



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS**



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO HÍDRICO E VIABILIDADE
ECONÔMICA DA CULTURA DO FEIJÃO CAUPI CULTIVADO NA
CHAPADA DO APODI**

ANECLÉIA RODRIGUES DE LIMA

CAMPINA GRANDE – PB

MARÇO DE 2011

ANECLÉIA RODRIGUES DE LIMA

AVALIAÇÃO DO CONSUMO HÍDRICO E VIABILIDADE ECONÔMICA DA
CULTURA DO FEIJÃO CAUPI CULTIVADO NA CHAPADA DO APODI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Recursos Naturais da
Universidade Federal de Campina Grande –
UFCG, em cumprimento às exigências para a
obtenção do grau de mestre.

Área de concentração: Sociedade e Recursos Naturais

Subárea: Gestão de Recursos Naturais

Orientador: Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva

Co-Orientador: Dr. José Renato Cortez Bezerra - Pesquisador (Embrapa Algodão)

Campina Grande – Paraíba

Março de 2011

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA
CENTRAL DA UFCG**

L732a Lima, Anecleia Rodrigues de
Avaliacao do consumo hidrico e viabilidade economica da
cultura do Feijao Caupi cultivado na Chapada do Apodi /
Anecleia Rodrigues de Lima. - Campina Grande, 2011.
67 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Recursos Naturais) -
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de
Tecnologia e Recursos Naturais.

1. Evapotranspiracao 2. Evapotranspiracao de Referencia
3. Coeficiente de Cultivo 4. Balanco de Energia 5.
Dissertacao I. Silva, Vicente de Paulo Rodrigues da, Dr.
II. Bezerra, Jose Renato Cortez, Dr. III. Universidade
Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB) IV. Titulo

CDU 556.13(043)

ANECLÉIA RODRIGUES DE LIMA

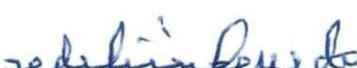
AVALIAÇÃO DO CONSUMO HÍDRICO E VIABILIDADE ECONÔMICA DA CULTURA
DO FEIJÃO CAUPI CULTIVADO NA CHAPADA DO APOD

APROVADA EM: 01/03/2011

BANCA EXAMINADORA


Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Dr. JOSÉ RENATO CORTEZ BEZERRA
Embrapa Algodão


Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Dr. ALDENÔR GOMES DA SILVA
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais, Francisco das Chagas e Maria Rodrigues, as minhas tias Francisca Iremar, Francicléa Rodrigues e Rita de Cássia, a minha avó Irene Souto Lima e ao meu irmão Augusto César com carinho e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Francisco das Chagas e Maria Rodrigues de Lima, e meu irmão, Augusto César, pelo carinho, confiança e incentivo na realização desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, pelos conhecimentos transmitidos, apoio e incentivo nessa etapa da minha vida acadêmica.

Ao Dr. José Renato Cortez Bezerra, pela amizade e dedicação, além de sua enorme contribuição na realização do experimento de campo.

Ao Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudo oferecida durante o curso.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, principalmente à Cleide (secretária), pela competência de seus serviços e dedicação aos alunos.

À minha prima companheira de pesquisa, Cícera Josefa Rosângela Borges.

A todos os professores que direta ou indiretamente contribuíram para o meu aprendizado.

Aos meus amigos, que mesmo distantes me apoiaram na concretização desse sonho, Mayara Andrade, Geórgia Karenia, Júlio Cezar, Vilma Souto, Izabel Cristina, Eliane Cecília, Givaldo, Sileno, Ailma Medeiros, Maria de Lourdes, Debora Taynara, Ayala Cássia, Mariclecia, Milena, Alexandre, Taciano.

Ao amigo Francisco Rodolfo Junior, presente em minha vida durante a realização desse curso, pela inestimável ajuda, além da grande amizade, companheirismo e apoio, que tornaram essa tarefa mais fácil.

A EMPARN, por ter permitido a realização dos trabalhos experimentais e sua base física de Apodi.

A todos os meus primos e primas, tios e tias, amigos e familiares que me incentivaram nessa jornada de estudo.

AGRADEÇO.

Sumario

| | |
|--|------|
| LISTA DE ABREVIACOES E SÍMBOLOS | viii |
| LISTA DE EQUACOES | xi |
| LISTA DE FIGURAS | xii |
| LISTA DE TABELAS | xiii |
| RESUMO | xiv |
| ABSTRACT | xv |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 16 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 18 |
| 2.1. Cultura do feijão | 18 |
| 2.2. Exigências climáticas, hídricas e de solo..... | 20 |
| 2.3. Importância socioeconmica | 22 |
| 2.4. Evapotranspirao da cultura..... | 25 |
| 2.5. Evapotranspirao de referência..... | 26 |
| 2.6. Coeficiente de cultura..... | 28 |
| 2.7. Balanço de energia..... | 30 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 32 |
| 3.1. rea experimental e clima..... | 32 |
| 3.2. Cultura utilizada | 34 |
| 3.3. Irrigao..... | 35 |
| 3.4. Lâmina de água aplicada e consumo hídrico | 35 |
| 3.5. Medições..... | 37 |
| 3.6. Dados utilizados na determinao da ET_0 | 38 |
| 3.7. Evapotranspirao de referência..... | 39 |
| 3.8. Evapotranspirao da cultura..... | 42 |
| 3.9. Razão de Bowen | 43 |
| 3.10. Fluxo de calor latente | 44 |
| 3.11. Fluxo de calor sensível | 44 |
| 3.12. Coeficiente de cultivo..... | 45 |
| 3.13. Análise econômica..... | 45 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 47 |
| 4.1. Fases de crescimento e desenvolvimento da cultura | 47 |
| 4.2. Balanço de energia sobre a cultura | 48 |
| 4.3. Evapotranspirao de referência..... | 53 |
| 4.4. Evapotranspirao da cultura..... | 54 |
| 4.5. Coeficiente de cultivo..... | 56 |
| 4.6. Análise econômica..... | 57 |
| 5. CONCLUSOES | 59 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 60 |

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

GREGOS

- β razão de Bowen.
 γ coeficiente psicrométrico.
 δ declinação solar.
 Δ declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T.
 ε razão entre as massas moleculares da água e do ar seco.
 π número trigonométrico.
 σ constante de Stefan-Boltzmann.
 φ latitude local.
 ω_s ângulo horário.

LATINOS

- arc cos – função trigonométrica.
BE – balanço de energia.
cos – função trigonométrica.
 C_p - calor específico do ar seco à pressão constante.
CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento.
 d_r – inverso da distância relativa Terra-Sol.
 e - pressão de vapor d'água.
 e_a - pressão de vapor d'água média diária.
 e_s - pressão de saturação do vapor d'água média diária.
 $e^0(T_{\min})$ - pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura mínima.
 $e^0(T_{\max})$ - pressão de saturação do vapor d'água para a temperatura máxima.
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
EMPARN - Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte.
ET - evapotranspiração.
 ET_c - evapotranspiração da cultura.
 ET_m - evapotranspiração máxima da cultura.
 ET_o - evapotranspiração de referência diária.
FAO - Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação.
G - fluxo diário de calor no solo.

G_{sc} - constante solar.

H - fluxo diário de calor sensível.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia.

J - dia Juliano.

K_c - coeficiente da cultura.

K_h - coeficiente de difusão turbulenta de calor sensível.

K_p - coeficiente do tanque Classe A.

K_w - coeficiente de difusão turbulenta de calor latente.

L - calor latente de vaporização da água.

LE - fluxo diário de calor latente.

P - energia utilizada no processo fotossintético.

P_p - período do dia em que o saldo de radiação é positivo.

p_o - pressão atmosférica média local.

q - umidade específica do ar.

R_a - radiação extraterrestre.

R_n - saldo diário de radiação.

R_{nl} - balanço de radiação de ondas longas.

R_{ns} - balanço de radiação de ondas curtas.

R_r - radiação refletida pela cultura.

R_s - radiação solar incidente.

R_{so} - radiação solar para dias de céu claro.

RN - Estado do Rio Grande do Norte.

S - energia armazenada na copa das árvores.

sen - função trigonométrica.

T - temperatura média diária do ar.

T_{max} - temperatura máxima do ar diária.

T_{min} - temperatura mínima do ar diária.

$T_{max,K}$ - temperatura máxima do ar em Kelvin.

$T_{min,K}$ - temperatura mínima do ar em Kelvin.

T_s - temperatura do ar do bulbo seco.

T_u - temperatura do ar do bulbo úmido.

u_2 - velocidade média diária do vento a 2 m de altura.

u_{10} - velocidade média diária do vento a 10 m de altura.

U - velocidade do vento.

UR_{\max} - umidade relativa máxima.

UR_{\min} - umidades relativa mínima.

USDA - Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.

z - altitude local.

Δe - diferença de pressão real de vapor d'água em dois níveis acima da superfície vegetada.

ΔT - diferença de temperatura do ar em dois níveis acima da superfície vegetada.

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|----|
| Equação 1 Evapotranspiração de referência diária (ET_o)..... | 39 |
| Equação 2 Inclinação da curva de pressão de vapor (Δ) | 40 |
| Equação 3 Temperatura média diária do ar (T)..... | 40 |
| Equação 4 Constante psicrométrica (γ) | 40 |
| Equação 5 Pressão atmosférica média local (p_o)..... | 40 |
| Equação 6 Velocidade média diária do vento a 10 m de altura (u_2)..... | 40 |
| Equação 7 Pressão de saturação do vapor d'água média diária (e_s)..... | 41 |
| Equação 8 Pressão de saturação do vapor d'água para temperatura máxima e mínima | 41 |
| Equação 9 Pressão de vapor média diária (e_a)..... | 41 |
| Equação 10 Saldo diário de radiação (R_n) | 41 |
| Equação 11 Balanço de radiação de ondas curtas (R_{ns})..... | 41 |
| Equação 12 Balanço de radiação de ondas longas (R_{nl})..... | 41 |
| Equação 13 Radiação solar para dias de céu claro (R_{so}) | 42 |
| Equação 14 Radiação extraterrestre (R_a)..... | 42 |
| Equação 15 Inverso da distância relativa Terra-Sol (d_r)..... | 42 |
| Equação 16 Declinação solar (δ) | 42 |
| Equação 17 Ângulo horário (ω_s)..... | 42 |
| Equação 18 Evapotranspiração da cultura (ET_c)..... | 42 |
| Equação 19 Razão de Bowen (β) em função das diferenças da temperatura do ar e da pressão real de vapor d'água em dois níveis acima da superfície vegetada | 43 |
| Equação 20 Fator Psicrométrico..... | 43 |
| Equação 21 Calor latente de vaporização..... | 43 |
| Equação 22 Variações de temperatura do ar e pressão de vapor d'água na camada de ar acima da cultura..... | 44 |
| Equação 23 Pressão parcial de vapor d'água (e) em dois níveis acima da superfície vegetada | 44 |
| Equação 24 Pressão de saturação de vapor d'água..... | 44 |
| Equação 25 Fluxo de calor latente (LE) em função da razão de Bowen..... | 44 |
| Equação 26 Fluxo de calor sensível | 44 |
| Equação 27 Coeficiente de cultivo (K_c)..... | 45 |
| Equação 28 Determinação da eficiência econômica | 45 |
| Equação 29 Renda bruta | 46 |
| Equação 30 Renda Líquida..... | 46 |
| Equação 31 Custo operacional efetivo | 46 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Localização da fazenda experimental da EMPARN. A) Visualização da costa do litoral do nordeste brasileiro;..... | 32 |
| Figura 2 Área experimental da EMPARN, em Apodi, RN, onde foi realizado o experimento de campo..... | 35 |
| Figura 3 Sistema de irrigação por aspersores utilizados para irrigação da área experimental. | 36 |
| Figura 4 Lâminas de água aplicadas por irrigação e precipitação pluvial ocorrida durante o ciclo do feijão caupi..... | 37 |
| Figura 5 A) Torre micrometeorológica utilizada na coleta de dados; B) Sistema automático de aquisição de dados (Datalogger CR 3000)..... | 38 |
| Figura 6 Estação meteorológica de observação à superfície do INMET. | 39 |
| Figura 7 Fases fenológicas do feijão caupi..... | 48 |
| Figura 8 Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de germinação do feijão caupi em 13/04/2010..... | 49 |
| Figura 9 Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de desenvolvimento da cultura do feijão caupi em 03/05/2010..... | 50 |
| Figura 10 Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de floração do feijão caupi em 19/05/2010. | 50 |
| Figura 11 Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de maturação do feijão caupi em 08/06/2010..... | 51 |
| Figura 12 Comportamento diário dos componentes de balanço de energia durante o ciclo do feijão caupi cultivado em Apodi, RN. | 53 |
| Figura 13 Comportamento diário da evapotranspiração de referência durante a realização do experimento com a cultura do feijão em Apodi, RN..... | 54 |
| Figura 14 Comportamento diário da evapotranspiração da cultura do feijão cultivado em Apodi, RN..... | 55 |
| Figura 15 Comportamento diário do coeficiente de cultivo do feijão-caupi cultivado em Apodi, RN..... | 57 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 Médias mensais da temperatura máxima ($T_{m\acute{a}x}$) e mínima ($T_{m\acute{i}n}$) e da umidade relativa máxima ($U_{m\acute{a}x}$) e mínima ($U_{m\acute{i}n}$) durante o período experimental. . | 33 |
| Tabela 2 Valores médios mensais da precipitação, temperaturas média, máxima e mínima e a umidade relativa do ar na região do Apodi, RN, no período de 1911 a 1990. | 34 |
| Tabela 3 Valores de lâmina de água aplicada ao feijão caupi e do seu efetivo consumo na região de Apodi, RN. | 36 |
| Tabela 4 Duração das fases fenológicas do ciclo do feijão caupi cultivado na região da Chapada do Apodi, RN. | 47 |
| Tabela 5 Valores médios do saldo de radiação (R_n) e da partição dos componentes do balanço de energia: fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G) durante as fases do ciclo do feijão caupi. | 52 |
| Tabela 6 Valores médios de E_{To} diária e total para cada fase do ciclo do feijão caupi. | 54 |
| Tabela 7 Valores médios diários e acumulados da E_{Tc} para cada fase do ciclo do feijão caupi. | 56 |
| Tabela 8 Valores médios do coeficiente de cultivo (K_c) do feijão-caupi cultivado em Apodi, RN. | 56 |
| Tabela 9 Análise econômica do cultivo do feijão caupi irrigado e em sequeiro em Apodi, RN. | 58 |

RESUMO

A presente pesquisa foi conduzida em nível de campo na Fazenda Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN, localizada no município de Apodi, RN. Foram utilizados na determinação do consumo hídrico da cultura do feijão caupi irrigado os métodos de Penman-Monteith para estimar a evapotranspiração de referencia (ET_0), balanço de energia baseado na razão de Bowen para estimar a ET_c e a relação ET_c/ET_0 para determinar o coeficiente de cultivo (K_c). O experimento foi realizado utilizando uma parcela experimental de 4,0 ha cultivado com feijão caupi, cultivar Potiguar, com espaçamento de 70 cm entre linhas e uma densidade populacional de aproximadamente 4 plantas m^{-1} . O sistema de irrigação foi por aspersão, considerando uma eficiência de 60%, o que totalizou uma lâmina de irrigação de 463,7 mm ao final do ciclo da cultura. Os resultados evidenciam que o consumo hídrico da cultura do feijão-caupi foi maior na fase de desenvolvimento vegetativo (166,91 mm), enquanto que para todo o ciclo o consumo foi 431,86 mm; Comparando os sistemas irrigado e de sequeiro na produção de feijão-caupi, o sistema irrigado alcançou uma rentabilidade superior. Assim, o cultivo irrigado do feijão-caupi na região de Apodi, RN, é economicamente viável, pois a renda líquida com o cultivo irrigado foi superior a renda líquida obtida pelo cultivo em sistema de sequeiro.

Palavras-chave: Evapotranspiração de referência, coeficiente de cultivo, balanço de energia.

ABSTRACT

This study was carried out under field conditions at the Experimental Farm of the Agricultural Research Company of Rio Grande do Norte (EMPARN), in Apodi, RN. For determining the crop water consumption of cowpea irrigated, it was used the methods of Penman-Monteith to estimate reference evapotranspiration (E_{To}), energy balance based on Bowen ratio to estimate crop evapotranspiration (E_{Tc}) and the ratio E_{Tc}/E_{To} to determine the crop coefficient (K_c). The experiment was conducted using an experimental plot of 4.0 ha cultivated with cowpea cultivar Potiguar, with 70 cm between rows which resulted a density of 4 plants m^{-1} . The irrigation system sprinkler was used with an efficiency of 60%, which produced a water depth of 463.7 mm at the end of the cycle. The results show that the water requirement of cowpea was higher in the period of vegetative growth (166.91 mm), while for the entire cycle it was 431.86 mm.

Key-words: Reference evapotranspiration, crop coefficient, energy balance.

1. INTRODUÇÃO

O feijão caupi, (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), conhecido por feijão macassar ou feijão de corda, é uma fonte de renda alternativa e considerado alimento básico da população da região Nordeste do Brasil, especialmente para a zona rural. A origem do feijoeiro comum é o continente americano, sendo, a exemplo de outras culturas, levado a Europa logo após a conquista das Américas. O feijão é, sem dúvida, o produto alimentício mais popular e conhecido no Brasil, constituindo-se em principal fonte de proteína vegetal. O teor de proteína dos grãos varia de 20 a 33%, sendo também um alimento energético, contendo cerca de 340 cal/100gr. O consumo de feijão no Brasil tem algumas particularidades quanto à preferência pelas variedades. No Rio Grande do Sul, Santa Catarina e no Paraná, o consumo é de feijão produzido localmente, ou seja, feijão preto e em cores; em São Paulo, a preferência é dada aos feijões de cores, como: Roxinho de Minas, o Opaquinho, Rosinha ou Chumbinho do Paraná; o Rojão ou Roxinho de Goiás, o Jalo ou Cavalo do Rio Grande. No Rio de Janeiro, no entanto, o maior consumo é do tipo preto. E nos outros estados, o consumo é de feijões produzidos no próprio estado, sejam pretos ou em cores.

A área ocupada com feijão caupi no mundo está em torno de 12,5 milhões de ha, com 8 milhões (64% da área mundial) na parte oeste e central da África. A outra parte da área está localizada na América do Sul, América Central e Ásia, com pequenas áreas espalhadas pelo sudoeste da Europa, sudoeste dos Estados Unidos e da Oceania. Os dados disponíveis na FAO (2009) sobre a produção mundial de feijão-caupi no ano de 2007 indicam que a cultura atingiu 3,6 milhões de toneladas em 12,5 milhões de hectares. A maior produção do feijão é encontrada em 36 países, destacando-se dentre os maiores produtores a Nigéria, o Niger e o Brasil que representam juntos 84,1% da área e 70,9% da produção mundial. No Brasil, a produção de feijão caupi se concentra nas regiões Nordeste (1,2 milhão de hectares) e Norte (55,8 mil hectares) do país; no entanto, a cultura está conquistando espaço na região Centro Oeste, em razão do desenvolvimento de cultivares com características que favorecem o cultivo mecanizado (Silva, 2010).

A distribuição irregular das chuvas prejudica o feijoeiro comum, que possui um sistema radicular pouco desenvolvido, inibe a germinação das sementes resultando em estande deficiente da cultura, afetando a produção final de grãos (Stone et al., 1988; Zimmermann e Teixeira (1996) acrescentam que em geral, o feijoeiro não se adapta aos

trópicos úmidos, porém cresce bem em áreas com chuvas regulares, desde os trópicos até as zonas temperadas, sendo muito sensível às geadas e às altas temperaturas.

O feijão tem uma ampla adaptação edafoclimática o que permite seu cultivo, durante todo o ano, em quase todos os estados da federação, possibilitando constante oferta do produto no mercado. Outra característica desta leguminosa é possibilitar a sua produção em diversos ecossistemas tropicais e temperados, em monocultivo e, ou consorciado nos mais variados arranjos de plantas inter e intraespecíficos, o que favorece a diversificação na produção, mas limita maior integração na sua cadeia produtiva (EMBRAPA, 2010).

A agricultura irrigada é uma das alternativas de grande importância para o desenvolvimento econômico e social da região Nordeste do Brasil, considerando que ela assegura adequada disponibilidade de água às culturas na quantidade e na época apropriada. Isso permite a comercialização do produto com maior rentabilidade em virtude de propiciar o cultivo na entressafra e, também, assegura a permanência do trabalhador rural no campo. O estudo da evapotranspiração das culturas é uma das principais informações para o planejamento do uso da água. A evapotranspiração é definida como a perda de água por meio da evaporação do solo e da transpiração das plantas. É um processo biofísico que envolve o conteúdo de água do solo, a passagem da água através da planta, a perda de água por transpiração através dos estômatos e o transporte de água na atmosfera por meio dos processos difusivos e turbulentos (Rana et al., 1997a). A sua medição ou estimativa é importante para propósitos tais como, estudos do balanço hídrico regional, manejo da irrigação, descrição da camada limite atmosférica e previsão do tempo (Amarakoon et al., 2000).

Com base nos dados de evapotranspiração de referência e coeficiente da cultura, pode-se determinar a quantidade de água a ser aplicada nos cultivos. Portanto, o feijão caupi pode ser uma das alternativas de cultivo para a região do semiárido nordestino, considerando a adaptabilidade da cultura ao clima e o hábito alimentar da população. Para obtenção de rendimento máximo na agricultura irrigada, o manejo de água adequado é essencial. Portanto, estudos que visem esse objetivo podem subsidiar o manejo racional da irrigação e, nesse sentido, o conhecimento da evapotranspiração é fundamental para maximizar a produtividade e otimizar o uso da energia elétrica e dos recursos hídricos que são cada vez mais escassos (Sousa et al., 2005). Assim, o presente trabalho objetivou determinar o consumo hídrico e a viabilidade econômica da cultura do feijão caupi irrigada e cultivada nas condições edafoclimáticas da região da Chapada do Apodi no Rio Grande do Norte.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura do feijão

O feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) no Brasil é conhecido por vários nomes populares tais como, feijão-de-corda e feijão macassar na região Nordeste, feijão de praia e feijão de estrada na região Norte e feijão-miúdo na região Sul, também chamado de feijão catador e feijão gerutuba em algumas regiões do Estado da Bahia e norte de Minas Gerais e de feijão fradinho no Estado do Rio de Janeiro (Freire Filho et al. 2005). Ela é uma planta de clima subtropical, originária do México e da América Central, onde ocorrem condições climáticas amenas, com dias quentes e noites frescas. Essa cultura é uma Dicotyledonea, que pertence ao filo Magnoliophyta, classe Magnoliopsida, ordem Fabales, família Fabaceae, subfamília Faboideae, tribo Phaseoleae, subtribo Phaseolina, gênero *Vigna*, e espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp (Freire Filho et al. 1983). O subgênero *Vigna* tem seis seções: *Catiang*, *Comosae*, *Liebrehtsia*, *Macrondontae*, *Reticulatae* e *Vigna*. A seção *Catiang* tem duas espécies, *Vigna unguiculata* (L.) Walp. e *Vigna nervosa* Markotter.

A espécie *Vigna unguiculata* (L.) Walp., além da subespécie *unguiculata*, tem três subespécies silvestres: *dekindtiana* (Harms) Verd., *tenuis* (E. Mey.) e *stenophylla* (Harvey) (Baudoin e Maréchal, 1985). Todo o feijão-caupi cultivado pertence à subespécie *unguiculata* (Marechal et al., 1978; Ng & Marechal, 1985) e dividiram a subespécie *unguiculata* em quatro cultigrupos: *Unguiculata*, *Sequipedalis*, *Biflora* e *Textilis*. Padulosi & Ng (1997) relatam que desde que esta classificação foi adotada cessaram as discussões sobre a classificação botânica do caupi. No Brasil, somente são cultivados os cultigrupos *Unguiculata*, compreendendo a quase totalidade das cultivares locais e melhoradas que são comumente conhecidas como feijão de metro (Freire Filho et al., 2005). Segundo Fuscaldi e Prad (2005) o desenvolvimento do feijoeiro compreende duas grandes fases distintas, denominadas de fases vegetativas e reprodutivas, diferenciadas entre si pela manifestação de diferentes eventos. A fase vegetativa tem seu início compreendido entre a germinação até o aparecimento dos primeiros botões florais. A fase reprodutiva transcorre desde a emissão dos botões florais até o pleno enchimento de vagens e a maturação das sementes. Nessa fase, evidencia-se a notória sensibilidade à deficiência hídrica e excesso de água.

A fase vegetativa compreende o estágio V_0 (Germinação): caracterizada pelo aparecimento da radícula geralmente pelo lado do hilo; Estágio V_1 (Emergência): a emergência é caracterizada pela presença dos cotilédones acima da superfície do solo em processo de desdobramento da “alça” do hipocótilo; Estágio V_2 (Desdobramento das folhas primárias): a rapidez do desdobramento, a conformação e o tamanho das folhas primárias são extremamente importantes para o estabelecimento da cultura no campo por representar a sede inicial de conversão de energia; Estágio V_3 (Emissão da primeira folha trifoliada): inicia-se quando a primeira folha trifoliada ou verdadeira encontra-se plenamente desdobrada, o que pode ser caracterizado pela constatação dos folíolos em posição horizontal; Estágio V_4 (Emissão da terceira folha trifoliada): neste período, a terceira folha trifoliada está plenamente desdobrada e tem início o processo de ramificação da planta (Fuscaldi & Prad, 2005). Já o estágio reprodutivo compreende os seguintes estágios: Estágio R_5 (Botões florais). Esse estágio é caracterizado pelo aparecimento dos primeiros botões florais.

Nas variedades de hábito de crescimento indeterminado (II, III e IV) o desenvolvimento vegetativo prossegue mediante a emissão de novos nós, ramos e folhas; Estágio R_6 (Florescimento): a abertura das primeiras flores define o presente estágio; Estágio R_7 (Início da formação das vagens): o presente estágio é caracterizado pelo aparecimento das primeiras vagens, após a murcha da corola, apesar da planta continuar emitindo novas flores, por tempo variável relacionado aos tipos de plantas correspondentes; Estágio R_8 (Enchimento das vagens): a etapa R_8 inicia com o enchimento da primeira vagem. Estágio R_9 (Maturidade das vagens): o referido estágio é caracterizado pela mudança da cor das vagens (amarela ou pigmentada de acordo com a variedade) (Fuscaldi & Prad, 2005).

Segundo, Fuscaldi & Prad (2005) é possível explorar a cultura em três épocas distintas, divididas em três safras consecutivas: Primeira safra ou “safra das águas”, Segunda safra ou “safra da seca” e Terceira safra ou “safra de inverno”. A safra das águas, cujo plantio é realizado entre os meses de agosto e novembro e a colheita entre novembro e abril, está concentrada nas regiões Sul e Sudeste e no Estado da Bahia, na região de Irecê. Essa é a maior das três safras, em produção e rendimento. A safra da seca é normalmente plantada entre janeiro e março e colhida entre abril e julho. Essa safra abrange os estados das regiões Sudeste e Sul, com concentração na Região Nordeste que, em anos normais, contribui com mais de 50% da produção. Na safra de inverno, cultiva-se o feijão irrigado. A plantação ocorre entre abril e julho e a colheita

entre agosto e outubro. A decisão de plantio influenciada pelo comportamento dos preços na comercialização do feijão colhido na safra da seca (Fuscaldi & Prad 2005).

2.2. Exigências climáticas, hídricas e de solo

O feijão caupi é considerado uma espécie altamente resistente à seca, variando de cultivar para cultivar o número de dias que a planta tolera de estresse hídrico. É uma cultura de ciclo curto e rusticidade para se desenvolver em solos de baixa fertilidade considerando que, por meio da simbiose com bactérias do gênero *rhizobium*, tem a habilidade para fixar nitrogênio do ar (Oliveira et al., 1993).

O feijão-caupi é cultivado em uma ampla faixa ambiental desde a latitude 40°N até 30°S, tanto em terras altas como baixas, tais como: Oeste da África, Ásia, América Latina e América do Norte (Rachie, 1985). O bom desenvolvimento da cultura ocorre na faixa de temperatura de 18 a 34°C. A temperatura base abaixo da qual cessa o crescimento varia com o estágio fenológico. Para a germinação, a temperatura varia de 8 a 11°C (Craufurd et al., 1996a), enquanto para o estágio de floração inicial, de 8 a 10°C (Craufurd et al., 1996b).

Segundo Ellis et al. (1994) e Craufurd et al. (1996b), elevadas temperaturas prejudicam o crescimento e o desenvolvimento da planta de feijão-caupi, exercendo uma grande influência sobre o abortamento de flores, o vingamento e a retenção final de vagens, afetando também o número de sementes por vagem. Além disso, podem contribuir para a ocorrência de várias fito-enfermidades, principalmente aquelas associadas às altas umidades relativas do ar, condições que frequentemente ocorrem quando o cultivo é feito em condições de sequeiro (Cardoso et al., 1997b). Temperaturas baixas (<19°C) influenciam negativamente a produtividade do feijão-caupi, retardando o aparecimento de flores e aumentando o ciclo da cultura (Roberts et al., 1978; Summerfield et al., 1978; Littleton et al., 1979; Leite et al., 1997).

O fotoperíodo é outro fator que exerce uma grande influência no crescimento e desenvolvimento do feijão-caupi. Devido à grande variedade de cultivares, existem cultivares de feijão-caupi sensíveis e outros insensíveis ao fotoperíodo, cujo crescimento vegetativo, arquitetura da planta e desenvolvimento reprodutivo são principalmente determinados pela interação de genótipos com a duração do dia e temperaturas do ar (Steele & Mehra, 1980). As cultivares de feijão-caupi sensíveis ao fotoperíodo são consideradas plantas de dias curtos (Hadley et al., 1983; Craufurd et al., 1996b), as

quais têm o seu florescimento atrasado quando o fotoperíodo é maior que o fotoperíodo crítico. Quando genótipos ou cultivares são insensíveis ao fotoperíodo, o crescimento e desenvolvimento da cultura são funções apenas da temperatura do ar (Craufurd et al., 1996c). Outro fator climático que requer cuidados é a incidência do vento constante em lavouras de feijão, podendo aumentar a demanda de água por parte da planta, tornando-a mais suscetível a períodos curtos de estiagem, afetando o desempenho da cultura.

A radiação solar pode ser considerada um fator de grande importância para o crescimento e desenvolvimento vegetal, pois influencia diretamente na fotossíntese das plantas. Segundo Loomis & Williams (1963), sob condições favoráveis de solo e clima e quando pragas e doenças deixam de ser fatores limitantes, a máxima produtividade de uma cultura passa a depender principalmente da taxa de interceptação de luz e da assimilação de dióxido de carbono pelas plantas. Apesar de ser considerada uma cultura tolerante à seca, pesquisas têm mostrado que a ocorrência de déficit hídrico no feijão caupi, principalmente nas fases de florescimento e enchimento de grãos, pode provocar severas reduções na produtividade de grãos (Cordeiro et al., 1998; Santos et al., 1998). Essas reduções devem estar associadas ao fato de que o estresse hídrico afeta vários processos fisiológicos relacionados com a assimilação de nitrato e fixação simbiótica de nitrogênio nas leguminosas, reduzindo o peso da matéria fresca dos nódulos e da parte aérea das plantas (Costa et al., 1996). A alteração destes processos fisiológicos reflete no decréscimo da produtividade de grãos ou sementes. É uma cultura que exige um mínimo de 300 mm de precipitação para que produza satisfatoriamente sem a necessidade de utilização da prática da irrigação. As regiões cujas cotas pluviométricas oscilem entre 250 e 500 mm anuais são consideradas aptas para a implantação da cultura, pois o consumo de água do feijão-caupi pode variar de 300 a 450 mm/ciclo, dependendo da cultivar, do solo e das condições climáticas locais. Ela é mais susceptível a déficit hídrico durante a floração e no estágio inicial de formação das vagens. O período crítico ocorre 15 dias antes da floração. O déficit hídrico causa redução do rendimento devido ao menor número de vagens/planta e, em menor escala, à diminuição do número de sementes/vagem. Segundo Cordeiro et al., (1998), o efeito negativo causado pela redução de água fornecida à cultura pode ser minimizado conhecendo-se as características pluviiais de cada região e o comportamento das culturas em suas fases fenológicas, ou seja, semeando nos períodos em que a probabilidade de redução da pluviosidade é menor durante o florescimento e enchimento dos grãos. Entretanto, a limitação em termos hídricos encontra-se mais diretamente condicionada à

distribuição do que à quantidade total de chuvas ocorridas no período (Cordeiro et al., 1998).

O feijão pode ser cultivada em quase todos os tipos de solos, merecendo destaque os Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho-Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Neossolos Flúvicos. De um modo geral, desenvolve-se em solos com regular teor de matéria orgânica, soltos, leves e profundos, arejados e dotados de média a alta fertilidade. Entretanto, outros solos como Latossolos e Neossolos Quartzarenicos com baixa fertilidade podem ser utilizados, mediante aplicações de fertilizantes químicos e/ou orgânicos. A disponibilidade de nutrientes logo após a germinação é essencial para o estabelecimento da cultura. Qualquer limitação no suprimento de nutrientes no período logo após a germinação da semente atrasa e diminui a formação de raízes, comprometendo o crescimento das plantas (Távora; Diniz, 2010).

2.3. Importância socioeconômica

O feijão caupi constitui uma das principais alternativas social e econômica na produção agrícola brasileira, por ser responsável pelo suprimento de grande parte das necessidades alimentares da população de baixo poder aquisitivo, que ainda tem apresentado taxas de crescimento relativamente altas e também pelo contingente de pequenos produtores que se dedicam à cultura, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, onde a cultura se adapta às condições edafoclimáticas do semiárido (Távora; Diniz, 2010).

Essa leguminosa é uma excelente fonte de proteínas (23-25% em média) e ela tem todos os aminoácidos essenciais, carboidratos (62%, em média), vitaminas e minerais, além de possuir grande quantidade de fibras dietéticas, baixa quantidade de gordura (teor de óleo de 2%, em média) e não conter colesterol (Oliveira et al., 1993). Pelo seu valor nutritivo, o feijão caupi é cultivado principalmente para a produção de grãos, secos ou verdes, visando o consumo humano *in natura*, na forma de conserva ou desidratado. Além disso, ele também pode ser utilizado como forragem verde, feno, ensilagem, farinha para alimentação animal e, ainda, como adubação verde e proteção do solo (Campos et al., 2010).

A grande produção de caupi encontra-se na região Nordeste, onde constitui um dos principais componentes da dieta alimentar do nordestino, além de ser também um

importante gerador de emprego e renda. De acordo com os valores divulgados pela Companhia de Abastecimento (Conab), na safra 2005-2006, o feijão representou o quinto grânifero mais produzido, ficando atrás apenas da soja, do milho, do arroz e do trigo. O feijão contribui com 35,6% da área plantada e 15% da produção de feijão no País, com média anual de 482 mil toneladas em 1,3 milhões de hectares (FAO, 2009).

A produtividade média do feijão-caupi no Brasil é baixa (366 kg ha⁻¹), em função do baixo nível tecnológico empregado no cultivo. No entanto, estados como Amazonas, Goiás, Mato Grosso do Sul e Mato Grosso apresentam produtividades superiores a 1.000 kg ha⁻¹, com exceção do estado do Goiás que apresentou produtividade superior a 2.000 kg ha⁻¹ (IBGE, 2007). O avanço da cultura na região central do Brasil propiciará um incremento na produtividade média brasileira, em função, principalmente, do uso de tecnologias que propiciam a cultura à expressão do seu potencial produtivo (Silva, 2010). A produção brasileira de feijão, estimada em 2009/2010 pela CONAB (2010), foi de 3.373,673 mil toneladas 1,4% superior a produção anterior. Os Estados do Paraná e de Minas Gerais se destacaram na produção de feijão das águas (1ª safra), representando 40% da produção total; Bahia, Minas Gerais e Ceará, na produção de feijão da seca (2ª safra), com 52% da produção total nacional e São Paulo, Goiás e Minas Gerais, na safra de inverno, mas com baixa participação na produção total – cerca de 8%. Não obstante, essa baixa participação equivale a uma produtividade de 1.545 kg ha⁻¹, o dobro das médias obtidas nas duas outras safras, que foram 761 e 785 kg ha⁻¹ respectivamente (Rapassi et al., 2003).

O feijão caupi também desempenha importante papel na produção agrícola do Rio Grande do Norte. No ano de 2007 a área plantada foi de 80.100 ha com uma produção de 37.111 ton; já no ano de 2008 ocorreu um aumento na área plantada, com uma diminuição na produção de 33.500 ton; enquanto que em 2009 a área plantada foi de 59.214 ha com uma produção de 23.285 ton (Conab, 2009). A ocorrência de reduções significativas de áreas cultiváveis com feijão, bem como na produção, vem ocorrendo em função das desfavoráveis situações climáticas (estiagens e excesso de chuvas) nos últimos anos. No Estado do Rio Grande do Norte, 91% do seu território está inserido no polígono das secas, isso quer dizer que o clima predominante é o semiárido, que apresenta como característica principal distribuições temporal e espacial das chuvas bastante irregulares. Devido a isso, o estado possui um setor primário ainda alicerçado na agricultura de subsistência, fazendo com que a população rural esteja sempre a mercê dos sérios problemas climáticos que constantemente assolam a região e

afetam a agricultura. Tanto os baixos valores nos índices pluviométricos, como a irregular distribuição temporal e espacial das chuvas na maior parte do território do Rio Grande do Norte, obrigam a população rural local a utilizar culturas que melhor se adaptam às condições climáticas reinantes, a fim de garantir o seu próprio alimento. Na região agreste do estado, que se caracteriza por apresentar baixos índices pluviométricos, é a maior produtora dessa cultura em decorrência de suas características de ciclo vegetativo relativamente curto (60 a 120 dias), baixa exigência hídrica (300 a 500 mm) e fácil adaptação ao solo da região (Bristot et al., 2010).

O Estado do R. G. do Norte dispõe de um amplo acervo de informações tecnológicas para o feijão caupi, onde foram obtidas várias cultivares comerciais, através de programa de melhoramento genético, possibilitando a ampliação do mercado e as formas de uso do produto. Essas cultivares associadas a outras práticas agrícolas apresentam melhorias nas técnicas no cultivo do feijão caupi sob condições de sequeiro e irrigado, elevando a sua produtividade (Corrêa, 2010; Rapassi et al., 2003).

Admitindo-se que um hectare de caupi gere 1,5 empregos por ano, a cultura gera 2,4 milhões empregos diretos e considerando-se um consumo *percapita* médio de 20 kg (Anuário Estatístico da Agricultura Brasileira, 1998), tem-se que o caupi abastece a mesa de 27,5 milhões de nordestinos. Esses dados são extremamente importantes, porque refletem a participação da cultura no contexto de geração de emprego, de renda e da produção de alimentos no país e a credencia para receber maior atenção por parte das políticas de abastecimento e por parte dos órgãos de apoio à pesquisa.

Segundo o mesmo autor Anuário Estatístico da Agricultura Brasileira (1998), de uma maneira geral, no Nordeste brasileiro, o chamado período das chuvas é caracterizado pela irregularidade das precipitações pluviométricas, tornando a agricultura de sequeiro uma atividade econômica de alto risco, o qual pode ser reduzido pela utilização de épocas mais adequadas de semeadura, com base no zoneamento agrícola, a partir do conhecimento das variabilidades climáticas locais (como por ex.: precipitação e evapotranspiração de referência) e de sua espacialização regional por um sistema de informação geográfica (SIG), definir regiões de aptidão climática para o cultivo agrícola e épocas mais adequadas de semeadura, como forma de diminuir os efeitos causados pela má distribuição de chuvas.

No caso de cultivo irrigado, tem-se uma maior flexibilidade quanto à indicação da melhor época de plantio, a qual deverá ser uma decisão econômica face às oscilações do preço de mercado do produto. No entanto, ressalta-se que se deve levar em

consideração o ciclo da variedade, procurando-se aquelas mais precoces, produtivas e indicadas para cultivo irrigado, as quais devem ser semeadas em épocas apropriadas de maneira que o florescimento não coincida com os períodos de altas temperaturas. Portanto, o feijão caupi pode ser uma das alternativas de cultivo para a região do semiárido, considerando a adaptabilidade da cultura ao clima e o hábito alimentar da população (Sousa et al., 2005).

2.4. Evapotranspiração da cultura

O conhecimento da evapotranspiração (ETc) é fundamental para se outorgar, dimensionar e manejar a irrigação de uma cultura, e uma vez que esses valores variam conforme a disponibilidade energética do local, variedade e idade da planta, que são importantes para à obtenção de valores regionalizados (Silva et al., 2005). As estimativas das lâminas de água a aplicar e da frequência de irrigação das culturas são de grande importância para evitar a redução nos rendimentos, provocada pelo excesso ou déficit de umidade no solo, salinização, devido à drenagem deficiente, e compactação por excesso de umidade durante as operações de preparo do solo (Silva et al., 1981).

Praticamente, toda a água de que as plantas necessitam é extraída pelo sistema radicular e perdida para a atmosfera por meio do processo de evapotranspiração, sendo necessário que a mesma seja devolvida à planta, na forma de precipitação ou irrigação, sob pena de comprometer o desenvolvimento e a produção da cultura. Existem várias metodologias para a determinação da evapotranspiração, podendo ser separadas em dois grandes grupos: determinação direta e determinação indireta (Burman et al., 1983). No grupo de determinação direta da evapotranspiração (ET) estão os lisímetros ou evapotranspirômetros (de pesagem, drenagem, lençol freático constante), balanço hídrico e controle de umidade no solo. No segundo grupo, correspondente à determinação indireta, a evapotranspiração é estimada por fórmulas empíricas, baseadas em dados meteorológicos. A escolha do método depende de sua área de aplicação e das necessidades de precisão e duração dos períodos de cálculo (Tanner, 1967).

Dentre os diversos métodos de determinação da evapotranspiração um dos mais precisos é o da utilização de lisímetros de pesagem, todavia, essa tecnologia restringe-se a instituições de pesquisa, devido à sua pouca aplicabilidade econômica em áreas agrícolas; desta forma, a estimativa, a partir de modelos matemáticos, tem recebido

bastante atenção pelo meio agrícola, em virtude da praticidade e da facilidade oferecidas por alguns modelos. Entretanto, existe necessidade de se ajustar esses modelos para as diversas regiões produtoras, já que, em suas formas originais, pouquíssimas são as estimativas compatíveis com as condições climáticas locais (Rocha et al., 2003).

A aplicação da lâmina correta de água na irrigação é de fundamental importância, como também o conhecimento da evapotranspiração da cultura para as diversas condições climáticas. Assim tornando a agricultura irrigada uma das alternativas de maior importância tanto para o desenvolvimento agrícola, econômico e social da região Nordeste do Brasil, considerando que ela assegura adequada disponibilidade de água às culturas na quantidade e na época apropriada. Isso permite a comercialização do produto com maior rentabilidade em virtude de propiciar o cultivo na entressafra e, também, assegura a permanência do trabalhador rural no campo.

O feijão caupi pode ser uma das alternativas de cultivo para a região do semiárido, considerando a adaptabilidade da cultura ao clima e o hábito alimentar da população. Para obtenção do máximo de rendimento na agricultura irrigada, o manejo de água adequado é essencial. Portanto, estudos que visem esse objetivo podem subsidiar o manejo racional da irrigação. Nesse sentido, o estudo da evapotranspiração é fundamental para maximizar a produtividade das culturas.

2.5. Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência é um termo variante de região para região, ou seja, é dependente única e exclusivamente das condições climáticas presentes no local; portanto, ela representa a demanda hídrica da região. Antigamente ela era chamada de evapotranspiração potencial e equivalia a evapotranspiração de uma superfície gramada. Evapotranspiração, segundo Borges e Mendiondo (2005), é a perda de água de uma superfície com qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de umidade do solo. Doorenbos & Pruitt (1977) definiu o termo evapotranspiração de referência como aquela que ocorre em uma extensa superfície coberta com grama de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água.

Essa é uma variável de extrema importância para a modelagem hidrológica e para a racionalização do uso da água na agricultura. Entretanto, sua determinação não é uma tarefa das mais fáceis, uma vez que depende da umidade do solo, do tipo de vegetação e do clima local. Existe um grande número de métodos empíricos

desenvolvidos para estimar a ETo a partir de diferentes variáveis climáticas, porém a grande limitação da maioria deles, é que sempre necessitam de calibrações locais para terem precisão (Allen et al., 1998). Os métodos de estimativa da evapotranspiração estão divididos em métodos diretos e indiretos.

Os métodos diretos estimam a evapotranspiração potencial diretamente por meio de lisímetros, balanço hídrico e controle de umidade no solo, sendo métodos difíceis e onerosos, pois exigem equipamentos e instalações especiais e os instrumentos são de alto custo, justificando-se apenas em condições experimentais (Pereira et al., 1997). Os métodos indiretos estimam a evapotranspiração em função da evapotranspiração de referência (ETo) e do coeficiente da cultura (Kc). Esses métodos são divididos em cinco categorias: 1) Empíricos: Tanque Classe A, Thornthwaite, Camargo, Makkink, Radiação Solar, Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani, Blaney-Cridle; 2) Balanço de energia através razão de Bawen e Priestley-Taylor; 3) Aerodinâmico: Correlações turbulentas; 4) Combinados: Penman, Slatyer e Mc Ilroy; 5) Penman Simplificado e Penman Monteith (Silva et al., 2005). A escolha do método a ser utilizado vai depender da precisão requerida ou do tipo de dados climáticos disponíveis (Fernandes et al., 2006). A grande limitação da maioria dos métodos empíricos desenvolvidos para estimar a ETo, a partir de diferentes variáveis climáticas, é que eles sempre necessitavam de calibrações locais para terem precisão (Allen et al., 1998). Esses autores, após rigorosas avaliações, elegeram o método de Penman-Monteith modificado como padrão da FAO, em face das melhores estimativas nos diferentes tipos de climas testados, sendo por isso, desde então, ele é recomendado como o método ideal para a estimativa da evapotranspiração de referência.

Mendonça et al. (2003) fez uma análise mais extensa comparando os valores de ETo obtidos em lisímetro de pesagem com grama com os valores resultantes dos métodos de Penman-Monteith parametrizado pela FAO, Radiação Solar, Makkink, Linacre, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Tanque Classe “A” e Atmômetro SEEI modificado. Foi constatado pelos autores que os métodos de Penman-Monteith FAO, Radiação Solar, Linacre, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani e Tanque Classe “A”, apresentaram tendências de superestimar a ETo na região, porém todos os métodos, exceto o Atmômetro SEEI modificado, atenderam satisfatoriamente à estimativa da ETo na região norte fluminense.

Allen et al. (1989), comparando a evapotranspiração de referência obtida pelos métodos de Penman, Kimberly-Penman, Penman corrigido e Penman-Monteith, com

medições lisimétricas, observaram que o modelo de Penman-Monteith foi o que melhor se ajustou às medições diárias e mensais. Por outro lado, de acordo com Belo Filho (2004), na ausência de dados de insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith pode ser substituída com razoável precisão pelo método de Hargreaves.

Lima (2006) utilizou a equação de Penman-Monteith, com uma variável proposta por Ortega Farias (1993), para se estimar a evapotranspiração horária e diária do feijão caupi nas condições do Brejo Paraibano. Esse autor obteve resultados satisfatórios, pois o modelo apresentou uma elevada exatidão para todas as fases fenológicas do feijão caupi, tanto na escala horária, num amplo intervalo de condições atmosféricas e de conteúdo de água no solo. A grande importância na determinação da ETo tem motivado a elaboração de programas computacionais para a sua estimativa. Nesse sentido, Silva et al. (2005) elaborou o modelo SEVAP (Sistema de Estimativa da Evapotranspiração) que possibilita estimativas confiáveis e contínuas da evapotranspiração de referência, com grande simplicidade operacional e interatividade com o usuário, podendo ser utilizado no monitoramento local e regional da evapotranspiração de referência, em escala diária ou mensal, em função dos dados meteorológicos disponíveis.

2.6. Coeficiente de cultura

O coeficiente da cultura é um importante parâmetro utilizado para a irrigação e para fins de planejamento de uso da água de diferentes culturas, e expressa a proporção da evapotranspiração que está ocorrendo, em relação àquela que ocorreria em condições ótimas (de referência). Segundo Bastos et al. (2010), a determinação dos valores dos coeficientes de cultivo (K_c) é fundamental para se obter as necessidades hídricas da cultura ao longo dos estádios de desenvolvimento. O K_c é variável de acordo com a fase de desenvolvimento da cultura, genética da planta, época do plantio, ritmo de crescimento e duração do período vegetativo, das condições de solo e clima locais e da frequência de chuva e de irrigação; o K_c é um parâmetro que expressa os fatores ambientais e fisiológicos das plantas devendo, preferencialmente, ser determinado para as condições locais nas quais será utilizado. Todavia, a sua determinação sob condições de campo exige um grande esforço de pessoal técnico, equipamentos e custo, em virtude da quantidade de informações, controle e monitoramento necessário ao balanço hídrico

em uma área irrigada. Assim, a utilização de valores obtidos de outras regiões pode gerar erros consideráveis na estimativa do consumo hídrico da cultura.

Os valores de K_c são muito utilizados para a determinação das necessidades hídricas das culturas, tanto em termos de manejo da água de irrigação como também no planejamento de sistemas hidroagrícolas, assumindo atualmente grande importância na análise de processos de concessão de outorga de uso da água de irrigação, realizados pela Agência Nacional de Águas (ANA), a nível federal, e pelos departamentos e institutos de gestão das águas, a nível estadual (Medeiros et al. 2004) .

Coefficiente de cultura (K_c) é determinado pela razão entre a ET_c e a ET_o . O K_c também pode ser calculado a partir dos coeficientes médios de cultura, que incluem efeitos gerais de umedecimento do solo pela precipitação ou irrigação, os quais são utilizados para calcular a ET_c relativa a períodos de vários dias, principalmente para a condição de irrigação por gravidade ou aspersão (Pereira & Allen, 1997). Normalmente, utilizam-se lisímetros ou evapotranspirometro. Pereira et al. (2002) descrevem que o lisímetro se constitui de uma caixa impermeável, contendo um volume de solo que possibilita se conhecer, com detalhes, alguns termos do balanço hídrico do volume amostrado, sendo que os mais empregados são os de drenagem, o de lençol freático constante e o de pesagem; neste último, é possível utilizar-se células de carga para a medição automatizada da variação do peso do sistema.

Para as culturas anuais, Doorenbos e Pruitt (1977) e Allen et al. (1998) apresentaram uma metodologia para estabelecer os valores de K_c . Tal metodologia divide o ciclo da cultura em quatro fases de desenvolvimento: 1) germinação, que correspondente à fase inicial de crescimento da cultura (cobertura do solo atingindo cerca de 10%); 2) fase de desenvolvimento, compreendido entre o final da germinação e efetiva cobertura do solo pela cultura (cerca de 70% a 80%); 3) fase de meia-estação ou reprodutivo (floração); inicia-se quando a cultura atinge plena cobertura até a maturação; 4) fase final, referente ao final do estágio anterior até a plena maturação e colheita. Segundo essa divisão do ciclo da cultura, geralmente no estágio de germinação, o coeficiente de cultura apresenta valores baixos ($K_c < 1$), visto que ET_c é bem menor que ET_o , pois a área foliar é muito pequena e cobre apenas uma pequena porcentagem do terreno. Durante o estágio de desenvolvimento vegetativo, a diferença entre a evapotranspiração da cultura e a de referência diminui devido ao aumento crescente da área foliar, acarretando num acréscimo dos valores de K_c ($K_c < 1$). Ao chegar à terceira fase do ciclo, em muitos casos, o valor da ET_c ultrapassa o da ET_o (K_c

> 1), permanecendo assim até o término da fase de enchimento de grãos. Finalmente, na última fase (maturação), os valores de K_c decrescem até o final do ciclo da cultura ($K_c < 1$). De acordo com a FAO o coeficiente de cultivo do feijão varia em torno de 0,5 a 1,05.

2.7. Balanço de energia

O método do balanço de energia baseado na razão de Bowen tem sido largamente utilizado por vários pesquisadores (Teixeira, 2001; Azevedo et al., 2003; San José et al., 2003; Silva et al., 2009). Entretanto, de acordo com Steduto & Hsiao (1998), essa técnica deve ser usada com cautela, pois ela não reflete a natureza turbulenta do processo de evapotranspiração. O método da razão de Bowen é baseado em várias suposições, quais sejam: no transporte, assumido ser na direção vertical, sem advecção de energia; assume-se que os sensores que medem os gradientes estão localizados dentro da camada de fluxo conservativo, onde os fluxos são constantes com a altura; a superfície é homogênea em relação às fontes e sumidouros de calor e vapor d'água; assume-se a igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta de calor sensível e latente (Fritschen & Simpson, 1989).

As duas primeiras suposições são facilmente encontradas se o “fetch” adequado estiver disponível; entretanto, as outras são mais complexas e dependem de fatores externos. As principais vantagens do método da razão de Bowen são: medições simples e diretas; não requerem informações a respeito das características aerodinâmicas da superfície de interesse; podem integrar fluxos de calor latente sobre grandes áreas (de centenas a milhares de metros quadrados); podem estimar os fluxos em escala fina de tempo (menos que uma hora) além de fornecerem medições contínuas (Lima et al., 2005). Por outro lado, dentre as desvantagens se incluem a sensibilidade aos erros instrumentais que medem os gradientes e os componentes do balanço de energia; a possibilidade de descontinuidade de dados quando a razão de Bowen se aproxima de -1 (Lima et al., 2005).

A solução da equação da razão de Bowen é obtida por medições do saldo de radiação (R_n) e fluxo de calor no solo (G) e pelas estimativas dos fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) (Teixeira et al., 1999). A falta de instrumentos para medir os componentes individuais do balanço de energia pode ser solucionada com o emprego de

expressões empíricas baseadas em parâmetros meteorológicos, as quais, devidamente ajustadas à região e à cultura, conduzem a resultados satisfatórios.

Várias pesquisas sobre as necessidades hídricas de culturas têm sido realizadas por diversos pesquisadores. Teixeira (2001), com o objetivo subsidiar o manejo de água da cultura da bananeira, avaliou a quantidade e a partição da energia solar disponível ao cultivo dessa cultura no primeiro ciclo de produção. Nessa pesquisa ele observou que, em média, 87% de R_n foi empregado para a liberação do fluxo de calor latente, 11% para o fluxo de calor no solo e 2% para o fluxo de calor sensível.

A maioria dos trabalhos sobre balanço de energia, baseado na razão Bowen, não contabiliza o fluxo de calor armazenado no dossel da planta, o argumento geralmente utilizado é que este componente do balanço de energia é muito pequeno em comparação com os demais fluxos do balanço de energia. Portanto, se espera que, se a planta tiver um dossel bastante desenvolvido, o calor armazenado por ela pode apresentar uma contribuição considerável no cálculo do balanço de energia; por outro lado, também em trabalhos com balanço de energia geralmente não se considera o calor armazenado acima dos fluxímetros; esses sensores devem ser instalados o mais próximo possível da superfície do solo, pois sua finalidade é medir o fluxo de calor que entra e sai do solo; entretanto, por falta de conhecimento os mesmos são comumente instalados a 2 cm de profundidade (Daamen et al., 1999; Azevedo et al., 2003).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental e clima

O experimento de campo foi conduzido no período de abril a junho do ano de 2010 na Fazenda Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte - EMPARN, localizada no município de Apodi, RN, que tem as seguintes coordenadas geográficas: 5°39'51''S, 37°47'56''W e 150 m. A Figura 1 exibe a localização geográfica do município de Apodi, RN (A) e da fazenda experimental da EMPARN (B). Na Tabela 1 são apresentados as variáveis climatológicas coletadas na estação agrometeorológica de Apodi, RN, durante o período experimental com a cultura de feijão.

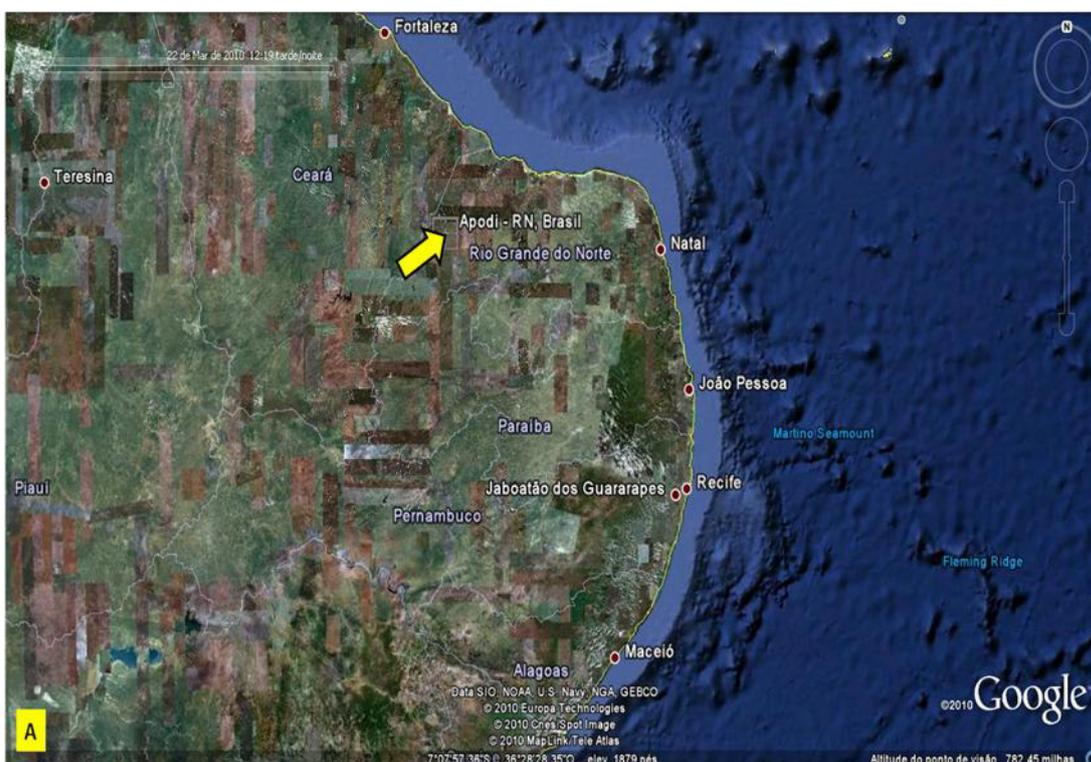


Figura 1. Localização da fazenda experimental da EMPARN. A) Visualização da costa do litoral do nordeste brasileiro;

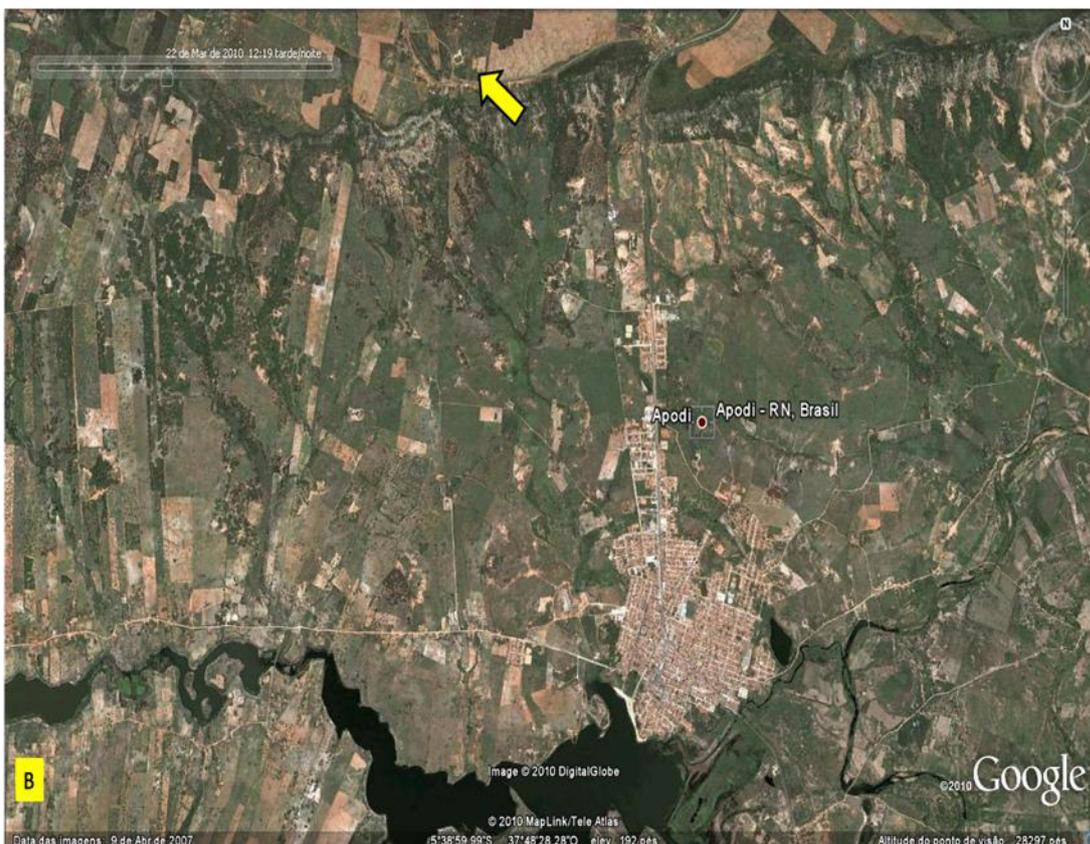


Figura 1 Localização da fazenda experimental da EMPARN. B) Localização no município de Apodi-RN.

Tabela 1 Médias mensais da temperatura máxima (T_{máx}) e mínima (T_{mín}) e da umidade relativa máxima (U_{máx}) e mínima (U_{mín}) durante o período experimental.

| | T _{máx} (°C) | T _{mín} (°C) | UR _{max} (%) | UR _{min} (%) |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Abril | 32,78 | 23,80 | 93,92 | 50,24 |
| Mai | 33,99 | 23,44 | 92,03 | 40,54 |
| Junho | 34,15 | 23,03 | 87,43 | 35,37 |

A região da Chapada do Apodi é caracterizada por um clima muito quente e semiárido, segundo a classificação climática de Köpper, com os seguintes valores médios anuais com normais climatológicas de pressão atmosférica = 1002,9 hPa, temperatura média = 26,9 °C, temperatura máxima = 33,8 °C, temperatura mínima = 22,9 °C, precipitação pluviométrica = 920,4 mm, evaporação = 2.145,9 mm, umidade relativa = 66,8%, insolação total = 3.000,7 horas e décimos e nebulosidade = 5,4. Por outro lado, as médias mensais das variáveis climatológicas da região de Apodi, RN, correspondentes ao período de 1911 a 1990 são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 Valores médios mensais da precipitação, temperaturas média, máxima e mínima e a umidade relativa do ar na região do Apodi, RN, no período de 1911 a 1990.

| | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| Precipitação Média | 55,8 | 118,5 | 207,9 | 195,1 | 108,9 | 44,6 | 33,5 | 6,0 | 3,8 | 9,0 | 1,9 | 21,5 |
| Temperatura Média | 28,4 | 27,8 | 27,1 | 26,8 | 26,7 | 26,2 | 26,2 | 26,8 | 27,5 | 28,0 | 28,2 | 28,3 |
| Temperatura Máxima | 33,4 | 32,5 | 31,7 | 31,3 | 30,9 | 30,3 | 30,6 | 32,0 | 33,1 | 34,0 | 34,2 | 34,1 |
| Temperatura Mínima | 21,6 | 21,5 | 21,2 | 20,9 | 20,4 | 19,6 | 19,0 | 19,1 | 20,1 | 20,7 | 21,2 | 21,7 |
| Umidade Relativa | 73,5 | 78,6 | 86,3 | 87,4 | 85,9 | 82,2 | 78,3 | 74,7 | 73,0 | 74,0 | 73,1 | 73,2 |

3.2. Cultura utilizada

A cultura utilizada nesta pesquisa foi o feijão vigna, cultivar Potiguar, semeado numa área experimental de 4,0 ha, com espaçamento de 70 cm entre linhas e densidade de plantio de quatro plantas/m² (Figura 2). O preparo do solo consistiu de aração seguida de gradagem com grade niveladora. A adubação de fundação foi realizada no fundo do sulco de plantio, em uma dose recomendada de acordo com a análise de fertilidade do solo. Para o controle de plantas daninhas efetuou-se o uso de enxada, de forma contínua durante os primeiros quarenta dias após a emergência.



Figura 2 Área experimental da EMPARN, em Apodi, RN, onde foi realizado o experimento de campo.

3.3. Irrigação

As lâminas de irrigação foram calculadas de forma que a água atingisse uma profundidade de 40 cm, que é correspondente ao perfil do sistema radicular da cultura. Para repor o consumo hídrico da cultura, utilizou-se o método de Penman-Monteith para calcular a evapotranspiração de referência. Foram efetuadas as reposições de água com duas irrigações semanais antes do solo atingir 60% da água disponível, que é considerada como o limite de esgotamento de água no solo para a cultura (Figura 3).

3.4. Lâmina de água aplicada e consumo hídrico

Foi aplicado através de irrigação ao longo do ciclo vegetativo do feijão 463,7 mm de água, considerando-se os valores de precipitação pluviométrica ocorrida no período, sendo distribuídos em 200,1 mm na fase de germinação, 215,8 mm na fase de desenvolvimento vegetativo e 47,8 mm na fase de floração (Figura 4). As irrigações foram suspensas aos 63 dias após a emergência das plantas, quando se constatou o início do estágio de maturação fisiológica dos grãos. A lâmina aplicada (irrigação + precipitação pluviométrica) estão de acordo com Stone et al. (2006) quando estudou a

evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto na região de Santo Antônio de Goiás, GO.



Figura 3 Sistema de irrigação por aspersores utilizados para irrigação da área experimental.

Os valores da lâmina de água aplicada no cultivo do feijão-caupi ao longo do ciclo de cultivo são exibidos na Tabela 3. Ressalta-se que os valores da lâmina de água foram calculados utilizando 60% de eficiência do sistema de irrigação.

Tabela 3 Valores de lâmina de água aplicada ao feijão caupi e do seu efetivo consumo na região de Apodi, RN.

| Fase | N° de dias | Lâmina de irrigação |
|--------------|-------------------|----------------------------|
| I | 15 | 200,1 |
| II | 29 | 215,8 |
| III | 13 | 47,8 |
| IV | 21 | - |
| TOTAL | 78 | 463,7 |

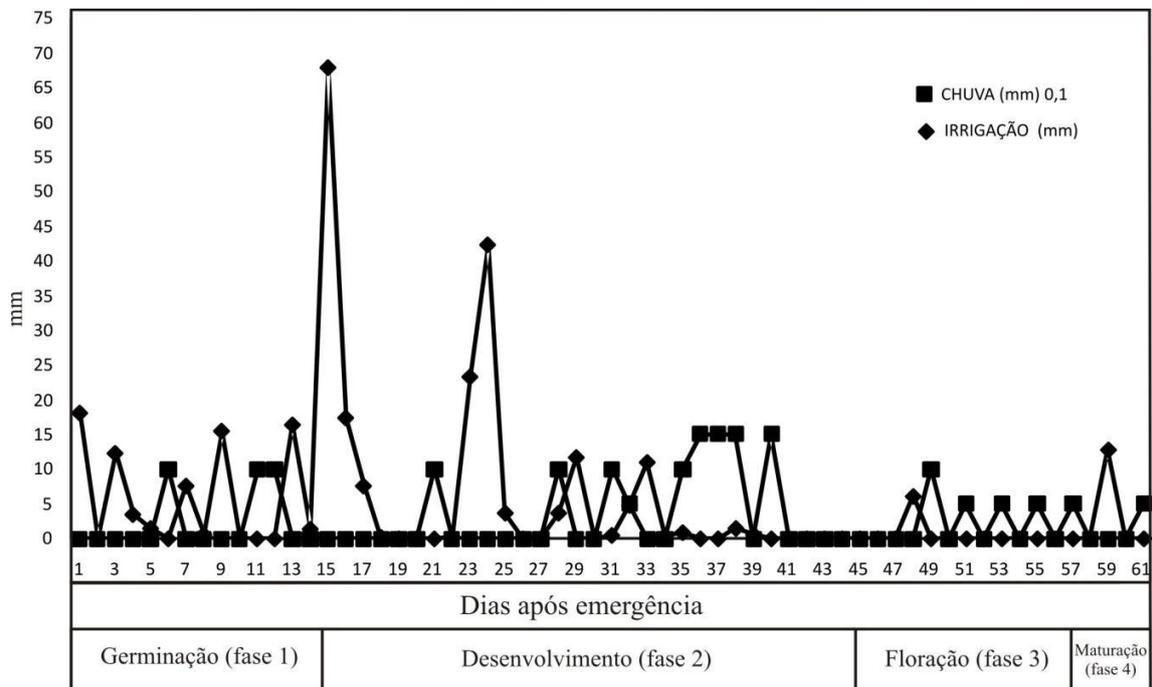


Figura 4 Lâminas de água aplicadas por irrigação e precipitação pluvial ocorrida durante o ciclo do feijão caupi.

3.5. Medições

No interior da parcela experimental foi instalada uma torre micrometeorológica, contendo um piranômetro do tipo SP-Lite, para medição da radiação solar global, um saldo radiômetro do tipo NR-Lite, para medição do saldo de radiação; dois psicrômetros para medição dos perfis verticais de temperatura. Os psicrômetros, formados por termopares de cobre-constantan, foram instalados em dois níveis, a 0,30 e 1,50 m acima do dossel da cultura, com a finalidade de medir as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido. Também, foram instalados dois fluxímetros do tipo HFT3 a 0,02 m de profundidade do solo para medir o fluxo de calor no solo, um entre as fileiras e o outro dentro da fileira. Todos os sensores foram conectados a um sistema automático de aquisição de dados (Datalogger CR 3000), com o intuito de coletar e armazenar os dados medidos. Esse instrumento foi programado para efetuar leituras a cada 5 segundos e armazenar médias em intervalos de 20 minutos. As médias foram coletadas em um módulo de armazenamento, para posterior transferência para um computador, onde foram processadas em planilhas eletrônicas. O datalogger foi alimentado por um painel solar de 12 Volts (Figura 5).

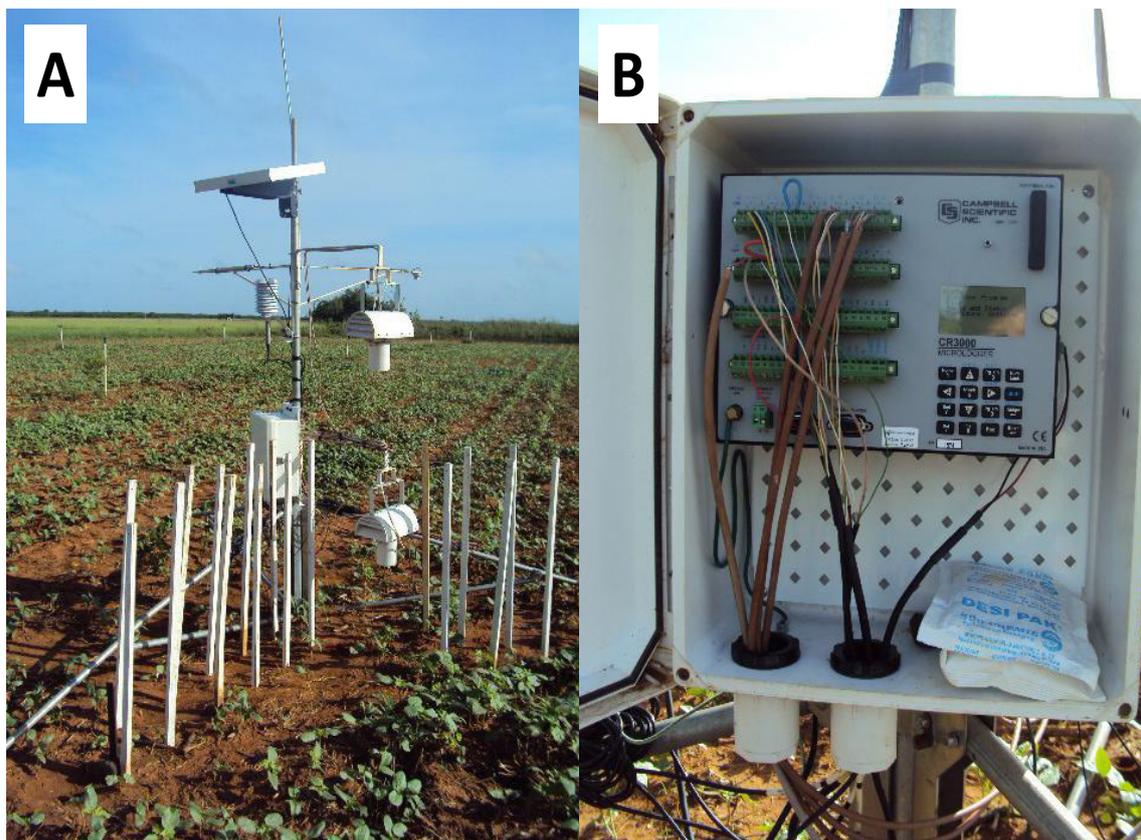


Figura 5 A) Torre micrometeorológica utilizada na coleta de dados; B) Sistema automático de aquisição de dados (Datalogger CR 3000).

3.6. Dados utilizados na determinação da ET_o

Na estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith foram utilizados os dados obtidos na Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática (Apodi – A340), pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Essa estação é localizada na Fazenda Experimental da EMPARN e é composta de uma unidade de memória central (Datalogger), na qual foram conectados os sensores de temperaturas do ar e do ponto de orvalho, umidade relativa, pressão atmosférica, direção e velocidade do vento a 10m de altura, radiação solar global e precipitação. A vista da estação meteorológica de observação à superfície do INMET é exibida na Figura 6. Os dados coletados nesta plataforma de coleta de dados foram das seguintes variáveis atmosféricas: temperaturas do ar máxima e mínima, velocidade do vento, radiação global e umidade relativa do ar.



Figura 6 Estação meteorológica de observação à superfície do INMET.

3.7. Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência diária (ET_o) foi estimada pelo método de Penman-Monteith, conforme recomendação da FAO (Allen et al., 1998):

Equação 1

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

em que ET_o é a evapotranspiração de referência diária (mm d^{-1}); Rn é o saldo diário de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G é o fluxo diário de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 é a velocidade média diária do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação do vapor d'água média diária (kPa); e_a é a pressão de vapor d'água média diária (kPa); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) e γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$). As variáveis da Eq. (1) foram determinadas através de dados obtidos pela Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, situada na Fazenda Experimental da EMPARN. As Eq. de 2 a 16 seguiram os

procedimentos de cálculos estabelecidos no Boletim FAO/56 (Allen et al., 1998). As variáveis necessárias para a obtenção da ETo foram estimadas como segue:

A inclinação da curva de pressão de vapor (Δ) foi obtida por:

Equação 2

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

em que T é a temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$), determinada por:

Equação 3

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

em que T_{\max} e T_{\min} são as temperaturas diárias do ar máximas e mínimas, respectivamente.

O parâmetro psicrométrica (γ) foi obtida por:

Equação 4

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

em que C_p é o calor específico do ar seco à pressão constante ($1013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$); p_0 é a pressão atmosférica média local (kPa); $L = 2,45 \text{ MJ. kg}^{-1}$ é o calor latente de vaporização da água; $\varepsilon = 0,622$ é a razão entre as massas moleculares da água e do ar seco.

A pressão atmosférica média local (p_0) foi determinada por

Equação 5

$$p_0 = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26}$$

em que z é a altitude local (m).

Na estação climatológica automática de superfície, as informações referentes ao vento são obtidas ao nível de 10m de altura (u_{10}). Portanto, para ajustar esses valores obtidos para o nível de 2 m de altura foi utilizada a expressão:

Equação 6

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

em que u_{10} é a velocidade média diária do vento a 10 m de altura (m.s^{-1}); z é a altura de 10m.

A pressão de saturação do vapor d'água média diária (e_s) foi obtida por:

Equação 7

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

em que $e^0(T_{\max})$ e $e^0(T_{\min})$ são as pressões de saturação do vapor d'água para as temperaturas máxima e mínima, respectivamente, expressas em kPa e determinadas por:

Equação 8

$$e^0(T) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T}{T + 237,3} \right]$$

A pressão de vapor média diária (e_a) foi calculada por:

Equação 9

$$e_a = \frac{e^0(T_{\min}) \frac{UR_{\max}}{100} + e^0(T_{\max}) \frac{UR_{\min}}{100}}{2}$$

em que UR_{\max} e UR_{\min} são as umidades relativa máxima e mínima, respectivamente, expressas em porcentagem.

O saldo diário de radiação (R_n) é expresso por:

Equação 10

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

em que R_{ns} e R_{nl} representam o balanço de radiação de ondas curtas e longas, respectivamente, ambos em ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$).

O balanço de radiação de ondas curtas (R_{ns}) foi determinado por:

Equação 11

$$R_{ns} = 0,77xR_s$$

em que R_s é a radiação solar incidente ($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$).

O balanço de radiação de ondas longas (R_{nl}) foi determinado por:

Equação 12

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

em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJK}^{-4}\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$); $T_{\max,k}$ e $T_{\min,k}$ são as temperaturas do ar diária máxima e mínima, respectivamente, em graus Kelvin; e_a é a pressão de vapor média diária (kPa); R_s é a radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); R_{so} é a radiação solar para dias de céu claro ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$).

A radiação solar para dias de céu claro (R_{so}) foi calculada por:

Equação 13

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

em que: R_a é a radiação extraterrestre ($MJ m^{-2} d^{-1}$); z é a altitude local (m).

Por sua vez, a radiação extraterrestre (R_a) foi estimada por:

Equação 14

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} G_{sc} \cdot d_r [\omega_s \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \text{sen}(\omega_s)]$$

em que G_{sc} é a constante solar ($0,0820 MJm^{-2}min^{-1}$); d_r é o inverso da distância relativa Terra-Sol (rad); ω_s é o ângulo horário (rad); φ é a latitude local (rad); δ é a declinação solar (rad).

O inverso da distância relativa Terra-Sol (d_r) e a declinação solar (δ) foram determinados por:

Equação 15

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

Equação 16

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

em que J é o dia Juliano (número do dia do ano entre 1 e 365).

O ângulo horário (ω_s) foi obtido por:

Equação 17

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)]$$

O fluxo de calor no solo para o cálculo da evapotranspiração de referência diária pode ser considerado nulo, devido o seu valor ser relativamente pequeno nesse período sob a cultura de referência (Allen et al., 1998).

3.8. Evapotranspiração da cultura

Os componentes do balanço de energia sobre a vegetação foram obtidos através da equação do balanço de energia baseado na razão de Bowen de acordo com seguinte expressão (Rosenberg et al., 1983):

Equação 18

$$R_n + LE + H + G + S = 0$$

em que R_n é o saldo de radiação e LE , H e G são as densidades de fluxos de calor latente e calor sensível para o ar e para solo, respectivamente, e S é a energia

armazenada no dossel vegetativo. Todos os termos da Eq. (18) são expressos em $W m^{-2}$. A energia utilizada nos processos fotossintéticos não foi considerada, visto que ela representa menos de 2% do saldo de radiação (Heilman et al., 1994). O balanço de energia foi efetuado sob o dossel da cultura, assumindo-se como volume de controle a camada entre o topo da vegetação e a superfície do solo. E, ainda, considerando-se que as densidades de fluxo vertical que chegam à camada vegetativa, são positivas, enquanto as que saem são negativas.

3.9. Razão de Bowen

A razão de Bowen corresponde à relação entre os fluxos de calor sensível e calor latente, dada por:

Equação 19

$$B = \frac{H}{LE}$$

em que H e LE são os fluxos de calor sensível e latente, respectivamente; P a pressão atmosférica (kPa); K_h e K_v são, respectivamente, os coeficientes de transferência nos processos de difusão turbulenta de calor sensível e latente, expressos em $m^2 s^{-1}$, e γ o fator psicrométrico ($hPa ^\circ C^{-1}$), obtido pela expressão:

Equação 20

$$\gamma = \frac{\bar{P} c_p}{0,662L}$$

em que $c_p = 0,24 \text{ cal g}^{-1} ^\circ C^{-1}$, representa o calor específico do ar à pressão constante, \bar{P} a pressão atmosférica média à superfície (hPa) e L o calor latente de vaporização ($cal g^{-1}$) obtido por (Wright, 1982).

Equação 21

$$L = \frac{3505T_a}{T_a - 273}$$

em que T_a é a temperatura do ar ($^\circ C$). Considerando-se a igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta de calor sensível (K_h) e calor latente (K_w) e $(\partial T / \partial Z) / (\partial e_a / \partial Z) \approx \Delta T / \Delta e_a$; sendo $\Delta T = T_2 - T_1$ e $\Delta e_a = e_2 - e_1$ as variações de temperatura do ar e pressão de vapor d'água na camada de ar acima da cultura, respectivamente. A Eq.19 é simplificada em:

Equação 22

$$\beta \approx \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e_a}$$

A pressão parcial de vapor d'água em dois níveis acima da cultura foi calculada pela equação de Ferrel, expressa da seguinte forma:

Equação 23



em que t_u e t_a são as temperatura dos bulbos úmido e seco, respectivamente, expressas em °C, \bar{P} a pressão atmosférica média (hPa) e $e_s(t_a)$ a pressão de saturação do vapor d'água (hPa) a qual foi calculada pela equação de Tetens, apresentada por Rosenberg et al. (1983), como:

Equação 24



3.10. Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente (LE) foi obtido substituindo-se a razão de Bowen na Eq. (18), ou seja:

Equação 25

$$LE = \frac{R_n - (G + S)}{1 + \beta}$$

A equação acima permite a estimativa do fluxo de calor latente com base em medições do saldo de radiação, fluxo de calor sensível no solo e dos gradientes verticais de temperatura e vapor d'água, bem como na estimativa do calor armazenado pelo dossel da planta.

3.11. Fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível foi obtido como resíduo da Eq. (19), ou seja:

Equação 26

$$H = -(R_n + LE + G + S)$$

O fluxo de calor latente ou evapotranspiração da cultura (ET_c), obtido pela Eq. (25), em W/m^2 , via de regra, é expresso em mm/dia, fazendo-se a integração de LE para o período em que R_n foi positivo.

3.12. Coeficiente de cultivo

O coeficiente de cultivo (K_c) foi obtido pela razão entre a evapotranspiração da cultura (ET_c) e a evapotranspiração de referência (ET_o), em mm/dia, para todos os estádios fenológicos da cultura de feijão.

$$K_c = ET_c / ET_o$$

Equação 27

3.13. Análise econômica

Com base nos dados de produtividade obtidos no experimento de campo, foram determinados os custos de produção e calculados os indicadores econômicos, tais como a receita bruta, margem bruta e relação benefício/custo. Esses indicadores foram utilizados na comparação entre as produtividades do feijão cultivado em condições irrigadas e de sequeiro na região Nordeste do Brasil. A descrição dos custos é baseada no conceito de custo operacional efetivo (COE), que segundo Martin et al. (1998) contempla todos os desembolsos monetários realizados com a cultura em questão. Os preços dos insumos (preços pagos) e dos produtos (preços recebidos) foram obtidos a partir dos dados disponibilizados pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB).

A determinação da eficiência econômica foi realizada com base na relação benefício/custo (RBC_i), de acordo com a seguinte equação:

$$RBC_i = \frac{RB_i}{COE_i}$$

Equação 28

em que:

RB_i é renda bruta auferida com o cultivo de feijão irrigado ($R\$ ha^{-1}$) e COE_i é o custo operacional efetivo ($R\$ ha^{-1}$).

A renda bruta RB_i foi obtida através da seguinte expressão:

Equação 29

$$RB_i = P_i \cdot PD_i$$

em que P_i é o preço da saca de feijão (R\$ sc^{-1}) e PD_i produção obtida com irrigação (kg ha^{-1}).

A renda líquida RL_i foi obtida através da seguinte expressão:

Equação 30

$$RL_i = P_i \cdot PD_i - COE_i$$

em que P_i é o preço da saca de feijão (R\$ sc^{-1}), PD_i a produção obtida com irrigação (Kg ha^{-1}) e COE_i é o custo operacional efetivo (R\$ ha^{-1}).

O custo operacional efetivo (CTO_i) correspondente a todos os custos de produção foi determinado a partir da seguinte expressão:

Equação 31

$$COE_i = C_{INS} + C_{MO} + C_{PS}$$

em que C_{INS} corresponde ao custo dos insumos utilizados, C_{MO} é o custo de mão de obra e C_{PS} é o custo de preparo do solo.

O método de custo utilizado no presente trabalho foi o do sistema de Custo Operacional Total, do Instituto de Economia Agrícola, proposto por Matsunaga et al. (1976). Para determinar o lucro da atividade foram estimados, para as condições de sequeiro e irrigada, os seguintes indicadores: receita bruta, obtida pelo produto da quantidade obtida (em sacas) pelo preço médio da saca de feijão, recebida pelo produtor em 2010; o lucro operacional, calculado pela diferença entre a receita bruta e o custo operacional total e o índice de lucratividade, representado pela relação entre o lucro operacional e a receita bruta em termos percentuais. Os dados relativos aos coeficientes técnicos e à produtividade, utilizados no cálculo dos custos de produção e de lucratividade, foram obtidos no campo e também por técnicos da região. Os preços dos insumos e do produto referem-se aos pagos e recebidos pelos produtores na região em 2010.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Fases de crescimento e desenvolvimento da cultura

A cultura estudada nesta pesquisa (feijão vigna, cultivar Potiguar) apresentou um ciclo médio de 71 dias, que correspondeu a 08 dias para a fase de germinação (Fase I); 29 dias para a fase de desenvolvimento vegetativo (Fase II); 13 dias para a floração (Fase III) e os 21 dias restantes, para maturação fisiológica (Fase IV). A semeadura foi realizado no dia 27 de março de 2010, sendo que a coleta dos dados tiveram início 10 dias após o plantio dia 06/04/2010 fase de germinação (início da fase I), o desenvolvimento vegetativo a partir do dia 15 de abril de 2010 (início da Fase II), a floração a partir o dia 14 de maio de 2010 (Fase III) e, finalmente, a maturação foi observada no dia 16 de junho de 2010, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 Duração das fases fenológicas do ciclo do feijão caupi cultivado na região da Chapada do Apodi, RN.

| Fase | Estádio | Período | Nº de dias |
|--------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| I | Germinação | 06 abril a 14 abril 2010 | 08 |
| II | Desenvolvimento vegetativo | 15 abril a 13 de maio 2010 | 29 |
| III | Floração | 14 maio a 26 maio 2010 | 13 |
| IV | Maturação Fisiológica | 27 maio a 16 junho 2010 | 21 |
| Total | | | 71 |



Figura 7 Fases fenológicas do feijão caupi.

A duração dos estádios fenológicos do feijão-caupi devem ser vistas com cautela frente às evidências da ocorrência de mudanças climáticas na região Nordeste do Brasil. Neste particular, Campos et al. (2010), analisando o impacto do aquecimento global no cultivo do feijão-caupi no Estado da Paraíba, observaram que nos cenários estudados de aumento de temperatura do ar haverá o deslocamento das áreas de produção dessa cultura para regiões mais ao leste do Estado da Paraíba, onde a oferta hídrica é maior. Os efeitos da fenologia das culturas são ainda desconhecidos, porém, infere-se que o aumento de temperatura global pode influenciar a morfofisiologia das culturas.

4.2. Balanço de energia sobre a cultura

Foram analisadas as variações diurnas dos componentes do balanço de energia do feijão caupi para cada um dos estádios fenológicos da cultura. O fluxo de calor latente (LE) e o fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G) foram obtidos com base no balanço de energia. As densidades de fluxo de energia foram calculadas para o período diurno, ou seja, no período em que o saldo de radiação (R_n) foi positivo. A Figura 8 exibe o balanço de energia para o dia 13/04/2010, na fase de germinação do feijão caupi. Os pontos máximos de R_n e LE ocorreram logo após o meio-dia com valores de 700 e 600 $W m^{-2}$, respectivamente.

Os fluxos de LE e H foram maiores após o meio dia por conta da intensidade de radiação, que por sua vez também foi maior nesse período. Esse é o comportamento típico de dias de céu aberto, com exceção no final do dia. Por outro lado, o balanço de energia para o dia 03/05/2010, representativos do estágio fenológico de desenvolvimento da cultura, é exibido na Figura 9. Constatou-se que houve uma variabilidade nas primeiras horas do dia, provavelmente provocado pela nebulosidade, sendo que o valor máximo de R_n superou 600 W m^{-2} após o meio dia.

No estágio fenológico de floração da cultura, conforme se verifica no balanço de energia do dia 19/05/2010, os fluxos de R_n e LE exibiram um comportamento suavizado, em consequência da condição de céu claro, exceto nos instantes iniciais após o meio dia e no final do período analisado (Figura 10). Os valores máximos de R_n e LE foram de 600 e 700 W m^{-2} , respectivamente, e ocorreram próximos ao meio dia. No dia 08/06/2010, representativo do estágio de maturação, o comportamento de R_n e LE foram típicos de dia com céu claro, exceto no final do período (Figura 11), com valores próximos de 600 e 700 W m^{-2} , respectivamente, e ocorreram também próximos ao meio dia.

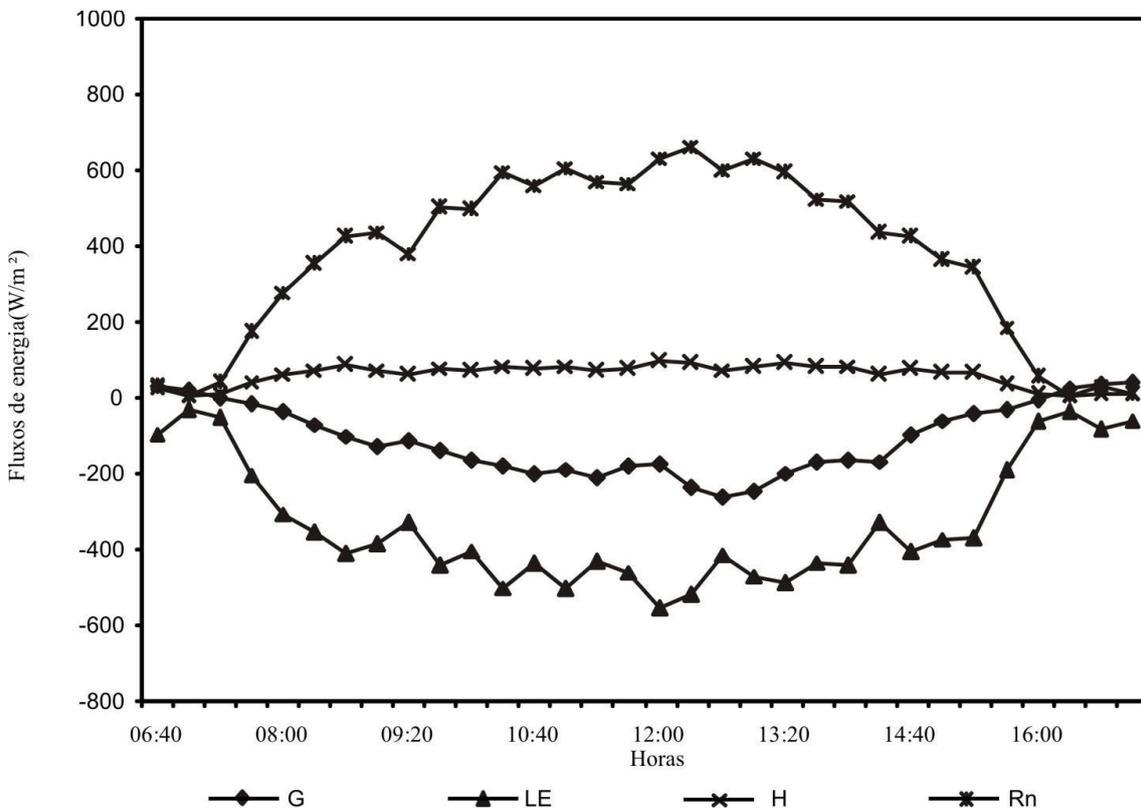


Figura 8 Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de germinação do feijão caupi em 13/04/2010

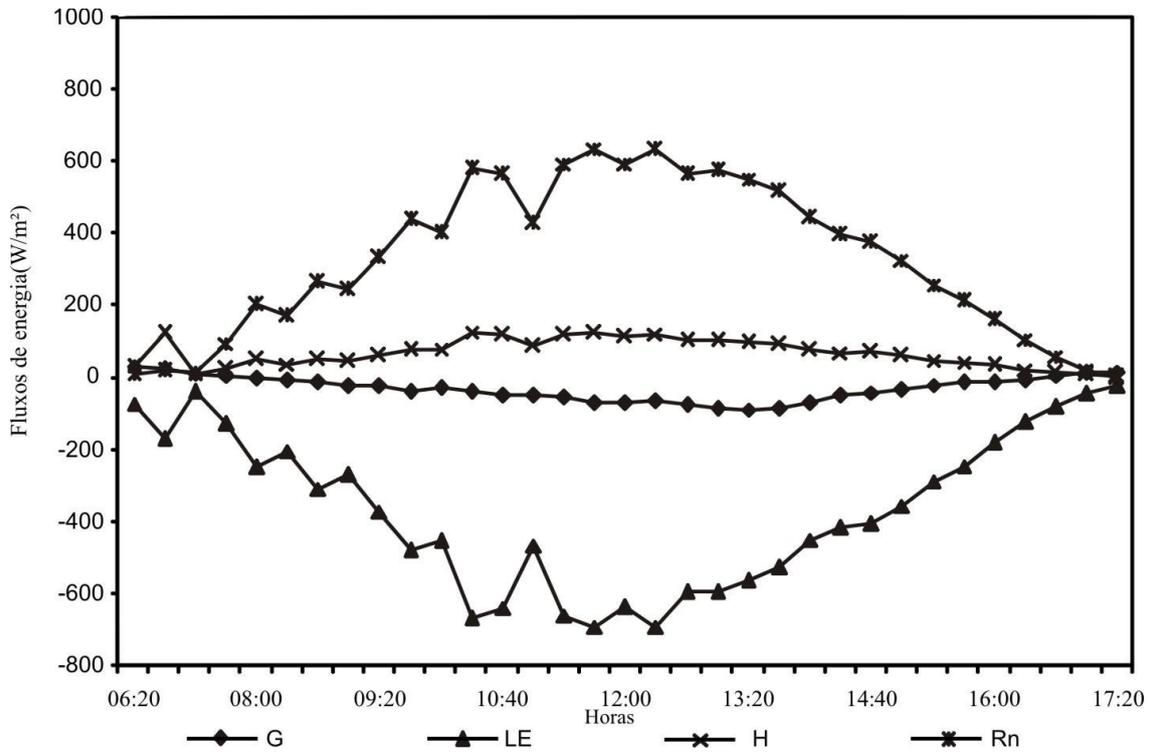


Figura 9 Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de desenvolvimento da cultura do feijão caupi em 03/05/2010

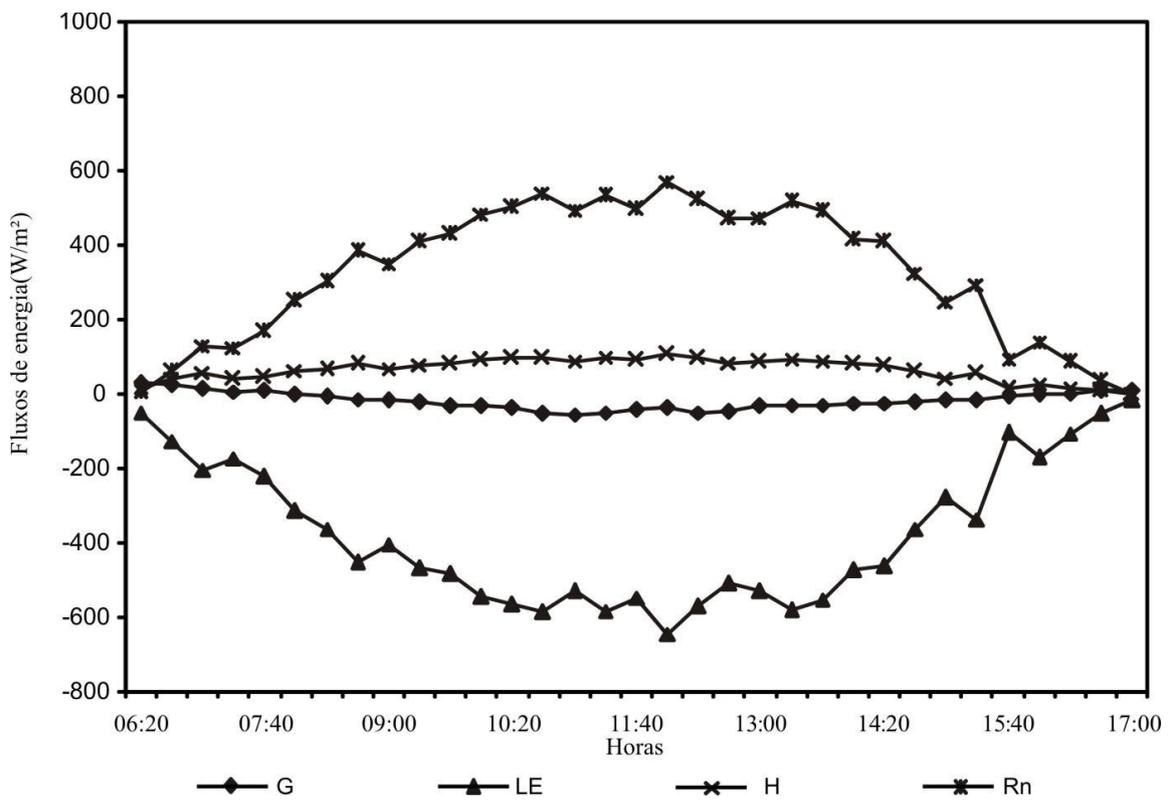


Figura 10 Curso diário dos componentes do balanço de energia no estágio fenológico de floração do feijão caupi em 19/05/2010.

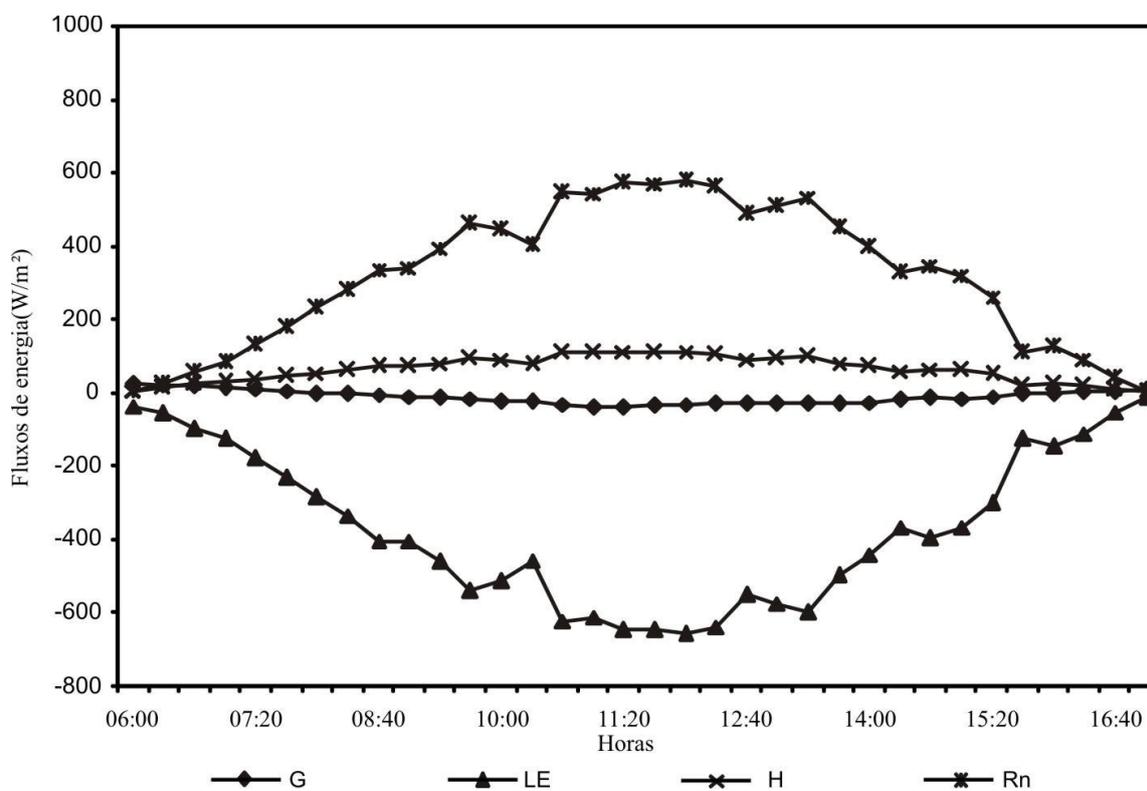


Figura 11 Curso diário dos componentes do balanço de energia no estádio fenológico de maturação do feijão caupi em 08/06/2010.

O saldo de radiação (Rn) foi maior na terceira fase do ciclo da cultura (fase de floração), com um valor total médio de aproximadamente 395 W m^{-2} , dos quais 98,4% corresponderam ao fluxo de calor latente (LE), 9,8% ao fluxo de calor sensível (H) e 11,40% ao fluxo de calor no solo (G) (Tabela 5). Dentre os componentes do balanço de energia analisados nesta pesquisa, o LE consumiu a maior quantidade do saldo total de radiação em todas as fases do ciclo do feijão, sendo que o maior consumo ocorreu na Fase III (78,8%) e a menor na Fase II (68,8%). Na fase de maturação fisiológica (Fase IV), o H representou 19,99% de Rn ($303,6 \text{ W m}^{-2}$) enquanto que na fase de floração representou apenas 9,8% de Rn ($395,3 \text{ W m}^{-2}$). O fluxo de calor no solo apresentou os maiores valores durante a Fase II (fase desenvolvimento), que correspondeu a 12,4% do Rn ($347,84 \text{ W m}^{-2}$) e os menores valores na Fase IV (maturação fisiológica) que correspondeu a 7,2% do Rn ($303,62 \text{ W m}^{-2}$).

Tabela 5 Valores médios do saldo de radiação (Rn) e da partição dos componentes do balanço de energia: fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G) durante as fases do ciclo do feijão caupi.

| Fases | Rn (W m ⁻²) | LE/Rn (%) | H/Rn (%) | G/Rn (%) |
|--------------|-------------------------|--------------|-------------|------------|
| I | 347,8 | 74 | 17,8 | 8,2 |
| II | 347,2 | 68,4 | 19,2 | 12,4 |
| III | 395,3 | 78,8 | 9,8 | 11,4 |
| IV | 303,6 | 72,9 | 19,9 | 7,2 |
| Média | 348,5 | 73,52 | 16,4 | 9,9 |

Analisando o balanço de energia sobre a cultura da mangueira, Borges et al. (2008) encontrou a seguinte partição média de Rn nas demais densidades de fluxos: LE/Rn = 78,51%; G/Rn = 7,46% e H/Rn = 14,20%. Por outro lado, o estudo de Sousa et al. (2008) evidencia que os componentes do balanço de energia são influenciados pelo índice de área foliar e altura da planta durante todas as fases de desenvolvimento do abacaxizeiro, principalmente o fluxo de calor sensível. Apesar desses estudos não se tratar da cultura de feijão, eles podem trazer alguns esclarecimentos sobre a partição de fluxos em outras culturas. O comportamento diário dos componentes de balanço de energia durante o ciclo do feijão caupi cultivado em Apodi, RN, é exibido na Figura 12. Observa-se que os valores do fluxo de calor solo (G) são próximos de zero e negativos em todo o período experimental, exceto entre as fases de germinação e de desenvolvimento da cultura. Por outro lado, o fluxo de calor sensível (H) foi sempre positivo durante esse mesmo período e atingindo valores próximos de zero no início do estágio de desenvolvimento.

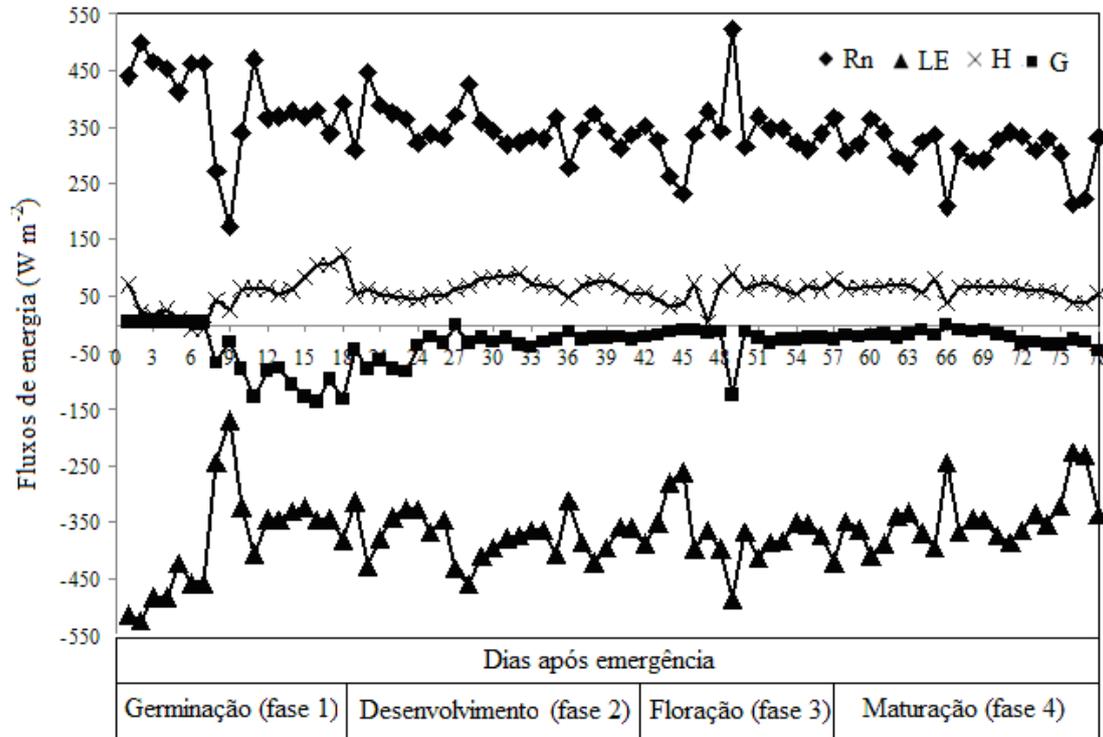


Figura 12 Comportamento diário dos componentes de balanço de energia durante o ciclo do feijão caupi cultivado em Apodi, RN.

4.3. Evapotranspiração de referência

A Tabela 6 exibe os valores médios e acumulados da evapotranspiração de referência (ET_0) durante as fases fenológicas do feijão-caupi cultivado em Apodi, RN. Os valores diários de ET_0 oscilaram entre $3,49 \text{ mm dia}^{-1}$ (Estádio I) e $6,98 \text{ mm.dia}^{-1}$ (Estádio III), sendo que os valores médios diários corresponderam a 4,87; 5,69; 5,86 e 5,76 para os Estádios I, II, III e IV, respectivamente.

No final do experimento, a ET_0 acumulada durante as fase fenológicas da cultura foi de 406,06 mm, sendo que os maiores valores foram registrados na Fase II (165,13 mm) e os menores na Fase I (43,83 mm), o que provavelmente foi provocado pelas alta e baixa demandas atmosféricas, respectivamente, nesses períodos fenológicos da cultura, bem como influenciado pelo número de dias do ciclo. De acordo com a Figura 13, a ET_0 aumenta ao longo do período de realização do experimento, em face do aumento do déficit de pressão de vapor nessa época do ano na região de estudo.

Tabela 6 Valores médios de ET_o diária e total para cada fase do ciclo do feijão caupi.

| Fase | Estádio | ET_o Diário ($mm.dia^{-1}$) | ET_o Total (mm) |
|--------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------|
| I | Germinação | 4,87 | 43,83 |
| II | Desenvolvimento vegetativo | 5,69 | 165,13 |
| III | Floração | 5,86 | 76,18 |
| IV | Maturação Fisiológica | 5,76 | 120,92 |
| Média | | 5,52 | — |
| Total | | — | 406,06 |

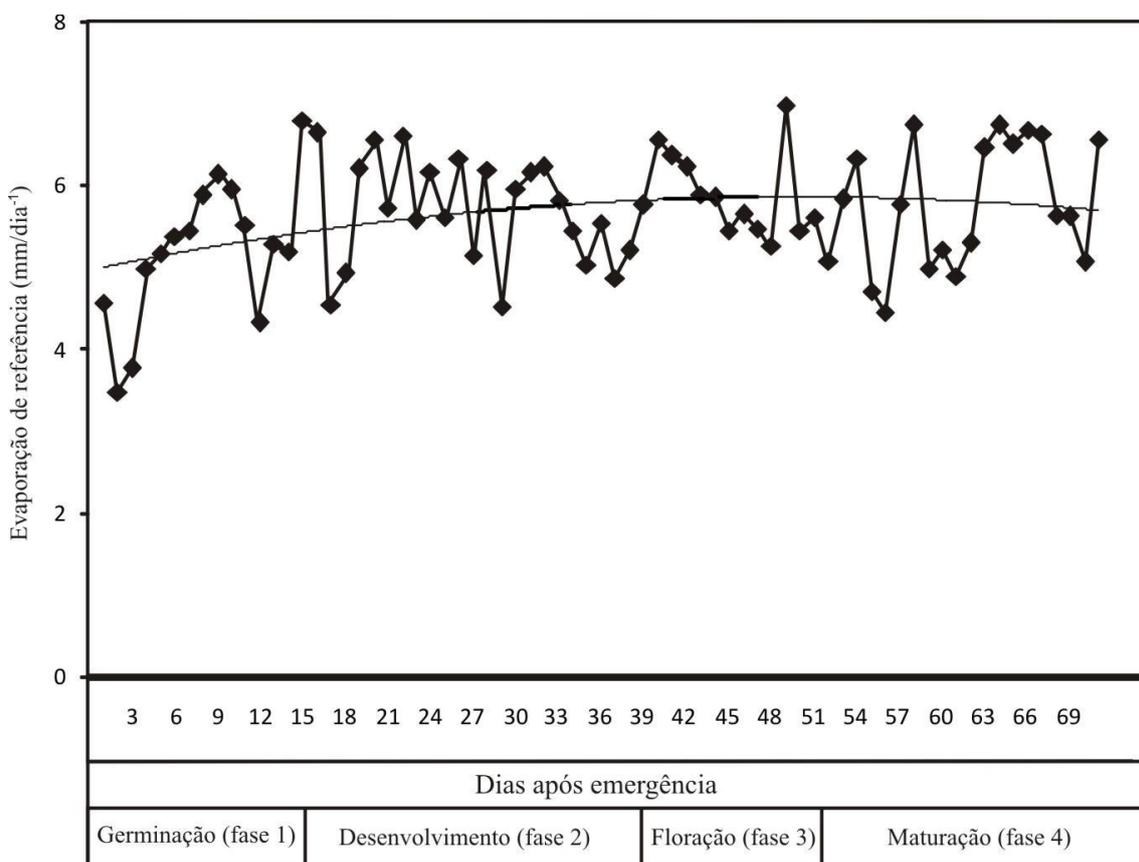


Figura 13 Comportamento diário da evapotranspiração de referência durante a realização do experimento com a cultura do feijão em Apodi, RN.

4.4. Evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração da cultura (ET_c) apresentou comportamento semelhante aquele da ET_o , sendo registrado um aumento gradativo em seus valores até a cultura do feijão concluir a sua fase de desenvolvimento vegetativo (Fase II), a partir de então os seus valores decresceram (Figura 14). Este comportamento pode ser explicado pelo

desenvolvimento das plantas, já que na Fase II do seu ciclo vegetativo a cultura apresentou maior aumento da área foliar e, conseqüentemente, aumento na sua evapotranspiração. A cultura, ao atingir a fase de floração (Fase III), já não mais apresentou mudanças significativas na ET_c , estabilizando-se, então, o índice de área foliar. Ao iniciar a fase de maturação fisiológica (Fase IV), o feijão necessitou de menor energia fotossintética, fazendo com que a ET_c diminuísse consideravelmente nesse período.

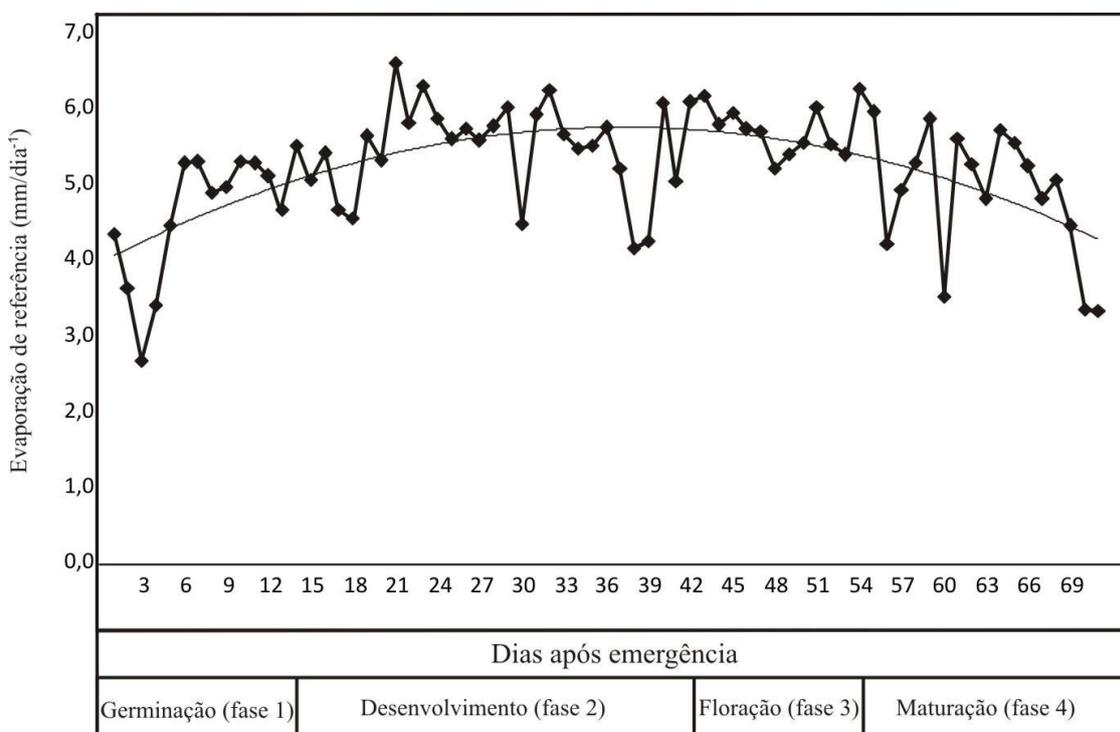


Figura 14 Comportamento diário da evapotranspiração da cultura do feijão cultivado em Apodi, RN.

Os valores médios diários e acumulados da ET_c para cada fase do ciclo do feijão caupi cultivado em Apodi, RN são apresentados na Tabela 7. Verifica-se que a Fase II do ciclo da cultura apresentou os maiores valores de ET_c , sendo que o valor médio para esse período ficou em torno de $5,76 \text{ mm} \cdot \text{dia}^{-1}$, e o acumulado fois de 166 mm. Por outro lado, para as Fases I, III e IV foram registrados valores médios diários de ET_c de 4,33; 5,98 e 5,03 mm, enquanto os acumulados foram de 38,96; 77,75 e 105,65 mm, respectivamente.

O total acumulado da ET_c durante todo o ciclo da cultura foi de 389,12 mm, sendo superior aquele encontrado por Bastos et al. (2010) quando estudaram a evapotranspiração e o coeficiente de cultivo do feijao caupi durante os diferentes

estádios de desenvolvimento da cultura na região do Vale do Gurguéia, PI, com valores acumulados de 288,5 e média diária de 4,1 mm. Klar & Fernandes (1997), quando trabalharam como Latossolo Amarelo cultivado com a cultura irrigada de feijão nas condições climáticas de Botucatu, SP, encontraram valores de ET_c acumulado e e médio de 157,16 mm e 1,71 mm dia⁻¹, respectivamente. No entanto, os valores da ET_c encontrados para feijão nesta pesquisa são inferiores aqueles obtidos por Calvache et al. (1998) que encontraram valores acumulados de 448 mm durante o ciclo da cultura de feijão.

Tabela 7 Valores médios diários e acumulados da ET_c para cada fase do ciclo do feijão caupi.

| Fase | Estádio | ET _c Diário (mm.dia ⁻¹) | ET _c Total (mm) |
|--------------|----------------------------|--|----------------------------|
| I | Germinação | 4,33 | 38,96 |
| II | Desenvolvimento vegetativo | 5,76 | 166,91 |
| III | Floração | 5,98 | 77,75 |
| IV | Maturação Fisiológica | 5,03 | 105,65 |
| Média | | 5,27 | — |
| Total | | — | 389,12 |

4.5. Coeficiente de cultivo

Os valores do coeficiente de cultivo (K_c) oscilaram entre 0,59 (Fase IV) e 1,14 (Fase II), apresentando valores médios iguais a 0,88; 0,97; 0,96 e 0,87 nas Fases I, II, III e IV, respectivamente (Tabela 8). Os resultados de K_c encontrados nesse trabalho foram compatíveis com os valores sugeridos pela FAO (2002), onde variam de 0,5 a 1,05. Constata-se que os valores maiores foram encontrados na fase de desenvolvimento da cultura (fase II), com máximo de 0,97 e tendência de redução ao longo do ciclo da cultura, atingindo valores 0,96 e 0,87 nas Fases III e IV, respectivamente.

Tabela 8 Valores médios do coeficiente de cultivo (K_c) do feijão-caupi cultivado em Apodi, RN.

| Fase | Estádio | Nº de dias | K _c |
|------|--------------------|------------|----------------|
| I | 31/03 a 14/04/2010 | 8 | 0,88 |
| II | 15/04 a 13/05/2010 | 29 | 0,97 |
| III | 14/05 a 26/05/2010 | 13 | 0,96 |
| IV | 27/05 a 16/06/2010 | 21 | 0,87 |

O comportamento diário do Kc em função dos dias após a emergência é apresentado na Figura 15. Este foi aumentando de valor gradativamente até atingir seu máximo, na Fase II, com um valor aproximado de 0,97, a partir de onde seus valores passaram a diminuir, até alcançar valores em torno de 0,87 na fase de maturação fisiológica.

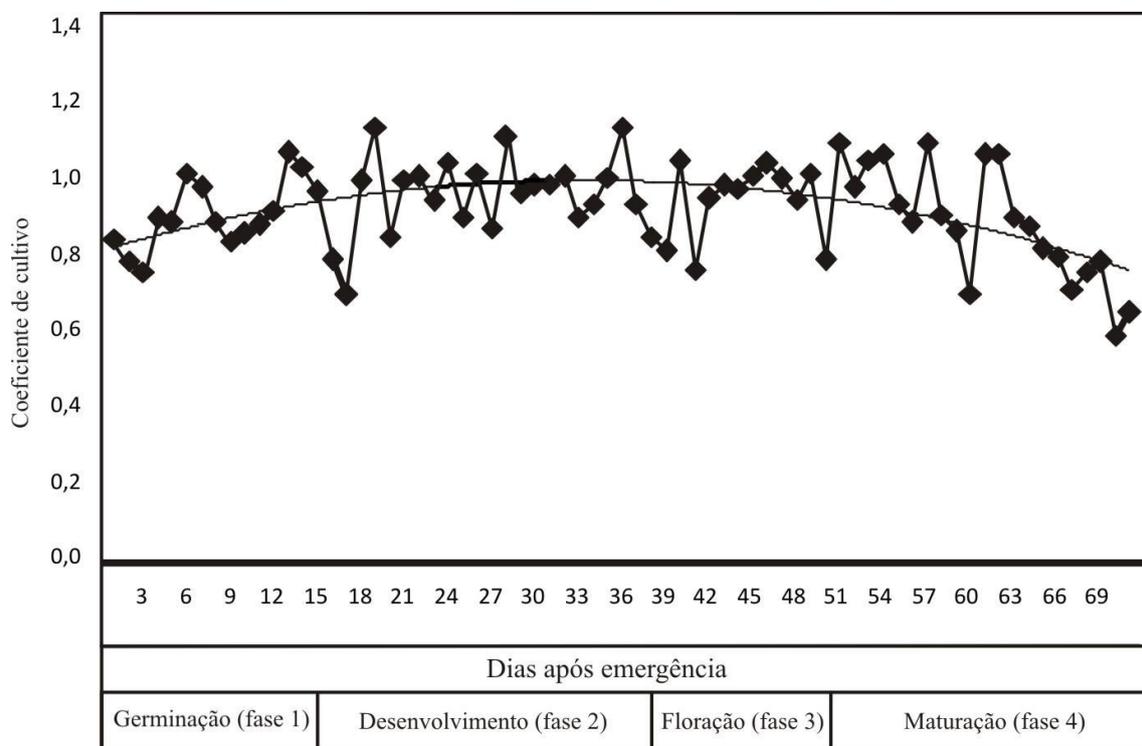


Figura 15 Comportamento diário do coeficiente de cultivo do feijão-caupi cultivado em Apodi, RN.

4.6. Análise econômica

A produtividade do cultivo do feijão-caupi irrigado em Apodi, RN, foi 605 kg ha⁻¹, resultando numa produção total de 2.420 kg da área cultivada com irrigação. Por outro lado, o cultivo em sistema de sequeiro na região é de 450 kg h⁻¹, que para a mesma área utilizada nesta pesquisa resultaria na produção total e 1800 kg. Pela análise da Tabela 9, verifica-se que o cultivo irrigado do feijão-caupi, em Apodi mostrou-se economicamente viável, indicando que a prática da irrigação garante a viabilidade econômica do cultivo do feijão. Já o cultivo em sequeiro, segundo os dados obtidos pelo IBGE, obteve uma produção menor, de 30,8%; entretanto, ambas as produtividades

exibiram uma eficiência econômica positiva, sendo este resultado considerado satisfatório. Evidentemente, a receita líquida auferida pelo cultivo irrigado do feijão-caupi foi superior a receita líquida do cultivo em sequeiro em função do aumento da água disponível no solo através de irrigação suplementar, ficando, porém, num patamar relativamente alto, cuja diferença é de 2.861,93 kg nos 4 hectares cultivados.

Tabela 9 Análise econômica do cultivo do feijão caupi irrigado e em sequeiro em Apodi, RN.

| | Renda Bruta R\$ | Renda Líquida R\$ | Custo Operacional R\$ | Eficiência Econômica |
|-----------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Irigado | 12.100 | 10.586,26 | 1.513,17 | 7, 993 |
| Sequeiro | 9.000 | 7.724,33 | 1.275,67 | 7,005 |

Campos (2010) analisando os impactos das alterações climáticas sobre a área de cultivo e produtividade de milho e feijão no nordeste do Brasil usando modelagem agrometeorológica observou que mediante os cenários de aquecimento, a duração da estação de cultivo e a produtividade serão drasticamente reduzidas como consequência da redução da área agricultável da cultura de feijão.

O custo operacional efetivo pode ser reduzido com a exclusão dos custos com a mão de obra. No Brasil, a agricultura familiar responde por sete de cada 10 empregos no campo e por cerca de 40% da produção agrícola. Atualmente, cerca de 35% dos alimentos que compõem a cesta alimentar distribuída pela CONAB se originam na agricultura familiar e, ainda, a maior parte dos alimentos que abastecem a mesa dos brasileiros vem das pequenas propriedades (CONAB, 2010). Ainda no estudo de Campos (2010), com base no “software” DSSAT, ele também observou que a relação benefício/custo do feijão caupi se mostrou maior com desvio positivo de precipitação e nas condições climáticas atuais, haja vista, que nessas condições climáticas, ocorreram os maiores valores de produtividade, e o custo de produção é o mesmo para todos os cenários de temperatura do ar.

5. CONCLUSÕES

Os resultados do estudo do feijão caupi conduzido em Apodi, RN, permitem concluir o seguinte:

1. O consumo hídrico da cultura do feijão-caupi foi maior na fase de desenvolvimento vegetativo (166,91 mm), enquanto que para todo o ciclo o consumo foi 431,86 mm;

2. Os valores do coeficiente de cultivo apresentaram valores máximos e mínimos nos estádios fenológicos germinação e de floração, respectivamente; enquanto os valores médios para os estádios I, II, III e IV foram de 0,88; 0,97; 0,96 e 0,87, respectivamente;

3. A eficiência do sistema de irrigação (60%) evidenciou que o aumento nos níveis de água disponível no solo concorreu para uma melhor eficiência na produção, que a lâmina de água aplicada (626,4 mm) resultou uma produtividade de grãos de feijão-caupi de 2.420 kg ha⁻¹ na região de Apodi, RN;

4. Comparando os sistemas irrigado e de sequeiro na produção de feijão-caupi, o sistema irrigado alcançou uma rentabilidade superior. Assim, o cultivo irrigado do feijão-caupi na região de Apodi, RN, é economicamente viável, pois a renda líquida com o cultivo irrigado foi superior a renda líquida obtida pelo cultivo em sistema de sequeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R. G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- Allen, R.G. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, n. 4, p. 650 - 662, 1989.
- Amarakoon, D.; Chen, A.; Mclean, P. Estimating daytime latent heat flux and vapotranspiration in Jamaica. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.102, p.113-124, 2000.
- Azevedo, P.V.; Silva, B.B.; Silva, V.P.R. Water requirements of irrigated mango orchards in Northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.58, n.1, p.241-254. 2003.
- Bastos, E. A.; Ferreira, V. M.; Andrade Júnior, A. S.; Rodrigues, B. H. N.; Nogueira, C. C.P. Coeficiente de cultivo do feijão-caupi em Parnaíba - Piauí. Disponível em: <<http://www.cpamn.embrapa.br/anaisconac2006/resumos/ID01.pdf>>. Acesso em: 02 dez. 2010.
- Baudoin, J. P.; Maréchal, R. Genetic diversity in Vigna. In: Singh, S.R.; Rachie, K.O. (Ed.) *Cowpea Research, Production and Utilisation*. Chichester, U.K.:John Wiley & Sons, 1985, p. 11-21.
- Belo Filho, A. F.; SILVA, V. P. R.; CAMPOS, J. H. B. C.. Sistema de estimativa da Evapotranspiração - SEVAP. 2004.
- Borges, A.C., Mediondo, E.M. “Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referencia na bacia do rio Jacupiranga, SP”. In: XV I Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, Nov.2005.
- Borges, C. J. R.; Azevedo, P.V.; Silva, V. P. R.; Campos, J. H. B. C.; Moura, M. S. B.; Soares, J. M.; Silva, B. B. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.393–399, 2008.
- Bristot, G; Pinheiro, J. U. As condições da pluviometria no Estado Do Rio Grande do Norte e as conseqüências da estiagem na produção de feijão neste Estado. Disponível em: <<http://www.rexlab.ufsc.br:8080/more/formulario10>>. Acesso em: 10 maio 2010.

- Burman, R.D. et al. Water Requeriments. In: Jensen, M.E. ed. Design and operation of Farm irrigation systems. St. Joseph: ASAE, 1983. Cap.6, p. 189 - 232. Doorenbos, J.; Pruitt, J.O. Crop water requirement. Rome: FAO, 1977. 144p. FAO Irrigation and Drainage Paper 24.
- Calvache, A. M; Reichardt, K.; Bacchi, O. O. S. Efeito de épocas de deficiência hídrica na evapotranspiração atual da cultura do feijão cv. Imbabello. Scientia Agrícola, v.55, p. 1-14, 1998.
- Campos, J.H.B.C.; Silva, M.T.; Silva, V.P.R. Impacto do aquecimento global no cultivo do feijão-caupi, no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.4, p.396–404, 2010.
- Campos, J. H. B. C. Impactos das alterações climáticas sobre a área de cultivo e produtividade de milho e feijão no nordeste do Brasil usando modelagem agrometeorológica. Tese de Doutorado. PPMET: UACA, UFCG, 93p, 2010.
- Cardoso, M.J.; Melo, F. De B.; Freire Filho, F.R.; Frota, A .B. Densidade de plantas de caupi (*Vigna unguiculata*) de portes enramador e moita em regime de sequeiro. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v.21, p.224-227, 1997b.
- CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento (Org.). Dados conjunturais de feijão macaçar (caupi) Rio Grande do Norte – Julho 2009. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/sureg/RN/dados_conjunturais_feijao_julho_2009.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2010.
- CONAB. Indicadores da Agropecuária. CONAB/MAA, Brasília-DF, ano X, nº 05, maio/2001, p.8 e 9.
- Cordeiro, I.g.;Bezerra, F.M.; Santos, J.J.A.; Miranda, E.P. Avaliação da produtividade do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) In: CONGRESSO BRASILEIRO DE Engenharia Agrícola, 27., Poços de Caldas ,1998. Anais. Lavras: SBEA/UFLA, 1998. v. 2, p.181-183.
- Corrêa, F. P. M. Cultivo de Feijão Caupi. Disponível em: <<file:///C:/Documents%20and%20Settings/a/Meus%20documentos/Ane/Artigos%20sobre%20Feij%C3%A3o/index.htm>>. Acesso em: 15 maio 2010.
- Costa, R.C.L.; Cardoso, B.B.; Silva, J.T.; Gomes Filho, J.G.F.; Silveira, J.A.G. O estresse hídrico diminui intensamente a assimilação do nitrato e a nodulação em feijão-de-corda (*Vigna unguiculata*, (L.) Walp.). In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CAUPI, 4. 1996, Teresina. Resumos. Teresina: Embrapa-CPAMN, 1996. p.78-79.

- Craufurd, P.Q.; Ellis, R.H.; Summerfield, R.J.; Menin, L. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*) I. The influence of temperature on seed germination and seedling emergence. *Experimental Agriculture*, v.32, p.1-12, 1996a.
- Craufurd, P.Q.; Ellis, R.H.; Summerfield, R.J.; Roberts, E.H. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*) II. Effect of temperature and saturation deficit on time to flowering in photoperiod insensate genotypes. *Experimental Agriculture*, v.32, p.13-28, 1996b.
- Craufurd, P.Q.; Summerfield, R.J.; Ellis, R.H.; Roberts, E.H. Development in cowpea (*Vigna unguiculata*). III. Effect of temperature and photoperiod on time to flowering in photoperiod-sensitive genotypes and screening for photothermal responses. *Experimental Agriculture*, v.32, p.29-40, 1996c.
- Daamen, C.C.; Dugas, W.A.; Prendergast, P.T.; Judd, M.J.; McNaughton. Energy flux measurements in a sheltered lemon orchard. *Agricultural and Forest Meteorology*. Amsterdam, v.93, p.171-183, 1999.
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Crop water requirements. *Irrigation e drainage*. Paper 24, Fao, Rome 1977.
- Ellis, R. H.; Lawer, R. J.; Summerfield, R. J.; Roberts, E. H.; Chay, P. M.; Brouwer, J. B.; Rose, J. L.; Yeates, S. J. Towards the reliable prediction on time to flowering in six annual crops. III. Cowpea (*Vigna unguiculata*). *Experimental Agriculture*, v.30, p.17-29, 1994.
- EMBRAPA. Pesquisa: A cultura do feijoeiro. Disponível em: <<http://www.cnpaf.embrapa.br/pesquisa/feijao.htm>>. Acesso em: 09 abr. 2010.
- FAO - Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação. Crop Water Management. Sunflower. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/cropwater/sunflower.stm>>. Acesso em: abril 2009.
- FAO - Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação. Crop Water Management. Sunflower. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/cropwater/sunflower.stm>>. Acesso em: Abril 2008.
- Fernandes, A. T.; Lofegatte, M. V.; Pereira, A. R. Avaliação de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura do crisântemo (*Chrisantemum ssp*) Cultivado em Estufa Plástica. *Irriga*, v. 11, n. 2, p.139-149, jun. 2006.
- Freire Filho, F. R.; Cardoso, M. J.; Araújo, A. G. Caupi: nomenclatura científica e nomes vulgares. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, DF, v. 18, n 12, p. 136-137, 1983.

- Freire Filho, F. R.; Ribeiro, V. Q.; Barreto, P. D.; Santos, A. A. Melhoramento genético. In: Freire Filho, F. R.; Lima, J. A. A.; Ribeiro, V. Q. (Ed.). Feijão-Caupi, Avanços Tecnológicos. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. P.29-75.
- Fritschen, L.J.; Simpson, J.R. Surface energy balance and radiation systems: general description and improvements. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v.28, n.7, p.680-689, 1989.
- Fuscaldí, K. C.; Prad, R. G. Análise econômica da cultura do feijão. *Revista de Política Agrícola*, Brasília, v.1, p.18-30, mar. 2005. Disponível e:m:<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/2850d8bdc04c86f8bb1ca00d68168c2e..pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2011.
- Hadley, P.; Roberts, E.H.; Summerfield, R.J. A quantitative model of reproductive development (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) in relation to photoperiod and temperature, and implications for screening germoplasm. *Annals of Botany*, v.51, p.531-543, 1983.
- Heilman, J.L.; McInnes, K.J.; Savage, M.J. Soil and canopy energy in a west Texas vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.71, n.1, p.99-114. 1994.
- IBGE. Base de informações municipais. Rio Grande do Norte. IBGE, 2009.
- IBGE. Levantamento sistemático da produção agrícola da Paraíba (LSPA-PB). Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística –FIBGE- GCEA/PB, J. Pessoa-PB, 1996.
- Klar, A. E.; Fernandes, M. A. Water needs for winter bean crop. *Sciencia Agricola*, Piracicaba, v.54, n.3, p.1-1-, 1997.
- Leite, M.L.; Rodrigues, J.D.; Virgens Filho, J.S. Avaliação de cultivares de caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) quanto à produtividade e componentes de produtividade, sob condições de estufa plástica. *Revista de Agricultura*, v.72, n.3, p.375-385, 1997.
- Lima, J. R. S.; Antonino, A. C. D.; Soares, W. A.; Silva, I. F. Estimativa da evapotranspiração do feijão caupi utilizando o modelo de Penman-Monteith. *Irriga*, v.11, n. 04, p.477-491, 05 abr. 2006.
- Lima, J. R. S.; Antonino, W. A.; Borges, S. 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*, v. 09, n. 04, p.527-534, 2005.

- Littleton, E.J.; Dennet, M.D.; Monteith, J.L.; Elston J. The Growth And Development Of Cowpeas (*Vigna Unguiculata*) Under Tropical Field Conditions 2. Accumulation And Partition Of Dry Weight. *Journal Of Agricultural Science*, V.93, P.309-320, 1979.
- Loomis, R.S.; Williams, W.A. Maximum crop productivity: an estimate. *Crop Science*, v.3, p.67-72, 1963.
- Maréchal, R.; Mascherpa, J. M; Stainier, F. Étude taxonomique d'un groupe complexe d'espèces de genres *Phaseolus* et *Vigna* (Papilionaceae) sur la base de données morphologiques et polliniques, traitées par l'analyse informatique. *Boissiera*, n.28, p.1-273, 1978.
- Martin, N. B.; Serra, R.; OliveirA, M. D.M.; Ângelo, J. A.; OkawA, H. Sistema integrado de custos agropecuários – CUSTAGRI. *Informações Econômicas*, São Paulo, v. 28, n. 1, 22p, 1998.
- Matsunaga, M., Bemelmans, P.F., Toledo, P.E.N. et al. 1976. Metodologia de custo de produção utilizado pelo IEA. *Agricultura em São Paulo*, 23(1):123-139.
- Medeiros, G. A.; Arruda, F. B.; Sakai, E. Relações entre o coeficiente de cultura e cobertura vegetal do feijoeiro: erros envolvidos e análises para diferentes intervalos de tempo. *Acta Scientiarum*, Maringá, v.26, n.4, p.513-519, 2004.
- Mendonça, J. C.; Sousa, E. F.; Bernardo, S.; Dias, G. P. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.7, n.2, p.275-279,2003.
- Ng, N. Q.; Maréchal, R. Cowpea taxonomy, origin germplasm. In: Singh, S. R.; Rachie, K. O. (Ed.) *Cowpea research, production and utilization*. Chichester, U.K.: John Wiley e Son, 1985. p.11-21.
- Oliveira, F. A.; Silva, J. J. S.; Campos, T. G. S. Evapotranspiração e Desenvolvimento Radicular do Milho Irrigado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.28, n.12, p.1407-1415, 1993.
- Ortega Farias, S. A comparative evaluation of the residual energy balance, Penman, and Penman-Monteith estimates of daytime variation of evapotranspiration. 1993. 137f. Phd (Thesis), Oregon State University, Corvallis, Oregon, 1993.
- Padulosi, S.; NG, N. Q. Origin taxonomy, and morphology of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. In: Singh, B .B.; Mohan, R.; Dashiell, K. E; Jackai, L. E. N., eds. *Advances in Cowpea Research*. Tsukuba; Iita jircas, 1997. p.1-12.

- Pereira, A. L.; Moreira, J. A. A.; Klar A. E. Efeitos de níveis de cobertura do solo sobre o manejo da irrigação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). Irriga, Botucatu, v.7, n.1, p.42-52. 2002.
- Pereira, L.S.; Allen, R.G. Novas aproximações aos coeficientes culturais. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.16, n.4, p.118-43, 1997.
- Rachie, K.O. Introduction. In: SINGH, S.H.; RACHE, K.O. Cowpea, research, production and utilization. Chichester: John Wiley. 1985. p.21-28.
- Rana, G.; Katerji, N.; Mastrorilli, M.; EL MoujabbeR, M.; RissoN, N. Validation of a model of actual evapotranspiration for water stressed soybeans. Agricultural and Forest Meteorology, v.86, p.215-224, 1997b.
- Rapassi, R.M.A.; Sá, M.E.; Tarsitano, M.A.A.; Carvalho, M.A.C.; Proença, E.R.; Neves, C.M.T.C.; Colombo, E.C.M. Análise econômica comparativa após um ano de cultivo do feijoeiro irrigado, no inverno, em sistemas de plantio convencional e direto, com diferentes fontes e doses de nitrogênio. Bragantia, v.62, n.3, p.397-404, 2003.
- Roberts, E.H.; Summerfield, R.J.; Minchin, F.R.; Stewart, K.A.; Ndunguru, B.J. Effects of air temperature on seed growth and maturation in cowpea (*Vigna unguiculata*). Annals of Applied Biology, v.90, p.437-446, 1978.
- Rocha, Omar C.; Guerra, Antônio F.; Azevedo, Hamilton M. Ajuste do modelo Christiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 07, n. 02, p.263-268, 15 ago. 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v7n2/v7n2a13.pdf>>. Acesso em: 19 out. 2010.
- Rosenberg, N. J.; Blad, B. L.; Verma, S. B. Microclimate. The biological environment. 20 Edition, Lincoln, Nebraska: John Wiley & Sons, 1983, 495p.
- San José, J. J.; Bracho, R.; Montes, R.; Nikonova, N. Comparative energy exchange from cowpeas (*Vigna unguiculata* (L) Walps cvs. TC-9-6 and M-28-6-6) with differences in canopy architectures and growth durations at the Orinoco Llanos. Agricultural and Forest Meteorology, v.116, n. 3-4, p.197-219, 2003.
- Santos, J. J. A.; Bezerra, F.M.L.; Miranda, E.P.; Cordeiro, L.G. Determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) e evapotranspiração máxima (E_{tm}) em diferentes fases fenológicas do feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). In: Congresso Brasileiro De Engenharia Agrícola, 27, 1998, Poços de Caldas. Anais. Lavras: SBEA/UFLA, 1998. v. 2, p.184-186.

- Silva, K. J. D. Estatística da produção de feijão-caupi. Disponível em: <<http://www.cifeijao.com.br/index.php?p=artigo&idA=107>>. Acesso em: 15 maio 2010.
- Silva, M.A.; Choudhury, E.N.; Gurovich, L.A.; Millar, A.A. *Metodologia para determinar as necessidades de água das culturas irrigadas..* Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1981.85 p.
- Silva, V. P. R.; Filho, A. F. B.; Silva, B. B.; Campos, J. H. B. C. Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 09, n. 04, p.547-553, 24 jun. 2005.
- Silva, V. P. R.; Borges, C. J. R.; Carlos H. A. F.; Albuquerque W. G.; Lima E. F.S.; Silva B. K. N.; Estudo preliminar dos fluxos de energia sobre a cana-de-açúcar na região da Mata Paraibana. In: XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2009, Belo Horizonte. Mudanças climáticas, recursos hídricos e energia para a agricultura sustentável. São Paulo : SBA, 2009.
- Silva, V. P. R.; Azevedo, P. V.; Brito, R. S.; Campos, J H. B. C. Evaluating the urban climate of a typically tropical city of northeastern Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment (Print)*, v. 161, p. 45-59, 2010.
- Sousa, I. F.; Sabino, F. G; Aguiar Netto, A. O.; Costa, O. A. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência no Perímetro Irrigado Califórnia-SE. In: Simpósio Internacional de Climatologia, 2005, Fortaleza-CE. Sociedade Brasileira de Meteorologia. Fortaleza-CE: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2005.
- Souza, C. B.; Silva, B. B.; Azevedo, P. V.; Silva, V. P. R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.4, p.393–399, 2008.
- Steduto, P.; Hsiao, T.C. Maize canopies under two soil water regimes IV. Validity of Bowen ratio-energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5 min intervals. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.89, n.3-4, p.215-228, 1998.
- Steele, W.M.; Mehra, K.L. Structure, evolution, and adaptation to farming systems and environments in *Vigna*. In: SUMMERFIELD, R.J.; BUNTING, A.H. (Ed.) *Advances in legume science*. Kew: Royal Botanic Garden, 1980. p.393-404.

- Stone, L. F.; Portes, T. A.; Moreira, J. A. A. Efeitos da tensão da água do solo sobre a produtividade e crescimento do feijoeiro. II Crescimento. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.23, n.5, p.503-510, 1988.
- Stone, L. F.; Silveira, P. M.; Moreira, J. A. A.; Braz, A. J.B. P. Evapotranspiração do feijoeiro irrigado em plantio direto sobre diferentes palhadas de culturas de cobertura. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 41, n. 04, p.577-582, abr. 2006.
- Summerfield, R.J.; Minchin, F.R.; Stewart, K.A.; Ndunguru, B.J. Growth, reproductive development and yield of effectively nodulated cowpea plants in contrasting aerial environments. Annals of Applied Biology, v.90, p.277-291, 1978.
- Tanner, C.B. Measurement of evapotranspiration. In: Hagan, R.M.; Haise, H. R.; Edminster, T.W., eds, Irrigation of agricultural lands . Madison, 1967. p. 320 - 29.
- Távora, F. J. A. F.; Diniz, Belísia Lúcia Moreira T.. Cultura Do Feijão COMUM (*Phaseolus vulgaris* L.). Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/cultura-do-feijao-doc-a48187.html>>. Acesso em: 02 dez. 2010.
- Teixeira, A. H. C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.1, p.28-32, 2001.
- Teixeira, A.H. de; Azevedo, P.V. de; Silva, B.B. da; Soares, J.M. Consumo hídrico e coeficiente de cultura da videira na região de Petrolina, PE. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.3, p.327-330, 1999.
- Wright, J. L. New evapotranspiration crop coefficient. Journal of the Irrigation and Drainage Division, New York, v.108, n.2, p.57-74. 1982.
- Zimmermann, M.J. de O. & Teixeira, M.G. Origem e evolução In: Araújo, R.S.; Rava, C.O.; Stone, L.F.; Zimmermann, M.J. de O. (Coord.). Cultura do feijoeiro comum no Brasil. P. 57-70. Piracicaba: POTAFOS, 1996. 786p.