



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS – UACA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA – PPGMET**



**ALÉCIO RODRIGUES PEREIRA**

**DISSERTAÇÃO**

Evapotranspiração da cultura do gergelim irrigada na região da chapada do Apodí-RN

**Área de concentração:** Agrometeorologia e Micrometeorologia

**Linha de pesquisa:** Necessidades Hídricas das Culturas

**Orientador:** Prof. Dr. Pedro Vieira de AZEVEDO

**Campina Grande – PB**  
**Abril de 2016**  
**ALÉCIO RODRIGUES PEREIRA**

## DISSERTAÇÃO

### EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO GERGELIM IRRIGADA NA REGIÃO DA CHAPADA DO APODI-RN

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento as exigências para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

**Área de concentração:** Agrometeorologia e Micrometeorologia

**Linha de pesquisa:** Necessidades Hídricas das Culturas

**Orientador:** Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo

**Grande – PB**  
**Abril de 2016**

ALÉCIO RODRIGUES PEREIRA

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CULTURA DO GERGELIM IRRIGADA NA  
REGIÃO DA CHAPADA DO APODÍ-RN

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 13/04/2016

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. PEDRO, VIEIRA DE AZEVEDO  
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. LUCIANO MARCELLO FALLÉ SABOYA  
Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola  
Centro de Tecnologia de Recursos Naturais  
Universidade Federal de Campina Grande

**Campina Grande – PB**  
**Abril de 2016**

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais  
José de Assis e Maria Lucia.*

*A minhas irmãs Elaine e Edlaine.*

*Aos demais familiares.*

*Aos meus amigos.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus**, autor da vida e de todo conhecimento, por sempre cuidar de mim, por iluminar os meus pensamentos e todo o meu ser.

Aos meus pais **José de Assis** e **Maria Lucia** e irmãs **Elaine** e **Edlaine** por sempre estarem comigo em todos os momentos da minha vida e pela força e confiança em mim depositada.

Ao meu cunhado **Marcio Ranielyson** pela sua amizade e companheirismo de um verdadeiro irmão.

A toda **minha família** por participar de minha vida de forma ímpar e peculiar.

A **Universidade Federal de Campina Grande** por me conceder a oportunidade de estudar.

Agradeço ao meu orientador **Pedro Vieira de Azevedo** e a colaboração de **José Renato Cortez Bezerra** e **Luciano Marcelo Fallé Saboya**, pelo conhecimento a mim transmitido. Sem os ensinamentos fundamentais dos senhores esse trabalho não teria sido possível.

Aos **professores** do curso de mestrado em Meteorologia, por me instruírem e com seus ensinamentos me capacitarem.

A todos os **funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas e Programa de Pós-Graduação em Meteorologia**, que com seus trabalhos e árduos esforços fazem o funcionamento de todo o centro, tornando-se pedras angulares de preciosíssimo valor.

Ao **CNPq** pela concessão da bolsa de estudo, contribuindo, desse modo, na minha capacitação profissional.

A **Embrapa Algodão** por viabilizar o projeto, além do serviço que presta a toda a sociedade brasileira.

A **EMPARN**, pelo seu apoio único e fundamental para a execução desta pesquisa.

A **Elloise Rackel** pelo seu companheirismo durante todo o experimento.

As minhas queridas amigas **Adriana e Gabriela** por sempre me acompanharem nessa jornada e pelo incentivo, sobretudo, nas horas em que mais precisei. Vocês são extraordinariamente maravilhosas. Obrigado!

A **banca examinadora** pela atenção dada ao trabalho e pela sua valorosa contribuição para um maior aperfeiçoamento do mesmo.

*As dificuldades da vida  
Não devem ser motivo de desespero,  
Mas sim oportunidades de nos tornarmos  
Pessoas vitoriosas...  
A vida é uma aventura  
Em que os dias são páginas  
E os meses capítulos nos quais  
Podemos deixar registrado  
Uma linda história de amor  
(Alécio Rodrigues)*

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	i
LISTA DE FIGURAS .....	ii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	iii
RESUMO .....	v
ABSTRACT .....	vi
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1 A cultura do gergelim.....	5
2.2 Relação radiação-planta-água .....	7
2.3 Necessidades hídricas da cultura.....	9
2.4 Balanço de energia .....	11
2.5 Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).....	14
2.6 Evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ).....	15
2.7 Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).....	17
3. METODOLOGIA .....	19
3.1. Área Experimental.....	19
3.2. A cultura .....	20
3.3. Tratos Culturais.....	20
3.4. Sensores e parâmetros meteorológicos mensurados .....	20
3.5 Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).....	22
3.6 Transmissividade radiativa da atmosfera ( $K_t$ ).....	22
3.7 Evapotranspiração da cultura pelo balanço de energia ( $ET_{c_{BERB}}$ ).....	23
3.8 Coeficiente de cultivo.....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1 Fenologia do gergelim.....	27
4.2 Comportamento das variáveis climatológicas na área experimental .....	27
4.3 Comportamento dos componentes do balanço de energia.....	29
4.4 Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) e irrigação (I).....	33
4.5 Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ).....	39
5. CONCLUSÕES .....	42
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43



## LISTA DE TABELAS

Tabela		Página
3.1	Análise textural do solo na área experimental.....	19
3.2	Características químicas do solo na área experimental em Apodi-RN....	20
3.3	Características e fator de calibração dos sensores e datalogge.....	22
3.4	Condições para satisfazer o método da razão de Bowen, sob condições não advectivas, para que os dados possam ser considerados consistentes.....	25
3.5	Tipos de erros em que o método da razão de Bowen é considerado inconsistente.....	25
4.1	Ciclo fenológico do gergelim (BRS ANAHÍ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi – RN.....	27
4.2	Análise de consistência física dos dados coletados para realização do cálculo do balanço de radiação pelo método da razão de Bowen.....	30
4.3	Valores médios das componentes do balanço de energia e da partição do saldo de radiação (Rn) em fluxo de calor latente (LE/Rn), calor sensível do ar (H/Rn) e fluxo de calor no solo (G/Rn) para as diferentes fases fenológicas da cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi – RN.....	33
4.4	Evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ) médios e totais para cada fase fenológica do gergelim (BRS ANAHÍ) em Apodi -RN.....	36
4.5	Evapotranspiração da cultura (ET <sub>c</sub> ) médios e totais para cada fase fenológica do gergelim (BRS ANAHÍ) em Apodi-RN.....	37
4.6	Lâmina de água aplicada a cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) e seu efetivo consumo em Apodi-Rn.....	39

## LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
3.1	Localização do município de Apodi – RN e área experimental.....	19
3.2	Torre micrometeorológica com visualização dos sensores instalados.....	21
4.1	Comportamento da temperatura máxima e mínima (°C), umidade relativa (%), precipitação (mm d <sup>-1</sup> ) e velocidade do vento a 10 m de altura (m s <sup>-1</sup> ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi RN.....	28
4.2	Comportamento da transmissividade atmosférica (Kt) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi – RN.....	31
4.3	Valor médio horários dos componentes do balanço de energia na cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN.....	32
4.4	Valor médio diário dos componentes do balanço de energia na cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi – RN.....	32
4.5	Evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> , mm d <sup>-1</sup> ) e transmissividade atmosférica no período 11/08 a 31/10/2015 em Apodi – RN.....	34
4.6	Evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> , mm d <sup>-1</sup> ) e temperatura média do ar (°C) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN.....	35
4.7	Evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> , mm d <sup>-1</sup> ) e velocidade do vento a 10 m de altura (m s <sup>-1</sup> ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN.....	35
4.8	Evapotranspiração da cultura (ET <sub>c</sub> , mm d <sup>-1</sup> ) do gergelim (BRS ANAHÍ) irrigado no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN.....	37
4.9	Evapotranspiração da cultura (ET <sub>c</sub> , mm d <sup>-1</sup> ) do gergelim (BRS ANAHÍ) irrigado e evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> , mm d <sup>-1</sup> ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN.....	38
4.10	Percentual de água aplicada em cada fase fenológica da cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) em Apodi-RN.....	39
4.8	Coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ), coeficiente de cultivo médio (K <sub>c</sub> médio) e coeficiente de cultivo recomendado pela FAO 56 para a cultura do gergelim no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN.....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

### GREGOS

A	Albedo da superfície
B	Razão de Bowen
$\gamma$	Fator psicrométrico
$\Delta$	Inclinação da curva de pressão de saturação de vapor d'água
E	Razão entre as massas moleculares da água e do ar seco
$\lambda$	Calor latente de vaporização

### LATINOS

BERB	Balço de energia baseado na razão de Bowen
$C_p$	Calor específico do ar seco à pressão constante
D	Distância terra–sol para determinado dia do ano
D'	Distância terra–sol
DAE	Dia após a emergência
E	Pressão de vapor d'água
e(t)	Pressão parcial de vapor d'água
$e_s$	Pressão de saturação do vapor d'água
$e_s(t_u)$	Pressão de saturação de vapor d'água correspondente à temperatura $T_u$
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPARN	Empresa Agropecuária de Pesquisa do Rio Grande do Norte
ETc	Evapotranspiração da cultura
ET0	Evapotranspiração de referência
ET <sub>CBEB</sub>	Evapotranspiração da cultura pelo balanço de energia
FAO	Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação
G	Fluxo de calor no solo
H	Fluxo diário de calor sensível

I	Irrigação
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
$K_c$	Coeficiente da cultura
$K_h$	Coeficiente de difusão turbulenta de calor sensível
$K_t$	Transmissividade radiativa da atmosfera
$K_v$	Coeficiente de vapor d'água
L	Calor latente de vaporização da água
LE	Fluxo de calor latente
P	Energia utilizada no processo fotossintético
Pr	Precipitação pluvial
$P_o$	Pressão atmosférica local
Ra	Radiação solar global no topo da atmosfera
Rn	Saldo de radiação à superfície
$R_{si}$	Radiação solar incidente
$R_{sr}$	Radiação solar refletida
S	Energia armazenada na copa das árvores
$S_o$	Constante solar
Tmax	Temperatura máxima do ar
Tmin	Temperatura mínima do ar
Ts	Temperatura do ar seco
Tu	Temperatura do ar úmido
UR	Umidade relativa do ar
V	Velocidade do vento a 2 m de altura
Z	Ângulo Zenital
$\Delta e$	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

## RESUMO

O experimento foi realizado 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 gergelim irrigado (*Sesamum indicum* L.), cultivar BRS ANAHÍ. Foi conduzido durante a estação seca do ano de 2015, entre os meses de agosto, setembro e outubro. Uma torre micrometeorológica instalada na área de cultivo abrigou os seguintes instrumentos para determinação dos componentes do balanço de energia: um saldo radiômetro, dois piranômetros, dois psicrômetros, dois fluxímetros, dois anemômetros e um datalogger. Na estimativa da necessidade hídrica da cultura foi empregado o método do balanço de energia baseado na razão de Bowen (BREB). A evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) e o coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>) foram obtidas para as condições climáticas da Chapada do Apodi. A evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) foi estimada pelo método de Penman-Monteith utilizando os dados meteorológicos, obtidos na estação automática do INMET, em Apodi-RN. Os resultados evidenciam que, em relação ao saldo de radiação (R<sub>n</sub>), os fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e calor no solo (G) corresponderam a 81,3%, 17,7% e 0,4%, respectivamente. Com a evolução da cobertura do solo pela cultura a fração do saldo de radiação utilizada como fluxo de calor latente aumentou, enquanto que aquela utilizada como fluxo de calor sensível diminuiu. A ET<sub>c</sub> acumulada ao longo da estação de cultivo foi de 566,2 mm, correspondendo a uma média de 6,9 mm dia<sup>-1</sup>. A Fase III (desenvolvimento reprodutivo da cultura) apresentou maior demanda hídrica, com média de 8,0 mm dia<sup>-1</sup>. Os valores do K<sub>c</sub> foram: 0,6 no estágio inicial, 0,9 no estágio médio e 0,8 no estágio final. O valor do K<sub>c</sub> médio determinado experimentalmente foi inferior àquele recomendado pela FAO-56 nas Fases: I (emergência), II (desenvolvimento vegetativo) e III (desenvolvimento reprodutivo), enquanto que na Fase IV (frutificação e maturação) foi superior.

**Palavras Chave:** Necessidade hídrica da cultura, Coeficiente de cultivo, Razão de Bowen.

## ABSTRACT

The experiment was conducted in the Apodi Chapada, west of Rio Grande do Norte, in experimental station EMPARN - Agricultural Research Company of Rio Grande do Norte, Located in the municipality of Apodi -RN. The objective of the research was to determine the water requirements of irrigated sesame (*Sesamum indicum* L.), grow crops BRS ANAHÍ. It was conducted during the dry season 2015 year, between the months of August, September and October. A micrometeorological tower installed in the growing area housed the following instruments for the determination of the components of energy balance: a net radiometer, two pyranometer two psychrometers, two soil heat flux plates, two anemometers and one datalogger. In estimating the water requirement of the crop was used the Bowen Ratio energy balance method (BREB). The crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) and the crop coefficient (K<sub>c</sub>) were obtained for the climatic conditions of Apodi Chapada. The reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) was estimated by the Penman-Monteith method using meteorological data, obtained in the weather station of INMET, in Apodi-RN. The results show that, compared to net radiation (R<sub>n</sub>), the latent heat flux (LE), sensible heat (H), and soil heat flux (G) corresponds to 81.3%, 17.7% and 0.4%, respectively. With the evolution of the soil covered by the crop the fraction of net radiation used as latent heat flux increased, while the one used as sensible heat flux decreased. A ET<sub>c</sub> accumulated during the growing season was 566.2 mm, corresponding to an average of 6.9 mm day<sup>-1</sup>. Phase III (reproductive development of culture) showed higher water demand, with 8.0 mm day<sup>-1</sup>. The values K<sub>c</sub> were: 0.6 at the initial stage, 0.9 in the middle stage and 0.8 in the final stage. The value of the average determined experimentally K<sub>c</sub> It was lower than that recommended by the FAO-56 in phases: I (emergency), II (vegetative growth) and III (reproductive development) while Stage IV (fruit set and ripening) was higher.

**Key Words:** Crop water requirement, crop coefficient, Bowen ratio.

## 1. INTRODUÇÃO

A água e a energia solar são recursos de extrema necessidade para a vida dos seres vivos e seu uso de forma sustentável para as práticas agrícolas tem sido muito pesquisado nos últimos anos. O conhecimento das necessidades hídricas das culturas é de extrema importância para identificar a quantidade de água que a planta necessita em seu desenvolvimento potencial, com obtenção do maior rendimento possível. A água chega ao solo por precipitação ou irrigação. A região Nordeste do Brasil (sujeita a massas de ar quentes e secas, oriundas da África) é a mais deficiente em chuvas, apresentando uma média anual inferior a 1000 mm de água (Biscaro, 2007).

O clima, devido a sua imprevisibilidade, é o fator de produção agrícola de mais difícil controle e de maior impacto quando se deseja a obtenção de máximas produtividades de uma determinada cultura (Ayoade, 2006). Consequentemente, as adversidades climáticas são o principal fator de risco e de insucesso na exploração agrícola, ocasionando assim, redução do rendimento da lavoura ou restrição à implantação de espécies de importância econômica em determinados locais e/ou época do ano. As variáveis climatológicas exercem influência sobre todos os estágios da cadeia de produção agrícola, incluindo a preparação da terra, semeadura, crescimento dos cultivos, colheita, armazenamento, transporte e comercialização (Ayoade, 2006). Logo o conhecimento do comportamento das variáveis climatológicas predominantes nas regiões produtoras é de suma importância para a prática agrícola.

As mais diversas atividades antrópicas, principalmente atividades agropecuária e processo de industrialização de produtos originados dessa atividade, requerem o uso de água em praticamente todo o seu processo produtivo, entretanto a água doce é um recurso natural finito, cuja qualidade vem piorando devido ao aumento da população e a ausência de políticas públicas voltadas para a sua preservação (Merten e Minella, 2002). Em virtude disso, nas últimas décadas, as questões ambientais têm sido discutidas, pesquisadas e submetidas aos mais diversos sistemas legais em todo o mundo com o objetivo principal de resgatar a qualidade de vida no planeta (Irias et al., 2004). Logo o uso racional da água na agricultura, na prática da irrigação, tendo como base a necessidade hídrica da cultura é imprescindível para uma agricultura sustentável.

A região Nordeste do Brasil sofre com a irregularidade de chuvas interanuais. Segundo Silva et al. (2005a), ao longo dos anos, essa região tem enfrentado grandes problemas em decorrência da irregularidade do seu regime pluvial, atingindo,

principalmente, a agricultura e a hidrologia. O Rio Grande do Norte sofre com essa irregularidade, onde se faz necessário o uso da técnica de irrigação em determinadas culturas ao longo dos seus estágios fenológicos em decorrentes épocas do ano. A irrigação possui o papel de suprir a demanda hídrica da cultura e possui alto potencial para aumentar a produtividade de culturas (Jordan et al., 2012).

No Brasil, o cultivo do gergelim (*Sesamum indicum* L.) tem sido encontrado na maioria dos estados nordestinos, em São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso. O país se caracteriza como pequeno produtor de gergelim com rendimento médio de 600 kg ha<sup>-1</sup>, onde produz 15 mil toneladas em uma área de 25 mil hectares (FAO, 2005). O gergelim tem um grande potencial econômico e nos últimos anos vem recebendo um importante estímulo no mercado brasileiro. Com o recente incentivo do governo Federal, em utilizar o biodiesel na matriz energética nacional, as oleaginosas surgem como fonte de energia renovável com a finalidade de preservação do meio ambiente (Mesquita et al., 2013). Um dos exemplos é a mudança em 2010 do Ministério de Desenvolvimento Agrário (MDA) na regra do benefício fiscal do Selo Combustível Social do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), cuja mudança consiste em um incentivo à diversificação da produção de oleaginosas, incentivando o cultivo do gergelim e da mamona, oferecendo ótimos benefícios a quem adquirir a produção dos agricultores rurais dessas culturas.

O Gergelim é uma cultura apreciada e cultivada na região Nordeste do Brasil, principalmente na agricultura familiar, tendo em vista que é uma cultura adaptada ao clima da região e tem sido uma excelente opção para ser cultivada em consórcio com outras culturas. Segundo Barros et al. (2001) e Firmino et al. (2000), devido aos preços compensadores, facilidade de cultivo e amplas possibilidades de bons rendimentos o seu cultivo é uma alternativa significativa para o semiárido nordestino. Além disso, as sementes são muito utilizadas em produtos alimentícios e a elevada qualidade do óleo da semente, bem como a sua alta concentração, favorece a aplicação do gergelim na indústria química de óleos e farmacêutica (Arriel et al., 2007).

Dentre as culturas oleaginosas, o gergelim apresenta uma produtividade inferior, mas devido à produção do óleo de grande qualidade, oferece fontes de lucro ao pequeno e médio produtor. O seu cultivo merece um grande incentivo devido à sua ampla adaptabilidade às condições edafoclimáticas dos locais de clima quente, bom nível de resistência à seca e por representar uma excelente opção agrícola ao alcance do pequeno e médio produtor, exigindo práticas agrícolas simples e de fácil assimilação (Arriel et



al., 2009). O teor de óleo presente no gergelim representa entre 44 a 58% do peso das sementes. Os grãos de gergelim, além de serem usados como excelente fonte de óleo, também é utilizado nas produções de farinhas, farelos, tortas e produtos de confeitaria (Savy Filho e Banzatto, 1988). A demanda pelo gergelim, por parte dos produtores, gera a necessidade de que sejam identificadas cultivares com alto rendimento e teor de óleo, assim, o gergelim é uma alternativa para a integração do sistema produtivo e torna-se competitivo com outras oleaginosas (Amabile et al., 2001). No Nordeste brasileiro, a cultura do gergelim teve a exploração comercial iniciada em 1986, com a diminuição do cultivo do algodão. Antigamente, o gergelim era plantado como uma alternativa pouco comerciável e não existia uma cultivar definida para as condições edafoclimáticas para o Nordeste. A Embrapa Algodão e seus parceiros desenvolveram estudos de melhoramento genético, contribuído para o estudo da adaptabilidade e da estabilidade de genótipos, para obter alta produtividade, entre eles se destacam as BRS Seda, CNPA G2 e CNPA G3.

A radiação, por ser um fator meteorológico que influencia o tempo e o clima, pode-se afirmar que de maneira geral todos os fenômenos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos ocorridos no solo estão direta ou indiretamente relacionados com a quantidade de radiação solar incidente sobre a sua superfície (Leitão et al., 2000). Logo a radiação interfere nos mais variados fenômenos agrometeorológicos e uma vez obtido o saldo radioativo fica definido a quantidade de energia que fica disponível a cultura, aos microrganismos e processos ocorrentes no solo.

O balanço de energia com base na razão de Bowen ( $\beta$ ) é um método indireto que determina a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ) por meio da quantificação do fluxo do calor latente durante o ciclo fenológico da cultura em escala horária ou diária, tornando-se ferramenta indispensável ao manejo racional da irrigação (Moura et al., 2007). Além disso, o método da razão de Bowen é amplamente utilizado por possibilitar a estimativa dos fluxos de energia diretamente no campo, sem alteração do meio, a partir de medidas do saldo de radiação, fluxo de calor no solo e dos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água do ar (Liu e Foken, 2001; Betts et al, 2007; Souza et al., 2008). Além da razão de Bowen, que possibilita a determinação da evapotranspiração da cultura, é imprescindível a determinação da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) e do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para diferentes localidades, culturas e cultivares, uma vez que a combinações desses fatores determinam a necessidade hídrica da cultura avaliada de acordo com as condições climáticas de onde está sendo cultivada.

Face ao exposto, a presente pesquisa teve por objetivos:

**Geral:** Determinar o consumo hídrico da cultura do Gergelim na região da Chapada do Apodi-RN.

**Específicos:**

- a) Avaliar o comportamento dos componentes do balanço de energia na cultura do Gergelim;
- b) Avaliar a evapotranspiração da cultura do Gergelim;
- c) Avaliar o comportamento do coeficiente de cultivo do gergelim.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 A cultura do gergelim**

O gergelim (*Sesamum indicum* L.), também conhecido por sésamo, é uma planta herbácea que tem como centro de origem a África, onde se concentra a maioria das espécies silvestres do gênero *Sesamum* (Lima et al., 2013). Pertence à família das pedaliáceas, sendo que, a planta pode crescer como pequeno arbusto, podendo chegar até a altura de 1,8 m, com hábito de crescimento ramificado ou não. As folhas da parte alta possuem pontas lanceoladas e as mais baixas são mais largas, arredondadas ou dentadas (Epstein, 2000). As flores apresentam colorações alvas, róseas ou vermelhas, do tipo hermafroditas e dispostas nas axilas das folhas. O fruto é do tipo cápsula de forma oblonga e pubescente. As sementes são pequenas de forma arredondadas e levemente comprimidas, apresenta cor amarela, alva ou preta e contém óleo que é utilizado em uma infinidade de produtos alimentícios, farmacêuticos e cosméticos, além de ser potencialmente uma fonte de energia renovável.

O gergelim requer precipitação pluvial entre 300 a 800 mm anual e altitude abaixo de 500 m (Embrapa, 2000). Silva et al. (2013) destacam que a espécie se desenvolve melhor em solos profundos com textura franca, bem drenados, de boa fertilidade natural e possui intolerância a salinidade. O pH do solo deve ser neutro, em torno de 7, tendo em vista que a cultura é extremamente sensível à acidez e à alcalinidade (Grilo Júnior e Azevedo, 2013). Em condições ambientais a cultura do gergelim completa o seu ciclo entre 3 a 4 meses, por apresentar frutos deiscentes, isso é, que se abrem naturalmente na maturação e deixa cair às sementes, a colheita requer cuidados específicos para evitar as perdas no campo (Epstein, 2000).

Em virtude de ter sido cultivado ao longo de muitos anos e mediante o seu uso para diferentes fins é uma cultura muito apreciada no mercado internacional, é a oleaginosa mais antiga usada pela humanidade e atualmente é a nona mais cultivada no mundo (Mesquita et al., 2013). A importância mundial de gergelim em grão apresenta tendência crescente no mercado mundial que aumentou de 653,149 mil toneladas em 1997 para 726,05 mil toneladas em 2001, já os volumes exportados aumentaram de 676,789 mil toneladas para 759,770 mil toneladas no mesmo período (Barros et al., 2001). O gergelim surge como uma alternativa para a produção de biocombustíveis, uma vez que a cultura é uma alternativa para o sistema produtivo, podendo competir com outras oleaginosas, devido à facilidade de manejo e obtenção de sementes e,

principalmente, devido ao fato de suas sementes conterem cerca de 50% de óleo de excelente qualidade (Araújo et al., 2006). Outra característica peculiar do óleo de gergelim é sua função de ativador de certas substâncias inseticidas, como a rotenona e a piretrina, dentre outras, cujos efeitos tóxicos são aumentados em presença do óleo de gergelim, sendo que essa propriedade não foi encontrada em outros 14 tipos de óleos, esse efeito é atribuído principalmente à sesamina contida no óleo de gergelim (Silva, 1993).

No Brasil a planta foi introduzida por portugueses, via colônias indianas, no século XVI (Beltrão, 2001a). Ao longo dos anos foi muito cultivado pela agricultura familiar, onde segundo Queiroga et al. (2007) tem sido utilizado basicamente as sementes como fonte de matéria prima para produtos artesanais, exercendo, portanto, uma apreciável função econômica e social, uma vez que é cultivado basicamente para a produção de grãos (Arriel et al., 2007). O Brasil ainda é considerado como um pequeno produtor, entretanto após o incentivo dos últimos anos para que sejam encontradas fontes de energia renováveis o gergelim tem sido visto como grande potencial para esse fim, sendo avaliado em diferentes pesquisas e sua produção e produtividade crescente ao longo dos anos. O rendimento médio do grão no país gira em torno de 650 kg ha<sup>-1</sup>, porém o seu potencial produtivo pode chegar a 1.500 kg ha<sup>-1</sup> (Oliveira, 2005) e de acordo com Barros et al. (2001) a possibilidade de exportação de óleo para a comunidade Europeia, Japão, Israel e outros países possibilitará uma maior projeção do produto brasileiro no mercado internacional.

Uma das grandes vantagens do cultivo do gergelim, principalmente na região semiárida, está no seu baixo consumo de água. Essa particularidade promove um grande destaque dessa cultura em relação a qualquer outra de mesma natureza, pois é notória que a escassez de água na região é a grande dificuldade na inserção dos produtores de maneira significativa no mercado agrícola nacional (Gomes et al., 2014). Entretanto, apesar de ser uma cultura de baixa necessidade hídrica, a falta de água, dependendo do período em que ocorre e levando-se em conta o estágio fenológico da planta, da cultivar e das condições do ambiente, pode levar à redução significativa do crescimento da planta, ocasionando redução na produtividade (Beltrão et al., 2001b). Logo, em determinadas regiões e épocas do ano, faz-se necessário o emprego da irrigação para que a cultura expresse seu melhor potencial, uma vez que a água é um dos fatores indispensáveis para a produção agrícola, devendo se ter a máxima atenção para com seu uso, uma vez que sua falta ou excesso afeta de forma significativa o rendimento das

culturas (Silva et al., 2011a). Dentre os diversos usos dos recursos hídricos a irrigação destaca-se pela sua importância socioeconômica, principalmente em regiões agrícolas áridas e semiáridas, onde é praticada para suplementar a precipitação natural no atendimento das necessidades hídricas das culturas (Farias et al., 2000).

Nas condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro, o gergelim é facilmente cultivado e obtém ótima produção a um custo relativamente baixo (Beltrão, 2001b). Além disso, é uma cultura que se insere tanto nos tradicionais sistemas de cultivo como na agricultura sustentável e orgânica, podendo ser usada em rotação, sucessão e consórcios com outras culturas (Beltrão et al., 2009). Apesar disso, de acordo com Arriel et al. (2007) a comercialização do gergelim nessa região é bastante pulverizada e de difícil organização, principalmente por ser proveniente de pequenos agricultores, fazendo-se necessário uma melhor organização e incentivo governamental para elevar a sua produção.

## **2.2 Relação radiação-planta-água**

A radiação emitida pelo Sol é um fator primordial para que haja vida em nosso planeta. O Sol é uma estrela constituída por cerca de 71% de hidrogênio, 26% de hélio e a mistura dos demais gases, presentes em pequenas quantidades, representam 3%. Sua superfície é denominada fotosfera, possui um diâmetro de aproximadamente  $1,3914 \times 10^5$  Km (Giacomoni, 2005) e localiza-se a uma distância de 150 milhões de quilômetros do planeta terra. Em seu interior ocorrem intensas reações termonucleares que geram a radiação e, por sua vez, se propagam por meio de ondas eletromagnéticas. É composta por um conjunto de radiações cujos comprimentos de onda variam de forma mais ou menos contínua, variando de 0,2 a 4 micras, tendo o conjunto de radiação o nome de espectro solar (Mota, 1976).

A intensidade e quantidade dos raios solares variam de acordo com a hora do dia, época do ano e localizações de altitude e longitude que se encontra um determinado ponto (Mota, 1976), afeta diretamente o crescimento e desenvolvimento das plantas e ainda é fonte de energia para os microrganismos do solo. Por ser um fator meteorológico que influencia o tempo e o clima, pode-se afirmar que de certa maneira todos os fenômenos físicos, químicos, físico-químicos e biológicos ocorridos no solo estão direta ou indiretamente relacionados com a quantidade de radiação solar incidente sobre a superfície (Leitão et al., 2000), logo interfere nos mais variados fenômenos meteorológico e climático. O conhecimento da radiação acerca da sua variabilidade tem

aplicabilidade em diversas áreas científicas, como meteorologia, agricultura, hidrologia e, ainda, como indicador da variabilidade climática (Lohmann et al., 2006).

A radiação afeta as mais diferentes culturas agrícolas em diferentes estágios de desenvolvimento, atua desde a germinação das sementes até a fase de maturação e senescência dos frutos. Radiação próximo a 1 micrón é importante para o fotoperiodismo, germinação da semente, controle de floração e coloração do fruto (Mota, 1976). Já a radiação em torno de 0,61 e 0,72 micrón gera forte atividade fotossintética, apresentando em vários casos também forte atividade fotoperiódica (Mota, 1976). Existem as plantas tidas como de dias curtos e outras de dias longos, dessa forma a radiação é um parâmetro meteorológico que precisa ser avaliado na escolha de uma determinada cultura e na época em que deve ser plantada, além disso, segundo Carvalho Filho et al., (2010) os fatores que afetam as taxas de evapotranspiração dos cultivos agrícolas podem ser enquadrados em três categorias, são eles os fatores climáticos, da planta e do solo, sendo que, entre os fatores climáticos destaca-se a radiação como um dos principais agentes influenciadores na intensidade da evapotranspiração. Logo a radiação é importante e influencia todas as fases de desenvolvimento de diversas culturas de importância econômica. A radiação incidente sobre o solo influenciará a sua temperatura e segundo Gasparim et al. (2005), a temperatura do solo tem efeitos diretos no desenvolvimento da planta, pois a semente não germina até que o solo alcance uma temperatura crítica, assim como o desenvolvimento normal da planta também necessita de uma temperatura adequada.

A radiação solar incidente sobre a vegetação influencia na armazenagem de glicose, crescimento das plantas e atua diretamente sobre a temperatura do ar no dossel, que, por sua vez, governa as taxas dos processos bioquímicos e de evapotranspiração (Burba e Verma, 2005; Querino et al., 2006). Tanto o excesso de radiação, incidência acima do limite tolerável para uma cultura, como a falta, incidência abaixo do limite desejável, é prejudicial à cultura, causando redução de produção e até mesmo inviabilização da implantação de uma determinada cultura em determinada região e/ou época do ano. Dessa forma, os estudos sobre o balanço de energia de superfícies agrícolas são desenvolvidos com propósito de avaliar os mecanismos de desenvolvimento que afetam e melhoram a produção (Hayashi, 2002; Farias et al., 2004).

Os processos radiativos ocorrentes na superfície terrestre são de grande importância para a redistribuição de umidade e calor no solo e na atmosfera

(Bastiaanssen et al., 2005). Logo o estudo do fluxo de energia é de grande importância no desenvolvimento das culturas (Neves et al., 2008). Possui importância no ciclo hidrológico, uma vez que, quanto maior for a incidência dos raios solares maior será a evapotranspiração da água. Em solos descobertos ocorre a evaporação, isso é, a água líquida do solo ao receber calor latente converte-se em vapor e passa para a atmosfera, já em áreas onde a vegetação se faz presente ocorre a evapotranspiração, combinação de dois processos separados onde a água é perdida da superfície do solo por evaporação e perdida pela vegetação através de transpiração. Em solos descobertos ou com pouca vegetação ocorre o predomínio da evaporação, já em solos parcialmente ou totalmente coberto pela vegetação predomina a transpiração. A água perdida, do conjunto solo e planta, vai para a atmosfera compor a formação de nuvens e, conseqüentemente, chuvas, dando prosseguimento ao ciclo hidrológico.

A escassez de chuva pode ser totalmente ou parcialmente amenizada com a prática da irrigação, no entanto, é preciso ter conhecimento da relação custo e benefício, pois muitas vezes fica inviável economicamente cultivar algumas culturas em determinadas localidades, uma vez que diversas regiões do país apresentam alta intensidade de radiação em praticamente todo ano, o que reduz o turno de rega, aumenta a necessidade da quantidade de água irrigada e dessa forma onera o custo da produção. Portanto, a relação radiação-planta-água de maneira alguma pode ser desconsiderada em meio a um mundo que exige cada vez mais uma agricultura que apresente alta produtividade, qualidade e sustentabilidade.

### **2.3 Necessidades hídricas da cultura**

A água é um componente vital ao desenvolvimento normal da cultura de tal forma que tanto o excesso como a sua escassez reduzem a produtividade da cultura agrícola e, conseqüentemente, resulta em danos econômicos.

A região semiárida, devido à distribuição irregular de chuvas, apresenta longos períodos de seca em torno do ano, onde, muitas vezes, faz-se necessário o emprego da irrigação para suplementar a necessidade hídrica da cultura. Logo a determinação precisa da evapotranspiração da cultura (ETc) é de grande importância para o uso eficiente da água, principalmente em regiões áridas e semiáridas (Figueiredo et al., 2009).

A necessidade hídrica da cultura é determinada a partir das perdas de água do solo, pelo processo de evaporação, e da planta, pelo processo de transpiração, para a

atmosfera. Como esses processos ocorrem simultaneamente e são de difícil separação, temos que, a partir da evapotranspiração se estima a necessidade hídrica da cultura. 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 (Doorenbos e Kassam, 2000).

A estimativa do consumo hídrico de áreas que têm coberturas vegetadas a partir do método do balanço de energia baseia-se 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. Outros métodos também são utilizados para determinar a necessidade hídrica da cultura, por meio de lisímetros ou evapotranspirômetros, que consistem em tanques vegetados onde são contabilizadas as entradas e saídas de água no seu interior, considerado como método padrão por muitos pesquisadores. A escolha do método baseia-se na disponibilidade de equipamentos e na precisão requerida na determinação do consumo hídrico da cultura (Sediyama, 1987).

A importância do correto manejo da irrigação a partir do conhecimento da necessidade hídrica da cultura consiste no fornecimento da quantidade de água que a planta verdadeiramente necessita. O gergelim é sensível ao encharcamento e de acordo com Weiss (1983) o excesso de umidade em qualquer estágio do desenvolvimento da cultura aumenta a incidência de doenças fúngicas, reduzindo sua produtividade e Langham et al. (2006) defendem que o gergelim é uma das culturas mais tolerantes à seca do mundo, entre tanto, as mais altas produtividades são obtidas quando a cultura se desenvolve sob condições irrigadas, principalmente nas regiões áridas.

Uma vez obtido o que o conjunto planta-solo perde de água por evapotranspiração, estima-se a necessidade hídrica da cultura e a quantidade de água a ser aplicada no processo de irrigação, onde, será fornecido à quantidade que a cultura realmente demanda, evitando-se, dessa forma, o uso excessivo de um recurso natural finito (água) ou a aplicação inferior à quantidade que a cultura demanda. Logo a determinação das necessidades hídricas das culturas, em seus diferentes estágios de desenvolvimento, é uma etapa importante para o manejo de irrigação (Amorim Neto et al., 1996). Sendo que para o gergelim a máxima absorção de água ocorre no



florescimento e após este período decresce gradualmente (Sesaco, 2012). De acordo com Chandrakar et al. (1994) para a cultivar Selection 5, cultivado na Índia, a eficiência de uso da água diminuiu gradativamente de 0,5; 0,4 e 0,3 Kg m<sup>-3</sup> com aumento do volume de irrigação aplicado em 234, 374 e 514 mm, respectivamente.

Em um estudo visando avaliar o crescimento e a capacidade produtiva para os genótipos de gergelim BRS Seda, BRS 196 CNPA G4 e ELAG09 – 27561, em função das lâminas de irrigação de 47, 240, 477, 698 e 1.026 mm, Silva (2012) concluiu que os maiores valores dos componentes de produção foram obtidos com a lâmina de 1.026 mm e que o crescimento dos genótipos de gergelim foi afetado pelas diferentes lâminas de irrigação nas condições edafoclimáticas de Barbalha-CE.

Pereira (2014) determinando as necessidades hídricas do genótipo de gergelim BRS 196 CNPA G4 sob os regimes de irrigação de 305, 436, 567 e 698 mm em Barbalha – CE, concluiu que a lâmina de irrigação de 698 mm proporcionou o maior crescimento do gergelim e promoveu o maior rendimento e teor de óleo das sementes. Já a lâmina de 305 mm foi a que possibilitou a melhor eficiência do uso de água na irrigação.

## **2.4 Balanço de energia**

O balanço de energia à superfície pode ser entendido como a relação entre a quantidade de energia que chega a uma determinada superfície e a energia que é emitida e absorvida pela mesma, ou seja, a partir desse balanço é determinada a quantidade efetiva de energia que entra e fica disponível em uma determinada área ou sistema para ser utilizado em processos físicos, químicos e biológicos. Processos esses que abrangem todo o sistema solo-planta-atmosfera.

Os fluxos de radiação em direção à superfície compõem-se da radiação solar incidente de ondas curtas (direta e difusa) e da radiação de ondas longas emitidas pela atmosfera em direção a superfície (Fontana et al., 1991). Já os fluxos que saem da superfície compõem-se da radiação solar de ondas curtas refletidas e da radiação longas emitidas pela superfície para a atmosfera (Tanner e Lemon, 1962). Dessa forma o saldo de radiação constitui-se da soma algébrica dos balanços de radiação de ondas curtas e longas, considerando-se positivos os fluxos incidentes e negativos aqueles emitidos pela superfície (Silva et al., 2005a). Durante o dia, momento de alta intensidade solar, o saldo de radiação é positivo, pois os fluxos incidentes são superiores às frações refletidas e emitidas, já à noite comumente esses valores são negativos, pois o fluxo

incidente passa a ser apenas atmosférico e a energia emitida pela superfície é superior a este, resultando em um saldo de radiação negativo (Monteith e Unsworth, 1990; Pezzopane et al., 1995), ou seja, a superfície terrestre à noite perde energia para a atmosfera.

O método do balanço de energia baseado na razão de Bowen (BERB) é considerado um método padrão nas estimativas dos fluxos de calor latente e calor sensível, o qual vem sendo usado por diversos pesquisadores (Lima et al., 2005; Azevedo et al., 2007; Oliveira et al., 2009), sendo que o BERB aplicado a áreas com coberturas vegetais se baseia no princípio de conservação da energia (Wang e Bras, 2001; Silva, 2005b). É um método que, seguindo corretamente a metodologia e utilizando equipamentos meteorológicos devidamente calibrados, apresenta excelentes resultados, isso é, devidamente condizentes com o que realmente acontece no campo. Logo, tem sido amplamente utilizado por possibilitar a estimativa dos fluxos de energia diretamente no campo, sem alteração do meio, através de medidas do saldo de radiação, fluxo de calor no solo e dos gradientes de temperatura e pressão de vapor d'água do ar (Liu e Foken, 2001; Betts et al, 2007; Souza et al, 2008). Além disso, o conhecimento dos componentes do balanço de energia de uma determinada cultura vegetal é de grande importância, não só para a caracterização do microclima da vegetação, mas especialmente para efeito de estimativas das perdas de água da cultura pelo processo de evapotranspiração (Fontana et al., 1991), uma vez que o processo de evapotranspiração é determinado pela quantidade de energia disponível para vaporizar a água (Allen et al., 1998). Nesse caso a evapotranspiração corresponde ao calor latente, sendo expresso como densidade de fluxo de energia.

O BERB é um método indireto de determinação da evapotranspiração (ETc) das culturas (Todd et al., 2000). Ainda, segundo os mesmos autores, é um método que apresenta como vantagem, com relação a outros métodos, possibilitar medidas simples e contínuas, não necessitar de informações sobre as características aerodinâmicas da superfície em estudo, possibilitar a integração do fluxo de calor latente sobre extensas áreas e fornecer medidas em pequeno espaço de tempo (menor que uma hora).

O maior ou menor valor da razão de Bowen ( $\beta$ ) é função das condições de umidade da superfície evaporante. Se a superfície estiver úmida, uma maior fração do saldo de radiação ( $R_n$ ) é utilizada na forma de calor latente (LE), o que resultará em menores valores de  $\beta$ , por outro lado, se a superfície evaporante estiver seca, uma maior fração de  $R_n$  será utilizada no aquecimento do ar, o que acarreta em elevados

valores de  $\beta$ . Já com relação ao sinal de  $\beta$  ele depende do sinal do calor sensível (H), isso é, se H for positivo  $\beta$  será negativo e se H for negativo  $\beta$  será positivo, concluindo-se que o fluxo de calor sensível ocorre do ar mais quente para a superfície mais fria.

A partição de energia 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 (Teixeira et al., 2007; Kjaersgaard et al., 2008). A  $ET_c$  tem sido frequentemente medida fazendo o uso do BERB (Azevedo et al., 2003; Silberstein et al., 2003; Silva et al., 2007, Teixeira et al., 2007, Perez et al., 2008 e Zhang et al., 2008).

Em uma pesquisa realizando o BERB na cultura do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L). Walp) no brejo paraibano Lima et al., (2005) observaram que o saldo de radiação teve como valor médio 78% durante todo o ciclo da cultura, do qual foi utilizado, em média, 71% no fluxo de calor latente, 19% como fluxo de calor sensível e 10% como fluxo de calor no solo. Ainda, segundo os mesmos autores, com exceção dos períodos mais secos, as variações do fluxo de calor latente seguiram as variações do saldo de radiação e a fração do saldo de radiação utilizada como fluxo de calor latente aumentou com a evolução da cobertura do solo pela cultura, enquanto a fração utilizada como fluxo de calor sensível e de calor no solo diminuiu.

Avaliando o fluxo de energia na cultura do abacaxizeiro nos tabuleiros costeiros do estado da Paraíba, Sousa et al., (2008) verificaram que os componentes do balanço de energia foram influenciados pelo índice de área foliar e altura da planta durante todas as fases de desenvolvimento de abacaxizeiro, sendo que o fluxo de calor sensível sofreu forte influência do volume de água aplicado por irrigação e o consumo do saldo de radiação na forma de calor latente aumentou em função do aumento do dossel vegetativo.

Os fatores que afetam o balanço de energia, isso é, que concorrem para que em uma determinada região tenha uma alta intensidade de energia ou uma quantidade de energia atenuada, está relacionado com a quantidade da radiação incidente, apenas ressalvando que os instrumentos utilizados no campo devem estar devidamente calibrados, tendo em vista que equipamentos mal calibrados ou defeituosos podem subestimar ou superestimar os dados dos parâmetros agrometeorológicos mensurados.

De modo geral o balanço de energia, tendo como metodologia a razão de Bowen, além de ser muito importante, por propiciar resultados de uma importante variável que está relacionada a diversos processos agroclimáticos e edáficos, é uma

metodologia muito utilizada devido à fidelidade dos seus resultados ao que de fato ocorre no campo.

## 2.5 Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ )

A taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, sem falta de água, é chamada de evapotranspiração da cultura de referência ou evapotranspiração de referência, denotado como  $ET_0$  (Allen et al., 1998). Ou seja, expressa a capacidade que uma determinada superfície possui de evapotranspiração, tendo em vista que a presença constante de umidade em abundância não limita a evapotranspiração, como ocorre em solos secos. Ainda segundo os mesmos autores, tendo como base o modelo de Penman-Monteith, há a preposição de uma superfície hipotética com características específicas, isso é, uma cultura que cobre totalmente o solo em crescimento ativo, sem restrição de água ou nutricional, em ótimas condições de desenvolvimento, apresentando altura média  $h = 12$  cm, albedo de  $\rho = 0,23$  e resistência estomática da superfície  $r_s = 70 \text{ sm}^{-1}$ . Portanto estas condições devem proporcionar uma perda de água acentuadamente alta, dependente das condições meteorológicas prevalentes, podendo, portanto, ser determinada através de relações climatológicas conhecidas (Saad e Scaloppi, 1988).

Entre os diversos métodos utilizados para estimar a evapotranspiração de referência Penman (1948) foi 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 a resistência do dossel do cultivo ( $r_c$ ), decorrente das características fisiológica da planta, e a resistência aerodinâmica ( $r_a$ ), que incluem o papel do vento na difusão turbulenta de calor sensível e vapor d'água. Allen et al. (1989), comparando as estimativas obtidas por diferentes métodos, observaram que o modelo de Penman-Monteith foi o modelo que melhor se adequou às medições diárias e mensais de  $ET_0$ , sendo adotado como método padrão. Para Baselga e 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. Alguns autores encontraram boa correlação entre resultados obtidos em lisímetros e os estimados pela equação de Penman-Monteith, entre eles Camargo e Sentelhas (1997) e Hussein (1999).

No Brasil, esse método foi e ainda tem sido utilizado por diferentes pesquisadores, entre eles Fronza (2001) e Moura (2001). Em uma pesquisa observando a correlação entre variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a ETo no sul do Espírito Santo, Araujo et al. (2011) observaram que as variáveis temperatura média do ar e radiação global foram as únicas variáveis explicativas que apresentaram efeito direto sobre a variável principal, evapotranspiração de referência, sendo a radiação global a variável explicativa de maior efeito direto sobre a evapotranspiração de referência e o maior efeito da temperatura média do ar se deu de forma indireta, via radiação global. Ainda segundo os mesmos autores, métodos que não considerem dados de radiação global e temperatura do ar podem levar a erros na estimativa da  $ET_0$ . O método de Penman–Monteith, por levar em consideração, além de outros parâmetros meteorológicos, a radiação e temperatura média do ar, consolida-se como um método mais completo e confiável, quando comparado com alguns outros métodos e, segundo Sanij Yamamoto e Rasiah (2004), para as regiões semiáridas, a metodologia proposta por Penman-Monteith é mais indicada quando comparada com as metodologias propostas por Wright–Penman, Blaney-Criddle, balanço de radiação e Hargreaves.

## **2.6 Evapotranspiração da cultura (ETc)**

As plantas, no decorrer do seu desenvolvimento, apresentam oscilações em sua evapotranspiração, o que faz com que a cultura perca diferentes porções de água ao longo dos seus estágios fenológicos, o que torna seu conhecimento fundamental à quantidade de água que deve ser aplicada na irrigação. Onde de acordo com Silva et al. (2009) a evapotranspiração da cultura (ETc) consiste no principal parâmetro a ser considerado no dimensionamento e no manejo de sistemas de irrigação, tendo em vista que ela totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período.

As diferenças na anatomia da folha, características dos estômatos, propriedades aerodinâmicas e albedo causam a diferença entre a ETc e a ETo sob as mesmas condições climáticas (Allen et al., 1998). Miranda (1998) comenta que a evapotranspiração de uma cultura é função das diferentes condições de disponibilidade hídrica e cobertura vegetal. Allen et al. (1998) relatam que a evaporação da cultura apresenta modificações de acordo com as condições em que a cultura se desenvolve, sendo, a condição padrão a evapotranspiração da cultura livre de doença, bem-fertilizada, plantada em extensas áreas, sob condições de umidade do solo ótimas e

alcançando produção máxima sob determinadas condições climáticas. Já a condição não padrão diz respeito a evapotranspiração das culturas crescidas em condições ambientais e de manejo que difere das condições padrão, ou seja, em condições não ótimas como a presença de pragas e doenças, salinidade de solo, baixa fertilidade do solo, escassez de água ou saturação. Em condições padrão, devido à cultura apresentar maior desenvolvimento, apresenta evapotranspiração maior do que a cultura desenvolvida em condições não padrão.

O conhecimento do consumo hídrico (evapotranspiração) de uma cultura durante seu ciclo é de grande importância, pois além de ser utilizado no dimensionamento e no manejo de projetos de irrigação, contribui para aumentar a produtividade e otimizar a utilização dos equipamentos de irrigação, da energia elétrica e dos recursos hídricos (Santos et al., 2013). Dessa forma algumas pesquisas têm sido realizadas objetivando estimar o consumo hídrico de culturas por meio do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) (Azevedo et al., 2003; Azevedo et al., 2006, Silva et al., 2007; Silva et al., 2009).

A  $ET_c$  pode ser calculada por diferentes métodos, sendo que o método utilizando estação micrometeorológica no campo diminui erros na lâmina de água a ser aplicada na cultura, entretanto faz-se necessário o conhecimento do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ). De acordo com Allen et al. (1998) é possível calcular a  $ET_c$  a partir de dados climáticos e estimativas da resistência da cultura, albedo e fatores de resistência do ar diretamente na aproximação de Penman-Monteith, entretanto, devido a falta considerável de informações para diferentes culturas, o método de Penman-Monteith é usado para estimar a  $ET_0$  e experimentalmente, determinar a relação  $ET_c/ET_0$ , chamada de coeficiente da cultura onde,  $ET_c = K_c \cdot ET_0$

A estimativa adequada da  $ET_c$  consiste no principal parâmetro a ser considerado no dimensionamento e no manejo de sistemas de irrigação, de vez que ela totaliza a quantidade de água utilizada nos processos de evaporação e transpiração pela cultura durante determinado período (Silva et al., 2009). Quanto maior for a acurácia dos resultados obtidos melhor serão gerenciados os recursos hídricos, tendo por objetivo o melhor desenvolvimento da cultura e evitar danos (a cultura e econômico) por falta ou excesso de água durante a irrigação. Logo o conhecimento da evapotranspiração, ou o fluxo convectivo de calor latente, contribui para uma utilização mais racional da água em determinadas culturas em que as fases críticas de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo são limitadas pelo fator hídrico (Cunha e Assad, 2001).

Em um experimento analisando a evapotranspiração do milho verde no semiárido do Rio Grande do Norte, Santos et al. (2013) observaram que a ETc estimada com base na metodologia da FAO obteve um desempenho muito bom quando utilizada em escala diária e um desempenho bom para a escala semanal, segundo a classificação de Camargo e Sentelhas (1997) quando comparada com a ETc medida nos lisímetros de pesagem.

Amaral e Silva (2008) concluíram que nas condições edafoclimáticas de Barbalha-CE, a evapotranspiração do gergelim variou de um valor mínimo de 2,5 mm d<sup>-1</sup>, aos 5 dias após o plantio, até um valor máximo de 11,6 mm d<sup>-1</sup>, aos 30 dias de idade.

## **2.7 Coeficiente de cultivo (Kc)**

O coeficiente de cultivo (Kc) é um índice adimensional expressa pela razão entre a evapotranspiração de uma cultura específica (ETc) e a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>). O Kc representa a integração dos efeitos de três características que distinguem a ETc da ET<sub>0</sub>, são elas: altura da cultura, que afeta a rugosidade e a resistência aerodinâmica; a resistência da superfície relativa ao conjunto 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; e 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). O coeficiente de cultivo é um fator importante no indicativo do consumo de água ideal para a planta durante todo o seu ciclo, constituindo-se, portanto, em um elemento imprescindível para um escalonamento mais racional de projeto e manejo de irrigação (Amaral e Silva, 2008). Logo se faz necessário determinar o Kc em cada estágio fenológico da cultura, tendo em vista que, a medida que a cultura se desenvolve fatores da relações cultura-solo são alterados.

Doorenbos e Pruitt (1997) e Allen et al. (1998) apresentaram uma metodologia para estabelecer os valores de Kc para culturas anuais. Tal metodologia divide o ciclo da cultura em quatro estágios de desenvolvimento, são eles: estágio I que corresponde à germinação das sementes ao crescimento inicial da cultura (cobertura de 10% do solo); estágio II, compreendido entre o final da fase inicial até o início da floração; estágio III, vai do início da floração até o início da maturação dos frutos ; estágio IV, vai do início da maturação dos frutos até o final do ciclo da cultura. No estágio I o coeficiente de cultura apresenta valores baixos (Kc < 1), visto que ETc é bem menor que ET<sub>0</sub>, uma que

a área foliar é muito pequena e cobre apenas uma pequena porcentagem do terreno. No estágio II a diferença entre a evapotranspiração da cultura e a de referência diminui, devido ao aumento crescente da área foliar, resultando em um acréscimo do  $K_c$  ( $K_c < 1$ ). No estágio III o valor da  $ET_c$  pode ultrapassar a  $ET_0$ , resultando em maiores valores do  $K_c$  ( $K_c > 1$ ), permanecendo até o término de enchimento de grãos. No IV estágio os valores de  $K_c$  decrescem até o final do ciclo da cultura ( $K_c < 1$ ).

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 demanda hídrica (Sediyama et al., 1998).

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

O boletim 56 da FAO não determinou o valor do  $K_c$  inicial para a cultura do gergelim, entretanto, estimou que o seu  $K_c$  médio é 1,10 e o  $K_c$  na fase final é de 0,25. Sendo sugeridos, para uso desses valores, alguns ajustes, causados por variações locais de clima, solo e manejo da irrigação.

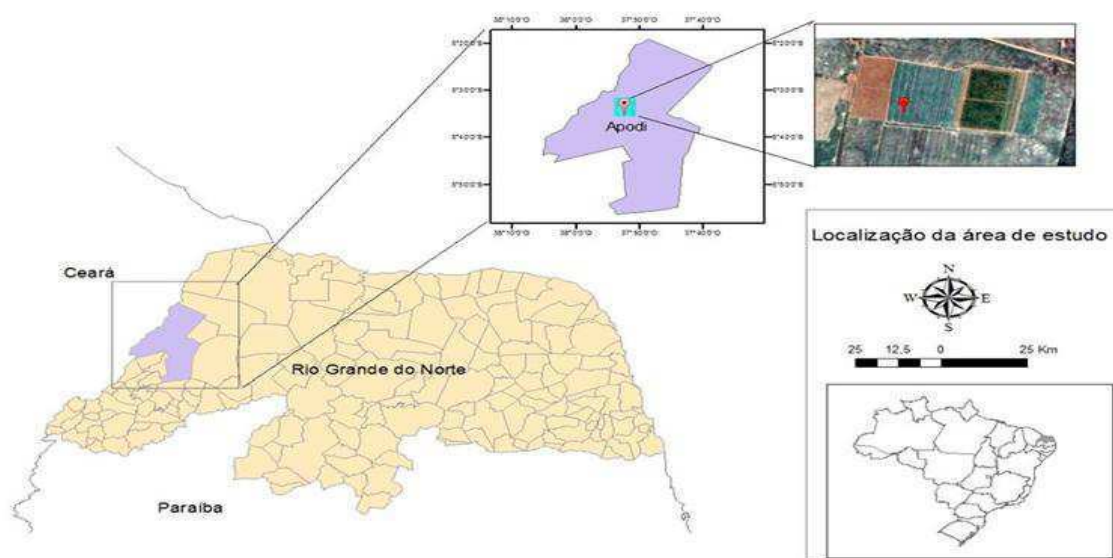
Segundo Amaral e Silva (2008) para as condições edafoclimáticas de Barbalha - CE e sob sistema de irrigação por aspersão convencional, a fase de crescimento vegetativo do gergelim BRS 196 CNPA G4 estendeu-se até 45 dias após o plantio, ao longo da qual os valores de  $K_c$  observados aumentaram de 0,6 até 0,8. Durante a fase de florescimento e desenvolvimento dos frutos, o  $K_c$  médio observado foi de 0,8. Pereira (2014) obtendo o coeficiente de cultivo pelo método do balanço hídrico do solo, também nas condições semiáridas de Barbalha-CE, concluiu que os valores do coeficientes de cultivo para cada fase fenológica do gergelim BRS 196 CNPA G4, foi 0,63 no I estágio, 0,83 no II estágio, 0,97 no III estágio e 0,56 no IV estágio. Valores esses distintos com os encontrados na FAO 56 sem a aplicação dos ajustes.



### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Área Experimental

A campanha experimental foi realizada 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), Nordeste do Brasil (Figura 3.1). O experimento foi conduzido durante a estação seca, entre os meses de agosto a setembro, do ano de 2015. A região apresenta clima muito quente e semiárido, conforme a classificação climática de Köppen, com temperaturas média, máxima e mínima de 27,1; 34,1 e 22,8 °C, respectivamente. O experimento foi implantado em um hectare, o que corresponde a uma área de 10.000 m<sup>2</sup>.



**Figura 3.1** – Localização do município de Apodi-RN e área experimental

O solo foi classificado, segundo análise física, como de textura franco arenosa até a profundidade de 20 cm e de 20 a 60 cm como franco-argilo-arenosa (Tabela 3.1).

**Tabela 3.1** - Análise textural do solo na área experimental

Granulometria (%)	Profundidade (cm)		
	0-20	20-40	40-60
Areia	67,22	50,84	42,29
Silte	15,14	25,35	34,14
Argila	17,64	23,81	20,57
Classe Textural	Franco Arenosa	Franco-Argilo-Arenosa	Franco-Argilo-Arenosa

A adubação do solo foi realizada de acordo com a recomendação para a cultura e com base na análise de fertilidade do solo (Tabela 3.2).

**Tabela 3.2** – Características químicas do solo na área experimental em Apodi-RN

<b>Fertilidade do Solo</b>											
pH	-----Complexo Sortivo (mmlc/dm <sup>3</sup> )-----							%	mmlc/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	g/KG
H <sub>2</sub> O	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	S	H+Al	T	V	Al <sup>+3</sup>	P	M.O.
6,2	34,8	10,0	0,4	1,6	46,8	23,1	69,9	67,0	ND*	10,7	16,4

\*ND – Não detectado

### 3.2. A cultura

O gergelim utilizado no experimento foi a cultivar BRS ANAHÍ. A planta apresenta haste de coloração verde-escura, hábito de crescimento não ramificado, três frutos por axila foliar e sementes de coloração esbranquiçada. Foi submetida a um espaçamento de 0,8 m entre fileiras e 0,1 m entre plantas, isso é, um espaçamento de 0,8 m x 0,1 m, o que corresponde a uma densidade de 10 plantas/m linear.

### 3.3. Tratos Culturais

Alguns tratos culturais foram adotados visando o pleno desenvolvimento da cultura ao longo do seu ciclo.

O controle de ervas daninhas foi efetuado utilizando-se a mistura de Alachlor (1 l ha<sup>-1</sup>) + Diuron (1,5 l ha<sup>-1</sup>), aplicados em pré-emergência, logo após o plantio. Trinta dias após a emergência foi efetuada uma aplicação de gramínicida Poast (1 l ha<sup>-1</sup>) + Podium (1 l ha<sup>-1</sup>). Ao longo do desenvolvimento da cultura foi realizado capinas manuais e semiautomáticas para retirar as plantas invasoras do plantio, fazendo com que não ocorresse competição das mesmas com a cultura por espaço, luz e nutrientes.

Foi realizada uma adubação de fundação, com base em análise química do solo, aplicando-se 67 Kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 12 kg ha<sup>-1</sup> de N, sob a forma de MAP. A adubação de cobertura foi efetuada utilizando-se 45 kg ha<sup>-1</sup> de N, aproximadamente 30 dias após a emergência, e repetindo-se esta dosagem 40 dias após a primeira aplicação, sob a forma de uréia.

Foram realizadas irrigações por aspersão para atender a demanda hídrica da cultura sendo as mesmas realizadas semanalmente nas segundas, quartas e sextas feiras. A demanda hídrica foi estimada a partir da ETo que, por sua vez, foi calculada tendo como base dados meteorológicos coletados na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET instalada na EMPARN.

### 3.4. Sensores e parâmetros meteorológicos mensurados

Uma torre micrometeorológica foi instalada na área de cultivo visando à obtenção e monitoramento das variáveis meteorológicas relevantes ao balanço de

energia. A torre abrigou os seguintes instrumentos: um saldo radiômetro, para medir a radiação líquida composta por dois piranômetros, um virado para cima, com a finalidade de medir a radiação global (direta e difusa), e outro virado para baixo, objetivando medir a radiação refletida, foram instalados a uma altura de 50 cm com relação ao dossel da cultura; dois psicrômetros com termopares de cobre-constantan, para determinar a temperatura do bulbo seco e úmido em dois níveis, um posto logo acima do dossel da cultura e outro 50 cm acima da vegetação, sendo alterada sua posição de acordo com o crescimento da cobertura vegetal; dois anemômetros, para medir a velocidade do vento em dois níveis, mantidos a mesma altura dos psicrômetros; fluxímetros, para medir o fluxo de calor no solo, instalados um entre linhas e outro entre fileiras de plantio a 2 cm de profundidade; e um datalogger, para armazenamento dos dados (Figura 3.2 e Tabela 3.3). Os sensores foram acoplados ao sistema de dados eletrônicos (datalogger) onde foi realizada leitura a cada 5 segundos e obtidos valores médios a cada 20 minutos.



**Figura 3.2** – Torre micrometeorológica com visualização dos sensores instalados

**Tabela 3.3** – Características e fator de calibração dos sensores e datalogger

Sensor	Modelo/marca	Constante de calibração ( $\mu V W^{-1}m^{-2}$ )
Saldo radiômetro	NR LITE/Kipp e Zonen	13,7
Psicrômetros aspirados	Tipo T/ Omega, Stamford, CT, USA	-
Anemômetros	Gill3 cup/modelo 12102, Young	-
Fluxímetros	Hukseflux/ HFP01	17,152 e 16,207
Piranômetros	CM3/Kipp & Zonen	17,44 e 19,10
Datalogger	CR1000/Campbell Scientific Inc.	-

### 3.5 Evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>)

A evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) foi obtida pelo modelo de Penman-Monteith/FAO a partir da equação de Allen et al (1998), dada por:

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \left( \frac{900 U_2}{T + 273} \right) (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (3.1)$$

Onde: ET<sub>0</sub> é a evapotranspiração de referência (mm);  $\Delta$  é a declinação da curva de saturação do vapor da água (kPa °C<sup>-1</sup>); R<sub>n</sub> é o saldo de radiação (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); G é o fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>);  $\gamma$  é o fator psicrométrico do vento a 2 m de altura (m.s<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> é a pressão de saturação do vapor de água atmosférico (kPa); e<sub>a</sub> é a pressão atual do vapor de água atmosférico (kPa).

A declinação da curva de saturação do vapor da água ( $\Delta$ ) foi calculada pela seguinte expressão:

$$\Delta = \frac{2504 \exp\left(\frac{12,27T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (3.2)$$

Sendo:  $\Delta$  a inclinação da curva de variação da temperatura com a pressão do vapor d'água no ar (KPa°C<sup>-1</sup>); T é a temperatura média diária do ar (°C).

A temperatura média diária do ar (T) foi obtida em função da temperatura máxima (T<sub>x</sub>) e pela mínima (T<sub>i</sub>), a partir da fórmula:

$$T = \frac{T_x + T_i}{2} \quad (3.3)$$

### 3.6 Transmissividade radiativa da atmosfera (Kt)

A transmissividade radiativa da atmosfera é um importante parâmetro derivado do balanço de radiação que corresponde à nebulosidade. As nuvens, por sua vez, são responsáveis por absorver e refletir radiação, portanto exerce influência no balanço de radiação, que tende a apresentar valores mais elevados em dias de céu claro e menores

em dias nublados. A transmissividade foi calculada pela razão entre a radiação solar incidente e a radiação global no topo da atmosfera, dada por:

$$Kt = \frac{R_{Si}}{R_a} \quad (3.4)$$

Os limites utilizados para transmissividade da atmosfera foram para céu nublado ( $Kt < 0,20$ ), para céu parcialmente nublado ( $0,20 < Kt < 0,80$ ) e para céu claro ( $Kt > 0,80$ ).

A radiação solar global no topo da atmosfera ( $R_a$ ) foi obtida em função da latitude do local, da declinação solar e do ângulo horário (Vianello & Alves, 1991):

$$R_a = S_0 \left( \frac{D'}{D} \right)^2 \cos Z \quad (3.5)$$

Onde:  $S_0$  é a constante solar ( $S_0 = 1.367 \text{ W m}^{-2}$ ),  $D$  a distância Terra-Sol para determinado dia do ano,  $D'$  a distância média Terra-Sol e  $Z$  o ângulo zenital, sendo  $(D'/D)^2$  o fator de correção devido à excentricidade da órbita da terra.

### 3.7 Evapotranspiração da cultura pelo balanço de energia ( $ET_{CBERB}$ )

A seguinte fórmula foi utilizada como base do balanço de energia:

$$R_n = LE + H + G + S + P \quad (3.7)$$

Sendo que:  $R_n$  é o saldo de radiação;  $LE$  é o fluxo de calor latente;  $H$  é o fluxo de calor sensível;  $G$  é o fluxo de calor no solo;  $S$  é a energia armazenada na copa das árvores;  $P$  é a energia utilizada no processo fotossintético. As unidades de cada variável da equação é Watt por metro quadrado ( $\text{W.m}^{-2}$ ). Segundo Allen et al. (1998) os termos  $S$  e  $P$  podem ser desprezados da equação, devido a dificuldade de serem calculados, logo a equação do saldo de radiação ficou sendo:

$$R_n = LE + H + G \quad (3.8)$$

A resolução da equação (3.5) foi obtida a partir das medidas do  $R_n$  e  $G$ , já as estimativas do  $LE$  e  $H$  por meio da expressão de Rosenberg et al. (1983), dada por:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{PC_p}{L\varepsilon} \left( \frac{K_h}{K_v} \right) \frac{\partial T / \partial Z}{\partial e / \partial Z} = \gamma \left( \frac{K_h}{K_v} \right) \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad (3.9)$$

O termo  $k_h$  representa o coeficiente de difusão turbulenta de calor sensível ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ); o termo  $k_v$  o coeficiente de vapor d'água ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ );  $L$  é o calor latente de evaporação da água ( $\text{MJ.kg}^{-1}$ );  $C_p$  é o calor específico do ar seco à pressão constante ( $\text{MJ.Kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ );  $P_0$  é a pressão atmosférica média local (kPa);  $\varepsilon$  representa a razão entre as massas

moleculares da água e do ar seco (equivalente a 0,622);  $\beta$  é a razão de Bowen;  $\Delta t$  representa a variação de temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\Delta e$  representa a variação da pressão parcial do vapor d'água na atmosfera medidas em dois níveis acima da superfície vegetada ( $\Delta e = e_2 - e_1$ );  $\Delta z$  é a diferença de altura entre os dois níveis que foram observados a pressão parcial do vapor d'água ( $\Delta z = z_2 - z_1$ ) e  $\gamma$  é o fator psicrométrico ( $\text{kPa}\cdot\text{C}^{-1}$ ), obtida por meio da equação:

$$\gamma = \frac{C_p P_o}{L\varepsilon} = 0,665 \times 10^{-3} P_o \quad (3.10)$$

A pressão parcial de vapor d'água em dois níveis acima do dossel da cultura pode ser obtida a partir da equação de Ferrel (Varejão Silva, 2001). Sendo a equação:

$$e(T) = e_s(T_u) - 0,00066(1 + 0,00115T_u)(T_s - T_u)P_o \quad (3.11)$$

Onde:  $e(T)$ ,  $e_s$  e  $P_o$  é a pressão parcial do vapor d'água, pressão de saturação do vapor d'água e a pressão atmosférica local ( $\text{kPa}$ ), respectivamente, e  $T_s$  e  $T_u$  são as temperaturas secas e úmidas ( $^{\circ}\text{C}$ ), respectivamente. A pressão de saturação do vapor d'água a temperatura úmida [ $e_s(T_u)$ ] é calculado pela fórmula:

$$e(T_u) = 0,6108 \exp\left(\frac{12,27T_u}{T_u + 237,3}\right) \quad (3.12)$$

De acordo com Verma et al. (1978), na ausência de advecção de calor sensível e em condições de neutralidade atmosférica ( $K_h \cong K_v$ ). Considerando que  $(\partial T/\partial Z)/(\partial e/\partial z) \cong \Delta T/\Delta e$ , a razão de Bowen pode ser expressa por:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (3.13)$$

A densidade do fluxo de calor latente (LE), pode ser obtida pela formula originada da substituição da equação (3.9) em (3.8), logo temos:

$$LE = \frac{Rn + G}{1 + \beta} \quad (3.14)$$

Dessa forma a densidade do fluxo de calor sensível (H) foi obtida como resíduo da equação do balanço de energia, de acordo com a equação:

$$H = Rn - LE - G \quad (3.15)$$

Onde a densidade de fluxo é dada em Watts por metro quadrado ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Objetivando eliminar alguns erros associados ao BERB aplicado às estimativas dos valores de  $\beta$  e, conseqüentemente, ao cálculo dos fluxos LE e H, foram consideradas as situações que satisfazem a aplicação do método, de acordo com Perez et

al. (1999) (Tabela 3.4), em conjunto com a classificação dos tipos de erros ocorridos levando o dado a ser considerado inconsistente (Tabela 3.5).

**Tabela 3.4** – Condições para satisfazer o método da razão de Bowen, sob condições não advectivas, para que o dado possa ser considerado consistente

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

**Tabela 3.5** – Tipos de erros em que o método da razão de Bowen é considerado inconsistente

Tipo de erro	Condição
A	Rn – G > 0, $\Delta e > 0$ e $\beta < -1 +  \varepsilon $
B	Rn – G > 0, $\Delta e < 0$ e $\beta > -1 -  \varepsilon $
C	Rn – G < 0, $\Delta e > 0$ e $\beta > -1 -  \varepsilon $
D	Rn – G < 0, $\Delta e < 0$ e $\beta < -1 -  \varepsilon $
E	Mudança rápida de temperatura e pressão de vapor

Visando a determinação do erro (E), para leitura integralizada de 20 minutos, utilizou-se a equação proposta por Perez et al. (1999), a seguir:

$$E = \frac{\delta\Delta e - \gamma\delta\Delta T}{\Delta e} \quad (3.16)$$

Assumindo  $\delta\Delta e = 0,02$  kPa e  $\delta\Delta T = 0,05$  °C.

Adicionalmente, considerou-se que valores de  $\beta < -0,75$  resultariam em valores de LE e H fisicamente inconsistentes (Ortega-Farias et al., 1996).

A evapotranspiração da cultura pelo método do balanço de energia ( $ET_{C_{BERB}}$ ), expressa em unidades de lâmina de água em um intervalo de tempo ( $\text{mm d}^{-1}$ ), foi obtida dividindo-se a equação (3.14) pelo calor latente de vaporização ( $\lambda$ ), integrando os resultados para o período do dia em que houver energia disponível, ou seja, quando o saldo de radiação for positivo ( $Rn - G > 0$ ) (Bezerra, 2007; Bezerra et al., 2010), sendo a equação:

$$ET_{C_{BERB}} = \frac{\lambda E}{\lambda} P_p \quad (3.17)$$

Onde:  $P_p$  é o período do dia em que  $Rn - G > 0$ .

O calor latente de vaporização ( $\lambda$ ) foi determinado pela equação:

$$\lambda = 2,501 - 0,0022361T \quad (3.18)$$

Sendo:  $\lambda$  o calor latente de vaporização ( $\text{MJ kg}^{-1}$ ) e T a temperatura do ar (°C).

### 3.8 Coeficiente de cultivo

A partir de valores diários da evapotranspiração da cultura ( $ET_{C_{BERB}}$ ) e da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), obteve-se o coeficiente da cultura ( $K_c$ ) pela expressão:

$$K_c = \frac{ET_{C_{BERB}}}{ET_0} \quad (3.19)$$



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Fenologia do gergelim

O ciclo fenológico do gergelim, cultivar BRS ANAHÍ, foi dividido em quatro fases (Tabela 4.1) em função dos seus processos fisiológicos, de acordo com Doorenbos e Pruitt (1979) e Allen et al. (1998).

**Tabela 4.1** – Ciclo fenológico do gergelim (BRS ANAHÍ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN

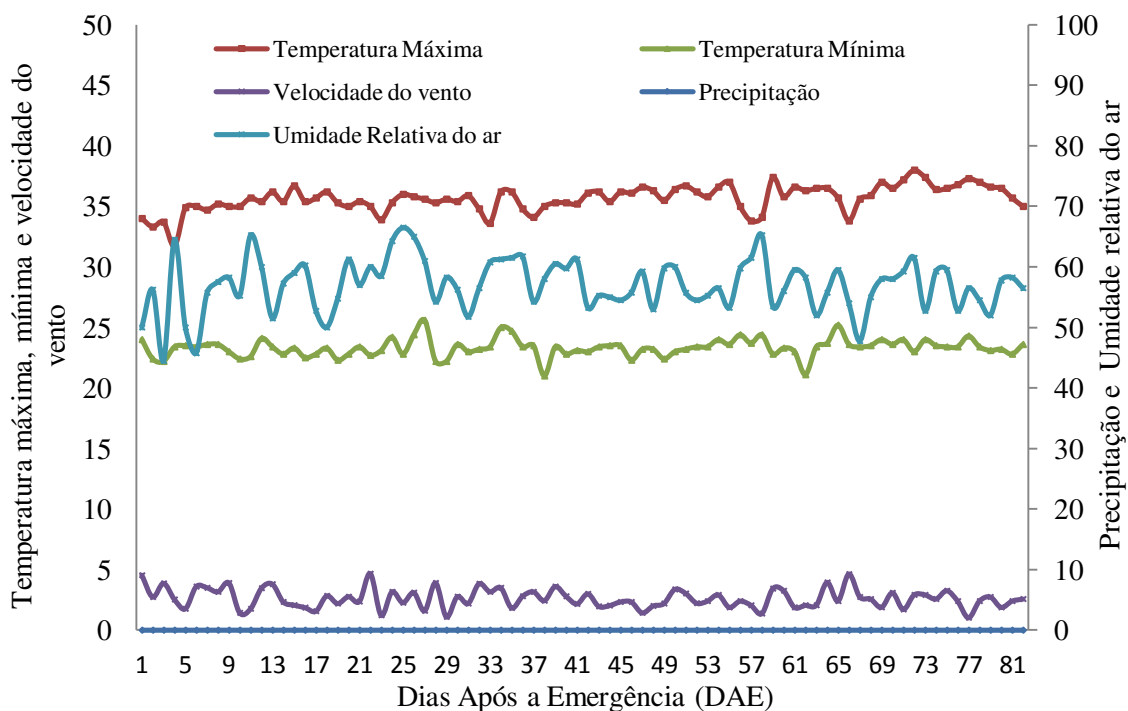
Fase fenológica	Período (DAE*)	Número de dias
I - Emergência a 10% da cobertura de solo.	1 – 13	13
II - 10% da cobertura de solo ao início da floração.	14 – 35	22
III - Início da floração ao início da maturação.	36 – 68	33
IV - Início da maturação ao final do ciclo da cultura	69 – 82	14
<b>TOTAL</b>		<b>82</b>

\* DAE: Dias Após a Emergência

A partir de observações diárias realizadas no campo verificou-se que a Fase I, correspondente ao período da emergência das plantas até 10% de cobertura de solo, teve duração de 13 dias; a Fase II, que correspondeu à fase do desenvolvimento vegetativo, compreendendo a partir da cobertura de 10% do solo pela cultura até o início da floração, teve a duração de 22 dias; a Fase III, que correspondeu à fase de desenvolvimento reprodutivo, compreendeu um intervalo que foi do início da floração ao início da maturação dos frutos, possuiu 33 dias e a Fase IV, compreendido como sendo a fase final do ciclo da cultura, correspondente ao início da maturação dos frutos ao final do ciclo da cultura, teve duração de 14 dias. Dessa forma o gergelim, cultivar BRS ANAHÍ, teve seu ciclo completado em 82 dias após a emergência da planta, sendo classificada como uma cultura de ciclo precoce.

### 4.2 Comportamento das variáveis climatológicas na área experimental

O comportamento das variáveis climatológicas temperaturas máximas e mínimas, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento a 10 m de altura, na área experimental no período de 11/08 a 31/10/2015, está representada na Figura 4.1.



**Figura 4.1** – Comportamento da temperatura máxima e mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), umidade relativa (%), precipitação ( $\text{mm d}^{-1}$ ) e velocidade do vento a 10 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN

O município de Apodi está localizado na microrregião da chapada do Apodi e mesorregião oeste potiguar do Rio Grande do Norte, sendo o clima da região classificado como semiárido (Thornthwaite, 1948). Logo apresenta condições climáticas próprias do semiárido como altas temperaturas, umidade do ar relativamente baixa (clima quente e seco), chuvas irregulares e pouco distribuídas, isso é, o período chuvoso se concentra em poucos meses do ano.

Não houve eventos de precipitação no período em que o experimento foi conduzido, logo a demanda hídrica da cultura foi totalmente fornecida pela prática de irrigação e em virtude disso, em algumas épocas do ano o plantio, em áreas semiáridas, só é justificável com o uso da técnica da irrigação.

A umidade relativa do ar (UR) seguiu o regime da precipitação local, mantendo-se baixa e pouco variável durante todo o período sem precipitação em que foi conduzido o experimento. A UR diária variou de 44,5 a 66,5%, sendo obtido valor mensal médio máximo no mês de setembro e mínimo no mês de agosto, sendo elas 57,1 e 54,7% respectivamente, apresentando uma diferença máxima de apenas 2,4% no período observado. Valores um pouco inferiores ao encontrado por Ramos et al. (2009) onde a média para a época do ano na região foi de 59,7%.

A temperatura máxima diária variou de 31,7 a 38  $^{\circ}\text{C}$ , sendo observado um valor médio mensal máximo no mês de outubro, onde foi registrada a temperatura de 36,2  $^{\circ}\text{C}$ ,

e a menor foi obtida no mês de agosto, registrando-se uma temperatura de 34,7 °C, sendo a diferença entre esses dois extremos de 1,5 °C. A temperatura mínima diária variou de 21 a 25,6 °C, sendo que a maior temperatura mínima foi obtida no mês outubro, onde foi registrada a temperatura de 23,5 °C, já a menor no mês de agosto, sendo observada uma temperatura 22,8 °C, a diferença entre elas foi de 0,7 °C. A produtividade do gergelim é bastante afetada pelas condições climáticas prevalentes durante o ciclo da cultura e entre os principais fatores climáticos que exercem essa influência está a temperatura. As temperaturas ideais para o crescimento e desenvolvimento do gergelim situam-se entre 25 a 30 °C, inclusive para a germinação das sementes. Temperaturas abaixo de 20 °C provocam atraso na germinação e no desenvolvimento da planta. Por isso, o plantio sob condições controladas apresenta grande potencial de produção, alto rendimento de grãos e estabilidade de produção. Apesar da temperatura situar-se acima da faixa ideal ao desenvolvimento do gergelim em algumas horas do dia não resultou em danos perceptíveis ao desenvolvimento vegetativo ou produtivo da cultura.

O vento, considerado o segundo fator mais importante depois da temperatura no processo de evapotranspiração, variou em termo diário de 1 a 4,7 m s<sup>-1</sup>, sendo a média mensal máxima no mês de agosto, obtendo-se a média 2,8 m s<sup>-1</sup>, e mínima do mês de outubro, onde foi registrado a média de 2,5 m s<sup>-1</sup>. De acordo com a classificação de Doorenbos e Pruitt (1977) foi considerado um evento moderado, situando-se na faixa de 2 a 5 m s<sup>-1</sup>.

As condições climáticas da região, sobretudo altas temperaturas e baixas umidades relativas do ar, no período do experimento, contribuem para ocorrência de uma alta evapotranspiração. A ausência de precipitação pluvial ocasionou sucessivas irrigações, tendo em vista que a demanda hídrica da cultura foi unicamente suprida pela prática da irrigação.

#### **4.3 Comportamento dos componentes do balanço de energia**

A partir dos dados coletados foi realizada a análise de consistência dos dados, segundo os critérios elencados por Perez et al., (1999), que podem ser observados na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2** - Análise de consistência física dos dados coletados para realização do cálculo do balanço de radiação pelo método da razão de Bowen

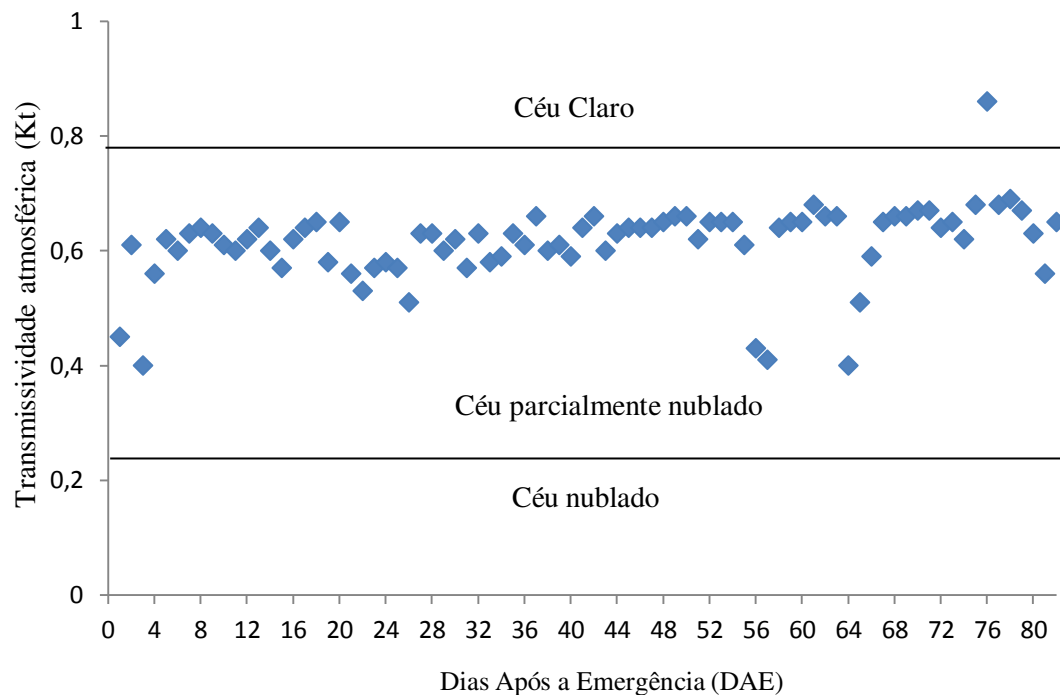
Fase Fenológica	PDC*	Tipos de Erro (%)					
		A	B	C	D	$(-1- \varepsilon ) < \beta < (-1+ \varepsilon )$	$\beta < -0,75$
Fase I	73,8	2,7	14	-	-	-	-
Fase II	65,6	2,7	26,7	-	-	-	-
Fase III	66,8	4,0	23,2	-	-	-	-
Fase IV	34,2		52,4	-	-	-	-
<b>Todo ciclo</b>	<b>62,3</b>	<b>3,7</b>	<b>29,5</b>	-	-	-	-

\*PDC – Percentual Médio de Dados Consistentes.

Observou-se que para todo o ciclo em 62,3% dos casos os dados coletados permitiram a realização do balanço de energia. Resultado similar ao obtido por Silva et al. (2011b) para a cultura da cana-de-açúcar em Juazeiro-BA, onde 62,7% dos dados foram considerados consistentes. Nas três primeiras fases fenológicas o percentual de dados consistentes mantiveram-se acima de 65%, entretanto no quarta fase foi de apenas 34,2%, fazendo com que o percentual de dados confiáveis para todo o ciclo sofre-se uma redução.

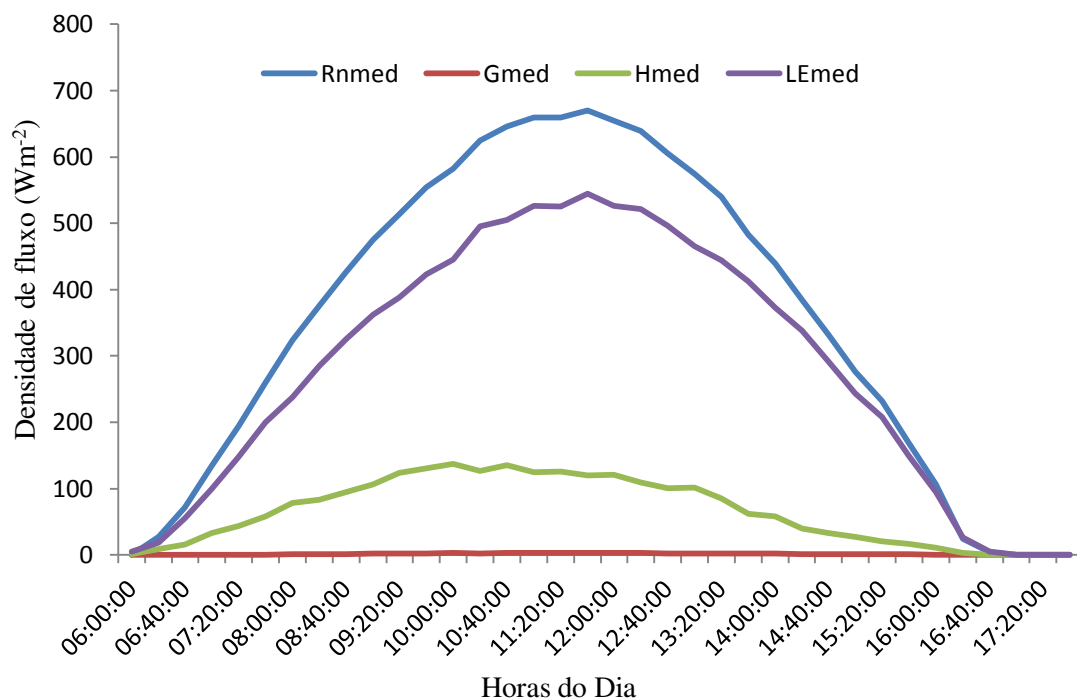
Os erros que ocorreram foram dos tipos A e os do tipo B, contribuindo com 3,7 e 29,5% respectivamente. Os erros do tipo A ocorreram quando valores do fluxo de calor sensível foram menores que zero ( $H < 0$ ), podendo ser ocasionado pela irrigação. Erros do tipo B ocorreram quando o gradiente da pressão de vapor foi inferior a zero ( $\Delta e < 0$ ), comportamento que deve ter ocorrido mediante a irrigação em combinação com a estrutura foliar do gergelim, por propiciar concentração de vapor de água maior entre as folhas do que na atmosfera, mesmo quando a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo é superior a zero ( $R_n - G > 0$ ). Não foram constatados valores da razão de bowen ( $\beta$ ) dentro da faixa de rejeição e nem valores inferiores a - 0,75. Para a cultura da cana de açúcar no município de Capim na Paraíba, Silva et al. (2011) observaram erros do tipo: A, B, C e D, contribuindo com 0,2%, 4,9%, 32,2% e 0,1%, respectivamente.

Avaliando a transmissividade atmosférica ( $K_t$ ) observou-se a ausência de dias considerados nublados. Os dias parcialmente nublados foram de 98,8% (81 dias) e de céu claro foi de 1,2% (1 dia) para todo o período de experimento (Figura 4.2). Portanto o balanço de energia e os parâmetros a ele relacionados para todo o ciclo da cultura apresentaram comportamento referente à condição de céu predominantemente parcialmente nublado.



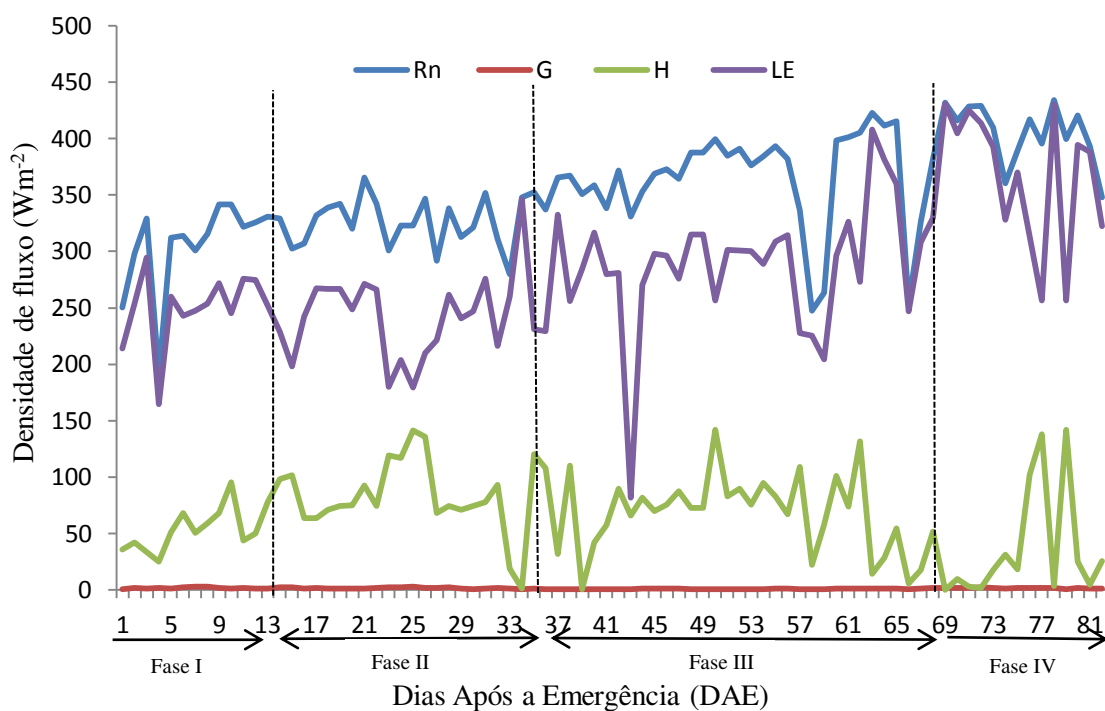
**Figura 4.2** - Comportamento da transmissividade atmosférica (Kt) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi – RN

O comportamento descrito pelos componentes do balanço de energia assemelha-se o de uma parábola com concavidade voltada para baixo, observando-se oscilações mínimas durante todo o percurso diário dos componentes analisados. O comportamento médio horário das curvas das densidades de fluxo de calor latente (LE) e sensível (H) foi semelhante ao do saldo de radiação (Rn), uma vez que o Rn define o tipo de comportamento das curvas dos demais componentes do balanço de energia. Na condição atmosférica de céu parcialmente nublados Rn, G e LE atingiram seus valores máximos médios de 670,4; 2,9 e 544,3  $\text{Wm}^{-2}$ , respectivamente às 11h:40 min. Já H apresentou um valor máximo médio de 137,5  $\text{Wm}^{-2}$  às 10h (Figura 4.3).



**Figura 4.3** – Valor médio horário dos componentes do balanço de energia na cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN

O comportamento médio diário de Rn, LE, H e do G é apresentado na Figura 4.4 e Tabela 4.3.



**Figura 4.4** – Valor médio diário dos componentes do balanço de energia na cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN

**Tabela 4.3** – Valores médios dos componentes do balanço de energia e da partição do saldo de radiação (Rn) em fluxo de calor latente (LE/Rn), calor sensível do ar (H/Rn) e fluxo de calor no solo (G/Rn) para as diferentes fases fenológicas da cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN.

Fase Fenológica	Rn	LE	H	G	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
	-----Wm <sup>-2</sup> -----				-----%-----		
I	305,6	250,1	53,9	1,8	81,8	17,6	0,6
II	326,4	242,3	83,1	1,7	74,2	25,5	0,5
III	364,5	287,6	68,8	1,0	78,9	18,8	0,3
IV	405,2	366,2	37,4	1,7	90,4	9,2	0,4
<b>Média</b>	<b>350,4</b>	<b>286,5</b>	<b>60,8</b>	<b>1,5</b>	<b>81,3</b>	<b>17,7</b>	<b>0,4</b>

As oscilações de valores de Rn foram acompanhadas pelos demais componentes do balanço de energia. Observa-se que o Rn apresentou comportamento crescente ao longo dos estágios fenológicos da cultura. Em termos médios percentuais em relação ao RN, o LE correspondeu a 81,3%, H com 17,7% e o G com apenas 0,4%.

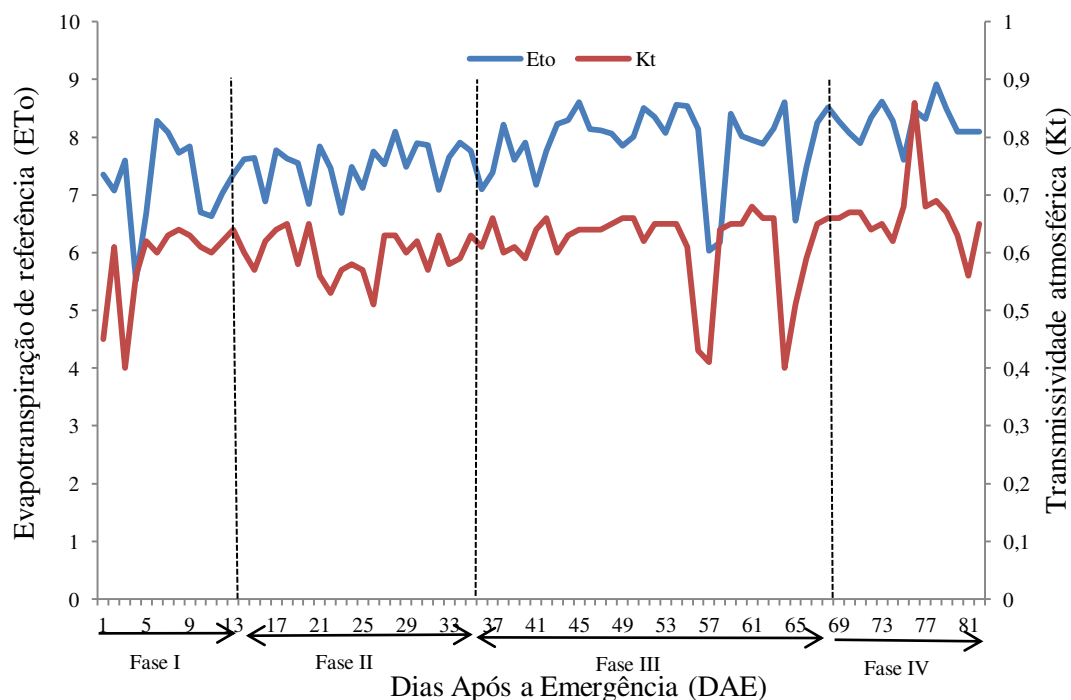
A partir da II fase fenológica, mediante a evolução da cobertura do solo pela cultura, a fração do saldo de radiação utilizada como fluxo de calor latente (LE/Rn) aumentou, enquanto a fração utilizada como fluxo de calor sensível (H/Rn) diminuiu. Isso pode ser explicado pelo fato de que no início do cultivo o solo apresentava uma maior fração descoberta, propiciando a ocorrência de uma maior evaporação, e à medida que a cultura se desenvolveu, a área foliar aumentou, intensificando o processo de transpiração, necessitando o uso de uma maior quantidade de energia na forma LE para transformar a água em vapor. O mesmo foi observado por Azevedo et al. (2007) trabalhando com abacaxi nos tabuleiros costeiros paraibano, onde sugeriram que o comportamento do LE pode ser parcialmente atribuído à variação do crescimento da cobertura vegetal.

O G apresentou valores baixos e não apresentou grandes diferenças em comparação individual nas partições da radiação líquida. Esta ordem de grandeza, com predominância do Rn para LE seguido de H e G, tem sido padrão observado nas determinações do balanço de energia, que empregam o uso da razão de Bowen em culturas agrícolas (André et al., 2010).

#### **4.4 Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) e irrigação (I).**

O comportamento da ET<sub>o</sub> (mm d<sup>-1</sup>), determinado pelo método de Penman-Monteith (FAO 56), e do Kt para todo ciclo é apresentado na Figura 4.5. Os valores diários de ET<sub>o</sub>, observados para todo o ciclo da cultura variou de 5,5 a 8,9 mm d<sup>-1</sup>, com

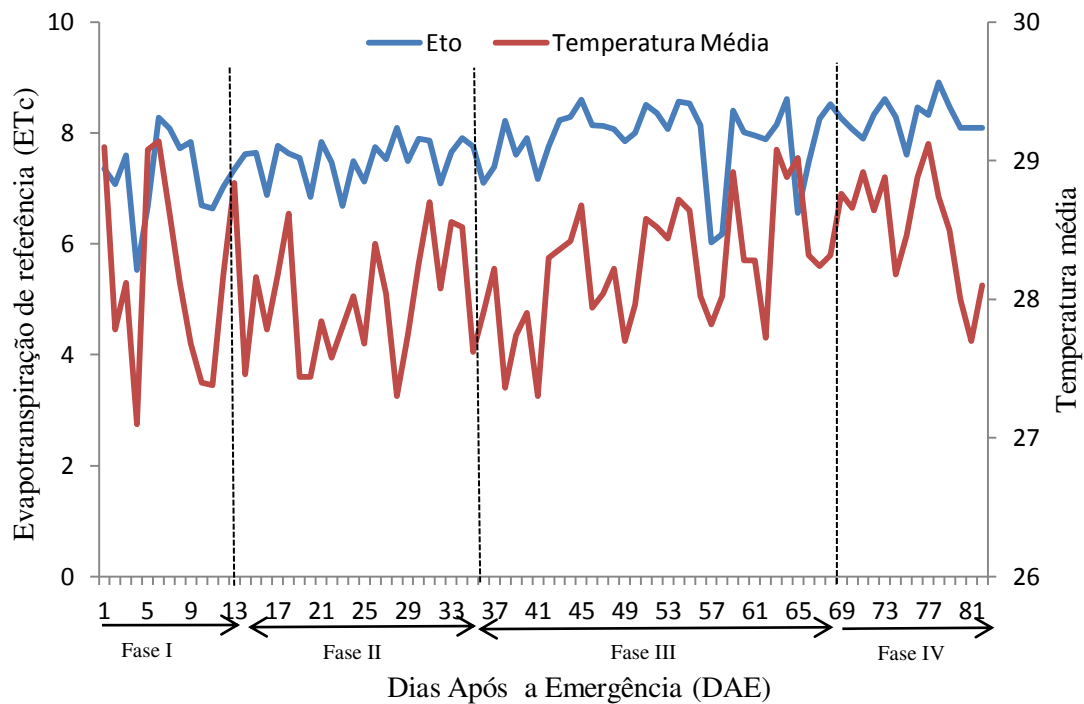
média de  $7,8 \text{ mm d}^{-1}$ . Verificou-se que a  $ETo$  foi influenciada pelo  $Kt$ , onde quando o  $Kt$  apresentou valores elevados ou de menor magnitude a  $ETo$  apresentou o mesmo comportamento, indicando que quando menor for a quantidade de nuvens presentes na abóbada celeste maior será a  $ETo$ , devido a maior quantidade de radiação que incide sobre a superfície, quando comparado com dias de céu com maior presença de nuvens.



**Figura 4.5** – Evapotranspiração de referência ( $ETo$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ ) e transmissividade atmosférica no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-R

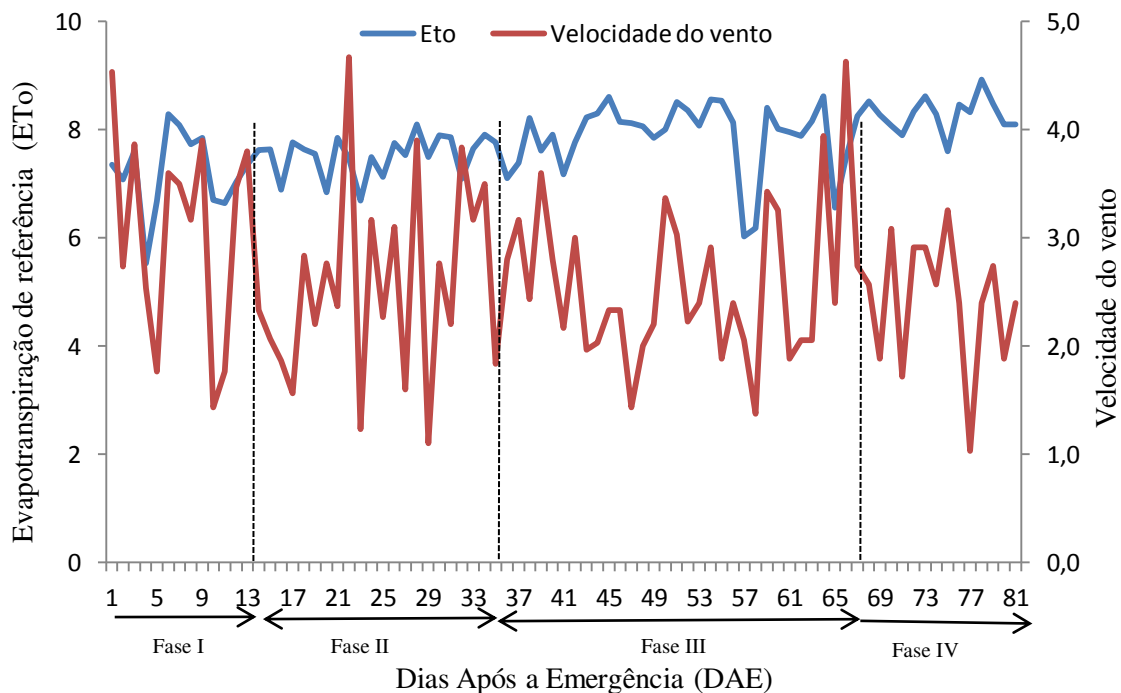
A menor ou maior radiação incidente influência para que ocorra uma menor ou maior temperatura do ar respectivamente, sendo que a temperatura é o principal parâmetro meteorológico que atua no processo da  $ETo$ , de tal forma que, temperaturas altas tendem a elevar a  $ETo$  (Figura 4.6).





**Figura 4.6** – Evapotranspiração de referência ( $E_{To}$ ,  $\text{mm d}^{-1}$ ) e temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN

A ocorrência de Vento, devido a sua capacidade de conduzir umidade, intensifica o processo de evapotranspiração, de tal forma que em dias onde registrou-se velocidade do vento médio mais elevados, na maioria das vezes, a  $E_{To}$  foi superior do que em dias de vento mais suaves (Figura 4.7).



**Figura 4.7** – Evapotranspiração de referência ( $\text{mm d}^{-1}$ ) e velocidade do vento a 10 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN

A ETo média para cada uma das fases fenológicas da cultura, bem como a ocorrida para todas as fases e para o ciclo da cultura estão representadas na Tabela 4.4

**Tabela 4.4** – Evapotranspiração de referência (ETo) médios e totais para cada fase fenológica do gergelim (BRS ANAHÍ) em Apodi-RN

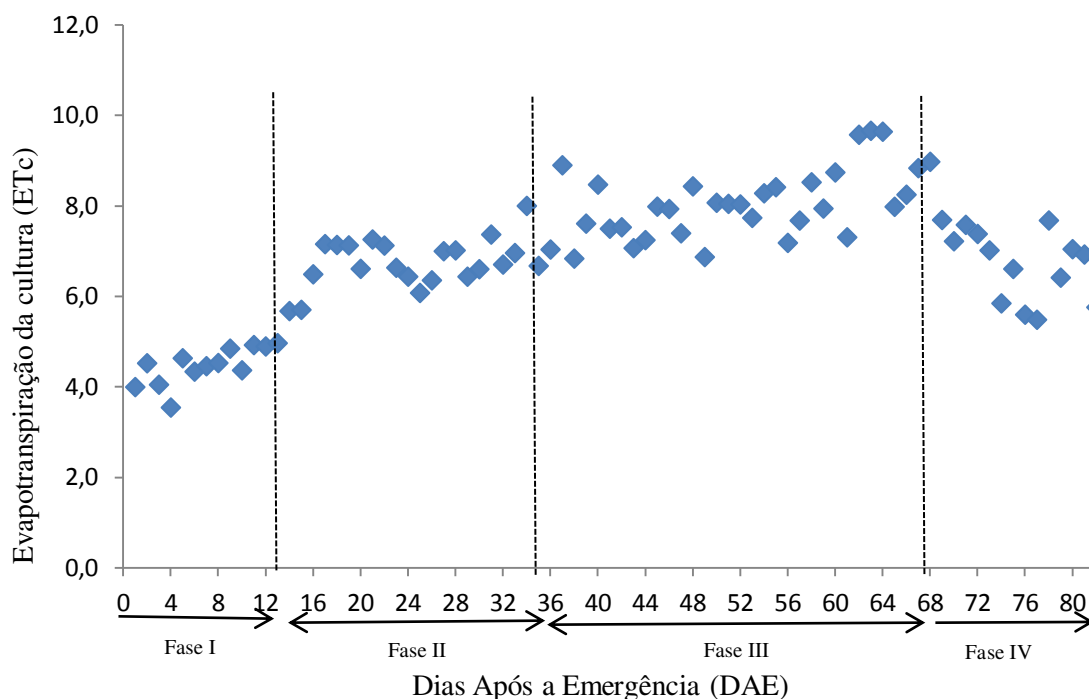
Fase Fenológica	ETo Médio (mmd <sup>-1</sup> )	ETo Total (mm)
I	7,2	93,9
II	7,5	165,6
III	7,9	260,7
IV	8,3	115,5
<b>Total</b>		<b>635,7</b>

Em termos médios obteve-se um menor valor de ETo na I fase fenológica, com 7,2 mmd<sup>-1</sup>, e maior na IV fase fenológica, com 8,3 mmd<sup>-1</sup>, sendo que os valores médios da ETo apresentaram comportamento crescente a cada estágio fenológico da cultura. Conseqüentemente a ETo total para cada fase fenológica também apresentou a mesma tendência crescente, sendo o maior valor observado na III fase fenológica, com 259,9 mm, devido ter um maior número de dia, entretanto a fase IV teve apenas um dia a mais que a fase I e apresentou uma diferença de 21,6 mm a mais na ETo total. A ETo acumulada para todo o ciclo da cultura correspondeu a 635,7 mm. A ausência de dias nublados e de precipitação durante todo o experimento favoreceram a ocorrência de altos valores de ETo.

Os valores diários da ETc obtidos pela razão de Bowen (ET<sub>CBERB</sub>) são apresentados na Figura 4.8 e Tabela 4.5. Os valores diários de ET<sub>CBERB</sub> variaram de 3,5 a 9,7 mm d<sup>-1</sup>, com mínimos no início do desenvolvimento (Fase I) e máximos durante o desenvolvimento reprodutivo da cultura (Fase III). A ETc acumulada para todo o ciclo da cultura foi de 566,2 mm. Na II fase fenológica da cultura a ETc apresenta comportamento crescente, entretanto entre os dias 20 e 28 apresentou um comportamento decrescente quando comparados com os valores obtido nos demais dias pertencentes a essa fase, isso pode ser explicado pelo fato de nesses dias o Kt ter apresentado valores baixos, ou seja, nesses dias o céu estava com uma maior quantidade de nuvens o que contribuiu para uma menor radiação incidente sobre a superfície e conseqüentemente uma menor temperatura, o que resultou em uma menor ETc. Assim como na ETo o Kt, a temperatura e o vento influenciam na ETc.

Estimando a evapotranspiração da cultura do gergelim pelo método do balanço hídrico do solo em Barbalha – CE, Amaral e Silva (2008) obtiveram um valor mínimo de 2,5 mm d<sup>-1</sup> e um valor máximo de 11,6 mm d<sup>-1</sup>. Os mesmos autores ainda observaram que, à semelhança do observado na presente pesquisa, a ETc apresentou

valor mínimo na fase fenológica I e comportamento crescente a medida que a cultura se desenvolveu.



**Figura 4.8** – Evapotranspiração da cultura (ETc, mm d<sup>-1</sup>) do gergelim (BRS ANAHÍ) irrigado no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN

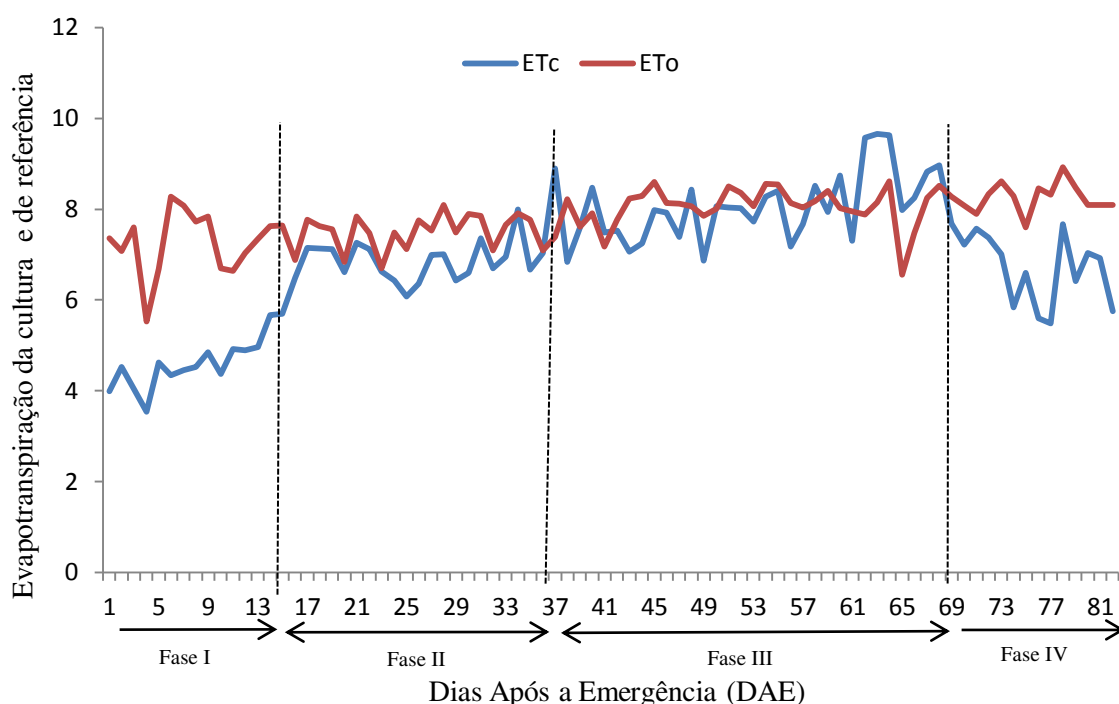
**Tabela 4.5** – Evapotranspiração da cultura (ETc) médios e totais para cada fase fenológica do gergelim (BRS ANAHÍ) em Apodi -RN

Fase Fenológica	ETc Médio (mmd <sup>-1</sup> )	ETc Total (mm)
I	4,5	58
II	6,7	148,5
III	8,0	265,5
IV	6,7	94,2
<b>Total</b>		<b>566,2</b>

Em termos médios obteve-se um menor valor de ETc na I fase fenológica da cultura, com 4,5 mm d<sup>-1</sup>, e maior na III fase, com 8,0 mmd<sup>-1</sup>. Os valores médios da ETc apresentaram comportamento crescente da Fase I a III e decrescente na fase IV, com média de 6,7 mmd<sup>-1</sup>. A ETc total foi menor na fase fenológica I, com 58 mm, e maior na fase fenológica III, com 265,5 mm. Para todo o ciclo a ETc foi de 566,2 mm. O decréscimo da ETc no fim do ciclo ocorreu, provavelmente, devido à senescência natural da cultura, tendo em vista que a redução da área foliar deve implicar em menor transpiração da planta, corroborando com o que foi observado por Lima et al. (2006) e Taiz e Zeiger (2009).

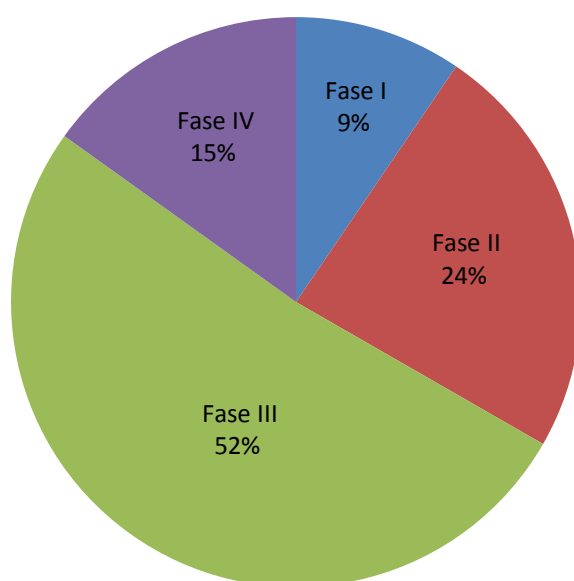
Pereira (2014) avaliando a evapotranspiração do gergelim pelo método do balanço hídrico do solo, em Barbalha-CE, também verificou que a ETc apresentou, em termos médios diários, um comportamento crescente entre as fases fenológicas I e III, aumentando de 3,5 para 7,7  $\text{mm d}^{-1}$ , respectivamente. Já na IV fase a ETc decresceu para 4,6  $\text{mm d}^{-1}$ . A ETc total para todo o ciclo da cultura foi de 515,9 mm.

Os valores da ETc superiores encontrados nessa pesquisa, em comparação com aqueles obtidos por Pereira (2011) pode ser explicado pela alta demanda hídrica da atmosfera, com temperaturas elevadas e baixa umidade relativa do ar, potencializando a capacidade do ar de absorver umidade. Além disso, a ausência de dias de céu nublado durante o experimento foi outro fator que também pode ter influenciado, uma vez que quanto menor for a presença de nuvens na atmosfera uma maior quantidade de radiação incidente chegará à superfície, tendo em vista a capacidade das nuvens de absorver e refletir energia. A Figura 4.9 representa a relação entre a ETc com a ETo.



**Figura 4.9** – Evapotranspiração da cultura (ETc,  $\text{mm d}^{-1}$ ) do gergelim (BRS ANAHÍ) irrigado e evapotranspiração de referência (ETo,  $\text{mm d}^{-1}$ ) no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN

Ao longo dos 82 dias do ciclo vegetativo do gergelim foram aplicados 713,2 mm de água, distribuídos em 67,9 mm na fase I; 169,4 mm na fase II; 368,2 mm na fase III e 107,7 mm na fase IV, como apresentado na Figura 4.10 e Tabela 4.6. Ao todo foram realizadas 24 irrigações, sendo a última realizada 80 dias após a emergência das plantas, durante a IV fase fenológica.



**Figura 4.10** – Percentual de água aplicada em cada fase fenológica da cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) em Apodi-RN

**Tabela 4.6** – Lâmina de água aplicada a cultura do gergelim (BRS ANAHÍ) e seu efetivo consumo em Apodi-RN

Fase Fenológica	Lâmina de Irrigação (mm)	ET <sub>o</sub> (mm)	ET <sub>c</sub> (mm)
I	67,9	93,9	58
II	169,4	165,6	148,5
III	368,2	260,7	265,5
IV	107,7	115,5	94,2
<b>Total</b>	<b>713,2</b>	<b>635,7</b>	<b>566,2</b>

A quantidade de lâmina de água aplicada em cada fase fenológica da cultura foi suficiente para atender a demanda hídrica da cultura. No cálculo da lâmina de irrigação a ser aplicada sobre a cultura leva-se em consideração a eficiência do sistema de irrigação de 75%, o que resulta na obtenção de uma lâmina de irrigação relativamente superior a quantidade de água que é efetivamente utilizada pela cultura durante o processo de evapotranspiração.

#### 4.5 Coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>)

Os valores diários, a média para cada fase fenológica e os valores recomendados pela FAO 56 para o coeficiente do cultivo (K<sub>c</sub>) são apresentados na Figura 4.11. Os valores mínimos diários foram obtidos na I e máximos na III fase fenológica da cultura, variando de 0,52 a 1,22, respectivamente. Os valores do K<sub>c</sub> médio na I, II, III e IV fase fenológica da cultura foram 0,62; 0,90; 1,01 e 0,82, respectivamente, e a média para todo o ciclo foi de 0,88. O maior valor do K<sub>c</sub> na III fase ocorreu devido ao fato do

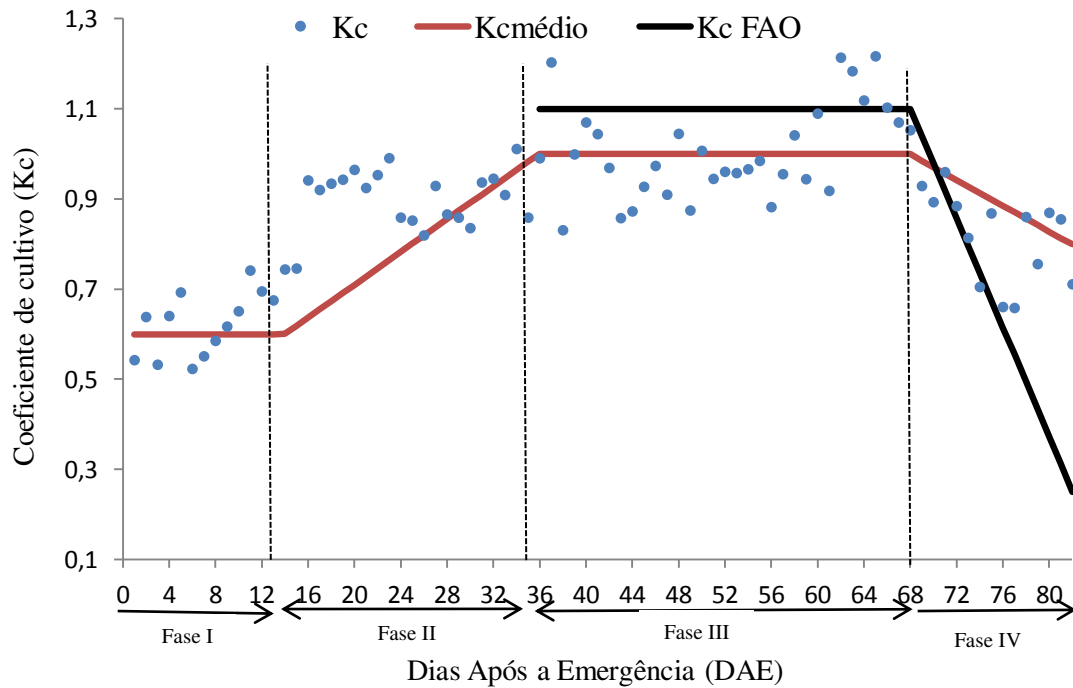
consumo hídrico das plantas (ETc) ter sido máximo nesta fase, resultado similar ao encontrado por Pereira et al. (2014) trabalhando com gergelim em Barbalha-CE, onde obteve um Kc médio de 0,63 no estágio I; 0,83 no estágio II e 0,97 no estágio III, divergindo acentuadamente apenas na fase IV onde obteve um Kc de 0,56. Um maior valor do Kc obtido no experimento durante a IV fase fenológica pode ser explicado pelo fato das irrigações terem sido mantidas até a fase de senescência com a finalidade de evitar a liberação dos frutos pela cultura, tendo em vista que López-Urrea et al. (2009) apontam o uso frequente do sistema de irrigação por aspersão como fator que contribui para obtenção de elevados valores da ETc nos estágios de menor cobertura do solo pela cultura, pois provoca intenso molhamento da superfície, o que eleva a evaporação do solo devido a sua maior exposição e, conseqüentemente, mantém o valor Kc elevado.

A FAO 56 não estabelece valor de Kc para a fase inicial da cultura, o Kc médio obtido foi relativamente próximo ao recomendado pela FAO 56, que sugere Kc médio de 1,10 para a cultura, entretanto diferiu muito do recomendado pela FAO 56 para o final do ciclo da cultura, que estabelece Kc final de 0,25. Obtendo o Kc diário para diversas culturas em um balanço hídrico agrícola, Gurski et al. (2013) identificaram que o Kc apresentou valores diferentes daqueles sugeridos pelas metodologias proposta pela FAO (Figura 4.10). Essa divergência pode ter ocorrido devido o Kc determinado localmente não ser constante para cada estágio da cultura e o agrupamento dos estágios de desenvolvimento da cultura proporcionarem erros, uma vez que a cultura se modifica diariamente durante todo o ciclo e sugerem o ajuste local como alternativa na determinação do referido parâmetro.

Resultado próximo ao obtido no experimento foi encontrado por Amaral e Silva (2008) estimando o coeficiente de cultivo do gergelim BRS 196 CNPA G4 a partir do balanço hídrico do solo em Barbalha-CE, onde verificaram que o Kc variou de 0,6 até 0,8 durante a fase intermediária (florescimento e desenvolvimento dos frutos), estabilizando-se e apresentando um valor médio de 0,8.

É reportado um considerável nível de sensibilidade da metodologia do Kc para as variações normais de ano para ano e do manejo da irrigação durante todos os estágios de crescimento e desenvolvimento da cultura, onde valores do Kcmédio desenvolvidos localmente sob condições de cultivo adequadas no sul da Califórnia, apresentaram uma redução de 6% (Allen et al., 2005) e de 15% no oeste da Turquia (Allen, 2000), devido as condições ideais assumidas não prevaleceram. Jensen et al. (1990) e Allen et al. (1998), sugerem a utilização de vários anos para construir uma curva mais

representativa do  $K_c$ . Allen et al. (1998) afirmam que o valor do  $K_c$  pode variar de 0,10 a 1,15, influenciado principalmente pela frequência e intensidade de molhamento da superfície (precipitação ou irrigação), como durante todo o experimento as irrigações foram mantidas pode ter influenciado na obtenção de valores de  $K_c$  relativamente mais elevados.



**Figura 4.11** – Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), coeficiente de cultivo médio ( $K_{cméd}$ ) e coeficiente de cultivo recomendado pela FAO56 para a cultura do gergelim no período de 11/08 a 31/10/2015 em Apodi-RN

## 5. CONCLUSÕES

A análise dos dados obtidos em experimento de campo ao longo do ciclo de produção do gergelim (BRS ANAHÍ) no município de Apodi, localizado no estado do Rio Grande do Norte, para o período de 11/08 a 31/10/2015 permite chegar às seguintes conclusões:

- a. O consumo hídrico da cultura ( $ET_{C_{BERB}}$ ) foi de 566,2 mm, distribuídos em 58 mm na I fase fenológica da cultura, 148,5 na II fase, 265,5 na III fase e 94,2 mm na IV fase;
- b. Em termos médios percentuais, com relação ao saldo de radiação, o calor latente ficou com 81,3%, o calor sensível com 17,7% e o fluxo de calor do solo com 0,4%;
- c. A evapotranspiração da cultura apresentou comportamento crescente entre a I e III fase fenológica da cultura e decresceu na IV fase;
- d. Os valores médios do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) foi de 0,6 na I fase fenológica da cultura, 0,9 na II fase, 1,0 na III fase e 0,8 na IV fase. O valor médio para todo o ciclo da cultura foi de 0,9.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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, D. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 300 p. 1998 (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

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.

ALVES, A.V.; AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B. Balanço de energia e reflectância de um cultivo de melão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n.2, p. 139-146, 1998.

AMABILE, R. F.; FARIAS NETO, A. L.; SPEHAR, C. R.; ARRIEL, N. H. C.; BELTRÃO, N. E. M. CNPA G3: nova opção de gergelim para a região do Distrito Federal. EMBRAPA Cerrados, Planaltina. 2001. 3p. (Comunicado Técnico, 43).

AMARAL, J.A.B.; SILVA, M.T. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do gergelim por manejo de irrigação. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v.12, n.1, p.25-33, jan./abr. 2008.

AMORIM NETO, M. da S.; GOMIDE, R. L.; SEDIYAMA, G. C.; BRITO, R. A. L.; MAGALHÃES, P. C.; BORGES JÚNIOR, J. C. F. Índice de estresse hídrico da cultura do feijoeiro irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 49-53, 1996.

ANDRÉ, R.G.B; MENDONÇA, J.C.; PINHEIRO, F.M.A.; MARQUES, V. S. MARQUES, J. Aspectos Energéticos do Desenvolvimento da cana-de-açúcar: Balanço de radiação e parâmetros Derivados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.3, p.375-382. 2010.

ARAUJO, G.L.; REIS, E.F.; MOREIRA, G.R. Correlações entre variáveis climatológicas e seus efeitos sobre a evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.5, nº. 2, p.96–104, 2011.

ARAUJO, A. E.; SOARES, J. J.; BELTRÃO, N. E. M.; FIRMINO, P.T.; **Cultivo do gergelim**, EMBRAPA ALGODÃO, Sistema de produção n. 6, versão eletrônica, 2006.

ARRIEL, N. H. C.; BELTRÃO, N. E. de M.; FIRMINO, P. de T. **Gergelim: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 209 p. 2009.

ARRIEL, N. H. C.; FIRMINO, P.T.; BELTRÃO, N. E. M.; SOARES, J. J. ; ARAÚJO, A .E.; SILVA, A. C.; FERREIRA, G.B. **A cultura do gergelim**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 72p. 2007 (Cartilha Plantar, 50).

ARRIEL, N. H. C.; VIEIRA, D. J.; FIRMINO, P. T. Situação atual e perspectivas da cultura do gergelim no Brasil. In: QUEIRÓZ, M. A.; GOEDERT, C. O.; RAMOS, S. R. R. (Ed.). Recursos genéticos e melhoramento de plantas para o nordeste brasileiro. (on line). Versão 1.0. Petrolina: Embrapa Semi-Árido; Brasília-DF: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 1999.

AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. 10. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006.

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 Management**, Amsterdam, v.88, n.1-3, p.201-208, 2007.

AZEVEDO, P. V.; SOUSA, I. F.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water use efficiency of dwarf-green coconut (*cocos nucifera L.*) orchards in Northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v.1, n.84, p.259-264, 2006.

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.

BARROS, M.A.L.; SANTOS, R.F. dos; BENATI, T.; FIRMINO, P. de T. Importância econômica e social. In: **O agronegócio do gergelim no brasil**. Brasília: Embrapa-CTT/Campina Grande: Embrapa-CNPA, cap. II. 348p. 2001.

BASTIAANSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; ALLEN, R. G. SEBAL for spatially distributed ET under actual management and growing conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 131, n. 1, p. 85-93, 2005.

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.M.; ARRIEL, N.H.C.; LIMA, R.L.S. **Clima**. In: ARRIEL, N.H.C.; BELTRÃO, N.E.M.; FIRMINO, P.T. **Gergelim: O produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa informações tecnológicas, 209p. 2009 (Coleção 500 perguntas, 500 respostas).

BELTRÃO, N. E. de M.; SOUZA, J. G. de.; PEREIRA, J. R. Fitologia. In: BELTRÃO, N. E. de M.; VIEIRA, D. J. **O agronegócio do Gergelim no Brasil**. Brasília: **Embrapa Comunicações para transferência de Tecnologia**, cap.3, p.37-5. 2001a.

BELTRÃO, N.E.M. Potencial da cultura do gergelim para a região Nordeste, em especial para o estado da Bahia. **Revista Bahia Agrícola**. Bahia, v.4, n.2, p. 49-51. 2001b.

BETTS, A. K.; DESJARDINS, R. L.; WORTH, D.. Impact of agriculture, forest and cloud feedback on the surface energy budget in BOREAS. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.142, n. 2-4, p.156-169, 2007.

BEZERRA, J. R. C., AZEVEDO, P. V., SILVA, B. B. da, DIAS, J. M. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo do algodoeiro BR-200 marrom, irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.6, p. 625-632, 2010.

BEZERRA, J. R. C. **Crescimento, desenvolvimento e rentabilidade do algodoeiro BRS 200 – marrom, irrigado**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2007.

BISCARO, G. A.; Meteorologia Agrícola Básica. Mato Grosso do Sul: UNIGRAF, 87p. 2007.

BURBA, G. G.; VERMA, S. B. Seasonal and interannual variability in evapotranspiration of native tallgrass prairie and cultivated wheat ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 135, n. 1-4, p. 190-201, 2005.

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.

CARVALHO FILHO, L.C.A.L.; L.G.; EVANGELISTA, A.W.P.; JUNIOR, J.A. Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Minas Gerais, v.14, n.12, p.1294–1303, 2010.

CHANDRAKAR, B. L.; SEKHAR, N; TUTEJA, S. S.; TRIPATHI, R. S. Effect of irrigation and nitrogen on growth and yield of summer sesame (*Sesamum indicum*). **Indian Journal of Agronomy**, v.39, n.4, p.701-702, 1994.

CUNHA, R. G.; ASSAD, E. D. Uma visão geral sobre zoneamento agrícola Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n.3, p.377-385, 2001.

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

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

DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 306p, 1979. (**Irrigation and Drainage Paper 33**).

EMBRAPA. Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Cultivares do gergelim. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/gergelim/arvore/CONT000gkv1h5y02wx5ok0xkgyq55vqh6l3.html>> Acessado em 20 maio 2015.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Algodão (Campina Grande, PB). **II Plano Diretor da Embrapa Algodão**. Campina Grande: Embrapa-CNPA, 30p. 2000.

EPSTEIN, L. **Cultura – Gergelim SDA DDA – SEAGRI** – Secretaria de Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária. Salvador .Agosto, 2000.

ESTEVES, B. dos S.; SOUSA, E. F. de; MENDONÇA, J. C.; LOUSADA, L. de L.; MUNIZ, R. de A.; SIQUEIRA, D. P. Albedo da cana-de-açúcar em Campos dos Goytacazes, RJ. In: **Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, 17, 2011, Guarapari - ES. Anais...Guarapari: SBAGRO, 2011.

FAO (Roma). Dados agrícolas de FAOSTAT. Disponível em: <[http:// apps.fao.org/](http://apps.fao.org/)>. Acessado em: 25 maio 2015.

FARIAS, S.E.M.; MEIRELLES, M.L.; FRANCO, A.C.; NOGUEIRA, J.L.M.; GUERRA, A. F. E MANZI, A. O. Balanço de Energia em Cultivo de Milho no Cerrado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 227-233. 2004.

FARIAS, R. A.; SOARES, A. A.; SEDYAMA, G. C.; RIBEIRO, C. A. A. S. Demanda de irrigação suplementar para acultura do milho no estado de minas gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 4, n.1, p.46-50, 2000.

FIGUEIREDO, V. B.; MEDEIROS, J. F.; ZOCOLER, J. L.; ESPINOLA SOBRINHO, J. Evapotranspiração da cultura da melancia irrigada com água de diferentes salinidades. **Engenharia Agrícola**, v.29, p.231-240, 2009.

FIRMINO, P. de T; ARRIEL, N.H.C.; ARRUDA, T.A.; ANTUNES, R.M.P. Valor protéico do grão, importância na alimentação humana e aplicações na fitoterapia e fitocosmética. In: **O agronegócio do gergelim no brasil**. Brasília: Embrapa CTT/Campina Grande: Embrapa – CNPA, cap. XV. 2000.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.26, n.3. 1991.

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.

GASPARIM, E. et al. Temperatura no perfil do solo utilizando duas densidades de cobertura e solo nu. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 27, no. 1, p. 107-115. 2005.

GIACOMONI, M. H. **Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia: aplicação no estado do Rio Grande do Sul**. 2005. 193 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricol) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

GOMES, A.H.S.; CHAVES, L.H.G.; FERREIRA FILHO, J.G.A.; SOUSA, F.G. **Fitomassa na cultura do gergelim irrigado sob doses de nitrogênio.** II INOVAGRI International Meeting. Fortaleza, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.12702/ii.inovagri.2014-a660>>. Acesso em: 18/04/2015.

Grilo Júnior, J. A. S.; Azevedo, P. V. de. Crescimento, desenvolvimento e produtividade do gergelim 'BRS Seda' na agrovila de Canudos, em Ceará Mirim (RN). **Revista Holos**, v.2, p.19-33, 2013.

GURSKI, B. C., SOUZA, J. L. M. & ARMINDO, R. A. **Estimativa do coeficiente de cultivo diário de diversas culturas em um balanço hídrico agrícola.** 2013. Disponível em: <[http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes/re\\_2013\\_cbcs\\_2.pdf](http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes/re_2013_cbcs_2.pdf)> Acesso em: 02/02/2016.

HAYASHI, M.M.S.; CAMPELO JÚNIOR, J.H.; PRIANTE FILHO, N.; NOGUEIRA, J.S.; VOURLITIS, G.L.; Balanço de energia da Crotalaria Juncea L. no período seco e úmido do ano, em condições de cerrado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia.** Santa Maria, v.10, n.2, pp. 197-205. 2002.

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.

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.

IRIAS, L.J.M.; GEBLER, L.; PALHARES, J.C.P.; ROSA, M.F.; RODRIGUES, G.S. Avaliação de impacto ambiental de inovação tecnológica agropecuária - aplicação do sistema Ambitec. **Agricultura em São Paulo.** São Paulo, v. 51, n. 1, p. 23-39, jan./jun. 2004.

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

JORDAN, R.P., GOMES, E.P., BISCARO, G.A., MOTOMIVA, A.V.A., GEISENHOFF, L. Impacto energético da irrigação por gotejamento no cultivo de mamona. **Pesquisa agropecuária tropical**, Goiânia, v. 42, n. 4, p. 375-382, out./dez. 2012.

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.

LANGHAM, R.; SMITH, G.; WIEMERS, T.; RINEY, J. **Sudoeste sesame grower's: aprilTexas**: Sesaco Corporation, 51p. 2006.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; MOURA, M.S.B.; SALDANHA, T.R.F.C.; SOBRINHO, J.E.; OLIVEIRA, G.M. Balanço de Radiação Sobre um Solo Descoberto para quatro Períodos do Ano. **Revista de Ciência e Tecnologia** 15 – pp. 59-66. 2000.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.1, p.89-95, 2006.

LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOARES, W.A.; BORGES, E.; SILVA, I.F.; LIRA, C.A.B.O. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p. 527-534, 2005.

Lima, F. A.; Sousa, G. G. de; Viana, T. V. de A.; Pinheiro Neto, L. G.; Azevedo, B. M.; Carvalho, C. M. de. Irrigação da cultura do gergelim em solo com biofertilizante bovino. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. Fortaleza v.7, p.102-111, 2013.

LIU, H. e FOKEN, T. A modified Bowen ratio method to determine sensible and latent heat fluxes. **Meteorologische Zeitschrift**, v.10, n.1, p.71-80, 2001.

LOHMANN, S.; SCHILLINGS, C.; MAYER, B.; MEYER, R. Long-term variability of solar direct and global radiation derived from ISCCP data and comparison with reanalysis data. **Solar Energy**, v.80, n.11, p.1390-1401, 2006.

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.

MERTEN, G.H.; MINELLA, J.P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. **Agroecologia e desenvolvimento rural sustentável**. Porto Alegre, v.3, n.4, out/dez 2002.

MESQUITA, J.B.R.; AZEVEDO, B.M.; CAMPELO, A.R.; FERNANDES, C.N.V.; VIANA, T.V.A. Crescimento e produtividade da cultura do gergelim (*Sesamum indicum* L.) sob diferentes níveis de irrigação. **Irriga**. Botucatu, v. 18, n. 2, p. 364-375, abril-junho, 2013.

MIRANDA, E. P. **Coefficiente 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.

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.; SOARES, J. M.; GURGEL, M. T.; SILVA, T. G. F. **Balanço de energia na cana-de-açúcar irrigada no Submédio São Francisco**. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 27.,2007, Mossoró-RN. Disponível em: [http://www.cpatia.embrapa.br/public\\_eletronica/downloads/OPB1481.pdf](http://www.cpatia.embrapa.br/public_eletronica/downloads/OPB1481.pdf). Acesso em: 24/07/2015.

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

MOTA, F.S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo: Nobel, 376p. 1976.

MONTEITH, J.L.; UNSWORTH, M.H. **Principles of environmental physics** . 2.ed. London: Edward Arnold, 291p. 1990.

NEVES, L.O.; COSTA, J.M.N.; ANDRADE, V.M.; LOLA, A.C.; FERREIRA, W.P. Balanço de energia em uma cultura de feijão caupi (*Vigna unguiculata* L.) no estado do Pará. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v.16, n.1, p.21-30, 2008.



OLIVEIRA, I.A.; LIMA, J.R.S.; SILVA, I.F.; ANTONINO, A.C.D.; GOUVEIA NETO, G.C.; LIRA, C.A.B.O. Balanço de energia em mamona cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n.2, p.185-191, 2009.

OLIVEIRA, E. Características da cultura do gergelim. Campo Florido: Emater, 2005.

ORTEGA-FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.81, p.131-143, 1996.

PEREIRA, J.R. **Comportamento e necessidades hídricas do gergelim sob diferentes regimes de irrigação**. Campina Grande: UFCG, 88p. 2014. (Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande).

PEREIRA, J.R.; ARAUJO, W.P.; ALMEIDA, E.S.A.B.; BEZERRA, J.R.C.; GUERRA, H.O.C.; ZONTA, J.H. Sesame crop coefficients using crop evapotranspiration by water balance and, reference evapotranspiration by Penman-Monteith. **Irriga**, Botucatu, Edicao Especial 01, p. 72-84, 2014.

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

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.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.97, n.3, p.141-50, 1999.

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.

PEZZOPANE, J.E.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A.; MEYER, N. Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.3, p.1-4, 1995.

QUEIROGA, V. de P.; ARRIEL, N. H. C.; BELTRÃO, N. E. de M.; SILVA, O. R.R.; GONDIM, T. M. de S.; FIRMINO, P. de T.; CARTAXO, W. V.; SILVA, A.C.; VALE, D. G.; NÓBREGA, D. A. **Cultivo Ecológico do Gergelim: alternativa de produção para comunidades de produtores familiares da região semi-árida do Nordeste.** Campina Grande: Embrapa Algodão, 53 p. 2007. (Embrapa Algodão. Documentos, 171).

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; MARIANO, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 42- 49, 2006.

Ramos, A. M.; Santos, L. A. R.; Fortes, L. T. G. **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990.** Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 465p. 2009.

ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L. VERMA, S. B. **Microclimate: the biological environment.** New York: John Wiley, 495p. 1983.

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 Florianópolis, SC. **Anais...** Florianópolis: v.2, p.1037-1052. 1988.

SANIJ, D. H., YAMAMOTO, T.; RASIAH, V. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. **Agricultural Water Management**, v. 64, p.91-106, 2004.

SANTOS, W.O.; NUNES, R.L.C.; GALVÃO, D.C.; PEREIRA, V.C.; MANIÇOBA, R.M.; LIMA, J.G.A.; VIANA, P.C. Evapotranspiração da cultura do milho verde, análise estatística. **Revista Agropecuária Científica no Semi-Árido**, V. 9, n. 1, p. 75 - 81, jan - mar, 2013.

SAVY FILHO, A.; BANZATTO, N. V. Descrição morfológica do gergelim (*Sesamum indicum* L.), IAC Ouro. Campinas: Instituto Agrônômico, 1988. 12p. (IAC. Boletim Científico, 13).

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

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

SESACO – SESAME COORDINADORES. **Sesame producer guide**. Austin: SESACO, p. 2012.

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, J.C.A.S.; FERNANDES, P.D.; BEZERRA, J.R.C.; ARRIEL, N.H.C.; CARDOSO, G.D. Crescimento e produção de genótipos de gergelim em função de lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.18, n.4, p.408–416, 2013.

SILVA, J. C. A. **Crescimento e produção de genótipos de gergelim (*Sesamum Indicum* L.) em função de lâminas de irrigação**. Campina Grande: UFCG, 144p. 2012 (Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande).

Silva, A. R. A.; Bezerra, F. M. L.; Sousa, C. C. M.; Pereira Filho, J. V.; Freitas, C. A. S. Desempenho de cultivares de girassol sob diferentes lâminas de irrigação no Vale do Curu, CE. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, p.57-64, 2011a.

SILVA, B. K. N; SILVA, V.P.R; AZEVEDO, P.V; FARIAS, C. H. A. Análise de sensibilidade dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência e razão de Bowen em cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.10, p.1046–1053, 2011b.

SILVA, V. P. R; CAMPOS, J. H. B. C.; AZEVEDO, P. V. Water-use efficiency and evapotranspiration of mango orchard grown in northeastern region of Brazil. **Scientia Horticulturae**, v. 102, p. 467-472, 2009.

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, B.B.; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens landsat 5 – tm. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.20, n.2, p.243 –252, 2005a.

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

SILVA, L.C. **Cultura do gergelim**. Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, 15p. 1993 (Treinamento para assistentes de pesquisa do sistema cooperativo de pesquisa Agropecuária).

SLACK D. C., Marti E. D., Sheta A.E., Fox Jr F. A., Clark L. J., Ashley RO **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, 1996.

SOUZA, C. B.; SILVA, B. B.; AZEVEDO, P. V.; SOLVA, V. P. R. Fluxo de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**. Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 400-407, 2008.

TANNER, C.B; LEMON, E.R. Radiand energy utilized in evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.54, p.207–212, 1962.

Taiz, L.; Zeiger, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 848p. 2009.

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.

TODD, R. W.; EVETT, S. R; HOWELL, T. A. The Bowen ratio-energu balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfafa evaluated in a semiarid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, p. 335-348, 2000.

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

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

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

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia Básica e Aplicações. Viçosa, MG: UFV, 449 p. 1991.

WANG, J.; BRAS, R. L. Effect of temperature on surface energy balance. **Water Resources Research**, Washington, v.37, n.12, p.3383-3386, WEISS, E. A. Sesame. In: WEISS, E. A. (Ed.). **Oilseed crops**. London: Longman, p. 282-340. 2001.

WEISS, E.A. **Oilseed Crops**. Logman, 660 p. 1983

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.