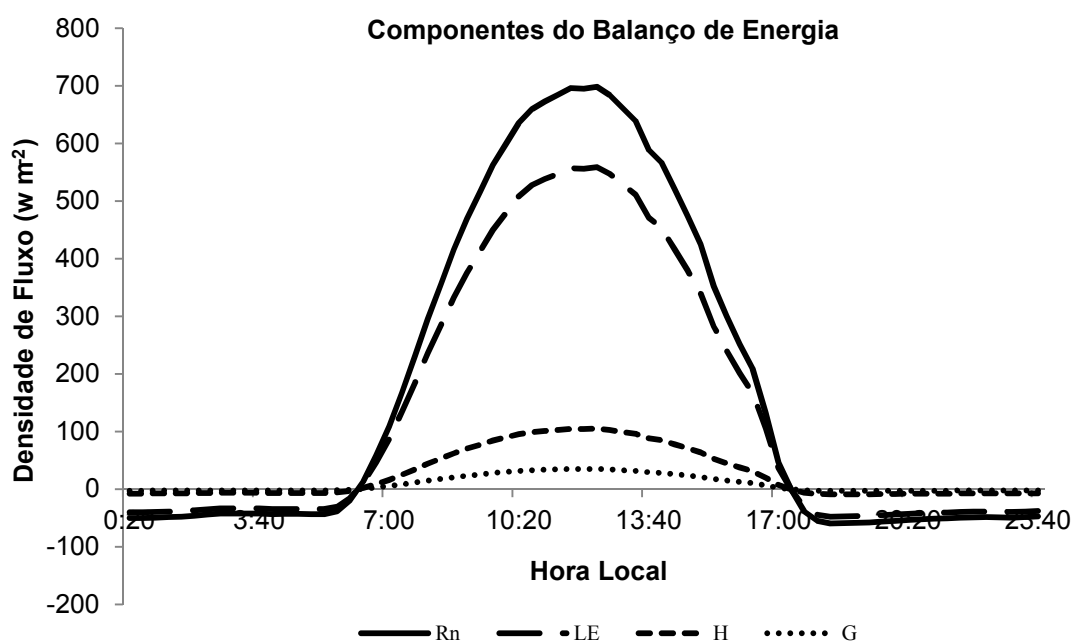
componentes do balanço de energia atingiram valores máximos para o ano de 2008 de Rn, LE, H e G respectivamente iguais a 698,70; 558,96; 104,8 e 34,94 W m<sup>-2</sup>. Na Figura 4.1 se encontram representados os valores de Rn, LE, H e G, onde. Fica evidenciado que nesse dia o fluxo de calor no solo representou pequena fração de Rn. Isto foi resultado do desenvolvimento alcançado pela cultura, não obstante a grande demanda atmosférica local.

Na Figura 4.2 se encontram representados os valores de Rn, LE, H e G, onde havia uma grande presença de nebulosidade sobre a área. Fica evidenciado que nesse dia o fluxo de calor no solo representou pequena fração de Rn. Isto foi resultado do desenvolvimento alcançado pela cultura, não obstante a grande demanda atmosférica local. O fato de o plantio ser em fileiras, certamente que causou grande redução nos valores de G. Segundo Pereira et al. (1997), sobre culturas bem irrigadas, o ar próximo à superfície permanece mais aquecido que a cultura, situação verificada com o algodoeiro irrigado. Já o fluxo de calor latente (LE), manteve-se sempre superior a H em todos os estágios fenológicos da cultura. O fluxo de calor no solo representou uma pequena proporção do saldo de radiação, em geral é de 5%.

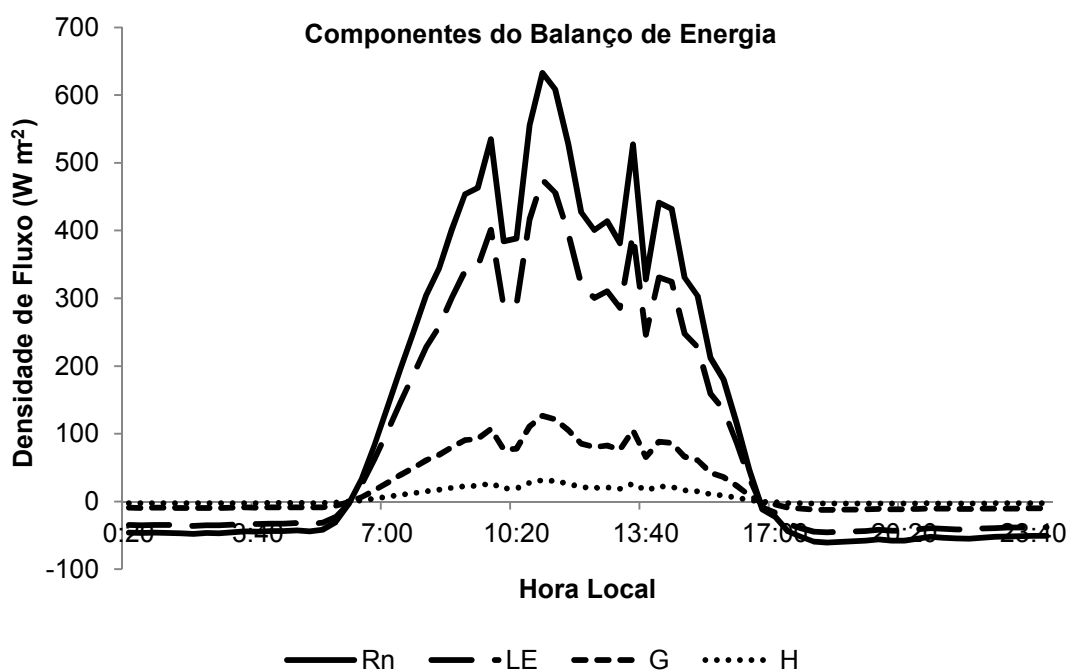
Na Figura 4.3 é apresentada uma poligonal referente ao curso diário dos componentes do balanço de energia para a condição de céu sem nebulosidade. Nesse dia, os valores médios diurnos de H, G e LE foram respectivamente correspondentes à 18%, 7% e 75% de Rn. Esses padrões são semelhantes aos observados em vegetação nativa (Siqueira, 1999) e cultivo de médio porte (Ávila Netto, 1997). Siqueira (1999) observou em área com algarobeira (*Prosopis juliflora*) no período chuvoso (janeiro-fevereiro de 1996) que G, H e LE representaram 10%,

10% e 80% de Rn, respectivamente; enquanto que Ávila Netto (1997) concluiu que para a videira Itália irrigada esses mesmos fluxos representaram 9%, 15% e 76% de Rn, respectivamente. No ano de 2009 os valores médios de Rn, LE, H e G foram iguais a 721,6; 541,20; 129,88; 50,51 W m<sup>-2</sup>.

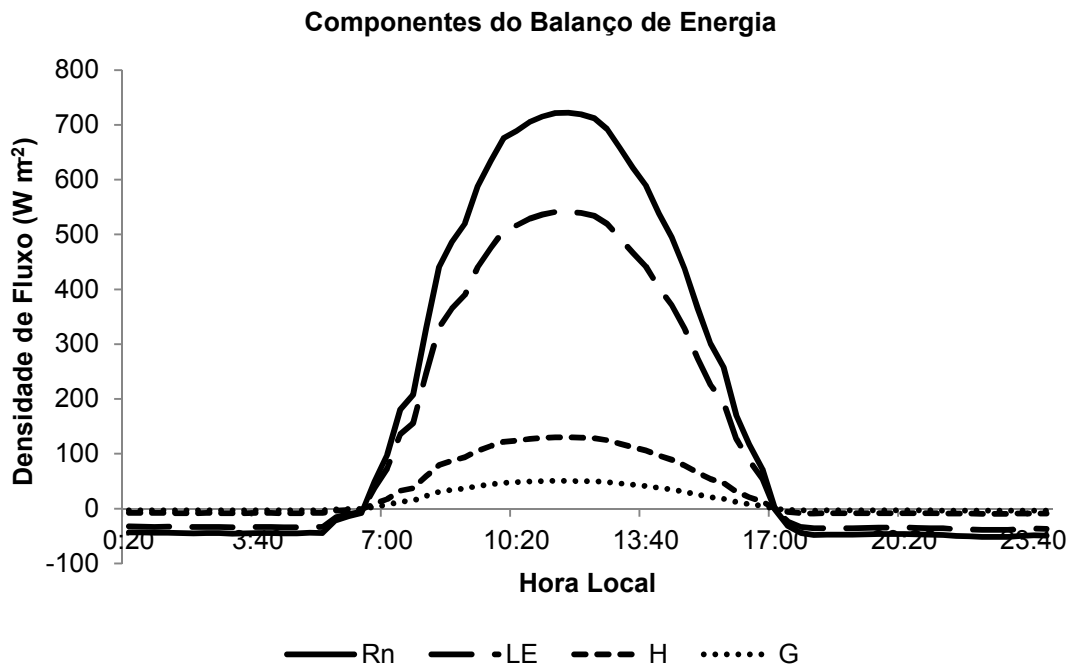
Na Figura 4.4, para a condição de céu com nebulosidade, observa-se que os comportamentos das curvas das densidades de fluxo de calor latente e sensível são, de certa forma, semelhantes ao do saldo de radiação (Rn), uma vez que Rn é quem define o tipo de comportamento das curvas dos demais componentes do balanço de energia. Na presença de nebulosidade Rn, LE, H e G atingiram seus valores máximos médios de 639,5; 498,81; 95,92 e 44,77 W m<sup>-2</sup>, respectivamente, às 10h20, isto para a campanha experimental de 2009. Estes percentuais foram de 78% para o fluxo de calor latente (LE), 15% para o fluxo de calor sensível (H) e 7% para o fluxo de calor no solo (G).



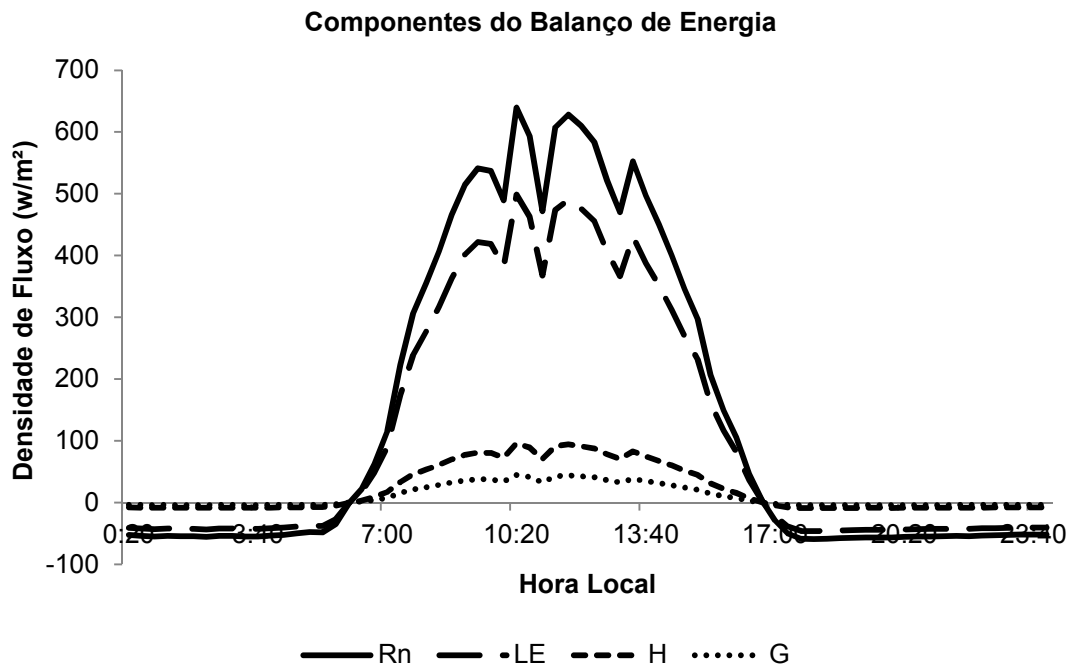
**Figura 4.1** - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo cultivar BRS-187 8H para o ano de 2008, para dias sem nebulosidade



**Figura 4.2** - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo cultivar BRS-187 8H para o ano de 2008, para dias com nebulosidade



**Figura 4.3** - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo cultivar BRS-187 8H para o ano de 2009, para dias sem nebulosidade



**Figura 4.4** - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo cultivar BRS-187 8H para o ano de 2009, para dias com nebulosidade

### **4.3 - Comportamento médio diário dos componentes do balanço de energia sobre o algodoeiro herbáceo para os ciclos completos e estágios fenológicos para os anos de 2008 e 2009**

Os componentes do BE durante o ciclo completo da cultura para os anos de 2008 e 2009 estão representados nas Figuras 4.13 e 4.14, respectivamente. Pode-se observar que em 2008 os componentes do balanço de energia ficaram um pouco acima dos valores obtidos em 2009. Isso foi corroborado em função da maior parte dos dias do ciclo da cultura, o céu apresentava-se com pouca nebulosidade, contribuindo para que os valores de  $R_n$ , LE, H e G para o ano de 2008 fossem de 650,83; 520,66; 97,63 e 32,54  $W\ m^{-2}$ , enquanto que para o período completo de 2009 seus valores máximos ficaram em torno de 648,26; 518,61; 97,24 e 32,41  $W\ m^{-2}$ . Estes valores são comparáveis aos encontrados por Rodrigues (2003), trabalhando com o algodoeiro herbáceo BRS 201 no Cariri Cearense que obteve valores máximos de  $R_n$ , LE, H e G respectivamente iguais a 689,07; 456,27; 140,45 e 59,46  $W\ m^{-2}$ , registrados por volta do meio dia local.

Os comportamentos médios horários das curvas do saldo de radiação ( $R_n$ ), das densidades de fluxo de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G), sobre o algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H, durante o ciclo fenológico estão representados nas Figuras 4.5 a 4.12. Observa-se que no decurso do período de 06h00 às 17h00, as curvas dos componentes LE, H e G, tenderam acompanhar as flutuações da curva do saldo de radiação ( $R_n$ ). Percebe-se que durante a maior parte dos dias do ciclo da cultura, mais precisamente durante o 1º estágio de desenvolvimento da cultura (Figuras 4.5 e 4.6), os valores dos componentes do balanço de energia  $R_n$ , LE, H e G atingissem valores máximos de

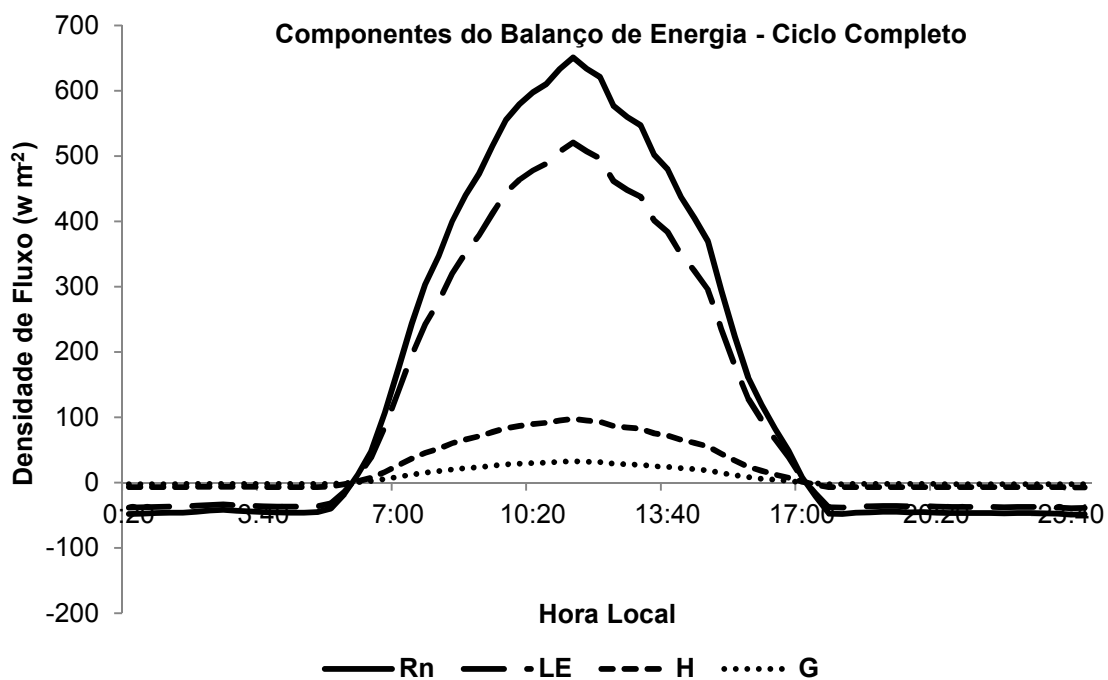
641,20; 512,96; 96,18 e 32,06 W m<sup>-2</sup> na campanha de 2008, enquanto que na campanha de 2009 foram encontrados os seguintes valores máximos para as componentes do balanço de energia Rn, LE, H e G da ordem de 621,21; 496,97; 93,18 e 31,06 W m<sup>-2</sup>, respectivamente, registrados por volta do meio dia local.

No 2º estágio de desenvolvimento da cultura (Figuras 4.7 e 4.8) na campanha de 2008, os valores máximos de Rn, LE, H e G, foram respectivamente iguais a 648,73; 518,98; 97,31 e 32,44 W m<sup>-2</sup>, enquanto que, neste estágio no ano de 2009 foram observados valores máximos de Rn, LE, H e G de 630,92; 504,73; 94,64 e 31,55 W m<sup>-2</sup>.

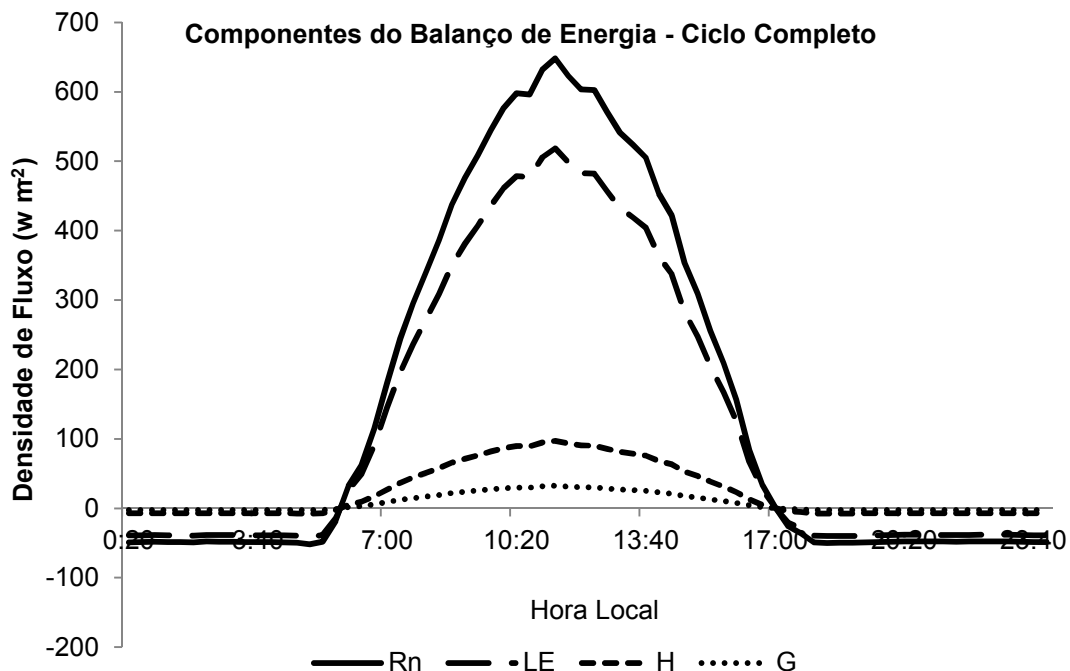
Observando-se o terceiro estágio de desenvolvimento da cultura nas campanhas de 2008 e 2009 (Figuras 4.9 e 4.10), percebe-se que os valores máximos dos componentes do balanço de energia alcançaram valores superiores para o Rn e o LE em relação aos valores mencionados na 1º e 2º estágios, sendo o Rn, LE, H e G para o ano de 2008 registraram máximos de 696,97; 557,58, 104,54 e 34,85 W m<sup>-2</sup>, enquanto que para o ano de 2009 seus valores máximos foram iguais a 680,96; 544,77; 102,15 e 34,05 W m<sup>-2</sup>. Portanto, os valores de Rn e LE em 2008 ficaram virtualmente acima dos respectivos na campanha de 2009 para a 3º estágio da cultura.

No quarto e último estágio de desenvolvimento, atividades de senescência nos anos de 2008 e 2009 (Figuras 4.11 e 4.12) foram observados valores abaixo dos encontrados na 3ª fase da cultura, onde os componentes do balanço de energia alcançaram valores máximos de Rn, LE, H e G em torno de 650,76; 520,61; 97,61; 32,54 W m<sup>-2</sup>, enquanto que no ano de 2009 esses valores foram de 639,95; 511,96; 95,99 e 32,00 W m<sup>-2</sup>. Uma vez mais, os valores dos componentes do BE em 2009 se

mostraram acima daqueles registrados em 2008, uma consequência provável da diferença entre as épocas de plantio, que embora seja de apenas um mês, foi suficiente para evidenciar sua influência nos valores do BE.

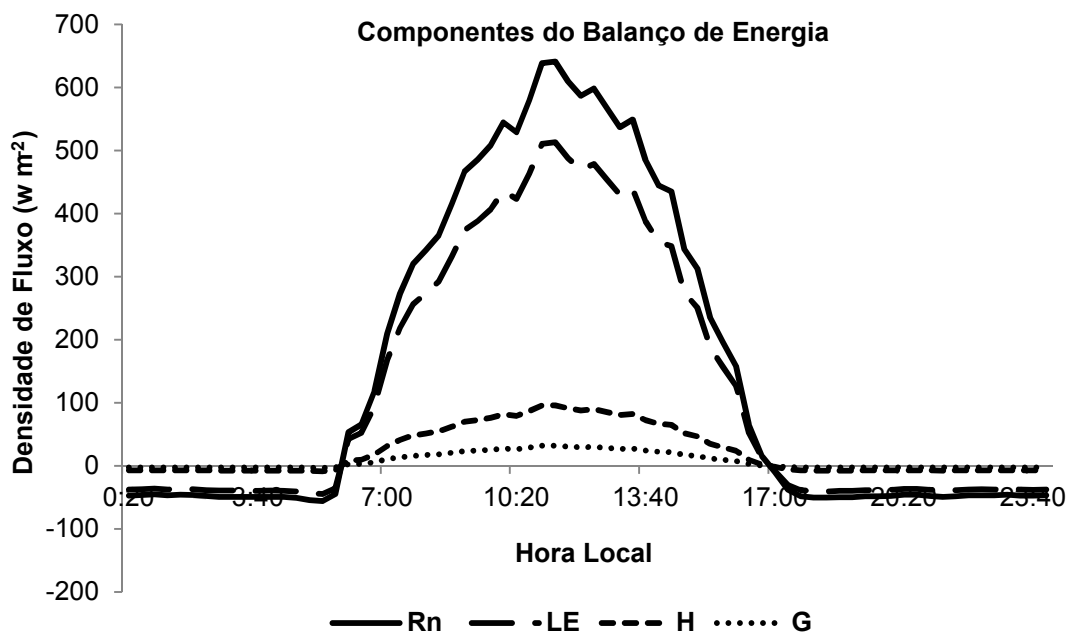


**Figura 4.5** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para o ciclo completo do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008

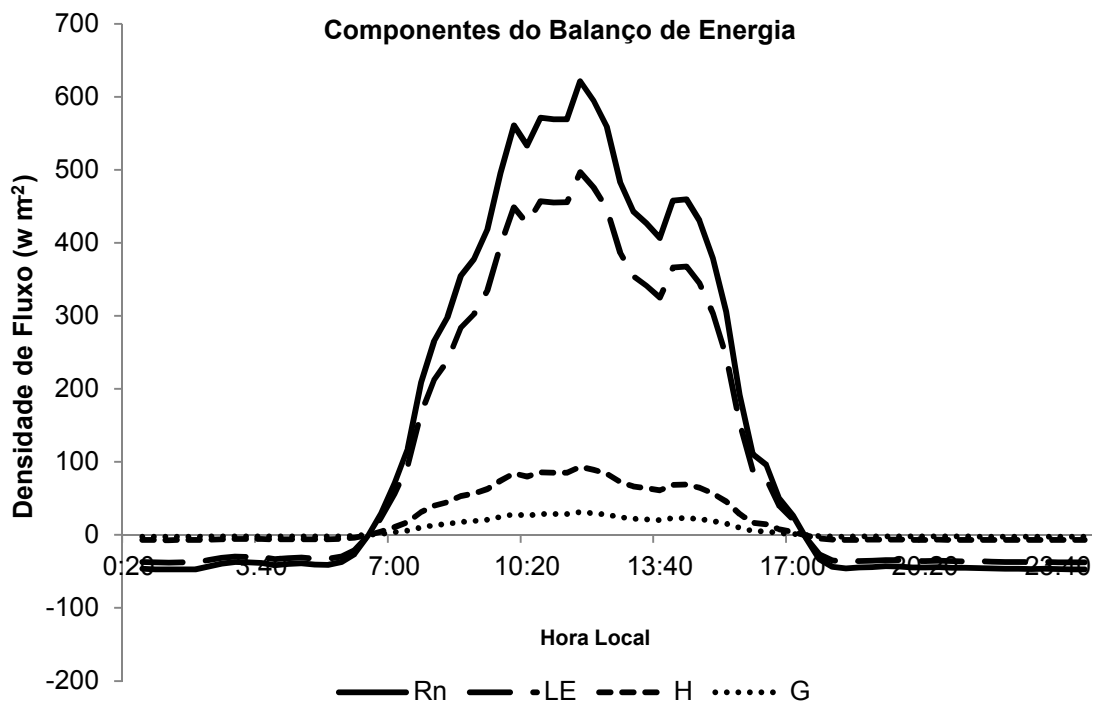


**Figura 4.6** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para o ciclo completo do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009

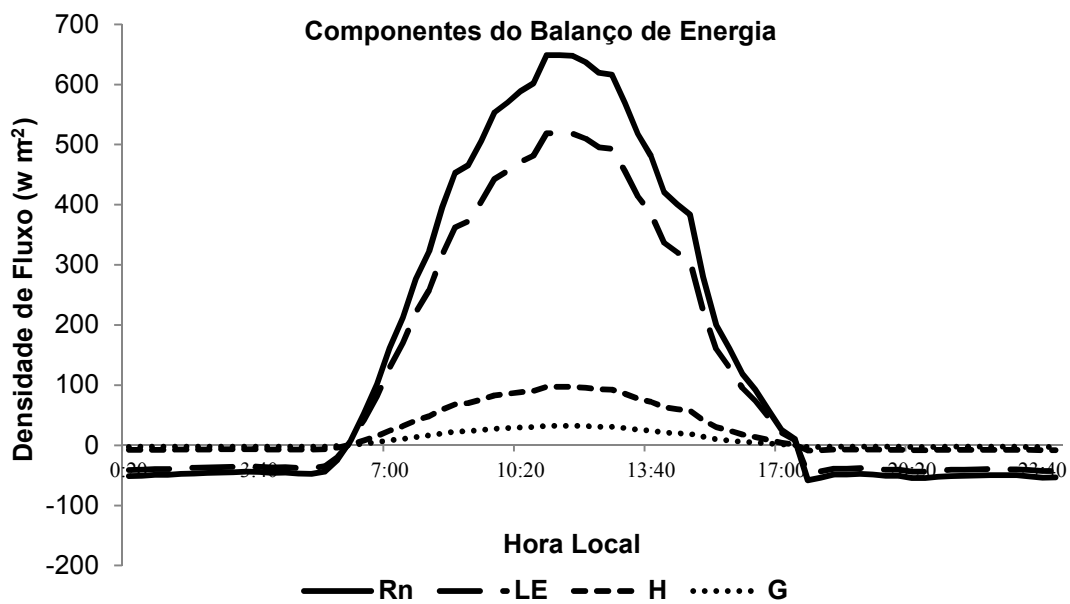




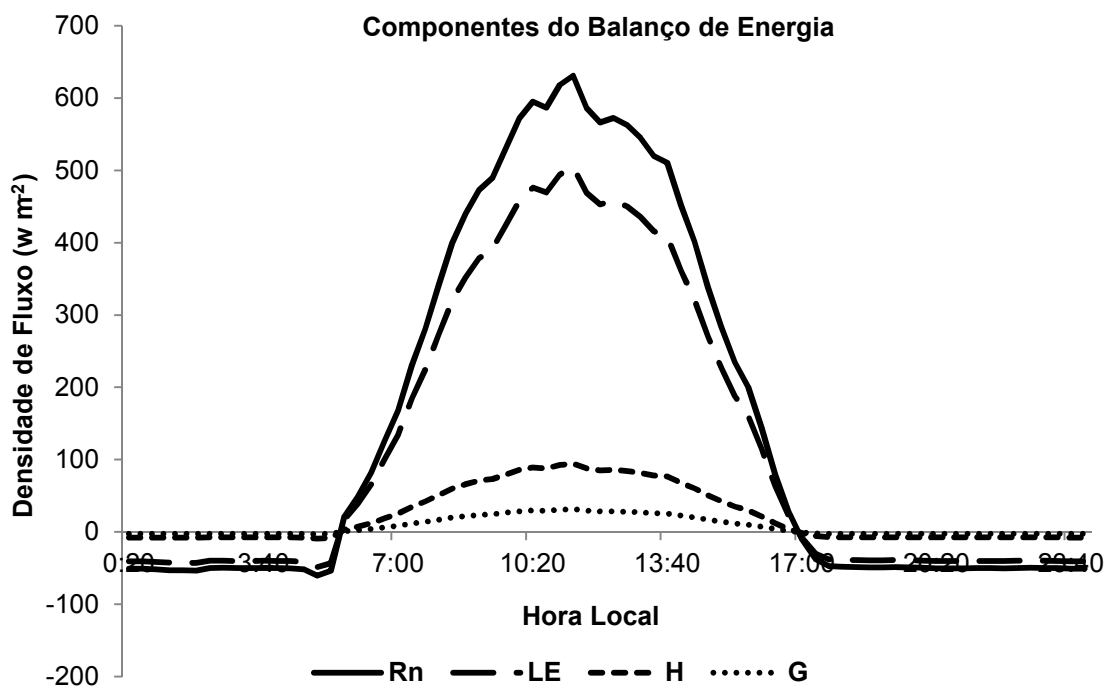
**Figura 4.7** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 1º estágio de desenvolvimento algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008



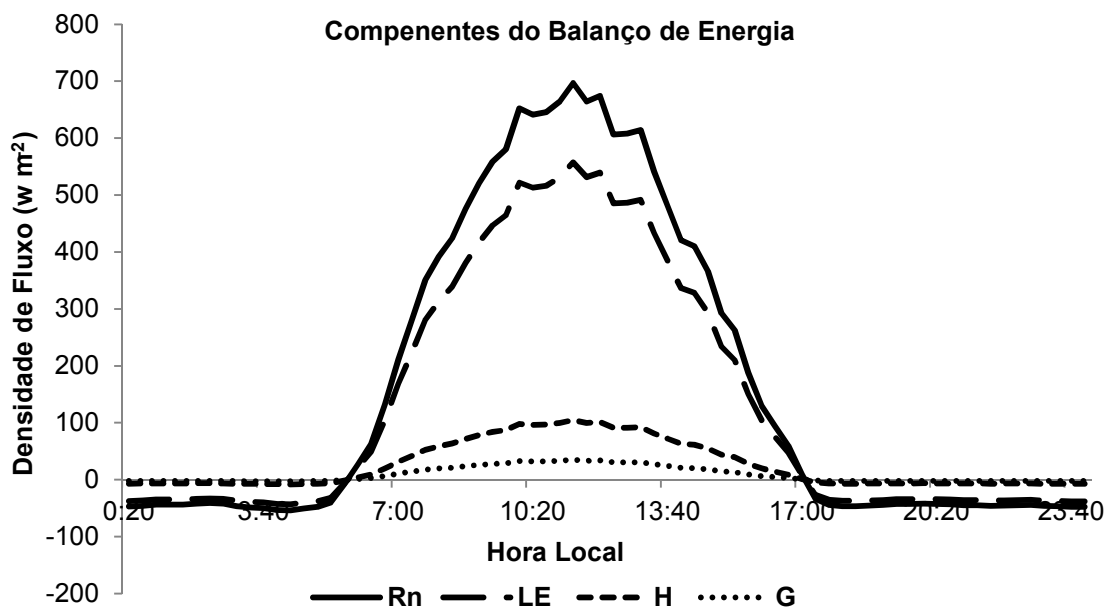
**Figura 4.8** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 1º estágio de desenvolvimento algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009



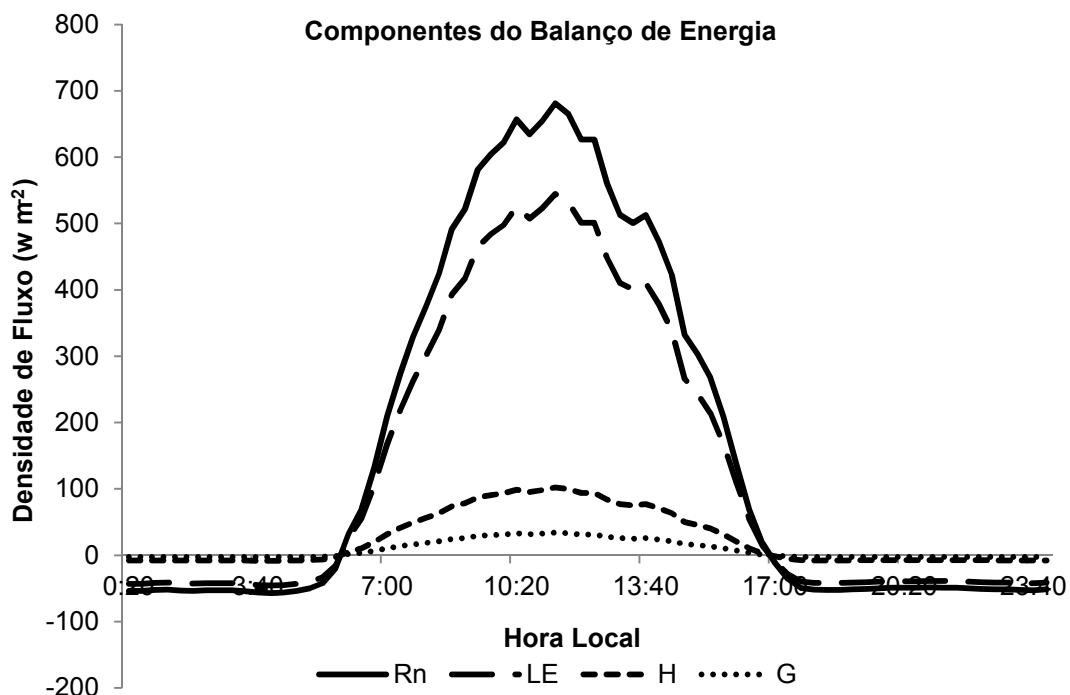
**Figura 4.9** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 2º estágio de desenvolvimento algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008



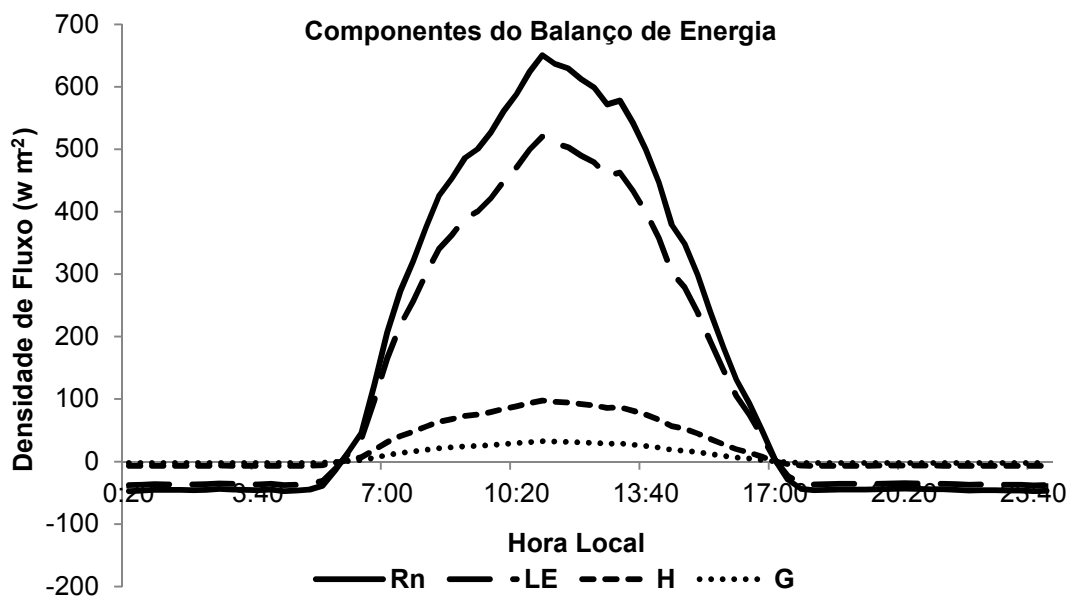
**Figura 4.10** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 2º estágio de desenvolvimento algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009



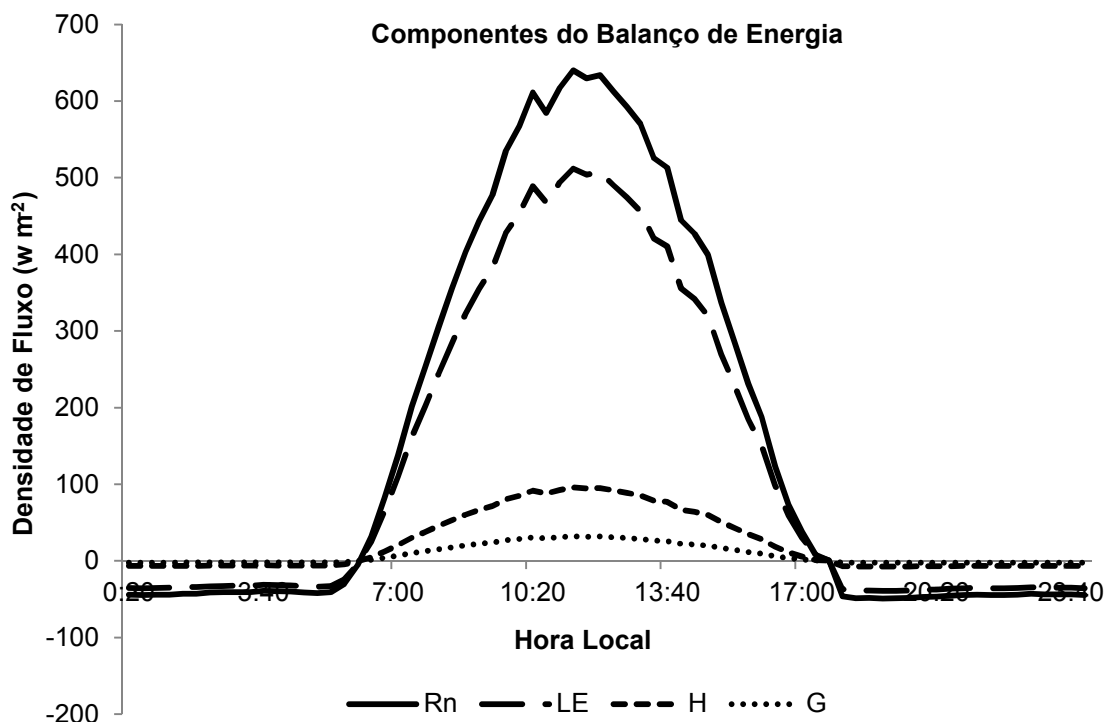
**Figura 4.11** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 3º estágio de desenvolvimento algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008



**Figura 4.12** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 3º estágio de desenvolvimento algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009



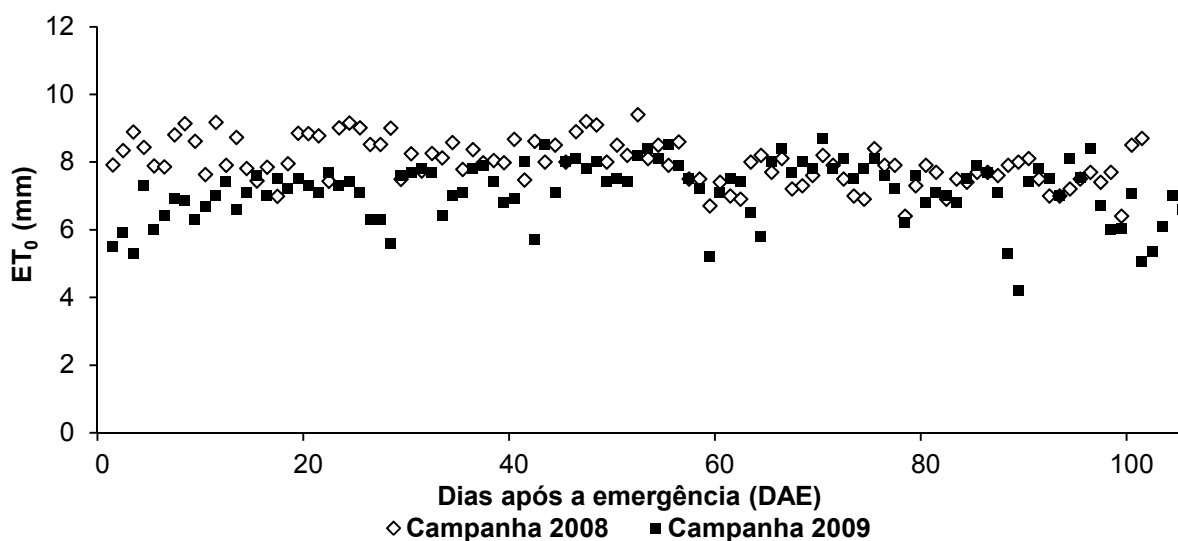
**Figura 4.13** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 4º estágio de desenvolvimento algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2008



**Figura 4.14** - Comportamento médio dos componentes do balanço de energia para a 4º estágio de desenvolvimento algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 187 8H para o ano de 2009

#### 4.4 – ET<sub>0</sub>, Irrigação e ET<sub>c</sub>

Os valores diários da ET<sub>0</sub> observados durante o ciclo fenológico da cultura do algodão em ambos os anos variaram de 6,4 a 9,4 mm em 2008 e de 4,2 a 8,7 mm em 2009 (Figura 4.15). A demanda hídrica da atmosfera em 2008 foi maior uma vez que nesse ano a ET<sub>0</sub> acumulada foi 43 mm maior que em 2009, mesmo com um período sete dias mais curto, conforme a Tabela 4.7. Conforme se depreende da Figura 4.15, na primeira metade do ciclo a ET<sub>0</sub> em 2008 foi superior à de 2009, mas na segunda metade os valores são aproximadamente iguais. Destaca-se que em ambos os anos e durante todo o período a ET<sub>0</sub> apresentou grande variabilidade, resultante da combinação dos diferentes elementos climáticos e, em particular, da radiação solar global. Isto também é evidenciado nos valores médios da umidade relativa do ar e na velocidade do vento apresentados na Tabela 4.4. A diferença da demanda hídrica da atmosfera nos respectivos anos foi refletida no volume de irrigação aplicado que foi 30 mm menor em 2009, conforme apresentados na Tabela 4.7 e cujos valores diários estão apresentados na Figura 4.15.



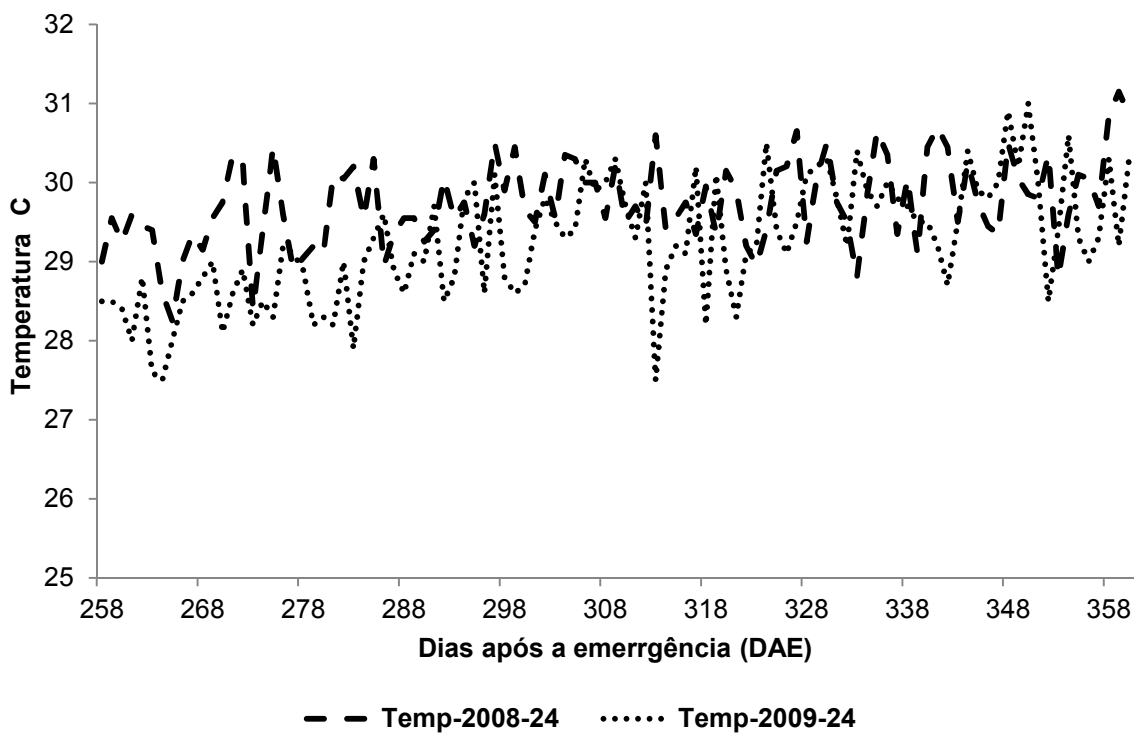
**Figura 4.15** - Evapotranspiração de referência observada durante os períodos experimentais em 2008 e em 2009

**Tabela 4.4** - Data da semeadura, temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa e GDD (Graus Dias de Desenvolvimento) observados durante o ciclo fenológico da cultura em ambas as campanhas experimentais

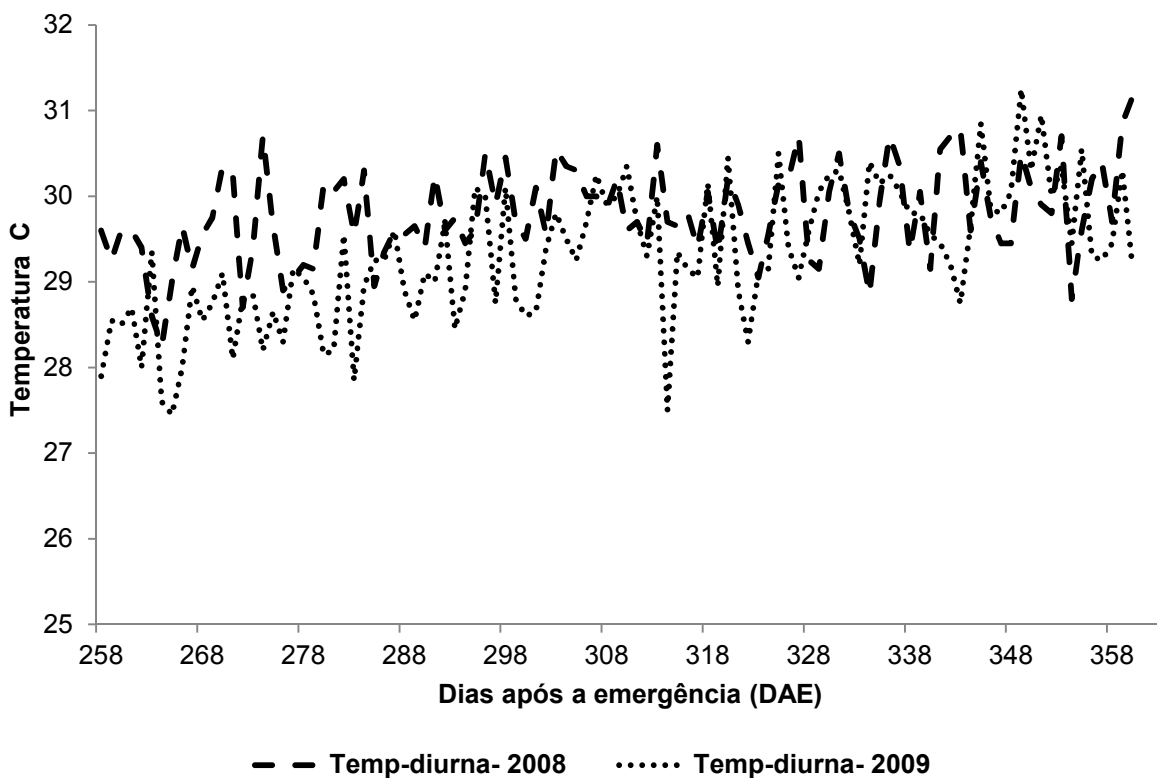
Anos	Sem.	Temperatura (°C)			$u_2$ (ms <sup>-1</sup> )	Rs(MJm <sup>-2</sup> )	Umidade Relativa (%)			GDD(°C) <sup>a</sup>
		Máx.	Mín.	Média			Máx.	Mín.	Média	
2008	29/set	38	21	30	2,8	2820	89	17	52	1499
2009	01/set	38	20	29	2,6	2702	94	18	56	1506

<sup>a</sup>GDD, Graus dias de desenvolvimento, foi determinado usando a temperatura base de 15,6°C.

Com vistas a melhor interpretar os dados da  $ET_0$  diária segundo os dados diários, obteve-se a temperatura média diária e a diurna, cujos dados estão representados nas Figuras 4.16 e 4.17. Percebe-se nitidamente que tanto a temperatura das 24 horas como a diurna para o ano de 2008 são superiores as de 2009 na primeira metade do período de observações, repetindo o que se verificou com a  $ET_0$  gerada com dados diários. As temperaturas máxima e mínima das 24 horas e do período diurno em 2008 foram de 31,1 C e 28,2 C para ambos os casos, enquanto que em 2009 essas temperaturas extremas para as 24 horas foram de 31 C e 27,5 C e para o período diurno foi 31,2 C e 27,4 C. As diferenças obtidas, portanto, são desprezíveis. Para constatar essa condição, empregou-se o teste de Student para a diferença de média com um nível de significância de 0,05 e se confirmou não haver diferença significativa entre as médias da Tmin e Tmax quando obtidas em períodos diário e diurno.



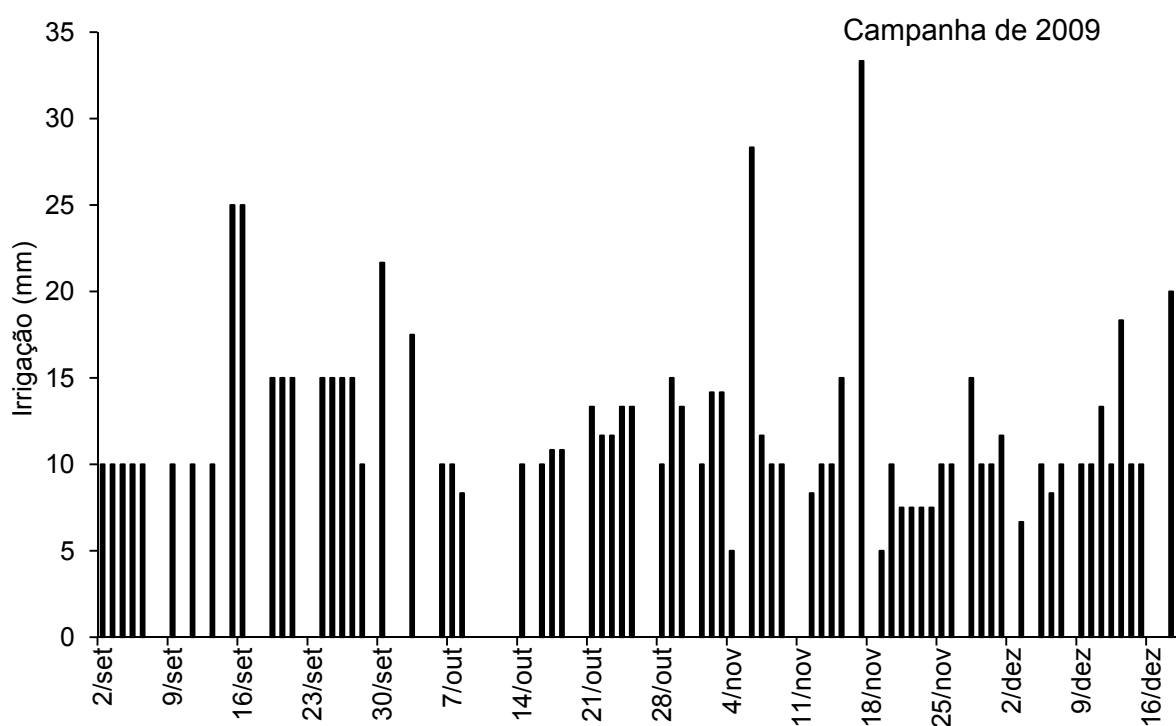
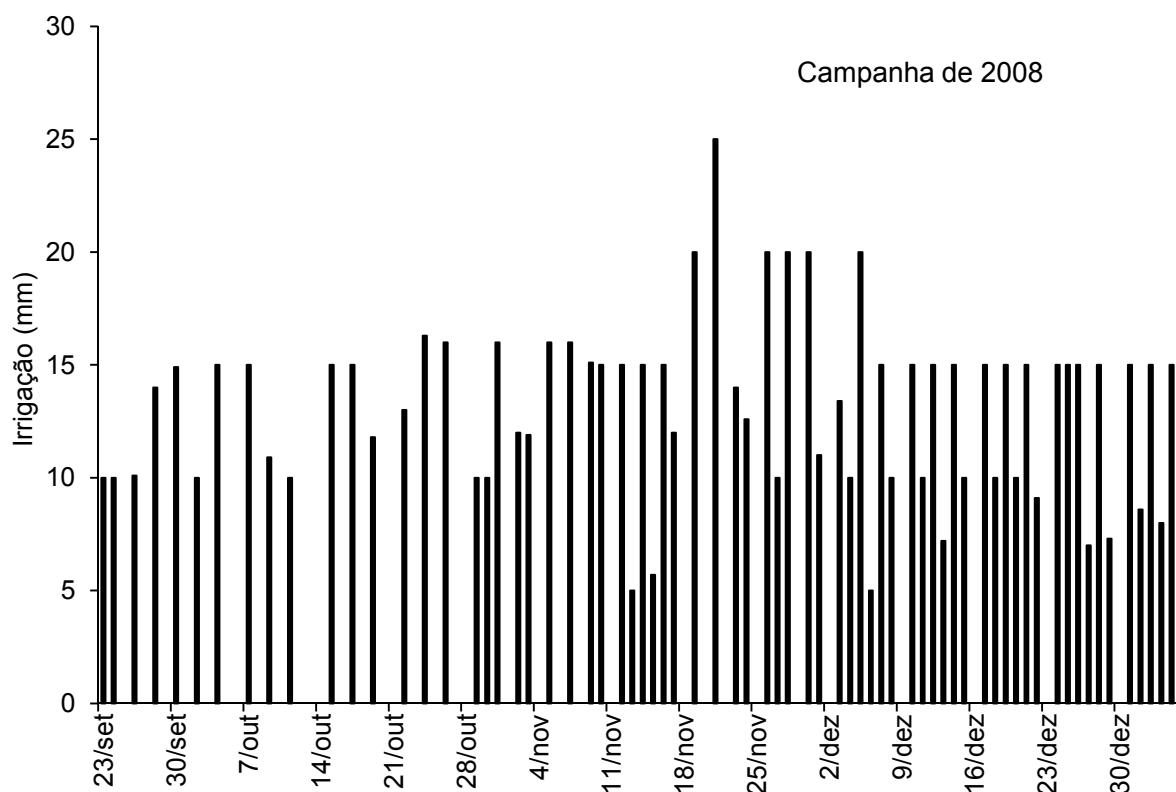
**Figura 4.16** - Temperatura média observada das 24 horas nos períodos experimentais de 2008 e 2009



**Figura 4.17** - Temperatura média observada diurna nos períodos experimentais de 2008 e 2009

Os valores da  $ET_c$  do algodão obtidos pela técnica de razão de Bowen variaram de 3,7 mm d<sup>-1</sup> a 9,3 mm d<sup>-1</sup> em 2008 e de 3,7 a 9,6 mm d<sup>-1</sup> em 2009 (Figura 4.19). Os valores mínimos foram observados no estágio inicial, enquanto que, os valores máximos foram atingidos no estágio médio em ambas as campanhas aos 79 dias após a emergência (DAE) em 2008 e aos 45 DAE em 2009. Esses valores máximos são inferiores aos obtidos no Texas (Howell et al., 2004, Ko et al., 2009) e superiores aos de 6,2 mm dia<sup>-1</sup> obtido por Azevedo et al. (1993) no oeste do estado da Paraíba e 7,0 mm d<sup>-1</sup> observado por Bezerra (2007) no sul do estado do Ceará, ambos no Semiárido brasileiro. A  $ET_c$  do algodão acumulada foi 717 e 751 mm em 2008 e 2009, respectivamente (Tabela 4.6). O valor mais elevado da  $ET_c$  acumulada em 2009 deveu-se provavelmente ao aumento da duração do ciclo da cultura que foi sete dias superior ao observado no ano anterior. Como pode ser visto, a temperatura foi determinante no estabelecimento do comprimento do ciclo fenológico da cultura, uma vez que a unidade térmica (isto é, Graus Dias de Desenvolvimento, GDD) requerida pela cultura em ambos os anos foi praticamente a mesma, aproximadamente 1500°C (Tabela 4.3). A média do GDD acumulado de 1502°C foi superior aqueles encontrados por Peng et al. (1989) e Howell et al. (2004) ao sul e ao norte das planícies altas do Texas, respectivamente, porém, inferior aos valores obtidos na Síria (Farahani et al., 2008) e em Uvalde, Texas (Ko et al., 2009).







**Figura 4.19** -  $ET_c$  diária do algodão herbáceo (cultivar BRS 187 8H) irrigado em Apodi - RN nos anos de 2008 e 2009

Quando se analisa os valores médios por ciclo fenológico Tabela 4.5, observa-se que o valor mínimo no ano de 2008, foi de  $5,2 \text{ mm dia}^{-1}$ , no início do crescimento vegetativo (1º estágio) e o máximo  $8,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , na etapa de desenvolvimento reprodutivo (3º estágio). Na Tabela 4.6, observa-se que a evapotranspiração da cultura no ano de 2009, foi crescente do 1º estágio até o 3º estágio, onde alcançou o máximo, voltando em seguida a decrescer, o que está de acordo com o observado por Bezerra et al. (1995) para o algodoeiro herbáceo, cultivar CNPA 6H, Azevedo et al. (1993) para a cultivar do algodoeiro herbáceo CNPA Precoce 1, Pereira et al. (1997) para as cultivares CNPA Precoce 1 e CNPA 7H e Bezerra (2007) para a cultivar BRS 200 Marrom. Por sua vez Rodrigues (2003), trabalhando com algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 201, observou valores de evapotranspiração crescente do 1º estágio para o 3º estágio, havendo uma redução no 3º estágio e alcançando o máximo no 4º estágio, enquanto que na (Tabela 4.5) a evapotranspiração da cultura foi crescente do 1º estágio até o 3º estágio, onde

alcançou o máximo, voltando em seguida a decrescer, deste modo observou-se que a  $ET_c$  média da cultura para as etapas de desenvolvimento foi maior no ano de 2008 que no ano de 2009 para o 3º estágio.

Tabela 4.5 - Valores médios da evapotranspiração  $ET_c$  do algodoeiro herbáceo BRS 187 8H por fase fenológica em Apodi - RN, 2008

Caracterização do ciclo do algodoeiro		Número de dias	$ET_c$ (média) (mm dia <sup>-1</sup> )	$ET_c$ do período (mm)
Fase I	Emergência das plântulas 10% de cobertura de solo	15	5,2	77,9
Fase II	10% de cobertura de solo ao início da floração	28	6,7	186,6
Fase III	Início da floração ao início da maturação	38	8,0	304,2
Fase IV	Início ao final da maturação	24	6,2	148,4
Total		105		717

Tabela 4.6 - Valores médios da evapotranspiração  $ET_c$  do algodoeiro herbáceo BRS 187 8H por fase fenológica em Apodi - RN, 2009

Caracterização do ciclo do algodoeiro		Número de dias	$ET_c$ (média) (mm dia <sup>-1</sup> )	$ET_c$ do período (mm)
Fase I	Emergência das plântulas 10% de cobertura de solo	17	5,1	86,9
Fase II	10% de cobertura de solo ao início da floração	19	7,1	135,3
Fase III	Início da floração ao início da maturação	44	7,7	340,5
Fase IV	Início ao final da maturação	32	5,9	188,8
Total		112		751

O consumo hídrico total do algodoeiro BRS 187 8H obtido pela Razão de Bowen para os anos de 2008 e 2009 foi respectivamente de 717 e 751 mm. Em 2008, o rendimento foi de 3448 kg/ha e em 2009, 3586 kg/ha. Utilizando a mesma metodologia Rodrigues (2003) e Bezerra (2007) obtiveram valores de  $ET_c$  de 517,1 mm e 514,5 mm para as cultivares BRS 201 e BRS 200 – Marrom, respectivamente, também em região semiárida. Utilizando a metodologia do lisímetro de lençol freático constante, Azevedo et al. (1993) obtiveram um consumo de 440 mm para a CNPA

Precoce 1, enquanto Marinato (1982), utilizando lisímetro de drenagem, obteve 440 mm para a cultivar IAC 17. Em ambiente protegido, Pereira et al. (1997) obtiveram um consumo médio de 501,1 mm e 533,5 mm para as cultivares de algodoeiro herbáceo CNPA Precoce 1 e CNPA 7H, respectivamente. Os altos valores obtidos na evapotranspiração da cultura no município de Apodi - RN decorre, provavelmente, em consequência da alta demanda atmosférica representada pela alta incidência da radiação solar, da alta temperatura, da velocidade do vento normalmente acima de  $2,5 \text{ m s}^{-1}$  e a baixa umidade relativa no período de estudo.

Comparando com a literatura, o valor médio de 734 mm da  $ET_c$  foi inferior aos valores observados no oeste da Turquia (Allen, 2000), em Bushland, Texas, USA (Grismer, 2002), na região central do Arizona, EUA (Hunsaker et al., 2003), no norte High Plains do Texas, EUA (Howell et al., 2004), no norte da Síria (Farahani et al., 2008) e na região de Uvalde, Texas, EUA (Ko et al., 2009). No entanto, é notado que os ciclos fenológicos das cultivares utilizadas em todos os estudos supracitados têm aproximadamente 50 dias mais longos do que o ciclo apresentado pela cultivar BRS 187 8H utilizada. Por outro lado, verifica-se que a  $ET_c$  obtida na presente pesquisa é consideravelmente superior aos valores obtidos em outras áreas do Semiárido brasileiro, a exemplo da obtida no oeste do estado da Paraíba (Azevedo et al., 1993) e do sul do estado do Ceará (Bezerra et al., 2010). Esses resultados evidenciam a necessidade da determinação da  $ET_c$  e seu correspondente  $K_c$  localmente, vez que no Semiárido brasileiro é bastante heterogêneo do ponto de vista meteorológico, com consideráveis diferenças entre os valores da UR e da velocidade do vento.

**Tabela 4.7** - Irrigação total aplicada (mm), evapotranspiração do algodão -  $ET_c$  (mm) e evapotranspiração de referência –  $ET_0$  (mm) calculada por FAO-Penman-Monteith em Apodi - RN durante os dois períodos experimentais

	2008	2009	Média
Irrigação (mm)	914	884	899
$ET_c \pm$ desvio padrão (mm)	717 $\pm$ 1,4	751 $\pm$ 1,5	734
$ET_0$ (24 horas)	835	792	813
Duração da estação de crescimento em (dias)	105	112	-

#### 4.5 - $K_{cFAO}$ versus $K_{cLocal}$

Os valores do  $K_{cFAO \text{ Ajustado}}$  e do  $K_{cLocal}$  para os estágios inicial, médio e final do algodão herbáceo irrigado por aspersão no Semiárido brasileiro estão representados na Tabela 4.8. Os valores da curva do  $K_{c-FAO}$  (Tabela 4.8 e Figuras 4.20, a e b) diferiram consideravelmente dos valores  $K_{c-inicial Local}$ , também apresentados na Tabela 4.8 e na Figura 4.21, com diferenças que variaram de 3 a 20%.

**Tabela 4.8** -  $K_{cFAO \text{ Ajustado}}$  e  $K_{cLocal}$  para a cultura do algodão irrigado por aspersão no Semiárido brasileiro

	2008	2009	Média
$K_c$ ajustado pela FAO			
$K_{c-inicial FAO}$	0,78	0,90	0,84
$K_{c-médio FAO}$	1,20	1,21	1,20
$K_{c-final FAO}$	0,66	0,74	0,70
$K_c$ localmente desenvolvido			
$K_{c-inicial Local}$	0,65	0,83	0,74
$K_{c-médio Local}$	1,01	1,03	1,02
$K_{c-final Local}$	0,78	0,76	0,77

A partir da Tabela 4.8 observa-se que os valores do  $K_c$  ajustado pela FAO e o  $K_c$  localmente desenvolvido, apresentam uma diferença significativa durante o ciclo fenológico da cultura, independente da combinação realizada com o método utilizado na estimativa da evapotranspiração do algodoeiro herbáceo e de referência. Percebe-se também que o  $K_c$  está intrinsecamente relacionado com as peculiaridades da metodologia utilizada no estudo principalmente com o método utilizado na determinação da  $ET_c$ , com o manejo de água e práticas culturais adotadas, com as condições edafoclimáticas local, com o tipo de planta e estágio de desenvolvimento, umidade do solo entre outros. De um modo geral, percebe-se que o coeficiente de cultura do algodoeiro herbáceo, cultivar 187 8H, apresenta uma relação entre  $ET_c$  estimada versus a  $ET_0$ , onde esta relação define a tendência sazonal do  $K_c$  desenvolvido localmente.

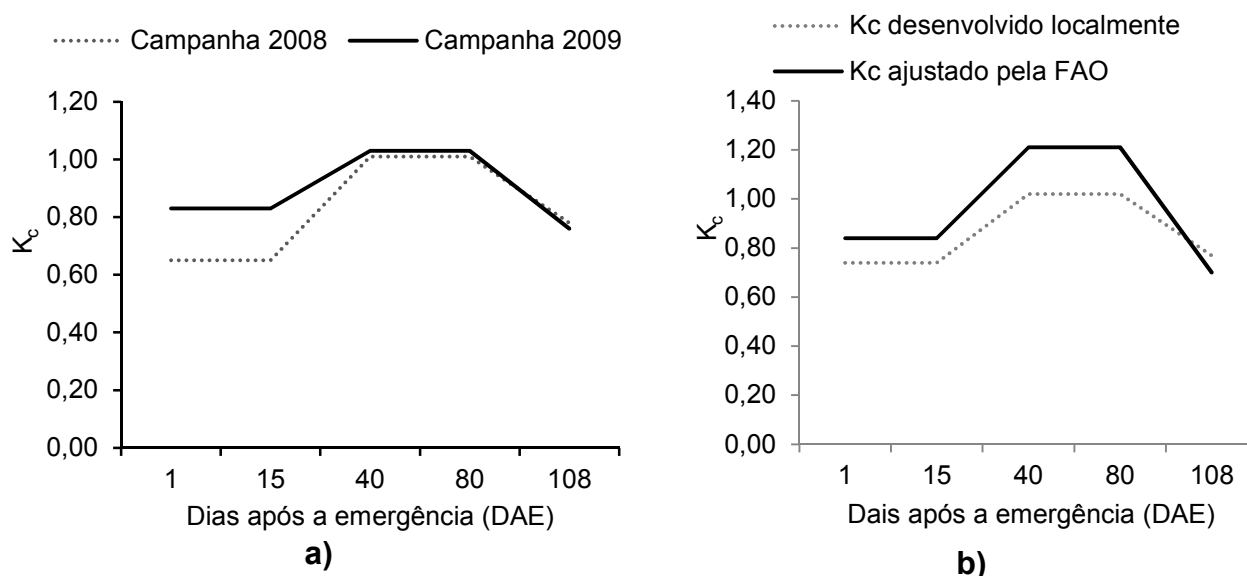
Os resultados mostram considerável nível de sensibilidade da metodologia do  $K_c$  para as variações normais de ano para ano e o manejo da irrigação durante todos os estágios de crescimento e desenvolvimento da cultura, onde estes ocorrem desde o início do estágio de crescimento vegetativo, passando pelo estágio de desenvolvimento, até chegar ao final do ciclo que é o último estágio, caracterizando assim a senescência da cultura. Essa sensibilidade é reportada na literatura, e é abordada por Jensen et al. (1990) e Allen et al. (1998), que sugerem a utilização de vários anos para construir uma curva mais representativa do  $K_c$ . Por exemplo, valores do  $K_{cmédio}$  desenvolvidos localmente sob condições de cultivo adequadas no sul da Califórnia, apresentaram uma redução de 6% (Allen et al., 2005) e 15% no oeste da Turquia (Allen, 2000), porque as condições ideais assumidas não prevaleceram.

Os valores do  $K_{c-inicial Local}$  foram inferiores aos valores do  $K_{c-inicial FAO}$  em ambas as campanhas experimentais, com diferença média da ordem de 13,0%. O valor médio de 0,74 é bastante similar aos resultados obtidos por Ko et al. (2009) no Texas; porém, é aproximadamente 40% superior ao valor obtido por Azevedo et al. (1993), também no Semiárido brasileiro e quase três vezes superior aos resultados de outras regiões como Síria (Farahani et al., 2008) e Louisiana, EUA (Hribal, 2009).

Os valores do  $K_{c-médio Local}$  foram praticamente os mesmos nos dois anos de observação (1,01 e 1,03) e também apresentaram diferenças semelhantes em relação ao  $K_{c-médio FAO}$  nas duas campanhas, ou seja, aproximadamente 18% inferior. Os valores do  $K_{c-médio Local}$  obtido nesse estudo são bastante similares aos encontrados por Azevedo et al. (1993) no oeste do estado da Paraíba, Semiárido brasileiro, no sul da Índia (Mohan e Arumugan, 1994) e na Síria (Farahani et al., 2008), sendo que a diferença entre  $K_{c-inicial Local}$  e  $K_{c-inicial FAO}$  encontrada no citado estudo foi cerca de 24%. Em comparação com a literatura, os valores  $K_{c-médio Local}$  encontrados em outras regiões potencialmente produtoras de algodão, como Texas, Califórnia, Arizona e Louisiana, têm sido invariavelmente superiores aos valores obtidos nesse estudo, com diferenças que variam de 14 a 25% (Hunsaker, 1999; Grismer, 2002; Hunsaker et al., 2003; Ko et al., 2009; Hribal, 2009).

Os valores do  $K_{c-final Local}$  e o  $K_{c-final FAO}$  foram os que apresentaram a maior compatibilidade, pois apresentaram a menor diferença média inferior a 10%. O valor do  $K_{c-final Local} = 0,77$  é aproximadamente 16% superior aos valores encontrados por Azevedo et al. (1993) e Farahani et al. (2008), que foram respectivamente de 0,65 e 0,66, porém inferior aos resultados encontrados por

Grismer (2002), 0,87, para os vales do Sacramento e São Joaquim e 0,95 para os desertos da Califórnia e por Ko et al. (2009), 0,9, para a região Uvalde, Texas, EUA.



**Figura 4.20** - Curvas do  $K_c$  desenvolvidas localmente durante os períodos experimentais de 2008 e 2009 (a) e sua curva média comparada com a curva do  $K_c$  FAO ajustado (b)

A Tabela 4.8 e a Figura 4.20 mostram que o  $K_c$  do 1º estágio foi bastante susceptível às variações locais, principalmente ao manejo de irrigação. O incremento de 70 mm (Tabela 4.9) na irrigação aplicada em 2009 em relação a 2008 implicou num valor de aproximadamente 20% superior do  $K_{c-ini Local}$  deste ano. Segundo Soares et al. 2001, o aumento no coeficiente de cultura para o estágio inicial ( $K_{cini}$ ), depende da lâmina d'água aplicada e da demanda evaporativa da atmosfera, visto quanto maior for a lâmina d'água aplicada, maior também será o valor do coeficiente de cultura para o estágio inicial ( $K_{cini}$ ), ou seja, o valor do  $K_{cini}$  dependeu diretamente do conteúdo de água na superfície do solo. A influência da irrigação fica mais evidenciada pelos dados meteorológicos observados durante o 1º estágio da cultura (Tabela 4.9) que em 2009 indicam uma demanda atmosférica menor, visto que tanto a UR, a  $u_2$  e a  $ET_0$  indicavam que a atmosfera foi mais úmida que em 2008 (maior



UR, menor  $u_2$  e menor  $ET_0$ ). No entanto, o  $K_{c-inicial}$  nesse ano foi maior que em 2008, ou seja, a  $ET_c$  da cultura foi maior, quando a cultura apresentou maior ET e consequentemente maior  $K_{c-inicial Local}$ .

**Tabela 4.9** - Valores médios de elementos meteorológicos e total da irrigação aplicada durante os estágio inicial, médio e final do algodão em Apodi – RN

	Estágio Inicial		Estágio Médio		Estágio Final	
	2008	2009	2008	2009	2008	2009
Irrigação (mm)	120,0	190,0	406,0	388,3	170,0	183,0
UR (%)	50,3	59,6	52,7	56,1	52,3	56,1
$u_2$ (m/s)	3,1	2,2	2,9	2,7	2,1	2,6
$ET_0$ (mm)	8,4	6,4	8,0	7,5	7,5	6,9

A sensibilidade do  $K_{c-inicial}$  ao manejo de irrigação é conhecida na literatura, sendo abordada por vários autores (Jensen et al., 1990; Allen et al., 1998; Farahani et al., 2008, López-Urrea et al., 2009). Allen et al. (1998) afirmam que seu valor pode variar de 0,10 a 1,15, influenciado principalmente pela frequência e intensidade de molhamento da superfície (precipitação ou irrigação). López-Urrea et al. (2009) apontam ainda o uso frequente do sistema de irrigação por aspersão como fator que contribui para os elevados valores da  $ET_c$ , no estágio inicial da cultura, pois provoca intenso molhamento da superfície e consequentemente elevada evaporação do solo devido a sua exposição em virtude de sua pouca cobertura do solo propiciada pela cultura.

Ao contrário do  $K_{c-inicial}$ , os valores do  $K_{c-médio}$  e do  $K_{c-final}$  foram bastante estáveis apresentando praticamente os mesmos resultados em ambas as campanhas experimentais.



**Tabela 4.10** - ET (mm) sazonal do algodão observada (Razão de Bowen) e estimada (mm) (multiplicando o  $K_{c-FAO}$  Ajustado pela  $ET_0$ )

	Campanha 2008	Campanha 2009
ET (observada) mm	717	751
ET (FAO) mm	832	843

## 5.0 CONCLUSÕES

Baseado nas análises dos dados obtidos, conclui-se que:

- a. Devido a alta demanda hídrica da atmosfera local, o consumo hídrico do algodoeiro em Apodi-RN, foi considerado elevado em comparação a outras áreas da região nordeste, como as várzeas de Souza na Paraíba e o Cariri Cearense.
- b. O  $K_c$  obtido a partir da combinação de  $ET_c$  estimada através do método do Balanço de energia baseado na razão de Bowen e  $ET_0$  segundo o método FAO – Penman-Monteith, foi mais preciso e o que melhor se adapta as condições da região da Chapada do Apodi - RN, haja vista que, além de serem de aplicação universal, apresentam base física mais sólida.
- c. Os valores do  $K_c$  determinados experimentalmente foram inferiores aos valores da FAO-56, mesmo ajustados as condições locais.
- d. A utilização dos valores da curva do  $K_{c-FAO}$  *Ajustado* para estimar a ET do algodão implicou em superestimavas da  $ET_c$  pela técnica de razão de Bowen nos dois anos de observação.

- e. O  $K_{c-inicial}$  foi o mais susceptível a variação da lâmina de irrigação aplicada, corroborando com o que já é conhecido da literatura.
- f. O emprego do  $K_c$  local proporcionou economia no volume de água aplicado nos anos das campanhas experimentais.
- g. O  $K_{c-LOCAL}$  foi usado como um modelo de simulação para mostrar que houve uma diferença entre o volume de irrigação de 2008 e 2009.

## 6.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S. Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. **Irrigation Science**, v.28, p.17-34, 2009.

ALLEN, R. G., CLEMMENS, A. J., BURT, C. M., SOLOMON, K., O'HALLORAN, T. Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. **Journal Irrigation Drainage Engineering**, v.131, n.1, p.24-36, 2005.

ALLEN, R. G. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. **Journal Hydrology**, v.229, p.27-41, 2000.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, K.; SMITH, M. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). Rome: FAO, 1998. 300p. (**Irrigation and Drainage Paper**, 56).

ALLEN, S. J.; WALLACE, J. S.; GASH, J. H. C.; SIVAKUMAR, M. V. K. Measurements of albedo variation over natural vegetation in the Sahel. **International Journal of Climatology**, v.14, n.6, p.625-636, 1994.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L. Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.4, p.650-662, 1989.

ALLEN, R. G. Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.112, n.4, p.348-368, 1986.

ALVES, L. R. A. **A reestruturação da cotonicultura no Brasil: fatores econômicos, institucionais e tecnológicos**, 121f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

AMORIM NETO, M. da S. **Termometria a infravermelho associada ao balanço de energia na determinação do índice de estresse hídrico da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) irrigado**. 1995. 89f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ANGUS, D. E. & WATTS, P. J. Evapotranspiration — How good is the Bowen ratio method. **Agricultural Water Management**. Amsterdam, v.8, p.133-150, 1984.

ARYA, S. P. Introduction to micrometeorology. North Carolina: **Academic Press**, 1988. 307p.

ASSENG, S.; HSIAO, T. C. Canopy CO assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.67, p.191-206, 2000.

ÁVILA NETTO, J. **Necessidades hídricas da videira europeia**. Campina Grande: 1997. 85p. (Dissertação de Mestrado).

AZEVEDO, P. V., RAO, T. V. R., AMORIM NETO, M. S., BEZERRA, J. R. C., ESPÍNOLA SOBRINHO, J., MACIEL, G. F. **Cotton water requirements**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.28, n.1 p.863-870, 1993.

AZEVEDO, B. M. **Evapotranspiração de referência obtida com a Razão de Bowen, Lisímetro de pesagem e equação de Penman-Monteith utilizando sistemas automáticos**. Piracicaba, 1999. 81p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

AZEVEDO, P. V. de; SILVA, B. B. da; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.58, p.241-254, 2003.

AZEVEDO, P. V., SOUZA, C. B., SILVA, B. B., SILVA, V. P. R. Water requirements of pineapple crop grown in a tropical environment, Brazil. **Agricultural Water Manage**. v.88, p.201-208, 2007.

BASELGA, J. J.; ALLEN, R. G. A. Penman-Monteith for semi-arid climate in southwestern Spain. In: **EVAPOTRANSPIRATION AND IRRIGATION SCHEDULING INTERNATIONAL CONFERENCE**, Sant Antonio, 1996. Proceedings. Sant Antonio: ASAE, p.999-1007, 1996.

BELTRÃO, N. E. de M.; FIDELES FILHO, J.; VALE, L. S. do. In: FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no cerrado do Brasil**. Brasília: ABRAPA, cap. 5, p.175-191, 2007.

BELTRÃO, N. E. de M.; SOUZA, J. G. de. Fitologia do algodão herbáceo (sistemática, organografia e anatomia). In: BELTRÃO, N.E. de M. (Org.). **O agronegócio do algodão no brasil**. Brasília: Embrapa Comunicação para a Transferência de Tecnologia, cap.3, v. 1, p.55-86, 1999.



BEZERRA, B. G. **Avaliação da eficiência de uso da água no algodoeiro irrigado na Chapada do Apodi segundo simulações do modelo SWAP**. 2011. 139f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

BEZERRA, JOSÉ R. C.; AZEVEDO, PEDRO V. de; SILVA, BERNARDO B. & DIAS, JOSÉ M. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BRS-200 Marrom, irrigado. **Revista brasileira de engenharia agrícola**, ambiente [online], ISSN 1415-4366, vol.14, n.6, p.625-632, 2010.

BEZERRA, J. R. C. **Crescimento, desenvolvimento e rentabilidade do algodão BRS 200 – Marrom Irrigado**. Tese de Doutorado em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, 88p, 2007.

BEZERRA, J. R. C.; BARRETO, A. N.; SILVA, B. B. da. et al. Consumo hídrico do algodoeiro herbáceo. Campina Grande: Embrapa Algodão, (**Relatório Técnico Anual, 1992-1993**), p.151-154, 1995.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v.27, p.779-787, 1926.

BURMAN, R.; POCHOP, L. O. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data. Comparisons and example calculations. New York: **Elsevier**, cap.8, p.191-213, 1994.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CARDOSO, G. B.; VIANA, T. V. de A.; AZEVEDO, B. M. de; SOUSA, V. F. de; SOUSA, F. Determinação da ET de referência pela razão de Bowen com

psicrômetros instalados a diferentes alturas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.36, n.1, p.16-23, 2005.

CASA, R.; RUSSEL, G.; CASCIO, B. L. Estimation of evapotranspiration from a field of linseed in central Italy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.104, p.289-301, 2000.

COELHO, A. B. A cultura do algodão e a questão da integração entre preços internos e externos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v.42, n.1, p.153-169, 2004.

CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira de grãos**: décimo levantamento, julho 2011 / Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>, Brasília, 2011.

CORRÊA, J. R. V. **Algodoeiro. Informações básicas para o cultivo**. EMBRAPA – UEPAE. Belém, 1989. 29p.

CUNHA, G. R., BERGAMASCHI, H., BERLATO, M. A., et al. Balanço de energia em cultura de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, p.1-14, 1996.

DOORENBOS, J. and KASSAM, A. H. **Yield response to water**. FAO Irrigation and Drainage. Paper n.33, FAO, Rome, Italy. 193p, 1979.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 2000. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. **Necessidades hídricas das culturas.** (Estudos FAO, Irrigação e Drenagem 24), Tradução Gheyj, H. R., Metri, J. E. C., Damasceno, F. A. V., Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. FAO. 204p, 1997.

ESPARZA, A. M.; GOWDA, P. H.; BAUMHARDT, R. L.; MAREK, T. H.; HOWELL, T. A. Heat unit availability for cotton production in the Ogallala Aquifer of the United States. **Journal of Cotton Science**, v.11, p.110-117, 2007.

FARAHANI, H. J., OWEIS, T. Y., IZZI, G. Crop coefficient for drip-irrigated cotton in a Mediterranean environment. **Irrigation Science**, v.26, p.275-383, 2008.

FERRY, G. V.; GEORGE, A. G.; JONHSON, C. E.; WcCUTHEON, O. D.; STROMBERG, L. K.; BOHER, L. J.; HOOVER, M. **Guides in cotton irrigation. Califórnia: University of Califórnia**, 1967. 25p.

FOLEGATTI, M. A.; SCATOLINI, M. E.; PAZ, V.P. da S.; PEREIRA, A.R., FRIZZONE, J. A. Efeitos de cobertura plástica sobre elementos meteorológicos e evapotranspiração da cultura de crisântemo em estufa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.2, p.155-163, 1997.

FREIRE, E. C.; MORELLO, C. de L.; ANDRADE, F. P. de; SANTOS, J. W. dos; ASSUNÇÃO, J. H. de; BEZERRA, W.; FERNANDES, J. I. **Desempenho dos cultivares de algodoeiro avaliados no estado de Goiás, nas safras 2001/02 e 2002/03.** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004a. 8p. (Embrapa Algodão. Comunicado Técnico, 204).

FREIRE, E. C.; MORELLO, C. de L.; CARVALHO, M. da C. S.; MIRANDA, J. E.; MATOS, J. P.; SENHORELO, W. L. P.; NEVES, A. C. das. **Diagnóstico da cultura**

**do algodoeiro em Goiás: Safra 2002/2003.** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004b. 40p. (Embrapa Algodão. Documento, 124).

FREITAS, M. A. V.; SANTOS, A. H. M. **Perspectivas de gestão e da informação de recursos hídricos.** O estado das águas no Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica, 1999. CD-ROM.

FRONZA, D. FOLEGATTI, M. V. MEGALE; P. et al. Determinação do Kc da estévia através de microlisímetro de lençol freático constante. In: XII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2, Fortaleza, 2001. Anais... Fortaleza, 2001. **Sociedade Brasileira de Agrometeorologia**, p.439-440.

FUZATTO, M. G. **Melhoramento genético do algodoeiro.** In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. (Org). Cultura do Algodoeiro. Piracicaba: POTAFOS, 1999. 286p.

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.

GAY, L. W. A portable Bowen ratio system for evapotranspiration measurements. Proceedings, National. Conference. **Irrigation and Drainage**, New York, p.625-632, 1988.

GRIDI-PAPP, I. L.; PASSOS, S. M. de G.; CARVALHO, L. H.; CHIAVEGATO, E. J.; SILVA, N. M.; CAVALIERI, P. A. **Instruções sumárias sobre épocas de plantio de variedades de algodoeiro.** Campinas: CATI, 1985. 6p. (Comunicado Técnico, 62).

GRISMER, M. E. Regional cotton lint yield, ETc, and water value in Arizona and Califórnia. **Agricultural Water Management**, v.54, n.3, p.227–242, 2002.

GUERRA, A. F.; RODRIGUES, G. C.; NAZARENO, R. B.; SARAIVA, M. A. de P. **Manejo de irrigação e fertilização nitrogenada para a cultura do algodoeiro na região do cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 16p. (Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa e desenvolvimento).

HARGREAVES, G. H. Estimation of potential and crop evapotranspiration. **Trans. ASAE**, 174, v.17, p.701-704, 1974.

HEILMAN J. L.; MCLNNES, K. J; SAVAGE, M. J. et al. Soil and canopy energy in a west Texas vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v.7, n.1, p.99-114, 1994.

HEILMAN, J L.; BRITTIN, CX. L. & NEALE, C. M. U. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**. Amsterdam, v.44, p.261-273, 1989.

HILLEL, D. **Solo e água: Fenômenos e princípios físicos**. Porto Alegre: Departamento de Solos/UFRGS, 1970. 231p.

HOU, L. G.; XIAO, H. L.; Si, J. H.; ZHOU, M. X.; YANG, Y. G. Evapotranspiration and crop coefficient of *Populus euphratica* Olivi forest during the grow in season in the extreme arid region northwest China. **Agricultural Water Management**, v.97, n.2, p.351-356, 2010.

HOWELL, T. A.; EVETT, S. R.; TOLK, J. A.; SCHNEIDER, A. D. Evapotranspiration of full-, deficit-irrigated, and dry land cotton on the Northern Texas High Plains. **Journal Irrigation Drainage Engineering**, v.130, n.4, p.277-285, 2004.

HRIBAL, S. A. **Crop Coefficients for Cotton in Northeastern Louisiana. Thesis Master of Science Degree Thesis 60p** – Agricultural and Mechanical College, Louisiana State University, Baton Rouge, 2009.

HUNSAKER, D. J. PINTER JR.; P. J.; BARNES, E. M.; KIMBALL, B. A. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. **Irrigation Science**, v.22, p.95-104, 2003.

HUNSAKER, D. D. Basal crop coefficients and water for early maturity cotton. **Trans. ASAE**, v.42, n.4, p.927-936, 1999.

HUSSEIN, A. S. A. Grass ET estimates using Penman-type equations in Central Sudan. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.125, n.6, p.324-329, 1999.

INMAN-BAMBER, N. G., MCGLINCHEY, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. **Field Crops Research**, v.83, p.12-138, 2003.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: **ASCE**, 1990. 332p.

JENSEN, M. E. Water consumption by agricultural plants. In: Koziowsky, T.T., (Eds.), Water Deficits and Plant Growth, Vol. II. **Academic Press**, Inc., New York, pp.1-22, 1968.

KJAERGAARD, J. H.; PLAUBORG, F.; MOLLERUP, M.; PETERSEN, C. T.; HANSEN, S. Crop coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. **Agricultural Water Management**, v.95, p.918-924, 2008.

KO, J., PICCINNI, G., MAREK, T., HOWELL, T. Determination of growth-stage-specific crop coefficients ( $K_c$ ) of cotton and wheat. **Agricultural Water Management**, v.96, n.12, p.1691-1697, 2009.

KOURI, J.; SANTOS, R. F. dos. A Recuperação da produção do algodão no Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO**, 6., 2007, Uberlândia. Anais... Uberlândia, p.1-5, 2007.

LIMA, J. R. de; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. de A.; BORGES, E.; SILVA, I. de F. da; LIRA, C. A. B de O. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.527-534, 2005.

LOPES, P. M. O.; SILVA, B. B. da; AZEVEDO, P. V. de; SILVA, V. P. R.; TEIXEIRA, A. H. C.; SOARES, J. M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Balanço de energia num pomar de mangueira irrigada. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2001.

LOPES, P. M. O. **Evapotranspiração da mangueira na região do Sub-médio São Francisco**. Campina Grande: 1999. 108 p. (Dissertação de Mestrado).

LÓPEZ-URREA, R., MONTORO, A., GONZÁLEZ-PIQUERAS, J., LÓPEZ-FUSTER, P., FERERES, E. Water use of spring wheat to raise water productivity. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1305-1310, 2009.

MACDONALD, S.; VOLLRATH, T. The forces of shaping world cotton consumption after the multifiber arrangement. Outlook report CWS-05c-01. USDA, **Economic Research Service**, 2005.

MCKENNEY, M. S. and N. J. ROSENBERG. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. **Agricultural and Forest Meteorology** v.64, p.81-110, 1993.

MAGGIOTTO, S.R. **Estimativa da evapotranspiração de Referência Pelo AO USO da termometria infravermelho**. 1996. 71 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.

MARINATO, R. Determinação da evapotranspiração da cultura do algodoeiro no Norte de Minas. In: **REUNIÃO NACIONAL DO ALGODÃO**, 2., 1982. Salvador. Resumos... Campina Grande: Embrapa – CNPA, p.124, 1982.

MAROIS, J. J.; WRIGHT, D. L.; PAWEL, J. W.; VARGAS, M. A. Effect of row width and nitrogen on cotton morphology and canopy microclimate. **Crop Science**, Madison, v.44, p.870-877, 2004.

MIRANDA, E. P. **Coeficiente de cultivo do melão (*Cucumis melo*, L.) determinado pelo balanço hídrico e graus-dia de desenvolvimento**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará. 1998. 61p. Dissertação Mestrado.

MAVI, H. S.; TUPPER, G. J. **Agrometeorology: Principles and Application of Climate Studies in Agriculture**. 1.ed. New York: Food Products Press, 2004, 364p.

MOHAM, S.; ARUMUGAM, N. Crop coefficients of major crops in south India. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.26, p.67-80, 1994.



MOLDER, M.; GRELLER, A.; LINDROTH, A.; HALLDIN, S. Flux-profile relationships over a boreal forest - roughness sub layer corrections. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.98-99, p.645-658, 1999.

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In G.E. Fogg (ed.) **Symposium of the Society for Experimental Biology**. The State and Movement of Water in Living Organisms, Academic Press, Inc., New York, v.19, pp.205-234, 1965.

MOURA, M. S. B. **Consumo hídrico, produtividade e qualidade de fruto da goiabeira irrigada na região do Sub-médio São Francisco**, 2005. 122f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

MOURA, M. S. B. **Fenologia e consumo hídrico da goiabeira irrigada**. Campina Grande: 2001. 124p. n.9, p.205-234.

NOGUEIRA JÚNIOR, S.; BARBOSA, M. Z. **O papel da pesquisa e a importância do Cerrado para a reorganização da cotonicultura brasileira**. Agricultura em São Paulo, São Paulo, v.52, n.2, p.87-98, 2005.

OHMURA, A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. **Journal Applied Meteorology**, Boston, v.21, n.4, p.595-598, 1982.

OLIVEIRA, G. M. de; LEITÃO, M. V. B. R. Estimativas de evapotranspiração e as consequências devido aos erros na determinação de saldo de radiação e efeitos advectivos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, p.343-347, 2000.

OOSTERHUIS, D. M. **Growth and development of a cotton plant.** In: CIA, E.; FREIRE, E.C.; SANTOS, W. J. dos. Cultura do algodoeiro. Piracicaba: POTAFOS, p.35-55, 1999.

PIERI, P.; FUCHS, M. Comparison of Bowen ratio and aerodynamic estimates of evapotranspiration. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.49, n.3, p.243-256, 1990.

PENG, S., KRIEG, D.R., HICKS, S.K., 1989. **Cotton lint yield response to accumulated heat units and soil water supply.** Field Crops Research, v.19, p.253-262, 1989.

PENMAN, H. L. Evaporation: an Introductory Survey. Nether. **Journal Agricultural Science**, v.4, p.9-29, 1956.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London**, v.A193, p.120-146, 1948.

PEREIRA, A. R. **Introdução à Micrometeorologia.** Piracicaba: ESALQ, Departamento de Ciências Exatas, 1998. 70p.

PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G. **Novas aproximações aos coeficientes culturais.** Revista Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.16, n.4, p.118 - 43, 1997.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração.** Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1997. 183p.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; MARTINEZ-COB, A. A simple model for estimating the Bowen ratio from climatic factors for determining latent and sensible heat flux. **Agricultural Forest Meteorology**, v.148, p.25-37, 2008.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, p.141-150, 1999.

PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L. AASE, J. K. PIKUL JR., J.L. Bowen-ratio comparisons with lysimeter evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.89, n.5, p. 730-736, 1997.

QIN, Z.; OUYANG, Y.; SU, G.; YU, Q.; LI, J.; ZHANG, J.; WU, Z. Characterization of CO and water vapor fluxes in a summer maize field with wavelet analysis. **Ecological Informatics**, v.3, p.397-409, 2008.

RANA, G.; KATERJI, N.; Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, Bologna, v.13, p.125-152, 2000.

REICHARDT, K. & TIMM, L. C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478p.

RIBEIRO, R. S. F. **ET estimation using Penman-Monteith equation compared to ET measured by lysimeter**. Knoxville: University of Tennessee, 1996. 15p.

RIGHI, E. Z.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.15, p.367-279, 2007.

RIVAS, R. e V. CASELLES. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing – based surface temperature and local meteorological data. **Remote Sensing of Environment**, v.93, p.68-76, 2004.

RODRIGUES, M. F. G. **Necessidades hídricas, crescimento e desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 201**. 2003. 132f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

ROSEMBERG, N. J., BLAD, B. L., VERMA, S. B. **Microclimate: The biological environment**. Nebraska, 1983. 495p.

ROSOLEM, C. A. **Ecofisiologia e manejo da cultura do algodão**. Piracicaba: POTAFOS, (Potafos. Informações Agronômicas, 95), 2001.

SAAD, J. C. C., SCALOPPI, E. J. Frequência de distribuição de evapotranspiração para dimensionamento de sistemas de irrigação. In: **CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**, 8, 1988. Florianópolis, SC. Anais... Florianópolis: v.2, p.1037-1052.

SAMMIS, T. W.; MAPEL, C. L.; LUGG, D. G.; LANSFORD, R. R.; McGUICKIN, J. T. Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.28, n.3, p.773-780, May/June 1985.

SÁNCHEZ, R. O. **Zoneamento Agroecológico do Estado de Mato Grosso (Ordenamento Ecológico - Paisagístico do Meio Natural e Rural)**. Secretaria de Estado de Planejamento e Coordenação Geral, Cuiabá, 1992.

SANTANA, J. C. F. de. **Características tecnológicas da fibra de duas cultivares de algodão armazenada em dois municípios paraibanos**. 2002. 48f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

SANTANA, J. C. F. de; WANDERLEY, M. J. R.; BELTRÃO, N. E. de M.; VIEIRA, D. J. Características da fibra e do fio do algodão: análise e interpretação dos resultados. In: BELTRÃO, N. E. de M. (Org.) **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, p.857-880, 1999.

SANTOS, A. C. dos; ANDRADE, A. P. de; SILVA, I. de F. da; AZEREDO, G. A. de. Variabilidade temporal da precipitação pluviométrica e rendimento do algodoeiro herbáceo em diferentes sistemas de manejo de solo e de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.36, n.2, p.123-129, 2006.

SAVAGE, M. J., EVERSON, C. S., METELERKAMP, B. R. Bowen ratio evaporation measurement in a remote montane grassland: Data integrity and fluxes. **Journal of Hydrology**, v.376, p.249-260, 2009.

SEDIYAMA, G. C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1987. 143p.

SEDIYAMA, G. C., Leal, B. G., Ribeiro, A., 1998: **Relações Clima-Água-Planta**. In: Manejo de Irrigação. Lavras, Suprema Gráfica e Editora, 368 p.

SENTELHAS, P. C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estações meteorológicas convencionais e automáticas**. 1998. 97f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

SHEN, Y.; ZHANG, Y.; KONDOH, A.; TANG, C.; CHEN, J.; XIAS, J.; SAKLLRA, Y.; LIU, C.; SUN, H. Seasonal variation of energy partitioning in irrigated lands. **Hydrological Processes**, v.18, p.2223-2234, 2004.

SILBERSTEIN, R. P.; SIVAPALAN, M.; VINEY, N. R.; HELD, A.; JATTON, T.J. Modelling the energy balance of a natural jarrah (*Eucalyptus marginata*) forest. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.115, p. 201-230, 2003.

SILVA, V. P. R., AZEVEDO, P. V., SILVA, B. B. Surface energy balance and evapotranspiration of a mango orchard grown in a semiarid environment. **Agronomy Journal**, v.99, p.1391-1396, 2007.

SILVA, V. de P. R. da; AZEVEDO, P. V. de; SILVA, B. B. da. Seasonal patterns of the energy balance components in a mango (*Mangifera indica* L.) orchard grown in Northeast Brazil. **Agricultural Journal**, v.1, n.1, p.18-23, 2006.

SILVA, B. B., RAO, T. V. R. The CWSI variations of a cotton crop in a semi-arid region of Northeast Brazil. **Journal of Arid Environ**, v.62, p.649-659, 2005.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem**. Engenharia Agrícola, v.25, n.3, p.705-712, 2005.

SILVA, B. B. da; BELTRÃO, N. E. de M.; RODRIGUES, M. F. G.; BEZERRA, J. R. C.; PEREIRA, J. R. Evapotranspiração do algodoeiro herbáceo no Cariri cearense. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO**, 4., 2003, Goiânia, GO. Anais... Campina Grande: Embrapa Algodão/Fundação GO, 2003. CD-ROM (Embrapa Algodão. Documentos, 118).

SILVA, V.P.R. **Estimativa das necessidades hídricas da mangueira**. Campina Grande: CDRN/UFPB, 2000, 129p. (Tese de doutorado).

SILVEIRA, P. M; STONE, L. F. Balanço de água na cultura do feijão em latossolo vermelho (LVA). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.14, p.111-115, 1979.

SIQUEIRA, A. A. **Avaliação do microclima em área de caatinga e área reflorestada com algaroba no semiárido**. Campina Grande, 1997, 87p. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal da Paraíba.

SLACK D. C., Marti E. D., Sheta A.E., Fox Jr F. A., Clark L. J., Ashley RO (1996) **Crop Coefficients normalized for climate variability with growing-degree-days**. In: Camp CR, Sadler EJ, Yoder RE (eds) ASAE proceedings of international conference on evapotranspiration and irrigation scheduling. San Antonio, TX, 3–6 Nov. St Joseph, MI.: ASAE pp 982–898

SMITH, M. Relatório sobre a consulta de peritos em matéria de procedimentos de revisão das metodologias da FAO para necessidades hídricas das culturas. Roma: FAO. 1991. 45p.

SOARES, J. M. **Consumo hídrico da videira Festival sob intermitência de irrigação no sub-médio São Francisco**. 2003. 309f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

SOARES, W. R. et al. Coeficientes de cultura no estágio de desenvolvimento inicial (Kcini) para diferentes texturas de solos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 21, n. 3, p. 218-226, set. 2001.

SOARES, A. A. Irrigação por aspersão e localizada. **Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior**. Curso de Engenharia e Manejo de Irrigação, módulo 4. Brasília, DF: ABEAS; Viçosa, MG: UFV, Departamento de Engenharia Agrícola, 1998. 86p.

SOUZA, C. B. DE; SILVA, B. B. DA; AZEVEDO, P. V. DE; SILVA, V. DE P. R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.400-407, 2008.

SOUSA, I. F. de. **Manejo de irrigação, consumo hídrico e produtividade do coqueiro anão verde nos Tabuleiros Costeiros norte do Estado de Sergipe**. 2005. 143f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

SOUZA, C. B. de. **Necessidades hídricas, crescimento e desenvolvimento do abacaxizeiro nos tabuleiros de Santa Rita – PB**. 2003. 124f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB.

SOUZA, C.C., OLIVEIRA, F.A., SILVA, I.F., AMORIM NETO, M.S., 2002. Evaluation of methods of determination of soil available water in cotton cultivation. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.37, n.3, p.337-341. (In Portuguese).

STEDUTO, P., HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes: IV. Validity of Bowen ratio-energy balance techniques for measurements water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.89, p.215-228, 1998.



TEIXEIRA, A. H.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; BASSOI, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin, Brazil. **Agricultural Water Management**, v.94, p.31-42, 2007.

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASSOI, L. H. B.; REIS, V. C. S.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, M. N. L.; MAIA, J. L. T. Estimativa do consumo hídrico da goiabeira, utilizando estações meteorológicas: automáticas e convencional. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.457-460, 2003.

TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação dos componentes do balanço de energia da cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.28-32, 2001.

TEIXEIRA, A. H. C.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SOARES, J. M. Balanço de energia na cultura da videira, cv. Itália. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.2, p.137-41, 1997.

THORNTHWAITE, C. W. **Na approach toward a rational classification of climate**. Geophysical Review, v.38, p.55-94, 1948.

TODD, R. W., EVETT, S. R., HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfafa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.130, p.335-348, 2000.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1992. 374p.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Brasília: INMET, Pax, p. 445-508, 2001.

VAREJÃO SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)**. Brasília. 2000.

VILLA NOVA, N.A. **Principais métodos climáticos de estimativa de aplicação de água de irrigação**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Física e Meteorologia, 1983. 22p.

VERMA, S. B.; ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L. Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v.17, p.330-338, 1978.

WANG, J.; BRAS, R. L. Effect of temperature on surface energy balance. **Water Resources Research**, Washington, v.37, n.12, p.3383-3386, 2001.

WENDEL, J. F.; CRONN, R. C. Polyploidy and the evolutionary history of cotton. **Advances in Agronomy**, n.78, p. 140-231, 2003.

WRIGHT, J. L., and M. E. JENSEN. Peak water requirements of crops in southern Idaho. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, ASCE, v.96 (IR1), p.193-201, 1972.

ZHANG, B.; KANG, S.; LI, F.; ZHANG, L. Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, n.10, p.1629-1640, 2008.