UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA

BALANÇO DE RADIAÇÃO E CONSUMO HIDRICO DE UM CULTIVO DE FEIJÃO MACASSAR (VIGNA UNGNICULATA L. WALP) IRRIGADO.

INAJA FRANCISCO DE SOUSA

CAMPINA GRANDE - PB MAIO - 1991.

INAJA FRANCISCO DE SOUSA

BALANÇO DE RADIAÇÃO E CONSUMO HIDRICO DE UM CULTIVO DE FEIJÃO MACASSAR (VIGNA UNGNICULATA L. Walp) IRRIGADO.

> Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Meteorologia, da Universidade Federal da Paraiba, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre (M.Sc.).

AREA DE CONCENTRAÇÃO: AGROMETEOROLOGIA

PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO

(Orientador)

MARIO DE MIRANDA VILAS BOAS RAMOS LEITÃO

(Co- Orientador)

CAMPINA GRANDE - PB. MAIO - 1991



| S725b | Sousa, Inaja Francisco de Balanço de radiação e consumo hídrico de um cultivo de feijão Macassar (Vigna Ungniculata L. Walp) irrigado. / Inaja Francisco de Sousa Campina Grande - PB: [s.n], 1991. |
|-------|--|
| | 99 f. |
| | Orientador: Professor Dr. Pedro Vieira de Azevedo. Coorientador: Professor Dr. Mario de Miranda Vilas Boas Ramos Leitão. |
| | Dissertação (Curso de Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba; Centro de Ciências e Tecnologia. |
| | Feijão macassar. 2. Consumo hídrico. 3. Balanço de radiação - cultivo de feijão. 4. Feijão irrigado. I. Azevedo, Pedro Vieira de. II. Leitão, Mario de Miranda Vilas Boas. III. Título. |
| | CDU: 551.5:631(043) |

BALANÇO DE RADIAÇÃO E CONSUMO HÍDRICO DE UM CULTIVO DE FEIJÃO MACASSER (VIGNA UNGNICULATA L. Walp) IRRIGADO.

INAJÁ FRANCISCO DE SOUSA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 07/6/91

pedro vieira de azevedo

Ori/entador

Tikamane Rav

TANTRAVAHI VENKATA RAMANA RAO

Membro

JOSE CARLOS OMETTO Membro

CAMPINA GRANDE JUNHO - 1991

DEDICATORIA

Aos meus pais Severino F. de Sousa Aurora G. de Sousa

AGRADECIMENTOS

O autor agradece primeiramente a Deus pela realização deste trabalho.

A minha querida esposa Maria do Socorro pela força e estimulo que foi decisivo na realização deste trabalho.

Ao Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico para o Nordeste (PDCT-Ne), através do Projeto PB-25 do convênio CNPq/BID operacionalizado pela SUEP/UFPB.

Ao Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO, pela sua honrosa dedicação e perseverança na orientação, que foram de suma importância na elaboração deste trabalho.

Ao Prof. MARIO DE MIRANDA VILAS BOAS RAMOS LEITÃO pela importante contribuição na Co-Orientação.

Ao Prof. Dr. TANTRAVAHI VENKATA RAMANA RAO pelas sugestoes dadas que foram significativas na realização deste trabalho.

A MALAQUIAS DA SILVA AMORIM NETO, pesquisador M.Sc. do Centro Nacional de Pesquisa do Algodão (CNPA/EMBRAPA), por sua contribuição na realização deste trabalho.

Ao Prof. JOSE MARIA NOGUEIRA da COSTA da Universidade Federal de Viçosa, pelas sugestoês dadas por ocasião da análise do plano de dissertação.

A Engenheira EYRES DIANA VENTURA SILVA, pela sua valiosa contribuição nos programas computacionais.

A Cleide dos Santos desenhista do DCA pela confecção dos gráficos.

A Divanete Cruz Rocha secretária do CMMet pela elaboração das tabelas deste trabalho.

E, finalmente, agradeço a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuiram para realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho resultou da análise dos dados de experimento agrometeorológico realizado no perimetro irrigado do DNOCS, no município de Sumé-Pb. Teve como objetivo avaliar os componentes dos balanços de radiação e energia , nas fases de desenvolvimento principais da cultura de feijão macassar(Vigna Ungniculata, L.(Walp)) irrigado, assim COMO estudar as necessidades hidricas da cultura, nas condições semiáridas do cariri paraibano. O experimento foi conduzido no periodo de outubro de 1988 à janeiro de 1989. Os componentes do balanço de radiação foram monitorados através de leituras horárias e registros diários do saldo de radiação (Rn); radiação solar qlobal incidente(Rs); e refletida(Rs). Os demais parâmetros atmosféricos foram medidos, com instrumentos instalados sobre a cultura. A evapotranspiração máxima da cultura(ETm), foi medida em dois evapotranpirômetros de lençol freático constante, instalados na área experimental е a evapotranspiração de referência(ETo), foi estimada pelos métodos de PENMAN; DOORENBOS & PRUITT; PRIESTLEY & TAYLOR; JURY & TANNER; TANQUE "Classe A"; LINACRE e HARGREAVES. Valores diários de ETm e ETO foram utilizados para calcular coeficiente 0 de cultivo(Kc=ETm/ETo).

A reflectância da vegetação (Pv) apresentou uma variação diurna, com valores minimos em torno do meio dia e máximos ao nascer e ao por do sol. Do ponto de vista estacional, P_v apresentou flutuações diárias devido ao estado de umidade do solo, mas em geral, variou de 0,10 logo após a germinação a 0,21 no final da fase de floração. A melhor estimativa de Rn, foi obtida pela equação de PENMAN (1948) adaptada às condições locais e da cultura, com erro padrão de estimativa de ε_{xy} = 22,38 cal/cm². 12hs. O saldo de energia radiante disponível representou 70,41% da radiação solar global incidente durante a estação de cultivo. Todos os métodos de estimativa de ETo empregados, apresentaram uma tendência de superestimar na fase de cresimento vegetativo e floração, e de subestimar a evapotranspiração medida na fase de maturação da cultura. Foi estabelecida uma curva representativa da variação estacional de K_G, para o feijão macassar nas condições locais do experimento. A análise de variância denotou que, não existe diferença significativa entre os valores de K_G sugeridos pela FAO e estimados pelos diferentes métodos, ao nivel de significância de 1%. O consumo hidrico da cultura ao longo das fases fenológicas foi de 478,1mm. Durante a fase de completo desenvolvimento da cultura, o consumo hidrico diário médio foi de 7,6mm/dia.

ABSTRACT

This work was a result of the analysis of data from field research conducted at DNOCS irrigation settlement at Sumé-Its objective was to evaluate the radiation Pb. and energy balance components for the main phenological phases of an irrigated cawpea crop(Vigna Ungniculata L. (WALP)) as well as to study the crop water requirements for the semi-arid conditions of the Paraiba State Cariri region. The experiment was conducted in the period from October, 1988 to January, 1989. The radiation balance components were obtained with hourly measures of the radiation balance(Rn); global incident(Rs) and reflected (Rs) solar radiation . The other atmospheric parameters were measured with instruments installed over the canopy. The crop maximum evapotranspiration(ETm), was measured with two constant water level evapotranspirometers installed within the experimental area and the reference evapotranspiration(ETo) was estimated by the methods of PENMAN; DOORENBOS & PRUITT; PRIESTLEY & TAYLOR; JURY & TANNER; "CLASSE A" PAN; LINACRE and HARGREAVES. Daily values of ETm and ETO were used to calculate the crop coefficient(Kc=ETm/ETo).

The canopy reflectance ($^{\rho}v$) showed a daytime variation with minimum values around midday and maximum values at sunrise and sunset. In terms of seasonal behavior, $^{\rho}v$ showed daily fluctuations due to the soil water status, but in general it varied from 0.10 just after germination to 0.21 at the end of flowering phase. The best estimate of Rn was obtained by PENMAN'S equation(1948) adjusted to local and crop conditions with an estimate standard error of ε_{xy} = 22.38 cal/cm².12hs. The available radiant energy represented 70.41% of the incident global solar radiation during the growing season.

All methods employed for estimating ETo showed a tendency of overestimating at the growing and flowering phases and of underestimating ETm at the complete development phase. It was established a representative curve of the seasonal variation of K_{c} for the cawpea crop, for the experiment and local

conditions. The variance analysis showed no significant difference between K_C values suggested by FAO and those estimated by the methods employed, at the 1% significance level. The crop water use during the whole growing season was 478,1mm. During the full development phase, the mean daily crop water use was 7,6mm/day.

SUMARIO

Página

ń

| 1 | - | INTRODUÇÃO | 1 |
|----|---|--|----|
| 2 | - | FUNDAMENTAÇÃO TEORICA | 4 |
| | | 2.1 - Processos Aerodinâmicos na Camada Limite | |
| | | Superficial Turbulenta | 4 |
| | | 2.1.1 - Perfil Logaritmico do Vento | 5 |
| | | 2.1.2 - Estabilidade do Ar na Camada Limite | |
| | | Superficial Turbulenta | 6 |
| * | | 2.2 - PROCESSOS DO BALANÇO DE ENERGIA | 8 |
| | | 2.2.1 - Equação do Balanço de Radiação | |
| | | à Superficie | 8 |
| 74 | | 2.2.1.1 - Radiação de Ondas Curtas | |
| | | Incidente (Rs ¹) | 9 |
| | | 2.2.1.2 - Coeficiente de Reflectividade | |
| | | ($\rho_{\mathbf{v}}$) | 10 |
| | | 2.2.1.3 - Radiação de Ondas Longas | 10 |
| | | 2.2.2 - Equação do Balanço de Energia à Superficie | 11 |
| 3 | | REVISÃO BIBLIOGRAFICA | 16 |
| 4 | | MATERIAL E METODOS | 21 |
| | | 4.1 - MATERIAL | 21 |
| | | 4.1.1 - Experimento de Campo | 21 |
| | | 4.1.2 - Cultura | 21 |

ŧ.

| 4.1.3 - Instalação dos Evapotranspirômetros | 21 |
|---|-----|
| 4.1.4 - Sistemática de Observações | 22 |
| 4.1.5 - Instrumentos Instalado na Area | - |
| Experimental | 22 |
| 4.1.6 - Tratos Culturais | 23 |
| 4.2 - METODOS | 23 |
| 4.2.1 - Balanço de Radiação de Ondas Curtas | 23 |
| 4.2.1.1 - Radiação de Ondas Curtas | |
| Incidentes (Rs ⁴) | 23 |
| 4.2.1.2 - Coeficiente de Reflexão da Superfic | cie |
| Vegetada(p _v) | 25 |
| - Comportamento Estacional de | |
| (p _v) | 25 |
| - Comportamento Diurno de (ρ_v) | 25 |
| 4.2.2 - Balanço de Radiação de Ondas Longas | 26 |
| 4.2.2.1 - Radiação de Ondas Longas Emitida | |
| pela Superficie (R_1^{\uparrow}) | 26 |
| 4.2.2.2 - Radiação de Ondas Longas Incidente | |
| à Superficie(R_1^{\downarrow}) | 26 |
| - Determinação de (R14) | 26 |
| - Estimativa de (R_{1}^{\downarrow}) | 27 |
| 4.2.3 - Saldo de Radiação (Rn) | 28 |
| - Medidas de (Rn) | 28 |
| - Estimativa de (Rn) | 28 |
| 4.2.4 - Balanço de Radiação | 31 |

| 4.2.5 - Fluxo de Calor Latente(LE) | 31 |
|--|----|
| 4.2.6 - Fluxo de calor Sensivel no Solo (G) | 31 |
| 4.2.7 - Fluxo de Calor Sensivel para o Ar (H) | 32 |
| 4.2.8 - Comportamento Diurno do Balanço de Energia | 32 |
| 4.2.9 - Balanço de Energia à Superficie | 32 |
| 4.2.10 - Medidas Diretas da Evapotranspiração | |
| Máxima da Cultura (ETm) | 33 |
| 4.2.11 - Processos de Estimativas da Evapotranspi | |
| ração de Referência (ETo) | 33 |
| - Método de PENMAN | 33 |
| - Método de PENMAN Modificado por DOORENBOS | |
| & PRUITT | 34 |
| - Método de PRIESTLEY & TAYLOR | 34 |
| - Método do Tanque "Classe A" | 35 |
| - Método de LINACRE | 35 |
| - Método de Hargreaves | 36 |
| 4.2.12 - Determinação do Coeficiente de Cultivo | |
| (Kc) | 36 |
| | |
| 5 - RESULTADOS E DISCUSSOES | 38 |
| 5.1 - Radiação Solar Global (Rs) | 38 |
| 5.1.1 - Estimativa da Radiação Solar Global | 38 |
| 5.2 - Reflectância da Vegetação (ρ_{v}) | 40 |
| 5.2.1 - Variação Estacional de ($\rho_{\mathbf{v}}$) | 40 |
| 5.2.2 - Variação Diurna de (^p ~) | 42 |

.

| r | 5.3 | - | Estimativa da Radiação de Ondas Longas da | |
|---|------|-----|---|----|
| | | | Atmosfera (R_1) | 42 |
| | 5.4 | - | Estimativa do Saldo de Radiação (Rn) | 46 |
| | | - | Equação Proposta por LINACRE (1968) | 46 |
| | | - | Equação Proposta por PENMAN (1948) | 48 |
| | | | Estimativa de Rn com Base Apenas em Rs $(1- {}^{ ho}v) \dots$ | 51 |
| | 5.5 | - | Comportamento dos Componentes do Balanço de Radiação | |
| | | | Sobre a Cultura | 53 |
| | | | 5.5.1 - Comportamento Diurno dos Componentes do | |
| | | | Balanço de RadiaçãoBalanço de Radiação. | 53 |
| | | | 5.5.2 - Variação Estacional dos Componentes do | |
| | | | Balanço de RadiaçãoBalanço de Radiação | 58 |
| | 5.6 | - | Balanço de Energia Sobre a Cultura | 58 |
| | 5.7 | | Medidas e Processos de Estimativas da Evapotrans | |
| | | | piração | 61 |
| | | | 5.8 - Coeficiente de Cultivo (K _C) | 67 |
| - | CON | CLU | JSOES | 82 |
| - | REFI | ERI | ENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 84 |
| | | | APÈNDICE A | 95 |

6

7

LISTA DE FIGURAS

| 2.1 - | Balanço de energia num volume de controle(SHAW e DECKER, 1979) 12 |
|---------------|--|
| 4.1 - | Localização e distribuição dos instrumentos na àrea experimental 24 |
| 5.1 - | Modelo de estimativa da radiação solar global incidente com base na insolação efetiva (Relação de PRESCOTT) para o periodo experimen tal do desenvolvimento da cultura |
| 5.2 - | Variação estacional da reflectância da cultu ra de feijão macassar, para às condições do cariri paraibano 41 |
| 5.3 - | Variação diurna do albedo (ρ_{v}) para dias representativos das fases de: (A) crescimento vegetativo; (B) floração e (C) maturação 43 |
| 5.4 - | Comparação de Ricc(D) determinado pela equação do balanço de radiação, com base nos componen tes observados, com Ricc(E) estimado pelas equações de BRUNT, SWIMBANK, BRUTSAERT, SATTERLUND e IDSO & JACKON, onde a temperatura do ar e a pressão do vapor d'água foram obser vados sobre a cultura |
| 5 . 5a | -Comportamento estacional do saldo de radiação (Rn) observado e estimado pelas eqs. de LINACRE (1968) |
| 5.5b | -Comportamento estacional do saldo de radiação (Rn) observado e estimado pela equação de PENMAN(1948): (A) Coeficientes originais do balanço de radiação de ondas longas(Rn1); (B) calibração local dos coeficientes referente ao balanço de radiação de ondas longas(Rn1); (C) calibração local dos coeficientes referentes |
| | 2.1 - 4.1 - 5.1 - 5.2 - 5.3 - 5.4 - 5.5a 5.5b |

| | aos termos dos balanços de radiação de ondas longas(Rnl) e ondas curtas(Rns) |
|--------|---|
| Figura | 5.5c -Comportamento estacional do saldo de radiação (Rn) observado e estimado em função de Rs ⁴ e Rs ⁴ (1 - ρ_v) |
| Figura | 5.6 - Estimativa do saldo de radiação (Rn) pelos: (A) correlação com a radiação solar global (Rs⁴); (B) correlação com o balanço de radiação com ondas curtas (Rs⁴ (1- ρ_V)); (C) equação de LINACRE(Rn₁) e (D) equação de PENMAN(Rnp),para o periodo do ciclo vegetativo da cultura de feijão macassar |
| Figura | 5.7a - Comportamento diurno dos componentes do balan ço de radiação sobre a cultura de feijão maca ssar para a fase de crescimento vegetativo: (A) dia anterior e (B) dia posterior às irri gações |
| Figura | 5.7b - Comportamento diurno dos componentes do balan ço de radiação sobre a cultura de feijão maca ssar para a fase de floração:(C) dia anterior e (D) dia posterior às irrigações |
| Figura | 5.7c - Comportamento diurno dos componentes do balan ço de radiação sobre a cultura de feijão maca ssar para a fase de maturação:(E) dia ante rior e (F) dia posterior às irrigações 57 |
| Figura | 5.8a - Comportamento diurno dos componentes do balan ço de energia para a fase de crescimento vege tativo da cultura de feijão: (A) dia anterior e (B) dia posterior às irrigações |
| Figura | 5.8b - Comportamento diurno dos componentes do balan ço de energia para a fase de floração da cul tura de feijão: (C) dia anterior e (D) dia posterior às irrigações |

| Figura | 5.8c | - Comportamento diurno dos componentes do balan ço de energia para a fase de maturação da cul tura de feijão: (E) dia anterior e (F) dia posterior às irrigações | 64 |
|--------|---------------|---|----|
| Figura | 5.9 - | - Comportamento estacioal da evapotranspiração medida e estimada pelos métodos de PENMAN e DOORENBOS & PRUITT | 69 |
| Figura | 5.10 | -Comportamento estacional da evapotranspiração medida e estimada pelos métodos de PRIESTLEY & TAYLOR e JURY & TANNER | 70 |
| Figura | 5.11 | -Comportamento estacional da evapotranspiração medida e estimada pelos métodos de LINNACRE e HARGREAVES | 71 |
| Figura | 5 . 12 | -Comportamento estacional da evapotranspiração medida e estimada pelo método do Tanque "Class A" | 72 |
| figura | 5.13 | -Correlação entre os valores diários médios, para periodos semanais, de K _C obtidos pelo Tan que "classe A" e PENMAN e sugeridos pela FAO (1975) | 75 |
| Figura | 5.14 | -Correlação entre os valores diários médios, para periodos semanais, de K _C obtidos por DOORENBOS & PRUITT e JURY & TANNER e sugeridos pela FAO(1975) | 76 |
| Figura | 5.15 | -Correlação entre os valores diários médios, para periodos semanais, de K _C obtidos por PRIESTLEY & TAYLOR e HARGREAVES e sugeridos pela FAO(1975) | 77 |
| Figura | 5 . 16 | -Correlação entre os valores diários médios, para periodos semanais, de K _C obtidos por LINACRE e sugeridos pela FAO(1975) | 78 |

| Figura | 5.17 -Comparação entre os valores diários médios, para periodos semanais, de K _C sugeridos pela FAO(1975) e estimados por vários métodos utili zados | 79 |
|--------|--|----|
| Figura | 5.18a-Curva representativa do coeficiente de cultivo (K _C) sugerido pela FAO para a cultura de fei jão macassar, nas condições ambientais do expe rimento | 80 |
| Figura | 5.18b-Curva representativa do coeficiente de cultivo (K _C) obtido pelo método de PENMAN e segundo os valores limites sugeridos pela FAO para a cultura de feijão macassar, nas condições ambientais do experimento | 81 |

LISTA DE TABELAS

| Tabela | 5.1 - | Radiação atmosférica (R _{lcc} , cal/cm ² .12hs) para dias de céu claro,medida e estimada por vários métodos com base na temperatura e pressão de vapor d'água observado sobre a cultura | 45 |
|--------|-------|--|----|
| Tabela | 5.2 - | Valores médios diurnos para periodos semanais dos componentes do balanço de radiação (cal/cm ² .12hs), sobre a cultura | 59 |
| Tabela | 5.3 - | Razoẽs entre os componentes do balanço de ra diação (%) para diferentes culturas | 60 |
| Tabela | 5.4 - | Evapotranpiração diária(mm/dia) para periodos semanais | 65 |
| Tabela | 5.5 - | Varaição estacional dos componentes do balanço de energia(cal/cm ² .12hs), sobre a cultura para periodos semanais | 66 |
| Tabela | 5.6 - | Evapotranspiração diária média (mm/dia) para periodos semanais, medida e estimada por difere ntes métodos | 68 |
| Tabela | 5.7 - | Valores diários médios para periodos de K _C , es timados por diferentes métodos e sugeridos pela FAO(1975) | 74 |
| Tabela | al - | Valores do fator ponderante (W) para a correção do efeito da radiação, na estimativa da evapo transpiração potencial para diferentes temperatu ras e altitudes | 96 |
| Tabela | a2 - | Coeficiente do tanque "Classe A" (kp) em função da cobertura da vegetação e dos valores médios diários da umidade relativa e velocidade do vento | 97 |

LISTA DE QUADROS

. . . .

Página

| Quadro | V.1- | Valores de "al" e "bl" da eq.(4.1) obtidos para Sumé-Pb, com dados da àrea experimental | 38 |
|--------|------|--|----|
| Quadro | v.2- | Valores de "al" e "bl" da eq. de PRESCOTT(1940) para o Semi-Arido do Nordeste | 40 |
| Quadro | V.3- | Comparação entre os valores originais e ajustado localmente dos coeficientes das eqauções utili zadas na estimativa de R _{lcc} , obtidos para Sumé- Pb (com "e" em mb) | 44 |
| Quadro | v.4- | Coeficientes originais e estimados localmente | |
| | | de ondas longas da equação de PENMAN(1948) | 51 |

1 - INTRODUÇÃO

últimas décadas tem-se observado que a população Nas mundial cresce em progressão geométrica, enquanto que a produção agricola evolui em progressão aritimétrica, acarretando uma maior demanda de bens de consumo, em particular de alimentos. Deste modo é extremamente importante que mais pesquisas sejam desenvolvidas visando o aumento de produção agricola. Como não poderia deixar de ser, existe uma preocupação muito grande por partes dos governantes e pesquisadores de todos os paises, na busca de soluções viáveis para equacionar o grave problema da fome que afeta o mundo. Tal situação é mais agravante nos países subdesenvolvidos. Portanto existe uma necessidade, cada vez maior se produzir alimentos para atender ao abasticimento de da crescente população humana e animal, fato que tem estimulado estudos do comportamento fisiológicos e adaptação climática de culturas visando obter maiores indices de produtividade.

O caupi é uma leguminosa comestivel dotada de alto teor protéico, boa capacidade de fixar nitrogênio e pouco exigente em fertilidade do solo. A importância do cultivo do feijão no Brasil além do aspecto econômico, tem caráter social, uma vez que constitui um dos alimentos básicos da população. Esta leguminose é responsavel pela principal fonte de protéinas na alimentação da população de mais baixo poder aquisitivo. Trata-se de alimento básico para a população, estando presente nas regiões tropicais e subtropicais, e amplamente distribuido no mundo. No Brasil existem boas condições de clima e solo para a sua adaptação, tendo como habitat predominante as regiões de clima ou semi-àridas). 0 caupi é cultivado quente (úmidas predominantemente nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, pois estas apresentam características edafoclimáticas favoráveis e distintas. Difundido nas demais regiões do pais como hortalica para a produção de graõs verdes e vargens, é tambem utilizado na produção de ramos e folhas para alimentação animal. Pela sua rusticidade e capacidade de se desenvolver em solos de baixa

fertilidade, constitui tambem uma opção como fonte de matéria orgânica, sendo utilizado como adubo verde na recuperação de solos pobres em fertilidade.

Os niveis de produção têm mostrado que, do agricultor tipico não se pode esperar a curto prazo, aumento substancial da produção, tendo em vista que o mesmo não introduz inovasoês tecnológicas que permitam incremento substancial na produção. A esperança está nos produtores empresáriais que investem mais na cultura como empreendimento rentável. Esses produtores utilizam a tecnologia disponível, inclusive a irrigação, para conseguir produções elevadas em duas safras por ano. E possivel que a entrada desse potencial de produção elimine as importações periódicas do produto e faça o Brasil voltar à condição inicial de exportador de feijão.

Para que haja aumento de produção agricola é necessário o conhecimento dos efeitos das variações dos parâmetros meteorológicos sobre os processos fisiológicos e metabólicos das plantas cultivadas. Assim, deve-se estudar as causas do aumento ou diminuição da demanda hidrica para a cultura que, de certa forma, são responsaveis pelo desenvolvimento das plantas e consequente nivel de produção da cultura.

Considerando caracteristicas as edafo-climáticas peculiares da região semi-àrida do nordeste do Brasil(solos pobres e alta demanda evapotranspirativa) faz-se necessário desenvover pesquisas agrometeorológicas em cultivos irrigadas, visando ajustar os balanços de radiação e energia às condições locais e da cultura. Devido principalmente ao alto custo e a de instalação de dificuldade lisimetros, grande muitos pesquisadores recorrem ao uso de fórmulas empíricas com o objetivo de estimar a evapotranspiração. As medidas lisimétricas são as mais confiáveis. No entanto existem vários métodos de estimativa que levam a resultados aceitáveis. Recentemente o método do balanço de energia tem sido bastante aplicado em pesquisas agrometeorológicas, obtendo-se bons resultados no computo e monitoramento das necessidades hidricas das culturas.

O objetivo deste trabalho consistiu da avaliação dos componentes dos balanços de radiação e energia, ao longo das

distintas fases de desenvolvimento da cultura de feijão macassar irrigado, e comparação dos resultados obtidos com as formulas empiricas existentes no sentido de adaptá-las as condições locais e da cultura.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

Quando se emprega a teória dos fluxos gradientes, pelos menos dois critérios básicos devem ser considerados na determinação dos fluxos na camada limite superficial turbulenta: os processos aerodinâmicos e do balanço de energia.

2.1 - PROCESSOS AERODINÂMICOS NA CAMADA LIMITE SUPERFICIAL TURBULENTA

No estudo da transferência turbulenta de massa, calor e quantidade de movimento, é necessário se considerar hipóteses simplificadoras, tendo em vista a complexidade dos processos Os fluxos de massa e calor na camada turbulenta, envolvidos. próximo à superficie, são gerados pelo movimento turbulento do ar. A ordem de grandeza do fluxo da guantidade de movimento em relação ao vento medido e a rugosidade da superficie, permite conhecer o grau de confiabilidade da eficácia do processo de transferência turbulenta de propriedades como: vapor d'áqua, calor sensivel, CO2, etc. Assim, os fluxos de calor sensivel (H), calor latente (LE) e quntidade de movimento (τ) na camada limite superficial, podem ser estimados por equações como:

$$H = \rho_{a}C_{p} K_{b} dT/dZ$$
 (2.1)

 $LE = \rho_{a}(L^{\varepsilon}/p) K_{v} de/dZ$ (2.2)

$$\tau = \rho_{a} K_{m} d\overline{U}/dZ, \qquad (2.3)$$

onde: Kh, Ky e Km são os coeficientes de difusão turbulenta, de calor sensivel, vapor d'água e quantidade de movimento

respectivamente; ρ_{n} é a densidade do ar; C_{P} é o calor especifico do ar à pressão constante; \overline{T} , \overline{e} e \overline{U} representam os valores médios da temperatura, pressão parcial do vapor d'água e da componente horizontal da velocidade do vento, L é o calor latente de vaporização; p é a pressão atmosférica; E é a razão entre os pesos moleculares do vapor d'água (M_{ν}) e do ar seco (M_{n}), que é da ordem de 0,622 e Z é a coordenada vertical.

E importante evidenciar que se o ar estiver fluindo sobre uma superficie rugosa, torna-se bastante turbulento e iregular, sendo que os fatores responsáveis por esta mudança são: efeito de fricção com a própria superficie e efeitos da estratificação térmica do ar. Tal movimento turbulento, denominado de tensão de cisalhamento, pode ser expresso pela seguinte equação:

$$= \rho_a U^{*2}$$
, (2.4)

em que: U* é a velocidade de fricção, que representa a velocidade caracteristica do movimento, causado pelo o ar sobre a superficie.

2.1.1 - PERFIL LOGARITMICO DO VENTO

τ

O perfil vertical da velocidade do vento na camada proxima a superficie, via de regra apresenta cisalhamento máximo proximo a superficie que decresce de forma logaritmica com a altura. Deste modo, o gradiente vertical da velocidade do vento pode ser expresso por:

$$dU/dz = A/Z , \qquad (2.5)$$

onde A é uma costante com dimensoes de velocidade, independente

5

da altura e proporcional a U*, podendo ser expressa por:

A = U*/k, sendo k=0,4 a constante de Von Karman. Então a eq.(2.5) fica:

$$dU/dz = U^*/kZ.$$
 (2.6)

A equação acima integrada verticalmente da superficie (Z=O) até um nivel Z, resulta:

$$U(z) = (U^*/k) \ln (Z/Z_0),$$
 (2.7)

em que Zo é o parâmetro ou coeficiente de rugosidade da superficie. Sobre superficies vegetadas, deve ser introduzido um plano zero de deslocamento (d), então a eq.(2.7) torna-se:

$$\overline{U}(z) = (U^*/k) \ln((Z-d)/Zo)$$
 (2.8)

2.1.2 -ESTABILIDADE DO AR NA CAMADA LIMITE SUPERFICIAL TURBULENTA

A condição de estabilidade do ar pode ser analizada com base no número de Richardson (Ri), definido como a razão entre as forças térmicas e mecânicas, isto é:

$$Ri = g(d\theta_v/dZ)/Tv(dU/dZ)^2, \qquad (2.9)$$

onde: g é a aceleração devido a gravidade, $\overline{T}_{\nu} = (T_{\nu}(Z1)+Tv(Z2))/2$ é a temperatura virtual absoluta média. A temperatura virtual absoluta é dada por:

$$T_v = T_a / (1-0,378(e/p)).$$
 (2.10

7

)

A temperatura potencial virtual (θ_v) é dada por:

$$\theta_{\mathbf{v}} = \mathbf{T}_{\mathbf{v}} + \Gamma(\mathbf{z}), \qquad (2.11)$$

sendo $\Gamma(z) = 9,86 \times 10^{-5} \text{ K.cm}^{-1}$ é a taxa de variação adiabática da temperatura do ar.

A estabilidade do ar é interpretada pelo número de Richardson da seguinte forma:

Ri > 0 : condições estáveis; Ri = 0 : condições neutras; Ri < 0 : condições instáveis;</pre>

As eqs.(2.7 e 2.8) são válidas apenas para condições de estabilidade atmosférica neutras ou muito próximas da neutralidade (| Ri | < 0,003). Para condições de estabilidade atmosférica fora da neutralidade e considerando a similaridade entre os processos de transferência da quantidade de movimento, calor sensivel e calor latente ($K_m = K_k = K_v$), as eqs.(2.7 e 2.8) são corrigidas pelos seguintes fatores:

Condições instaveis:

 $K_h/K_m = K_v/K_m = (1-16Ri)$ (DYER & HICKS, 1970) (2.12)

Condições estáveis:

 $K_{\rm h}/K_{\rm m} = K_{\rm v}/K_{\rm m} = 1$ (WEBB, 1970) (2.13)

2.2 - PROCESSOS DO BALANÇO DE ENERGIA.

saldo de radiação (Rn) sobre uma superficie 0 vegetada, resulta do computo dos fluxos de radiação incidentes e refletidos ou emitidos, na interface superficie-atmosfera. Tais fluxos, são constituidos de componentes de ondas curtas e de ondas longas. O saldo de radiação constitui, 0 principal parâmetro para modelos de estimativa da evapotranspiração tais como, o método da razão de Bowen (FRITSCHEN, 1965; TANNER, 1960) e o método combinado (PENMAN, 1948; FERGUSON, 1952; SLATYER & MCILROY, 1961). Rn pode ser medido com radiômetros especializados (saldo radiômetro). Entretanto, tais instrumentos são caros e requerem técnicas especiais de operação e calibração, sendo por conseguinte, de uso restrito à pesquisa. Na solução deste problema, vários autores têm desenvolvido algumas relações, com o objetivo de estimar a radiação de ondas curtas e o saldo de PENMAN, 1948; FRITSCHEN, 1967; LINACRE, radiação (1968; FITZPATRICK & STERN, 1973).

2.2.1 - EQUAÇÃO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO À SUPERFICIE.

ou

O balanço de radiação à superficie é dado pela soma algébrica dos fluxos radiantes que chegam e saem da superficie, no expectro solar integrado sobre todos os comprimentos de ondas, isto é:

$$Rn = (Rs^{\downarrow} - Rs^{\uparrow}) + (R_{1}^{\downarrow} - R_{1}^{\uparrow})$$
(2.14)

 $Rn = Rs^{\downarrow} (1 - \rho_{\nu}) + Rn_{\perp},$ (2.15)

onde Rs^{\downarrow} é a radiação de ondas curtas incidentes; ρ_{\bullet} é a reflectividade da superfcie e Rn_1 é o saldo de radiação de ondas longas.

Segundo MONTEITH & SZEICZ (1961) a aproximação linear da eq.(2.15) é dada pela formula empirica.

$$Rn = a(1 - P_V)Rs^{\ddagger} + b \qquad (2.16)$$

$$Rn = a((1 - \rho_w)Rs^{\ddagger} + b/a), \qquad (2.17)$$

onde a e b são coeficientes de regressão. Igualando as eqs.(2.15 e 2.17) tem-se:

$$Rn_1 = b/a - Rn ((1 - a)/a)$$
 (2.18)

$$-dRn_1/dRn = [(1 - a)/a] = B$$

sendo: B = é o coeficiente térmico.

Assumindo que Rn1 = Rn10 quando Rs =0, então:

$$Rn = Rs^{\downarrow} [(1-\rho_V)/(1+\beta)] + Rn_{10}$$
(2.19)
ou
Rn = a'Rs^{\[\phi\]} + b', (2.20)

onde:

$$\mathbf{a'} = [(1 - \rho_V) / (1 + \beta)]$$

 $\mathbf{b'} = Rn_{10}$

Com base nessas relações, MONTEITH & SZEICZ (1961) chegaram a seguinte conclusão: um aumento do saldo de radiação está ligado a um acréscimo na temperatura da superfície e o saldo de radiação de ondas longas (Rn₁) está interligado ao coeficiente térmico (B). Com isso usa-se a hipotese, para dias de céu claro ser constante a radiação de ondas longas incidente.

2.2.1.1 - RADIAÇÃO DE ONDAS CURTAS INCIDENTE (Rs)

A radiação solar incidente à superficie (Rs), pode ser expressa em função da duração efetiva do brilho do sol e da radiação solar incidente no topo da atmosfera (Qs), através da equação de ANGSTRÖM modificada por PRESCOTT (1940). O

9

desenvolvimento das plantas, depende da magnitude da radiação solar incidente, pois as plantas respondem instantaneamente a essa radiação. Da radiação solar que chega à superficie da terra, uma parte é refletida pela superficie do solo, outra parte é transmitida para o interior do solo, enquanto que o restante é absorvida pelas plantas.

2.2.1.2 - COEFICIENTE DE REFLECTIVIDADE (ρ_{v})

O coeficiente de reflectividade é importante para o balanço de radiação à superficie e varia de acordo com a cobertura do solo e com a hora do dia solar. O coeficiente de reflectividade, pode ser estimado pela razão entre os fluxos de radiação de ondas curtas refletido e incidente à superficie.

2.2.1.3 RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS.

Sobre superficies vegetadas, o balanço de radiação de ondas longas é geralmente analizado considerando-se que a radiação emitida pela superficie depende apenas da emissividade (ε_v) e da temperatura da superficie vegetada, segundo a lei de Stefan-Boltzmann:

$$R_{1}^{\uparrow} = \varepsilon_{v}^{\sigma} T_{a}^{4}, \qquad (2.21)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann. A emissividade da vegetação varia entre 0,95 e 0,98, podendo, em termos práticos, ser considerada igual a um. Já o termo referente a radiação atmosférica (Ri¹), depende da temperatura do ar (Ta), e da emissividade da atmosfera (ε_a), a qual é basicamente uma função do teor de vapor d'água no ar e da nebulosidade.

Sob condições de ceu claro, a estimativa da radiação atmosférica (Ricc), requer informações (radiossondagens) sobre os perfis verticais de temperatura e umidade. Tais informações dificilmente estão disponiveis, principalmente sobre culturas isoladas, ou perimetros agricolas. Assim, estima-se (Rice) através tambem da lei de Stefan-Boltmann.

 $R_{1cc} = \varepsilon_{cc} \sigma T_{a}^{4}, \qquad (2.22)$

cuja dificuldade reside na determinação da emissividade da atmosfera a céu claro (ε_{cc}). Vários autores têm desenvolvido relações empiricas visando obter (ε_{cc}) em função da pressão parcial de vapor (e), da temperatura do ar ou de ambas (ANGSTRÖM, 1915 e 1936; AZEVEDO et allii, 1988; BRUNT, 1932; BRUTSAERT, 1975d; IDSO and JACKSON, 1969; SATTERLUND, 1979; SWINBANK, 1963). A equação de Brunt define a emissividade atmosférica para condições de céu claro, como uma relação linear entre ($R_{1cc}/\sigma T_a^4$ e \sqrt{e} , a qual tem sido largamente testada com coeficiente, variando de 0,51 a 0,68 para interseção e de 0,036 a 0,066 para a inclinação.

2.2.2 - EQUAÇÃO DO BALANÇO DE ENERGIA A SUPERFICIE.

A figura 2.1 mostra as principais formas de energia que interagem entre o sistema e o meio através das trocas nas paredes laterais e os armazenamentos decorrentes. Nessa figura, QH' e LE' são os termos referentes a advecçao de calor sensivel e latente, respectivamente e os ΔS , $\Delta V = \Delta F$ são os armazenamentos de calor sensivel, calor latente pelo sistema, e energia devido a atividade fotossintética. O balanço de energia na superficie vegetada fica da seguinte forma:

 $Rn + QH' + LE' + \Delta F + \Delta S + \Delta V + H + LE + G = 0,$ (2.23)

Em estudos do sistemas solo-planta-atmosfera, leva-se



Fig. 2.1 - Balanço de Energia num volume de controle (SHAW e DECKER, 1979).

em consideração dois aspéctos: o comportamento da àqua e a distribuição de energia. Para tal, utiliza-se o balanço de energia como ferramenta, afim de averiguar a partição da energia disponível, principalmente nas suas formas latente e sensivel. O de radiação absorvido pelo sistema, (solo saldo + dossel vegetativo) é dissipado e pode ser escrito de acordo com a eq.(2.23). Essa expressão permite determinar a transferência vertical turbulenta de vapor d'água para a atmosfera (E), desde que sejam conhecidos os outros termos. Como a fotossitese envolve apenas cerca de 2% da energia disponivel, ocorrendo o mesmo com a variação da quantidade de calor no interior do sistema, é desprezar ^AF. Em se tratando de vegetação que possivel permita uma cobertura uniforme do solo, para periodos longos, os termos de divergência, tambem podem ser desprezados. Os termos ΔS e ΔV são desprezados em relação a Rn. Se as medições forem feitas а baixa altura. e dentro de uma àrea tampão suficientemente extensa, pode-se desprezar (OH ' e LE'). De acordo com as considerações acima e convencionando que os fluxos que chegam no interior do volume de controle são positivos e os que saem são negativos, a eq.(2.23) para ciclo diurno reduz-se:

$$Rn + H + LE + G = 0$$
. (2.24)

Na prática, a utilização desta equação não é facil, uma vez que os termos H e LE são de difícil determinação (PRIESTLEY, 1958). Uma maneira de contornar essa dificuldade, é usar a razão de BOWEN (1926) definida como:

$$\beta = H / LE$$
.

(2.25)

Combinando as eqs.(2.24 e 2.25) obtem-se:

13

Rn + G = - [LE
$$(1 + \beta)$$
]. (2.26)

14

Assim, substituindo as eqs.(2.1 e 2.2) na eq.(2.25) e utilizando a aproximação:

 $K_{\rm h}/K_{\rm m} = K_{\rm h}/K_{\rm v} = 1$ (WEBB, 1970) obtem-se:

$$\beta = C_{\rm P} / L \left(\Delta \overline{T} / \Delta \overline{q} \right), \qquad (2.27)$$

sendo q =0,622 (ē/p) a umidade especifica do ar (admitindo P constante). Então a eq.(2.27) torna-se:

$$\beta = \gamma (d\bar{T}/d\bar{e}), \qquad (2.28)$$

onde y é a constante psicrométrica dada por:

$$\gamma = P C_P / 0,622 L$$
 (2.29)

onde L = 596,73 - 0,601Ta°C. Substituindo a eq.(2.28) na eq.(2.26), resulta:

$$Rn + G = -LE [1 + \gamma (dT/de)].$$
 (2.30)

Esta equação foi utilizada por BUDIKO, (em FERREIRA e PEIXOTO, 1962), para obter a evaporação média E, apartir dos gradientes de temperaturas (T) e pressão de vapor (e), medidos na

primeira camada acima da superficie. Quando as medições são tomadas próximo da superficie da vegetação, pode-se escrever a eq.(2.30) na forma:

Rn + G

--- --- ---

LE = -- $[1 + \gamma (\Delta \overline{T} / \Delta \overline{e})]$

(2.31)
3 - REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O saldo de radiação é a principal fonte de energia para os processos físico-biológicos que ocorrem na interface superficie-atmosfera. Sobre superficies vegetadas, essa energia é consumida nos processos de: aquecimento/esfriamento do ar e do solo; transferência de vapor d'àgua para atmosfera e nos processos metabólicos, principalmente pela atividade fotossintética das plantas.

A maior porção do saldo de radiação(Rn), é utilizada nas trocas de calor sensivel(H) e latente(LE), com a atmosfera. A distribuição proporcional entre estes dois termos depende da disponibilidade de àqua para a evaporação (BERLATO & MOLION, SELLERS, 1965; TANNER, 1960). Quando as plantas estão 1981; bem supridas de água, a maior parte de energia disponivel é utilizada no processo de evapotranspiração (ANDRE & VISWANADHAM, 1986; BERGAMASCHI et allii, 1988; CUNHA, 1988; FONTANA, 1987: PEDRO 1977; VILA NOVA, 1973). Rn é maior na fase de completo JUNIOR, desenvolvimento da cultura, comparada a fase de crescimento.

advecção de calor sensivel e latente, constitui-se Α fonte adicional de energia numa para os processos de evapotranspiração e aquecimento/esfriamento do ar. Isto ocorre, quando a energia utilizada na evapotranspiração supera o saldo de radiação. Em alguns casos, a energia advectada aumenta em até 40% radiação (BRAKKE et allii, citado por SINGH & saldo de 0 TAILLEFER (1986)).

Em nivel atmosférico, o principal fator limitante do saldo de radiação é a radiação solar, que varia em função da latitude, altitude, ângulo solar, cobertura de nuvens e turbidez atmosférica (CHANG, 1968). A radiação solar é muito importante, para as plantas, principalmente a faixa de comprimento de ondas do visivel, necessário para a fotossintese, além de proporcionar vida a todos os seres vivos que habitam na terra. Muitos estudos demonstram que práticas culturais tais como: espaçamento entre fileiras e densidade de plantas por fileiras, podem influênciar na absorção da radiação, através do processo fotossintético e na evapotranspiração das culturas, porque tais práticas modificam o balanço de energia dentro do dossel (CHIN CHOY & KANEMASU, 1974).

BOWERS et allii (1963) determinaram, para uma cultura sorgo, que o saldo de radiação à superficie do solo de foi 58 maior, em fileiras mais espaçadas, enquanto que houve uma diminuição da energia para a cultura. AUGUSTINE & SHAW (1974),detectaram que a razão entre o saldo de radiação a superficie do no topo de uma cultura de milho é menor solo e para altas densidades de plantio. SUBRAHMANYAM & KUMAR (1984), concluiram longo da estação de cultivo de Finger Millet, que, ao somente 2,28 da radiação de ondas curtas incidentes sobre a cultura foi utilizada na produção de matéria seca. Este valor representa mais menos 3,6% do saldo de radiação, para o mesmo periodo. ou E fundamental que se determine o balanço de energia acima da cultura e ao nivel do solo, para se ter uma ideia do percentual radiação que atinge a superficie do do saldo de solo, nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura e percentual de cobertura do solo.

VILA NOVA (1973) e outros asseguram que a energia **consumid**a pela atividade fotossintética nunca ultrapassa 3% do saldo de radiação, podendo ser desprezada no balanço de energia, principalmente se as medições sobre o dossel vegetativo e se а integralmente a superficie vegetação cobre do solo. 0s componentes do balanço de energia sobre culturas é importante, particulamente quando se deseja conhecer os percentuais de energia disponivel utilizados em cada um dos processos de consumo (FONTANA et allii, 1987), ou a contribuição relativa de cada componente (PRATES et allii, 1987; ROSENBERG et allii, 1983).

O coeficiente de reflexão (albedo) é fundamental para a determinação do balanço de radiação sobre culturas. Este termo é obtido pela razão entre os fluxos de radiação de ondas curtas refletida e incidente à superfície. O albedo de superfície

vegetada depende do ângulo do sol, grau de cobertura do solo. tipo de vegetação, estado de umidade do solo, quantidade e tipo de cobertura de nuvens (BLAD & BAKER, 1972). O coeficiente de atinge valores máximos ao nascer e ocaso reflexão, do sol. \mathbf{e} valores minimos proximo ao meio dia (DAVIES & BUTTIMOR, 1969: MONTEITH & SZEICZ, 1961; PROCTOR et allii, 1972; RIJKS, 1967; SHAW & DECKER, 1979). No entanto, RIJKS (1967) encontrou valores reflectância inferiores ao ocaso comparados com valores de observados ao nascer do sol. Opostamente (PROCTOR et allii, 1972; NKEMDIRIM, 1973; LOMAS et allii, 1974), obtiveram valores de reflectância mais elevados ao entardecer do que ao amanhecer. 0 albedo é um parâmetro fundamental para a estimativa da taxa de evapotranspiração de superficies vegetadas. Vários autores têm estudado o comportamento desse parâmetro sobre vegetação tropical e culturas agricolas (CHIA, 1967; GRAHAM and KING, 1961; MONTEITH SZEICZ, 1961; TAN and RAJARATNAM, 1975; SUBRAHMANYAM & and 1969). AZEVEDO et allii (1989) estudando a RATNAM. reflectância uma cultura de soja irrigada no semi-árido do de nordeste do Brasil encontraram valores minimos(12%) no início da fase de crescimento vegetativo e um máximo(25%) na fase de floração. Já no periodo diurno os mesmos encontraram valores mais elevados ao amanhecer e entardecer e mais baixo em torno do meio dia. LING and ROBERTSON (1982) pesquisando o comportamento da reflectância em vegetação tropical na Malaysia encontraram os seguintes resultados para palmeira, cacau, grama natural e legumes (0, 21,0,21, 0,19 e 0,18) respectivamente.

A nebulosidade reduz a radiação direta, resultando numa dependência da reflexão sobre a elevação solar. Assim, condições atmosféricas tais como nebulosidade intensa tem uma significante influência sobre o coeficiente de reflectividade.

O método do balanço de energia (eq.2.24) e fórmulas aerodinâmicas, têm sido largamente empregadas no calculo da evaporação e/ou evapotranspiração. Sua utilização requer medições ou estimativas do saldo de radiação e dos fluxos de calor sensivel para o ar e para o solo. Para avaliações diárias do balanço de energia, o termo G da equação(2.24), referente ao

fluxo de calor no solo, é considerado desprezivel(SEGUI & ITIER. 1983). Tambem, dados pontuais naõ podem ser extrapolados para grandes àreas porque G depende do teor de umidade e do grau de cobertura vegetativa do solo. Entretanto, para considerações do comportamento diurno ou estacional, o termo G não pode ser desprezado, uma vez que atinge valores máximos em torno do meio dia e minimos(inclusive positivos) ao nascer e pôr do sol. Para áreas cultivadas, os valores diários médios de G atingem máximos antes do plantio(solo descoberto) e minimos quando o dossel vegetativo atinge seu completo desenvolvimento. Para essas condições de máxima cobertura do solo e suprimento adequado de áqua, G H e pode ter a mesma ordem de magnitude de LE quando a vegetação se aproxima da senescência (KUSTAS & DAUGHTRY, 1990). IDSO et allii (1975), estabeleceram que em solos sem vegetação, G/Rn varia entre 0,5 para solos secos e 0,3 para solos úmidos. Já (1973) indica 0,05 < G/Rn < 0,1 para superficie com MONTEITH vegetação cobrindo totalmente o solo. Em termos práticos, guando não há condições de se medir G, KUSTAS & DAUGHTRY (1990) sugerém [G/Rn] variando ao longo do ciclo da cultura, entre 0,3 e 0,1, aproximadamente.

O método da razão de Bowen (Bowen 1926), tornou-se uma técnica de modêlo para medição dos fluxos de calor latente e sensivel para o balanço de energia na superficie. A precisão do método da razão de Bowen tem sido estudada cuidadosamente por FUCHS and TANNER (1970); REVHEIM and JORDAN (1976); SINCLAIR et allii (1975); SPITTERHOUSE and BLACK (1980); TANNER (1960) e outros. Entretanto, este método não tem sido largamente usado tendo em vista a grande dificuldade de obtenção de medidas exatas do gradiente de umidade sobre uma determinada àrea e para longos periodos de tempos (BLACKWELL and TYDESLEY, 1965). Entretanto bons resultados foram obtidos em Davies na California, usando aproximação da razão de Bowen para o calculo da evapotraspiração de grama (PRUITT, 1963; PRUITT and LOURENCE, 1966).

E muito importante ter informações sobre o consumo hidrico diário, estacional ou por subperiodos do ciclo vegetativo, especialmente quando ha necessidade de suplementação de água para a cultura através da irrigação. Essas informacoes permitem ajustamentos da época de plantio e manutenção do teor de no solo adequado ao desenvolvimento pleno das plantas, umidade como tambem obter um maior aproveitamento das precipitações (BERLATO & BERGAMASCHI, 1978). Quando se mede ou estima \mathbf{os} fluxos de calor sensivel para o ar e para o solo, determina-se 0 consumo hidrico através do balanço de energia, com base nas perdas d'água para a atmosfera, as quais dependem do tipo e estádio de desenvolvimento da cultura (BERLATO 2 MOLION 1981: TANNER & LEMON, 1962).

O coeficiente de cultivo (K_c) é um parâmetro de grande significância no planejamento e racionamento da irrigação. K_c tem sido largamente empregado na estimativa das necessidades hidricas das culturas (BERGAMASCHI et allii, 1987; ENCARNAÇÃO, 1980). Informações sobre o comportamento estacional do coeficiente de cultivo torna o escalonamento das irrigações mais simples eficiente princilpalmente por não se ter que recorrer a medições do teor de umidade do solo (TAN & FULTON, 1980; WRIGHT, 1982; SOUSA et allii, 1987). O coeficiente de cultivo pode então ser empregado para estimar os requerimentos hidricos de uma cultura particular, atravès apenas da evapotranspiração potencial ou de referência medida ou estimada.

4 - MATERIAL E METODOS.

4.1 -MATERIAL.

4.1.1 - Experimento de Campo

experimento de campo foi realizado numa 0 àrea de aproximadamente 1,4 ha, localizada no perimetro irrigado do Departamento Nacional de Obras Contra as Sêcas (DNOCS), no municipio de Sumé-Pb, com coordenadas (7°, 39'S 36 56'W, 510m) na região do cariri Paraibano.

4.1.2 - Cultura

Após o preparo do solo em sistema de sulcos no sentido leste-oeste, a àrea foi plantada com feijão macassar (Vigna Ungniculata L,(WALP)), de grande importância econômica para essa região. O espaçamento adotado foi de 1,00m entre fileiras e 0,60m entre covas. Foi utilizado o sistema de irrigação por sulcos, para atender as necessidades hidricas da cultura.

4.1.3 - Instalação dos Evapotranspirômetros

Foi instalada uma bateria de dois evapotranspirômetros de lençol freático constante, tendo-se o máximo cuidado para que os mesmos apresentassem resultados próximos dos reais. Teve-se 0 cuidado de separar a terra retirada, segundo os horizontes do solo. Ao fundo de cada evapotranspirômetro colocou-se uma camada de brita, seguida de uma de areia afim de impedir a obstrução do conduto adutor. Um cano de PVC de meia polegada de diâmetro foi instalado na posição vertical para verificar a altura do lenco freático. No enchimento dos tanques teve-se o cuidado de colocar as camadas do solo na ordem inversa, visando reproduzir o máximo possivel, o perfil original do solo. A superficie do solo dentro dos tanques ficou no mesmo nivel do solo adjacente.

A relação planta/área, tratos culturais e irrigação foram aproximadamente iguais dentro e fora dos evapotranspirômetros. A figura 4.1 mostra a distribuição dos instrumentos instalados na área experimental.

4.1.4 - Sistemática de Observações.

Diariamente foram feitas medições horárias de alguns parâmetros meteorológicos das 6 às 18 horas. As medições do saldo de radiação e radiação solar global, foram feitas a cada meia hora. Duas vezes por semana foram efetuadas medidas da altura da cultura e do indice de área foliar. Tambem foram feitas medições de umidade do solo, nos horários das 06:00, 09:00, 12:00 e 15:00 hs, objetivando determinar as necessidades de irrigação da cultura.

4.1.5 - Instrumentos Instalado na Area Experimental

- a) Abrigo Agrometeorológico Contendo:
 - Termômetros de máxima e minima;
 - Termômetros de bulbos sêco e úmido;
 - Termohigrógrafo;

b) Area Experimental

- Actinógrafo;
- Heliógrafo;
- Anemômetros de conchas em cinco niveis acima da vegetação;
- Anemômetro totalizador instalado no nivel de dois metros acima da vegetação;
- Sensores de temperatura em cinco niveis acima da vegetação;
- Piranômetro Eppley;
- Saldo Radiômetro;

- Tensiômetros;

- Dois evapotranspirômetros de lençol freático constante.

4.1.6 - Tratos Culturais

Durante o periodo experimental, teve-se a preocupação de fazer as capinagens necessárias, visando com isso deixar a cultura livre das ervas daninhas e assim atingir o máximo desenvolvimento. Ao longo da estação de cultivo foram feitas 08(oito) irrigações, espaçadas de acordo com as necessidade hidricas da cultura.

4.2 -METODOS

4.2.1 - Balanço de Radiação de Ondas Curtas.

4.2.1.1 - Radiação de Ondas Curtas Incidente (Rs)

A radiação solar incidente a superficie (Rs⁴), foi medida com Piranômetro Eppley, e registrada em actnogramas, e estimada em função da insolação efetiva (n/N) e da radiação incidente na ausência da atmosfera (Qs), escrita na forma da equação de ANGSTRÖM modificada por PRESCOTT (1940):

$$Rs^{\downarrow} = Qs (a1 + b1 n/N)$$

$$(4.1)$$

onde: Qs é a radiação solar incidente na ausência da atmosfera, estimada em função da latitude local, dia do ano e da constante solar; n é a medida de horas de brilho solar; N é a insolação máxima teórica, avaliada em função da latitude e declinação do sol; al e bl são coeficientes empiricos que dependem do local, estação do ano e do tipo predominante de nuvens, que se forma na região estudada. Esses coeficientes foram determinados para cada





1. Evapotranspirômetros

- 2. Heliografo
 3. Actinografo
 4. Actinografo sombreado
- 5. Anemômetro totalizador
- 6. Piranômetro Eppley
- 7. Saldo radiômetro

- 8. Albedômetro
- 9. Torre com cinco níveis
- 10. Abrigo agrometeorológico
- 11. Tensiômetros.

N

mês e para todo periodo experimental. Para o cálculo de Qs e N, empregou-se as seguintes formulas:

$$Qs = 1440/\pi \cdot S_{\odot}(d/d)^2 \quad (\text{Hsen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \text{senH}) \quad (4.2)$$

$$N = 2/15 \ \text{arc} \ \cos(-tq\phi \ \cdot \ tq\delta) + 0.83^{\circ} \tag{4.3}$$

sendo: d a distância média Terra-Sol; d a distância Terra-Sol no dia considerado; S_o é a constante solar; H é o ângulo horário em radianos (calculado entre o nascer do sol e meio dia); ϕ é a latitude; ^{δ} é a declinação do sol.

4.2.1.2 - Coeficiente de Reflexão da Superficie Vegetada (ρ_v).

a) Comportamento Estacional de $(^{\rho}v)$

Para se obter o comportamento estacional de $({}^{\rho} _{\mathbf{v}})$, utilizou-se o quociente entre os valores diários, da radiação refletida (Rs[†]) e da radiação de ondas curtas incidente (Rs[†]), (MONTEITH & SZEICZ, 1961; FRITZCHEN, 1967; IDSO et allii, 1969; SUBRAHMANYAM and KUMAR, 1984) ou seja:

$$\rho_{\mathbf{v}} = \mathrm{Rs}^{\dagger} \mathrm{Rs}^{\dagger}$$
 (4.4)

b) Comportamento Diurno de (ρ_v)

Neste caso, utilizou-se as medidas de Rs[↓]e Rs[↑] para cada meia hora, das 06:00 às 18:00 hs. Para tal, selecionou-se dias representativos das fases de crescimento vegetativo, floração e maturação, com a cultura estressada e em condições ótimas de umidade no solo, respectivamente nos dias anterior e posterior às irrigações.

4.2.2 - Balanço de Radiação de Ondas Longas

O balanço de radiação de ondas longas (Rn1), foi efetuado da seguinte forma:

$$Rn_{\perp} = R_{\perp}^{\downarrow} - R_{\perp}^{\uparrow}$$
(4.5)

sendo R_1^{\uparrow} o fluxo de radiação emitido pela superficie, e R_1^{\downarrow} o fluxo de radiação atmosférico incidente à superficie.

4.2.2.1 - Radiação de Ondas Longas Emitida pela Superfcie (Ri[†]).

A radiação de ondas longas emitida pela superficie (Ri) foi determinada pela equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{1}^{\dagger} = \varepsilon_{s} \sigma_{Ta}^{4}, \qquad (4.6)$$

onde: $\epsilon_a = 1$ é a emissividade da superficie; $\sigma = 5,855 \times 10^{-8}$ cal/cm².dia.k⁴ é a constante de Stefan-Boltzmann, e T_a é a temperatura média do ar proximo a superficie em graus kelvin.

4.2.2.2 - Radiação de Ondas Longas Incidente a Superficie (Rr).

a) Determinação de (R_1^{\downarrow}) .

A radiação atmosférica (R1⁴) foi determinada para o periodo diurno pela expressão:

$$R_1^{\downarrow} = Rn + R_1^{\uparrow} - (Rs^{\downarrow} - Rs^{\uparrow})$$

b) Estimativa de (R_1^{\downarrow})

Para dias de céu claro, a radiação de ondas longas incidente à superfície (Ricc), foi estimada pelas seguintes expressoẽs:

b.1) Expressão de BRUNT (1932):

$$R_{lcc}/\sigma T_{a}^{4} = (a^{2} + b^{2}\sqrt{e_{a}})$$
 (4.8)

em que a2 e b2 são as constantes de regressão que variam com a latitude e época do ano e $e_a(mb)$. Para o local e condições em que foram obtidas, BRUNT estabeleceu os seguintes valores: a2 =0,44 e b2 = 0,079. A eq.(4.8) foi adaptada às condições locais do experimento.

b.2) Expressão de BRUTSAERT (1975d):

$$R_{LCC}/\sigma T_{a}^{4} = 1,24 \ (e_{a}/T_{a})^{1/7}$$
(4.9)

b.3) Expressão de SWINBANK (1963):

 $R_{\rm loc}/\sigma T_{\rm a}^4 = 0,92 \times 10^{-5} \times T_{\rm a}^2$ (4.10)

10

b.4) Expressão de SATTERLUND (1979):

(4.7)

 $R_{100}/\sigma_{T_{a}}^{4} = 1,08-1,08 \exp(-e^{T_{a}/2016})$ (4.11)

$$R_{1cc}/\sigma T_{a}^{4} = (1-0, 261 \exp(-7, 77 \times 10^{-4} (273 - T_{a})^{2}))$$
(4.12)

O efeito da nebulosidade é introduzido através de uma relação do tipo:

$$R_{lcc} = \sigma T_a^4 \ \varepsilon_{cc} = \sigma T_a^4 [a^2 + b^2 v_e]$$
(4.13)

$$Rn_{lcc} = R_{lcc} - {}^{\sigma}T_{a}{}^{4}$$

$$(4.14)$$

$$Rn_1 = R_1 - \sigma T_a^4 \tag{4.15}$$

 $Rn_1/Rn_{lec} = A + (1 - A) n/N$ (4.16)

na eq.(4.16) foi introduzido o efeito da nebulosidade através da aproximação proposta por PENMAN (1948), no qual o termo A = 0,1 é uma constante.

4.2.3 - SALDO DE RADIAÇÃO (Rn).

a) Medidas de (Rn)

Para medir o saldo de radiação (Rn), foi utilizado um saldo radiômetro (net radiometer) com valores instantâneos coletados a cada meia hora, das 06:00 às 18:00 horas.

b) Estimativa de (Rn)

Na estimativa do saldo de radiação, empregou-se algumas expressões visando analisar o erro padrão de estimativa (^exy) de cada uma dessas formulas, quando comparados aos valores medidos:

b.1) Equação de LINACRE (1968)

Considerando a temperatura da cobertura vegetal igual a temperatura do ar próximo à superficie e assumindo a emissividade da superficie igual a um, ou seja ε_s =1, LINACRE (1968) derivou uma aproximação para Rn:

$$Rn = Rs^{\downarrow}(1 - \rho_{V}) - 16 \times 10^{-4} (0, 2 + 0, 8 n/N) (100 - T_{a}).$$
(4.17)

Na eq.(4.17), Linacre fez a substituição da temperatura do ar, próximo à superficie (T_a) por 50 x Rs⁴, resultando na seguinte forma:

$$Rn = Rs^{4}(1 - \rho_{v} + 0,016 + 0,064n/N) - (0,032 + 0,128n/N). \qquad (4.18)$$

Simplificando ainda mais a eq.(4.18), Linacre substituiu Rs^{*} pela relação de ANGSTRÖM modificada por PRESCOTT (1940), obtendo a seguinte expressão:

 $Rn = (a1+b1n/N)Qs (1,016-\rho_v+0,064n/N) - (0,032+0,128n/N). (4.19)$

Em seguinda, Linacre utilizou valores médios de al=0,25; $\overline{b1}=0,50$; Fv=0,26; e ($\overline{n/N}$)=0,55, baseados em várias observações de diferentes locais, na eq.(4.19) resultando:

$$Rn = [\overline{a}1 + \overline{b}1(\overline{n/N})] Qs(1,016 - \overline{P_{v}} + 0,064(n/N)] - -[0,128(\overline{n/N}) + 0,032]$$
(4.20)

b.2) Equação de PENMAN (1948)

A primeira equação para estimativa do saldo de radiação (Rn) foi proposta por PENMAN (1948) na forma:

$$Rn = Rs(1 - \rho_{v}) - \sigma_{T_{a}}(0, 56 - 0, 079\sqrt{e})(0, 1 + 0, 9n/N), \quad (4.21)$$

a qual foi adaptada integralmente para as condições do local, obedecendo os seguintes critérios:

a) - Correção dos coeficientes da nebulosidade, com a pressão parcial do vapor d'água (e), calculado a partir das temperaturas do ar $(T_{\rm a})$ e do bulbo úmido $(T_{\rm w})$ observadas sobre a cultura.

b) - Ajustamento do coeficiente do termo referente ao balanço de radiação de ondas longas a céu claro, com pressão parcial do vapor d'água (e), calculada a partir das temperaturas do ar (T_a) e do bulbo úmido (T_w) observados sobre a cultura.

A pressão parcial do vapor d'água (e), foi calculada segundo a expressão de Ferrel:

$$e(T_a) = es(T_w) - 0,00066(1+0,00115T_w)(T_a - T_w)P,$$
 (4.22)

onde a pressão de saturação do vapor d'água, baseada na temperatura do bulbo úmido $(es(T_w))$ é calculada segundo a expressão de Tetens:

$$es(T_w)=6,1078 exp((17,269T_w)/(237,3+T_w))$$
 (4.23)

b.3) Relações entre Rn e Rs $(1 - \rho v)$ e entre Rn e Rs $\frac{1}{2}$

Foram determinadas regressões lineares entre o saldo de radiação (Rn) e o balanço de radiação de ondas curtas (Rs(1- Pv)), assim como entre Rn e Rs $\frac{1}{2}$

4.2.4 - Balanço de Radiação.

Determinou-se valores horários de cada componente do balanço de radiação, para análise da variação diurna sob diferentes condições de nebulosidade. Calculou-se o saldo de radiação pelos métodos de PENMAN (1948) e LINACRE (1968). Para as condições do local e da cultura.

4.2.5 - Fluxo de Calor Latente (LE).

O fluxo de calor latente (LE) foi obtido pela evapotranspiração medida em evapotranspirômetros de lençol freático constante. Com as medidas de evapotranspiração, calculou-se o consumo diário da água da cultura, ao longo do periodo experimental.

4.2.6 - Fluxo de Calor Sensivel no Solo (G).

O fluxo de calor no solo (G) foi modelado segundo resultados por CLOTHIER et allii, (1986) para alfafa, LEITÃO (1989) para soja e KUSTAS & DAUGHTRY (1990) para alfafa e algodão, da seguinte forma:

a) No periodo diurno, G/Rn variando, para dias anteriores às irrigações, de +0,05 às 06:00 e 18:00 hs, à -0,2 ao meio dia e, para dias posteriores às irrigações, de +0,025 às 06:00 e 18:00 hs, à -0,1 ao meio dia;

b) Ao longo do ciclo da cultura, |G/Rn| variando entre
 0,2 logo após o plantio para 0,05 quando a vegetação atingiu a

máxima cobertura do solo, aumentando em seguinda para 0,1 na fase de amadurecimento e queda das folhas (senescência).

4.2.7 - Fluxo de Calor Sensivel Para o Ar (H).

O fluxo de calor sensivel (H) foi obtido por residuo da equação do balanço de energia, uma vez que os demais termos eram conhecidos.

4.2.8 - Comportamento Diurno do Balanço de Energia.

Α análise do comportamento diurno do balanço de energia foi feita com base nos valores horários de seus componentes, para dias anterior e posterior às irrigações, para as fases de crescimento vegetativo; floração e maturação. Efetuou-se tambem o balanço de energia para periodos semanais com base nos valores diários. Analizou-se ainda, o ciclo diurno das razoẽs entre os fluxos de calor no solo e a radiação solar incidente (G/Rs) e entre o fluxo de calor no solo e o saldo de radiação (G/Rn).

4.2.9 - Balanço de Energia à Superficie.

cáculo do balanço de energia à superficie, tanto No para campos experimentais quanto em escala regional, é importante que se conheça os componentes mais significativos desse balanço, o fluxo de calor latente especialmente (LE), através da evapotranspiração, como o maior consumidor da energia disponivel ao sistema. O balanço de energia foi elaborado considerando-se de energia (Rn) é consumido nos processos, que o saldo de calor sensivel no ar (H), de convecção de condução de calor solo (G), de transferência de calor latente para sensivel no atmosfera através da evapotranspiração (LE) e nos processos fisiológicos e metabólicos que ocorrem nas plantas.

4.2.10 - Medidas Diretas da Evapotranspiração Máxima da Cultura (ETm).

A evapotranspiração máxima foi medida utilizando-se dois evapotranspirômetros de lençol freatico constante, instalado na área experimental.

4.2.11 - Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ETo).

A evapotranspiração de referência (ETo) foi estimada pelos seguintes métodos:

a) Método de PENMAN

Penman (1948), baseado no principio da combinação do balanço de energia com os efeitos aerodinâmicos, derivou uma expressão para estimar a evapotranspiração de referência (ETo) na seguinte forma:

ETO =
$$[S (Rn - G) + \gamma Ea]/(S + \gamma).$$
 (4.24)

Onde Ea refere-se ao poder evaporante da superficie expresso por:

$$Ea = 0,35 (1+U_2/100) (e_a-e_a)$$
(4.25)

em que U₂ é a velocidade do vento a dois metros da superficie em Km/dia; (e_a-e_a) é o deficit de saturacaão do ar (mb); S é a inclinação da curva de temperatura saturada do ar calculada pela expressão (WRIGHT,1982).

$$S=33,8639[0,05904(0,00738T_0+0,8072)^2-3,42x10^{-5}]$$
 (4.26)

b) Método de PENMAN Modificado por DOORENBOS & PRUITT.

Com a finalidade de simplificar o uso da equação de Penman, a FAO(1975) sugeriu a expressão (DOORENBOS & PRUITT, 1975):

$$ETo = W (Rn -G) + (1-W) f(u) (e_{e_1}-e_{e_1}), \qquad (4.27)$$

onde W é um fator ponderante do efeito da temperatura dado na (tabela Al); f(u) é um coeficiente de transferência de vapor d'água para o ar dado por:

$$f(u) = 0,27 (1 + U_2/100).$$
 (4.28)

c) Método de PRIESTLEY & TAYLOR.

PRIESTLEY & TAYLOR (1972) deduziram que, na ausência de advecção, a evapotranspiração de referência pode ser estimada pela equação:

$$ETo = \alpha \left[S/(S + \gamma) (Rn - G) \right]$$
(4.29)

que equivale a equação de Penman(4.24), onde o termo aerodinâmico γ Ea é substituindo por uma constante α , a qual varia de local para local e com o tipo de cultura. Com base em superficies bem abastecida de água, PRIESTLEY & TAYLOR obtiveram valores para α variando entre 1,08 e 1,34 com valor médio de 1,26. JURY & TANNER (1975) adaptaram a eq.(4.29) às condições advectivas, da seguinte forma:

$$ETo = [1 + (\alpha - 1) \Delta e_{\alpha} / \Delta e_{\alpha}] [S / (S + \gamma) (Rn-G)]$$
(4.30)

sendo: Δe_a o deficit de saturação diário e $\overline{\Delta e_a}$ o deficit de saturação diário médio, para o periodo considerado. A constante α foi derivada pela seguinte equação:

$$\alpha = \text{ETm} / [S/(S+\gamma)(\text{Rn} - G)]$$
(4.31)

d) Método do Tanque "Classe A".

Com os valores da evaporação do tanque "Classe A" cedido pelo (DNOCS), determinou-se a evapotranspiração de referência pela equação:

ETO = Kp ECA

onde: ECA é a evaporação medida no tanque "Classe A" (mm/dia) e Kp é um fator de correção, obtido em função da umidade relativa, da velocidade do vento e pela exposição do tanque em relação a vegetação local (tabela A2).

e) Método de LINACRE.

O método de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), proposto por LINACRE (1977) é dado por:

sendo $T_m = T_a + 0,006Z$, Z é a elevação (m); ϕ é a latitude local (graus); T_d é a temperatura do ponto de orvalho. A eq.(4.33) gera

(4.32)

erros na estimativa da evaporação, principalmente para curtos periodos de tempo. Para estimativas da evapotranspiração de referência, faz-se necessário a seguinte correção:

$$ETO = 0,7 EO$$

(4.34)

e) Método de HARGREAVES.

O método proposto por HARGREAVES (1974), para estimativa da evapotranspiração de referência, é expresso pela seguinte equação:

$$ETo = F1 Fu (1, 8T_a + 32)$$
 (4.35)

em que: Fl é um fator mensal dependente da latitude; Fu é um fator de correção para a umidade relativa, o .qual somente e acionado quando a umidade média ultrapassa 64%. Fu é obtido pela seguinte expressão:

$$Fu = 0,166 (100 - Ur)^{0,5}$$
(4.36)

4.2.12 - Determinação do Coeficiente de Cultivo (Ka).

Com os valores de ETm obtidos nos evapotranspirômetros e ETo estimados pelos diferentes métodos ja mencionados, determinou-se o coeficiente de cultivo,(K_c) para o periodo do experimento. O coeficiente de cultivo definido por DOORENBOS & KASSAN (1979) é definido como a razão entre, evapotranspiração máxima medida (ETm) e a de referência (ETo) ou seja: $K_{c} = ETm/ETo$

Na estimativa de K_c pelos métodos de PRIESTLEY& TAYLOR e JURY & TANNER, α foi determinado pela na equação (4.31), com base na evapotranspiração de referência de PENMAN.

(4.37)

5 - RESULTADOS E DISCUSSOES

5.1 - RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL (Rs^{\dagger})

5.1.1 - Estimativa da Radiação Solar Global

Sendo a radiação solar global um parâmetro indispensável ao balanço de radiação, as vezes torna- se dificil a obtenção deste parâmetro. Por conseguinte determinou-se uma expressão para a estimativa de Rs⁴no municipio de Sumé-Pb, com base nas horas de brilho solar e na radiação solar na ausência da atmosfera.

Cálculou-se uma regressão linear de Rs⁴ (observado)/Qs contra n/N. Para tanto, utilizou-se a fórmula de ^OANGSTRÖM modificada por PRESCOTT (1940), eq.(4.1). Os parâmetros da regressão foram obtidos mês a mês e para todo o periodo de observações, os quais são mostrados no quadro V.1. Além disso, a figura 5.1 mostra o modêlo de estimativa da radiação solar global incidente à superficie para o periodo experimental.

QUADRO - V.1.

Valores de "al" e "bl" da eq.(4.1) obtidos para Sumé-Pb, com dados da área experimental.

| Periodo | n <u>o</u> dias | a1 | b1 | Coef.Corr. | ε _{×y} (cal/cm ² 12hs) |
|------------|-----------------|------|------|------------|--|
| Outubro | 14 | 0,35 | 0,34 | 0,81 | 18,72 |
| Novembro | 30 | 0,25 | 0,42 | 0,93 | 27,36 |
| Dezembro | 28 | 0,31 | 0,34 | 0,90 | 28,08 |
| Out. a Dez | 72 . | 0,29 | 0,39 | 0,94 | 28,10 |
| | | | | | |

AZEVEDO et allii (1981) encontraram para o mês de outubro, valores das constantes "al" e "bl" para algumas



localidades da região semi-árida do nordeste quadro V.2., com valores médios de 0,28 e 0,43 respectivamente, os quais estão de acordo com os valores encontrados para Sumé-Pb (quadro V.1).

QUADRO - V.2.

Valores de "al" e "bl" da eq. de PRSCOTT(1940), obtidos para o Semi-Arido do Nordeste.

| Localidade | Lat. | Periodo | n <u>o</u> dias | a1 | b1 | Coef.Corr. |
|-----------------|-------|---------|-----------------|------|-------|------------|
| | | | | | | |
| Quixeramobim-ce | 5°12′ | outubro | 122 | 0,26 | 0,42 | 0,85 |
| São Gonsalo-pb | 6°45′ | outubro | 175 | 0,25 | 0,48. | 0,82 |
| Petrolina-pe | 9°23′ | outubro | 120 | 0,33 | 0,43 | 0,92 |
| Paulo Afonso-ba | 9°21′ | outubro | 83 | 0,29 | 0,37 | 0,87 |
| | | | | | | |

Os valores das constantes da eq. de PRESCOTT encontrados em diferentes regiões, evidenciam uma variação com a latitude e época do ano. Em geral, mostra um aumento de al e uma redução de bl para latitudes cada vez mais equatoriais. Isto justifica uma calibração local, ao invés de utilizar valores médios modelados mundialmente (a1=0,25 e b1=0,50). Neste estudo encontrou-se, para o periodo experimental, os valores médios de a1=0,28 e b1=0,39, que podem ser representativos da estação seca naquela localidade.

5.2 - REFLECTÂNCIA DA VEGETAÇÃO (P~).

5.2.1 - Variação Estacional de ($\stackrel{\rho}{\sim}$)

A variação estacional da reflectância da vegetação é apresentada na figura 5.2. Nota-se que no inicio do experimento, quando o solo estava quase sem vegetação, o albedo atingiu magninitude inferior (10%) e com o passar do tempo a cultura foi se desenvolvendo, o solo foi sendo coberto pela vegetação e o



albedo foi aumentando, atingindo um valor máximo (21%), no final da fase de floração (24.12.88). Esse valor poderia ter sido maior, não fosse o espaçamento entre fileiras, que não permitiu uma cobertura completa do solo, mesmo na fase de completo desenvolvimento da cultura. A partir de então, observou-se um decréscimo lento do albedo, chegando (11%) no final do experimento. Ainda analizando a figura 5.2, observa-se oscilações diárias do albedo no decorrer do experimento, em decorrência das irrigações ou precipitações pluviais.

As flutuações do albedo na fase de completo desenvolvimento da cultura, foram mais acentuadas com relação àquelas ocorridas no início do experimento, quando o solo estava mais descoberto. Isto se deve ao efeito mais acentuado da umidade do solo sobre a transpiração.

5.2.2 - Variação Diurna de $({}^{\rho}v)$

figura 5.3 (a,b e c) mostra a variação diurna A da reflectância (ρ_{v}), para dias anterior e posterior às irrigações, representativos das fases de crescimento vegetativo, floração e maturação. Observa-se que para todas as fases, o albedo apresentou valores máximos ao nascer e ocaso do sol e minimos em do meio dia. Observa-se ainda que em todos os casos, o torno albedo foi sempre superior para os dias anteriores às irrigações. Nota-se ainda que, na fase de maturação, o albedo apresentou valores superiores comparados àqueles das outras fases. Isto se deve ao fato de que na fase de maturação, o solo se encontrava quase que totalmente coberto pela vegetação.

5.3 - ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS DA ATMOSFERA (R_1^{\vee}) .

Utilizou-se várias expressões, para a estimativa da radiação atmosférica, sob condições de céu claro (R_{lcc}). Os resultados são mostrados na tabela 5.1. Os cálculos foram feitos com base na temperatura do ar e pressão de vapor observados sobre a cultura. Durante todo o periodo experimental, observou-se





06(seis) dias de céu completamente claro. O quadro V.3, mostra os valores dos coeficientes de regressão linear, obtidos pelas diferentes equações, para as condições locais e da cultura. O quadro V.3, mostra também uma comparação dos coeficientes originais com aqueles obtidos localmente. Observa-se que a equação de BRUNT é a que melhor se ajusta, principalmente com os coeficientes obtidos localmente.

QUADRO - V.3.

Comparação entre os valores originais e ajustados localmente dos coeficientes das equações utilizdas na estimativa de Rice, obtidos para Sumé-Pb (com "e" em mb).

| Fórmula | Coef. Orig | Coef. Locais | | | | |
|------------------|--------------|--------------|----|--------|--------|-------|
| - | a2 | b2 | r² | a2 | b2 | r² |
| BRUNT(Eq. 4.8) | 0,44 | 0,079 | | 0,488 | 0,070 | 0,98 |
| SWINBANK (Eq. 4. | 10) 0,0 | 0,92E-5 | 5 | 2,314 | -0.000 | -0,54 |
| IDSO & JACKSON(| Eq.4.12) 1,0 | 0 -0,26 | 51 | 0,570 | 0,423 | 0,53 |
| BRUTSAERT(Eq. 4 | .9) 0,0 | 1,24 | | -0,259 | 1,549 | 0,99 |
| SATTERLUND(Eq. | 4.11) 1,08 | -1,08 | | 1,462 | -3,150 | -0,97 |
| | | | | | | |

Os resultados da tabela 5.1 indicam que os valores de Ricc estimados pela equação de BRUNT adaptada às condições locais, apresentaram o menor erro padrão de estimativa, $(\epsilon_{xy} =$ 0,57 cal/cm².12 hs) para o periodo diurno. No entanto, a equação de BRUNT, na sua forma original, apresentou erro padrão de estimativa da ordem de $(\varepsilon_{xy}=4,74 \text{ cal/cm}^2.12\text{hs})$. Observa-se ainda todos os casos, o ajustamento em local reduziu que, substancialmente o erro padrão de estimativa. Resultados semelhantes foram encontrados por AASE & IDSO (1978); AZEVEDO et alii (1988) e MANSI et allii (1986). Tais resultados justificam a calibração dos vários modêlos, para o local e tipo de cobertura

TABELA 5.1

Radiação atmosférica (R_{LCC}^{+} em, cal/cm². 12hs) para dias de céu claro, medida e estimada por vá rios métodos, com base na temperatura e pressão de vapor d'água observadas sobre a cultura.

| FÓRMULAS UTILIZADAS | 05.11.88 | 07.11.88 | 21.11.88 | 24.11.88 | 25.11.88 | 10.12.88 | E (cal/cm ² .12hs |
|---|------------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------------------|
| OBSERVADO | 387.36 | 387.36 | 380.88 | 380.16 | 387.36 | 387.36 | - |
| EQUAÇÃO DE BRUNT(Eq. 4.8) | | * | | | | | |
| -Coeficientes Originais | 382.20 | 383.48 | 374.84 | 375.27 | 383,02 | 38.3.48 | 4.74 |
| -Coeficientes Locais | 386.98 | 387.68 | 379.79 | 380.76 | 387.15 | 387.68 | 0.57 |
| EQUAÇÃO DE BRUTSEART(Eq.4.9) | | | | | | | |
| -Coeficientes Originais | 407.33 | 407.01 | 400.27 | 402.28 | 406.35 | 407.01 | 18.98 |
| -Coeficientes Locais | 382.50 | 383.27 | 375.68 | 376.35 | 382.78 | 383.27 | 4.46 |
| EQUAÇÃO DE SWINBANK(Eq.4.10) | | | | | | | |
| -Coeficientes Originais | 410.28 | 404.61 | 400.60 | 409.47 | 403.00 | 404.61 | 20.87 |
| -Coeficientes Locais | 371.87 | 371.91 | 371.91 | 371.88 | 371.91 | 371.91 | 13.57 |
| EQUAÇÃO DE SATTERLUND(Eq.4.1 | <u>1</u>) | | | | | | |
| -Coeficiente Originais | 415.74 | 413.19 | 408.50 | 413.12 | 412.21 | 413.19 | 27.70 |
| -Coeficiente Locais | 388.27 | 388.46 | 380.16 | 381.73 | 387.77 | 388.46 | 1.03 |
| EQUAÇÕO DE IDSO & JACKSON (Eq. 4.12) | | | | | | | 200 1 |
| -Coeficentes Originais | 422.61 | 416.84 | 412.40 | 421.76 | 414.94 | 416.64 | 32.76 |
| -Coeficientes Locais | 385.22 | 385.03 | 384.88 | 385.19 | 384.97 | 385.03 | 3.22 |

solo. Nas condições locais e da cultura, a equação de BRUNT do apresentou os melhores resultados. Em seguida vem as equações de, SATTERLUND e BRUTSAERT que apresentaram resultados satisfatórios. modêlos Para todos os utilizou-se. como parâmetros representativos das condições locais e da cultura, a temperatura ar e a pressão do vapor d'água, medidas sobre a do cultura. Ά pouca confiabilidade dos modêlos de SWINBANK e IDSO JACKSON, & pode ser atribuida ao fato dessas equações utilizarem apenas o valor da temperatura do ar, enquanto que os demais empregam a temperatura e a pressão do vapor d'água. A figura 5.4 mostra ainda os gráficos ilustrativos da relação entre R_{lcc} determinado e estimado pelos vários modêlos, com base nas condições locais e da cultura. Observa-se ótima concordâncias dos valores estimados pela equação de BRUNT original e adaptada. Já as equações de BRUTSAERT e SATTERLUND, ambas adaptadas às condições locais e da apresentaram uma concordância razoável, enquanto as cultura, equações de SWINBANK e IDSO & JACKSON, sobreestimaram os valores de Ricc determinados. A forma original das equações de SWINBANK, SATTERLUND e IDSO & JACKSON subestimaram os valores de Ricc determinados.

5.4 - ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO (Rn)

a) Equações Proposta por LINACRE (1968)

resultados obtidos para o saldo de radiação 0s (Rn), estimado com base nas equações de LINACRE (1968), são mostradas figura 5.5a, onde as curvas (a, b, c e d), correspondem na às versoes representadas pelas equações 4.17; 4.18; 4.19 e 4.20, ao da curva com os valores observados, ao longo do periodo lado experimental. As curvas (a e b), mostram uma boa concordância com os valores observados. Já as curvas (c e d), mostram que houve defasagen acentuada, entre os valores estimados е àqueles uma observados durante o periodo experimental. Isto ocorre pelo fato que nessas equações, é feita a modelagem (estimativa) de de alguns parâmetros, implicando num aumento do erro padrão de



Fig. 5.4 - Comparação de RLcc(D) determinada pela equação do balanço de Radiação com bases nos componentes observados, com RLcc(D) estimado pelas equações de BRUNT, SWIMBANK, BRUTSAERT, SATTERLUND e IDSO JACKSON, onde a temperatura do ar e a pressão do vapor d'água foram observados sobre a cultura.

estimativa.

Isto pode ser verificado, analisando-se os processos de substituição. Na eq. 4.17, ocorreu a substituição de (Ta) por 50 x Rs⁴, resultando num pequeno afastamento verificado na curva (b). Em seguinada, na eq.4.18, foi feita a substituição da radiação solar global (Rs) pela relação de ANGSTRÖM modificada por PRESCOTT (1940), acarretando um afastamento ainda maior na curva (c), reduzindo a precisão do modêlo. Por último, na eq.4.19, foi feita a substituição de (n/N) e ρ_{v} , pelos respectivos valores médios $(\overline{n/N})$ e $\overline{\rho}v$. Com isso, as versoes C e D das equações proposta por LINACRE (1968), tornaram-se visivelmente imprecisas. A calibração deste modêlo de estimativa do saldo de radiação (eqs. 4.17; 4.18; 4.19 e 4.20), evidenciaram erros padroes de estimativas da ordem de c_{xy}=27,37 cal/cm².12 hs; $\varepsilon_{xy}=34,02$ cal/cm².12hs; $\varepsilon_{xy}=38,71$ cal/cm².12hs; $\varepsilon_{xy}=57,05$ cal/cm².12hs, respectivamente. Com isso nota-se a perda de precisão, a medida que vai ocorrendo as substituições já descritas.

b) Equação Proposta por PENMAN (1948)

A equação de PENMAN (1948), foi empregada de 03(três) com os coeficientes originais (eq.4.21); com formas: OS coeficientes obtidos localmente (eq.5.1); e com a inclusão da calibração local de Rs⁴ através da relação de PRESCOTT (eq.5.2). As curvas correspondentes são apresentadas na figura 5.5b. De acordo com essa figura observa-se que as versoes (a e b), mostram uma boa aproximação entre as curvas dos valores observados e estimados, com erro padrão de estimativa em torno de $\varepsilon_{xy}=22$ cal/cm².12hs. Neste caso, a calibração local não melhorou significativamente a precisão da equação de PENMAN para estimativa de Rn. No entanto, a mesma precisão não ocorreu com a versão (c), que apresentou um pequeno afastamento, com erro padrão de estimativa em torno de ε_{xy} =30 cal/cm².12hs. 0s coeficientes devido a introdução do efeito da nebulosidade, no termo da equação de PENMAN referente ao balanço de radiação de





£' ?



ondas longas (Rn]), para as versões original e adaptada, são apresentadas no quadro V.4.

Coeficientes originais e estimados localmente para o termo referente ao balanço de radiação de ondas longas da equação de PENMAN(1948).

| Versoes | | Coeficier | ntes | |
|------------------|--------|-----------|------|---------|
| da eq. de PENMAN | (1-a2) | b2 | a3 | (1- a3) |
| Original | 0,56 | 0,079 | 0,1 | 0,9 |
| Adaptada | 0,512 | 0,070 | 0,2 | 0,8 |

De acordo com o quadro V.4, a estimativa do saldo de radiação através da equação de PENMAN, nas formas adaptada às condições locais e com a inclusão da calibração local de Rs⁴ através de relação de PRESCOTT(1940),toma as seguintes configurações:

$$Rn=Rs(1-\rho_v)-720 \sigma T_a^4(0,512-0,070\sqrt{e})(0,2+0,8n/N)$$
(5.1)

Rn= Qs(0,29+0,39n/N)(1- $^{\rho}v$)-720 $^{\sigma}T_{a}^{4}(0,512-0,070\sqrt{e})(0,2+0,8n/N)$

(5.2)

c) Estimativa da Rn com base apenas em Rs⁴(1- ρ_v)

OFPS/BIBLIOTECA/ PRAN

A figura 5.5c(a e b) mostra o comportamento estacional de Rn estimado com base na radiação de ondas curtas incidente Rs⁴ e no saldo de ondas curtas Rs⁴(1- ρ_V), comparado à curva de Rn observado. Observa-se que houve um pequeno afastamento em ambos






os casos. No entanto, pode-se considerar uma boa concordância entre os modêlos e a curva de Rn observado, com erro padrão de estimativa da ordem de ε_{xy} = 16,6 cal/cm².12 hs e ε_{xy} =18,0 cal/cm².12 hs, respectivamente.

Para uma melhor avaliação da precisão dos modelos de estimativas do saldo de radiação, a figura 5.6 mostra os gráficos de Rn observado, contra o Rn estimado para cada caso. Estes resultados indicam que a estimativa de Rn em função apenas do balanço de radiação solar (ondas curtas), é tão preciso quanto em função do balanço completo (ondas curtas e ondas longas), representado pelas equações de PENMAN e LINACRE. Os resultados aqui apresentados são semelhantes àqueles apresentados por (FUNARI & SIMPSON, 1986).

- 5.5 COMPORTAMENTO DOS COMPONENTES DO BALANÇO DE RADIAÇÃO SOBRE A CULTURA.
- 5.5.1 Comportamento Diurno dos Componentes do Balanço de Radiação.

O comportamento diurno dos componentes do balanço de radiação sobre a cultura, para dias anterior e posterior às irrigações, representativos das fases de crescimento vegetativo, floração e maturação, é apresentado nas figuras 5.7(a,b e c) respectivamente. Observa-se que nas figuras 5.7(a e b), a curva do saldo de radiação (Rn) se comporta quase que paralela á curva da radiação solar global (Rs). O mesmo não acontece com a figura (c), devido a ocorrência nestes dias, de acentuada 5.7 nebulosidade. Nas figuras 5.7(a e b) a radiação solar global foi sempre superior, ao longo do periodo diurno, em ambos os dias, enquanto que na figura 5.7(c), a radiação solar global, foi superior em algumas horas, devido as condições sempre atmosféricas existentes ao longo do periodo diurno. A radiação de ondas curtas refletida (Rs¹), foi maior ou igual ao saldo de radiação de ondas longas em todas as fases, principalmente nos dias de maior nebulosidade, em que Rste Rnj estiveram muito



Fig. 5.6 - Estimativa do saldo de radiação (Rn) pelos: (A) cor relação com a radiação solar global (Rs); (B) corre lação com o balanço de radiação com ondas curtas (Rs $(1-\rho_V)$); (C) equação de LINACRE(Rnl) e (D) equa ção de PENMAM (Rnp), para o período do ciclo vegeta tivo da cultura de feijão macassar.











FIG. 5.7b - Comportamento diurno das componentes do balanço de radiação sobre a cultura de feijão macassar para a fase de floração: (C) dia anterior e (D) dia posterior a irrigação.

27 T



próximos.

5.5.2 - Variação Estacional dos Componentes do Balanço de Radiação.

Uma análise da variação estacional dos componentes do balanço de radiação, é mostrada na tabela 5.2, com valores médios diurnos, para periodos semanais. Essa tabela, mostra que 15,06% foram refletidos pela superficie para atmosfera, enquanto que 70,41% foram absorvidos pela cultura e solo.

Comparou-se o comportamento de cada componente do balanço de radiação, para periodos semanais, em termos de razoes percentuais, apresentadas na tabela 5.3, que tambem mostra semelhantes àqueles citados por LEITÃO resultados (1989);SUBRAHMANYAM e KUMAR (1984). Quando comparados a resultados encontrados para uma cultura soja, finger millet, gero millet e milho, o albedo (Rs[†]Rs[†]) e o percentual da energia solar disponivel (Rn/Rs) para cultura do feijão macassar foram superiores, ao passo que a razão entre o saldo de radiação de ondas longas (Rn1) e radiação solar incidente (Rs) foi inferior. Isto demonstra um maior potencial energético local, para o desenvolvimento da cultura.

5.6 - BALANÇO DE ENERGIA SOBRE A CULTURA

Os resultados do comportamento diurno do balanço de dias anterior e posterior às irrigações, energia, para representativos das fases de crescimento vegetativo, floração e são mostrados nas figuras 5.8(a, b е c), maturação, respectivamente. Observa-se que o fluxo de calor no solo (G) é bastante reduzido após a irrigação, significando que parte da energia que poderia ser utilizada no aquecimento do solo, foi consumida no processo de evapotranspiração. Para os dias anteriores às irrigações, o fluxo de calor no solo (G), torna-se pronunciado. Em geral o termo (G) decresceu com 0 mais desenvolvimento da cultura. Observa-se ainda que o fluxo de calor

TABELA 5.2

Valores médios diurnos para periodos semanais, dos componentes do balanço de radiação(cal/cm².12hs), sobre a cultura.

| Periodo | Rs↓ | Rs [↑] | Rs∜(1-pv) | Rn | Rnl | |
|-------------|--------|-----------------|-----------|--------|---------|--|
| 18-24/10 | 594,03 | 70,78 | 522,74 | 422,07 | -90,56 | |
| 25-31/10 | 570,92 | 76,56 | 496,70 | 398,12 | - 88,19 | |
| 01-07/11 | 592,23 | 74,25 | 521,16 | 414,40 | - 90,85 | |
| 08-14/11 | 458,02 | 63,69 | 393,89 | 314,52 | - 68,27 | |
| 15-21/11 | 523,66 | 79,34 | 445,11 | 382,04 | - 84,97 | |
| 22-28/11 | 574,38 | 82,11 | 493,96 | 400,62 | - 88,51 | |
| 29/11-05/12 | 415,85 | 61,37 | 353,47 | 313,58 | - 57,22 | |
| 06-12/12 | 465,52 | 66,69 | 392,61 | 331,43 | - 66,33 | |
| 13-19/12 | 450,44 | 72,07 | 373,86 | 333,03 | - 55,07 | |
| 20-26/12 | 477,75 | 92,46 | 386,97 | 326,65 | - 64,35 | |
| 27-29/12 | 548,80 | 115,12 | 433,55 | 357,30 | - 90,63 | |

Percentuais (%) $Rs^{1/2}Rs^{1/2} = 15,06$; $Rn/Rs^{1/2} = 70,41$

 $Rn_1/Rs^4 = 14,89$; $Rn_1/Rn = 21,15$

Razoes entre os componentes do balanço de radiação (%) para

diferentes culturas.

| Razoeg | | a new test and and and test the test and and and | | |
|--|--------|---|-------|--------|
| Cultura | Rs∜Rs↓ | Rs [†] /Rs [↓] Rn/Rs [↓] | | Rnı/Rn |
| Feijão macassar Sumé-Pb(7°39′s) Brasil | 15,06 | 70,41 | 14,89 | 21,15 |
| Soja Mandacarú-Ba(9°26's) Brasil | 17,92 | 62,20 | 19,88 | |
| Finger Millet Anakaplle(<mark>1</mark> 7°40' N) India | 18,26 | 60,77 | 20,97 | |
| Gero Millet Somaru(11°11′N) Nigéria | 19,00 | | | |
| Milho Somaru(11°11′N) Nigéria | 17,08 | 56,77 | 26,15 | |
| | | | | |

sensivel (H), foi negativo no periodo da manhã em todos os casos significando que houve um consumo do saldo de energia. Na parte da tarde. (H) tornou-se positivo, o que significa um adicionamento ao saldo de energia, gerado possivelmente pela advecção regional de calor sensivel. Já o fluxo de calor latente (LE), acompanhou o saldo de energia. Na fase de crescimento vegetativo (figura 5.8a), (LE) apresentou valores superiores para o dia anterior à irrigação. Na fase de floração figura 5.8b (LE)teve oscilações durante todo o periodo, significando um aumento em função do crescimento das plantas, tendo em vista que a demanda hidrica aumenta nesta fase. Já na fase de maturação figura 5.8c (LE), sofreu uma redução embora a cultura apresente uma considerável demanda hidrica. Os dias considerados na figura 5.8c por terem saldo de energia pequeno, não proporcionaram fluxos de calor latente acentuados.

A evapotranspiração diária média para periodos semanais, é mostrada na tabela 5.4. Esta tabela evidencia que a demanda hidrica atingiu um máximo na fase de maturação da cultura.

Os componentes do balanço de energia sobre a cultura, para periodos semanais são mostrados na tabela 5.5, onde o fluxo de calor no solo é considerado pela relação G/Rn. O fluxo de calor latente atingiu um máximo, apartir da décima semana. Para todo o periodo (LE) representou 77,04% de Rn, enquanto o fluxo de calor sensivel representou 11,8% de Rn. Já o fluxo de calor no solo representou 11,17 da energia disponível.

5.7 - MEDIDAS E PROCESSOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO.

O consumo hidrico das culturas, representado pela evapotranspiração máxima medida (ETm), é influênciado por fatores do solo, planta e atmosfera tais como: propriedades fisicas do solo; tipo e estádio fenológico da cultura; suprimento adequado de água; energia disponível; condições climáticas em geral, etc.. Entretanto, a evapotranspiração de referência (ETo) reflete tão somente, as potencialidades ambientais para o processo





Fig. 5.8a - Comportamento diurno dos componentes do balanço de energia para a fase de crescimento vegetati vo da cultura de feijão: (A) dia anterior e (B) dia posterior a irrigação.

62

NY:





Fig. 5.8b - Comportamento diurno dos componentes do balanço de energia para a fase de floração da Cultura de feijão:(C)dia anterior e (D) dia posterior a irrigação.

NT.



26/12/88



Fig.5.8c - Comportamento diurno dos componentes do balanço de energia para a fase de maturação da cultura de feijão:(E) dia anterior e (E) dia posterior à irrigação. 64

1

| Evapotranspir | ação diária n | média (mm | /dia) para | periodos | semanais. |
|-------------------------|---------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| Periodo | Ordem | | Evap. | Média. Me | dida |
| 18-24/10 | 1 | | | 1,8 | 3 |
| 25-13/10 | 2 | | | 2,4 | |
| 01-07/11 | 3 | | | 2,4 | |
| 08-14/11 | 4 | | | 2,6 | 5 |
| 15- <mark>2</mark> 1/11 | 5 | | | 2,8 | 3 |
| 22-28/11 | 6 | | | 3,3 | 3 |
| 29/11-05/12 | 7 | | | 3,6 | 5 |
| 06-12/12 | 8 | | 8 | 4,2 | 2 |
| 13-19/12 | 9 | | | 4,9 |) |
| 20-26/12 | 10 | | 1 | 5,6 | 5 |
| 27/12-02/01 | 11 | | | 6,8 | 3 |
| 03-09/01 | 12 | | | 8,7 | 7 |
| 10-16/01 | 13 | | | 9,8 | 3 |
| 17-19/01 | 14 | | | 9,4 | 1 |
| | | | | | |

TABELA - 5.4

Total

478,1mm

| (cal/cm ² .12h | s) sobre | a cultura, | para peri | odos semar | nais. | |
|---------------------------|----------|------------|-----------|------------|-----------------|--|
| Periodo | Rn | LE | Н | G | Rs [↓] | |
| 18-24/10 | 422,07 | 106,15 | 234,74 | 81,18 | 594,03 | |
| 25-31/10 | 398,12 | 136,83 | 191,64 | 69,65 | 570,92 | |
| 01-07/11 | 414,40 | 138,46 | 210,74 | 65,21 | 592,23 | |
| 08-14/11 | 314,52 | 151,88 | 118,63 | 44,01 | 458,02 | |
| 15-21/11 | 382,04 | 165,09 | 170,31 | 46,63 | 523,66 | |
| 22-28/11 | 400,63 | 191,52 | 166,99 | 42,12 | 574,38 | |
| 29/11-05/1 2 | 313,58 | 208,97 | 77,36 | 27,25 | 415,85 | |
| 06-1 <mark>2</mark> /12 | 331,43 | 245,59 | 62,81 | 23,03 | 465,52 | |
| 13-19/12 | 333,03 | 285,46 | 29,23 | 18,34 | 450,44 | |
| 20-26/12 | 326,65 | 328,54 | -22,06 | 20,17 | 406,40 | |
| <mark>27/12-02/01</mark> | 357,30 | 397,23 | -66,23 | 26,30 | 520,81 | |
| 03-09/01 | 388,06 | 506,01 | -151,01 | 33,41 | 541,95 | |
| 10-16/01 | 382,40 | 572,22 | -227,20 | 37,38 | 527,88 | |
| 17-19/01 | 406,72 | 549,41 | -185,87 | 43,18 | 540,78 | |
| Média | 369,35 | 284,52 | 43,55 | 41,27 | 513,06 | |

Variação Estacional dos Componentes do Balanço de Energia

Percentuais (%) LE/Rn = 77,03

LE/Rn = 77,03H/Rn = 11,80 G/Rn = 11,17

evapotranspiratório. Os valores diários, para periodos semanais evapotranspiração medida e estimada, pelos da diferentes métodos, são mostrados na tabela 5.6. Esses resultados indicam que todos os métodos empregados tendem a sobreestimar, na fase de crescimento vegetativo е floração, e de subestimar a evapotranspiração medida, na fase de maturação da cultura. A hidrica total ao longo do ciclo da cultura demanda foi de 478,1mm.

Os métodos que levam em consideração o saldo de energia e as condições aerodinâmicas reinantes (PENMAN; DOORENBOS & PRUITT; PRIESTLEY & TAYLOR; JURY & TANNER) refletem melhor a variabilidade, dia a dia, da capacidade evapotranspiratória da vegetação. Já os métodos mais empiricos (Tanque "Classe A"; LINACRE; HARGREAVES) respodem apenas pela ordem de magnitude de ETo, sem previsão das variações de curto periodo (dia).

figuras 5.9; 5.10; 5.11 e 5.12 são mostrados, Nas OS comportamentos estacionais da evapotranspiração diária medida e estimada por diferentes métodos. Evidencia-se que métodos OS quais não levam em conderação as características fisiológicas da vegetação, especialmente sua capacidade transpiratória, não devem ser empregados no estabelecimento do consumo hidrico das culturas, mas apenas como um referêncial relativo à evapotranpiração real.

5.8 - Coeficiente de Cultivo (K_C)

dificilmente se tem condições de medir ETm, Como na prática ETO é de grande utilidade na estimativa do consumo hidrico de uma cultura, uma vez conhecendo-se o comportamento estacional do coeficiente de cultivo. Assim, Kc torna-se um parâmetro de grande importância no planejamento e racionamento da irrigação. K_c tem sido largamente empregado na estimativa das necessidades hidricas das culturas (ENCARNAÇÃO, 1980; BERGAMASCHI allii, 1987 e outros). O K_C pode ser afetado pela et solo; energia hidrica no disponivel; disponibilidade características aerodinâmicas da cultura; altura e espaçamento

TABELA 5.6

Evapotranspiração diária média (mm/dia) para períodos semanais, medida e estimada por diferentes métodos.

| PERÍODO | | ΜΈΤΟΟΟS | | | | | | | |
|---|--|--|---|---|---|---|------|-------|-----|
| *** | ORDEM | ETm | ETCA | ETPO | ETDP | ETJT | ETPT | ETH | ETL |
| 18-24/10 | 1 | 1.8 | 6.4 | 9.6 | 8.8 | 9.1 | 8.9 | 6.1 | 7.0 |
| 25-31/10 | 2 | 2.4 | 6.8 | 8.7 | 7.9 | 8.7 | 8.4 | 6.2 | 7.0 |
| 01-07/11 | 3 | 2.4 | 6.4 | 9.2 | 8.4 | 9.0 | 8.8 | 6.3 | 7.1 |
| 08-14/11 | 4 | 2.6 | 6.3 | 7.5 | 6.8 | 6.4 | 6.6 | 5.7 | 6.5 |
| 15-21/11 | 5 | 2.8 | 6.4 | 8.1 | 7.6 | 7.8 | 7.7 | 6.2 | 6.7 |
| 22-28/11 | 6 | 3.3 | 6.7 | 8.7 | 7.8 | 8.8 | 8.5 | 6.3 | 7.1 |
| 29/11-05/12 | 7 | 3.6 | 6.0 | 6.6 | 6.2 | 6.6 | 6.6 | 6.0 . | 6.9 |
| 06-12/12 | 8 | 4.2 | 5.1 | 7.1 | 6.5 | 7.0 | 7.0 | 5.8 | 6.7 |
| 13-19/12 | 9 | 4.9 | 5.6 | 6.9 | 6.3 | 6.4 | 6.7 | 5.8 | 6.6 |
| 20-26/12 | 10 | 5.6 | 5.5 | 7.0 | 6.5 | 6.5 | 6.7 | 5.9 | 6.7 |
| 27/12-02/01 | 11 | 6.8 | 5.9 | 7.0 | 7.0 | 7.8 | 7.8 | 6.0 | 6.9 |
| 03-09/01 | 12 | 8.7 | 6.5 | 7.2 | 7.1 | 8.6 | 8.6 | 6.4 | 6.8 |
| 10-16/01 | 13 | 9.8 | 6.0 | 6.9 | 6.5 | 8.6 | 8.6 | 6.1 | 6.9 |
| 17-19/01 | 14 | 9.4 | 6.5 | 7.4 | 7.1 | 9.1. | 9.0 | 6.3 | 7.1 |
| ETM - Evapo ETCA- Evapo ETPO- Evapo ETDP- Evapo ETJT- Evapo ETPT- Evapo ETH - Evapo | transpira transpira transpira transpira transpira transpira | ição máxin ição estin ição estin ição estin ição estin ição estin ição estin | ma medida mada pelo mada pelo mada pelo mada pelo mada pelo mada pelo | método do método de método de método de método de método de método de | tanque Cla PENMAN DOORENBOS JURY & TAN PRIESTLEY HARGREAVES LINACRE | asse A & PRUITT NNER & TAYLOR S | | | |





.





das plantas; época de plantio e comprimento da estação de cultivo (TAN & FULTON, 1980).

Na tabela 5.7, são apresentados os valores diários médios para periodos semanais, de K_C estimados pelos diferentes métodos e sugeridos pela FAO. Em todos os casos, observa-se uma tendência de aumento de K_C , que após atingir um máximo, decresce devido a menor exigência hidrica da cultura na fase de maturação e queda das folhas (senescência). Nessa tabela, observa-se que os valores do coeficiente de cultivo, estimados pelos métodos combinados (PENMAN; DOORENBOS & PRUITT; PRIESTLEY & TAYLOR; JURY & TANNER), se ajustam melhor àqueles sugeridos pela FAO, para o periodo de completo desenvolvimento da cultura. Já para a fase de crescimento vegetativo, os valores de K_C estimados pelos métodos empiricos (Tanque "Classe A"; LINACRE e HARGREAVES), ajustam-se melhor àqueles sugeridos pela FAO.

Nas figuras 5.13; 5.14; 5.15 e 5.16, são apresentados diagramas de dispersão e as respectivas curvas de regressão os dos valores diários médios, para periodos semanais, de Kc, obtidos por diferentes métodos e os sugeridos pela FAO (1975). A análise de variância revelou que não há diferença significativa quando considera-se as regressões linear e quadratica. Uma comparação entre os valores diários, para periodos semanais, de K_c sugeridos pela FAO(1975) e estimados por diferentes métodos é mostrada na figura 5.17. Através desses resultados demonstra-se que, com exceção dos valores de Kc estimados por (PRIESTLEY & TAYLOR e JURY & TANNER), os demais sobrestimaram aqueles sugeridos pela FAO.

Segundo a metodologia descrita por DOORENBOS & PRUITT (1975), apresenta-se na figura 5.18 a curva representativa do coeficiente de cultivo, para a cultura do feijão macassar, nas condições ambientais do experimento.

TABELA 5.7

Valores diário médios para períodos semanais de K_c, estimados por diferentes métodos e sugeridos pela FAO(1975).

| | | | MÉTODOS | | | | | | | |
|-------------|-------|-------------------|-------------------|------|-------------------|------|------------------|------|--------------------|---|
| PERÍODO | Ordem | К _с СА | К _с РО | KcDP | К _С ЈТ | KcPT | к _с н | Kcr | K _C FAO | |
| 18-24/10 | 1 | 0.28 | 0.19 | 0.21 | 0.20 | 0.21 | 0.29 | 0.26 | 0.29 | |
| 25-31/10 | 2 | 0.36 | 0.27 | 0.29 | 0.27 | 0.28 | 0.38 | 0.33 | 0.37 | |
| 01-07/11 | 3 | 0.37 | 0.26 | 0.28 | 0.26 | 0.27 | 0.38 | 0.33 | 0.45 | |
| 08-14/11 | 4 | 0.41 | 0.35 | 0.39 | 0.43 | 0.40 | 0.46 | 0.41 | 0.53 | |
| 15-21/11 | 5 | 0.45 | 0.35 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.46 | 0.42 | 0.61 | |
| 22-28/11 | 6 | 0.49 | 0.38 | 0.42 | 0.38 | 0.39 | 0.52 | 0.46 | 0.69 | |
| 29/11-05/12 | 2 7 | 0.62 | 0.56 | 0.60 | 0.58 | 0.57 | 0.60 | 0.52 | 0.77 | |
| 06-12/12 | 8 | 0.83 | 0.66 | 0.74 | 0.77 | 0.72 | 0.73 | 0.64 | 0.85 | |
| 13-19/12 | 9 | 0.90 | 0.73 | 0.78 | 0.78 | 0.74 | 0.84 | 0.75 | 0.93 | 1 |
| 20-26/12 | 10 | 1.05 | 0.81 | 0.87 | 0.89 | 0.86 | 0.95 | 0.84 | 1.01 | |
| 27/12-02/0 | 1 11 | 1.17 | 0.99 | 1.00 | 0.89 | 0.88 | 1.15 | 0.99 | 1.09 | |
| 03-09/01 | 12 | 1.35 | 1.20 | 1.22 | 1.02 | 1.01 | 1.38 | 1.28 | 1.17 | |
| 10-16/01 | 13 | 1.68 | 1.42 | 1.50 | 1.15 | 1.15 | 1.59 | 1.42 | 1.17 | |
| 17-19/01 | 14 | 1.46 | 1.27 | 1.33 | 1.04 | 1.04 | 1.49 | 1.32 | 1.09 | |

K CA -- Método de Tanque Classe A K^CPO - Método de PENMAN K^CDP - Método de DOORENBOS & PRUITT K^CJT - Método de JURY & TANNER K^CPT - Método de PRIESTLEY & TAYLOR K^CH - Método do HARGREAVES K^CL - Método de LINACRE K^CFAO- Método da FAO







Fig. 5.14 - Correlação entre os valores diários médios para períodos semanais,de Kc obtidos por estimativas e sugeridos pela FAO(1975).













Fig. 5.18 - Curva representativa do coeficiente (Kc) sugerido pela FAO para a cultura de feijão macassar, nas condições ambientais do experimento.



Fig. 5.18b. Curva representativa do coeficiente de cultivo (Kc) obtido pelo método de PENMAN e segundo os valores limites sugeridos pela FAO para a cultura de feijão macassar, nas condições ambientais do experimento. 6 - CONCLUSOES.

As equações propostas por Linacre (1968) e Penman (1948), quando utilizadas com os coeficientes originais, mostraram-se razoavelmente precisas na estimativa de Rn, com erros padrões de estimativa da ordem de $\varepsilon_{\rm L} = 27,37$ cal/cm².12hs e $\varepsilon_{\rm P} = 22,47$ cal/cm².12hs, respectivamente. Entretanto a eq. de Penman (1948) adaptada às condições do local e da cultura não melhorou significativamente a precisão da estimativa de Rn.

A introdução do albedo (ρ_{v}) na equação de regressão linear entre o saldo de radiação (Rn) e a radiação solar (Rs⁴), não melhorou as estimativas de Rn, isto é, de ϵ_{xy} = 18,0 cal/cm².12hs para ϵ_{xy} = 16,6 cal/cm².12hs.

O comportamento diurno dos componentes do balanço de energia, mostrou-se semelhante entre os dias anterior e posterior às irrigações.

O sistema de evapotranspirômetros de lençol freático constante, utilizado no experimento mostrou-se eficiente, tendo em vista o bom desenvolvimento das plantas no seu interior e a consistência dos dados colhidos.

Como é esperado os métodos utilizados superestimaram a evapotranspiração medida nas fases de crescimento e floração e subestimaram na fase de completo desenvolvimento da cultura.

Os valores do coeficiente de cultivo (K_c) estimados pelos métodos de Penman, Doorenbos & Pruitt, Priestley & Taylor e Jury & Tanner, ajustaram-se melhor àqueles recomendados pela FAO(1975), para o periodo de completo desenvolvimento da cultura. Já na fase de crescimento vegetativo, esse ajustamento foi melhor com os valores de (K_c) estimados pelos métodos do Tanque "classe A", Linacre e Hargreaves.

Recomenda-se que os resultados apresentados neste trabalho, sejam testados em outros locais do semi-árido nordestino.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA

- AASE, J.K. & IDSO, S.B. A Comparison of Two Formulatypes For Calculating Long Wave Radiation From the Atmosphere. <u>Water Resour. Res</u>., 14: 623-625, 1978;
- ANGSTROM, A. <u>A</u> <u>Study of The Radiation of The</u> <u>Atmosphere. Smithsonian Misc. Coll.</u> 65(3), 159pp., 1915;
- ANGSTRÖM, A. Effective Radiation During the Second International Polar Year. <u>Medd. Statens. Meteorol</u> <u>Hydrogr Amst.</u>, Stockholm. 6(8), 1936;
- ANDRE, R.G.B. & VISWANADHAM, Y. Distribuição de Energia Numa Cultura de Soja (Glycine Max (L.) Merrill) Irrigada e não Irrigada. Porto Alegre, UFRGS, <u>Faculdade de Agronômia</u>, 121p. Dissertação <u>Mestrado</u> em Fitotecnia, 1986;
- AUGUSTINE, Y.M & SHAW, R.H. Effect of Plant Population and Planting Date Pattern of Corn on the Distribution of Net Radiation. <u>Agron. J.</u> :165-170, 1974;

AZEVEDO, P.V., LEITÃO, M.M.V.B.R., & COSTA, J.P.R..

Adaptação da Equação de Brunt, Modificada por Penman, às Condições Semi-Aridas do Nordeste do Brasil. <u>Comgresso Brasileiro de Meteorologia</u>, V. Anais 1: 1-5. Sociedade Brasileira de Meteorologia. Rio de Janeiro-RJ, 1988;

- AZEVEDO, P.V., LEITÃO, M.M.V.B.R., & COSTA, J.P.R.. Reflectância de uma Cultura de Soja Irrigada nas Condições Semi-Aridas do Nordeste do Brasil. VI <u>Congresso</u> <u>Brasileiro</u> <u>de</u> <u>Agrometeorologia</u>. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. Anais. Maceió:330-337, 1989;
- AZEVEDO, P.V., VAREJÃO SILVA, M.A & VARGAS, G.A.O. Zoneamento do Potencial de Energia Solar no Nordeste. <u>Coleção</u> <u>Politécnica</u>. Universidade Federal da Paraiba. C. Grande-Pb, 51p, 1981;
- BERGAMASCHI, H., BERLATO, M.A. & FONTANA, D.C. Balanço de Radiação de Soja em Região Subtropical do Brasil. <u>V</u> <u>Congresso</u> <u>Brasileiro</u> <u>de</u> <u>Agrometeologia, Anais.</u> 320-321, Belém-Pa 1987;
- BERGAMASCHI, H., OMETTO, J.C., VIEIRA, H.J., ANGELOCCI, L.R. e LIBARDI, P.L. Deficiência Hidrica em Fejoeiro II. Balanço de Energia. <u>Pesquisa Agropecuária Brasileira,</u> 23(7): 745-757, 1988;
- BERLATO, M.A & BERGAMASCHI, H. Consumo de Agua da Soja-Evapotranspiração Estacional em Condições de Otima Disponibilidade de Agua no Solo.<u>I Seminário</u> <u>de Pesquisa da Soja.</u>Anais. Vol. 1: 53-58, 1978;
- BERLATO, M.A & MOLION, L.C.B. Evaporação e Evapotranspiração. Ipagro.<u>Boletim Técnico</u> n<u>o</u>7, 95p, 1981;
- BLACKWELL, M.J. AND TYDESLEY, J.B. Measurement of Natural Evaporation: Comparison of Gravemetric and Aerodinamic Methodology of Plant Eco-Physiology. <u>Proceedings of the Montpellier Symposium.</u> UNESCO,

- BLAD, B.L. & BAKER, D.G. Reflected Radiation from a Soybean Crop.<u>Agron.</u> J. 64: 277-280, 1972;
- BOWEN, I.S. The Ratio of Heat Losses by Conduction and Evaporation from any Water Surface. <u>Phys.</u> <u>Rev.</u> 27: 779-787, 1926;
- BOWERS, S.A., R.J. HANKS, AND F.C STICKLER. Distribution of Net Radiation Within Sorghum Plots.<u>Agron.</u> J.55: 204-205, 1963;
- BRUNT, E.T. Notes on Radiation in the Atmosphere. Quart. J.R Met. Soc., 58: 389-418, 1932;
- BRUTSAERT, W. Evaporation Into the Atmosphere. D. <u>Reidel Publishing Company</u>, Dordrecht, Holland, 299pp, 1982;
- BRUTSAERT, W. On a Derivable Formula For Long-Wave Radiation From Clear Skies. <u>Water Resources</u> <u>Research</u>, 11: 742-744, 1975d;
- CHOTHIER, B.E., CLAWSON, K.L., PINTER, P.J. Jr., MORAN, M.S., REGINATO, R.J., and JACKSON, R.D. Estimation of Soil Heat Flux from Net Radiation During Growth of Alfafa. <u>Agric. For. Meteorol.</u>, 37: 319-329, 1986;
- CHANG, JEN-HU. Climate and Agriculture: An Ecologial Survey. Chicago, <u>Aldine</u>, 340pp, 1968;
- CHIA, L.S. Albedo of Natural Surfaces in Barbados. <u>O.J.R. Meteorol. Soc.</u>, 93: 116-120, 1967;

- CHIN, CHOY, E.W. & KANEMASU, E.T. Energy Balance Comparisons in Sorghum. <u>Agron.</u> <u>J.</u>, 66: 98-100, 1974;
- CUNHA, G.R. Estudo Micrometeorológico da Transferência Vertical de Vapor D'áagua e Energia em Milho. Porto Alegre, UFRGS. <u>Faculdade de</u> <u>Agronomia</u>, 142p. Dissertação Mestrado em Fitotecnia, 1988;
- DAVIES, J.A., and BUTTIMOR, P.H. Reflection Coefficients, Heating Coefficients and Net Radiation at Simcoe Southern Ontario. <u>Agric. Meteorol</u>. 6: 373-386, 1969;
- DOORENBOS, S.J. & PRUITT, W.O. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. <u>FAO</u>, ROMA, 180pp, 1975;
- DOORENBOS, S.J. & KASSAM, A.R. Efectos Del Agua Sobre el Rendimento de Los Cultivos. ROMA. <u>FAO</u>, 213p, 1979;
- DYER, A.J. and HICKS, B.B. Flux-Gradient Relationships in the Constant Flux Layer. <u>Quart.</u> <u>J.R. Roy. Meteorol. Soc.</u>, 96: 715-721, 1970;
- ENCARNAÇÃO, C.R.F. Estudo da Demanda de Agua do Feijoeiro. Piracicaba, <u>ESALO/USP</u>, (Dissertação de Mestrado), 82p, 1980;
- FERGUSON, J. The Rate of Evaporation From Shallow Ponds. <u>Australian J. Sci. Res.</u>, 5: 315-330, 1952;

FERREIRA, H. & PEIXOTO, J.P. Evaporação e Evapotranspiração. Lisboa, <u>Instituto Geofísico de</u>
Infante D. Luis, (Publicação) no 4, 1962;

- FITZPATRICK, E.A., & STERN, W.R. Net Radiation Estimated From Global Radiation. Plant Response to Climatic Factors, <u>Proc. Uppsala Symp</u>. UNESCO. 403-410, 1973;
- FONTANA, D.C. Balanço de Radiação e Balanço de Energia em Soja (Glycine Max(L.) Merrill) Irrigada e não Irrigada. Porto Alegre, UFRGS, <u>Faculdade</u> <u>de</u> <u>Agronomia</u>, 121p. Dissertação Mestrado em Fitotecnia, 1987;
- FONTANA, D.C., BERLATO, M.A. & BERGAMASCHI, H. Balanço de Energia em Soja Irrigada e não Irrigada. <u>V Congresso</u> <u>Brasileiro</u> <u>de</u> <u>Agrometeorologia. Coletânea de Trabalhos</u>. Belém-Pa, 317-319, 1987;
- FRITSCHEN, L.J. Miniature Net Radiometer Improvements. J. Appl. Meteorol., 4: 528-532, 1965;
- FRITSCHEN, L.J. Net and Solar Radiation Relations
 Over Irrigated Field Crops. Agric. Meteorol. 4:
 55-62, 1967;
- FUSHS, M. and TANNER, C.B. Error Analysis of Bowen Ratios Measured by Differential Psychrometry. Agric. Meteorol, 7: 329-334, 1970;
- FUNARI, F.L., TARIFA, J.R., and SIMPSON, J.G.P. Estudo Comparativo Entre as Equações de Brunt-Penman e Linacre(1967), para Estimativa da Radiação Liquida. <u>IV Congresso Brasileiro de</u> <u>Agrometeorologia</u>. Anais. Londrina-Pr. 129p,1985;

I

- GRAHAM, W.G., and KING, K.M. Short-Wave Reflection Coefficient for a Field of Maize. Q.J.R. Meteorol. Soc., 84: 425-428, 1961;
- KUSTAS, W.P. and DAUGHTRY, C.S.T. Estimation of the Soil Heat Flux/Net Radiation Ratio from Spectral Data. Agric. For. Meteorol., 49: 205-223, 1990;
- HARGREAVES, G.H. "Estimation of Potential and Crop Evapotranspiration". <u>Trans. ASAE</u> 17: 701-704, 1974;
 - IDSO, S.B., AASE, J.R., and JACKSON, R.D. Net Radiation - Soil Heat Flux Relations as Influenced by Soil Water Content Variations. <u>Boundary-Layer</u> <u>Meteorol.</u>, 9: 113-122, 1975;
 - IDSO, S.B., BAKER, D.G. & BLAD, B.L. Relations of Radiation Fluxes Over Natural Surfaces. <u>Quart.</u> <u>J.</u> <u>Roy. Meteorol. Soc.</u>, 95: 227-244, 1969;
- IDSO, S.B. & JACKSON, R.D. Thermal Radiation From the Atmosphere. <u>J. Geophysics Res</u>., 74: 5397-5403, 1969;
 - JURY, W.H. & TANNER, C.B. "Advection Modification of the Priestley and Taylor Evapotranspiration Formula". Agron. J., 67: 840-842, 1975;
 - LEITÃO, M.M.V.B.R. Balanço de Radiação e Energia Numa Cultura de Soja (Glycine max.(L.) Merrill) Irrigada. <u>Dissertação de Mestrado em Meteorologia</u>. UFPb, Campus II, Campina Grande-Pb. 110pg. 1989;
 - LINACRE, E.T. Net and Solar Radiotion Relations Over Irrigated Field Crops. <u>Agric. Meteorol</u>. 4: 55-62, 1968;

- LINACRE, E.T. " A Simple Formula for Estimating Evapotranspiration Rates in Various Climates, Using Temperature Data Alone". <u>Agric. Meteorol</u>., 18: 409-424, 1977;
- LING, A.H and ROBERTSON, G.W. Reflection Coefficients of Some Tropical Vegetation Covers. <u>Agric.</u> <u>Meteorol</u>, 27: 141-144, 1982;
- LOMAS, J., SCHLESINGER, E. and LEWIN, J. Effects of Environmental and Crops Factors on the Evapotranpiration Rate and Water Use Efficiency of Maize.<u>Agric. Meteorol</u>, 13: 239-251, 1974;
- MANSI, A.D., MOLION, L.C.B., and SANTOS, J.M. Estudos de Radiação de Onda Longa em Floresta de Terra Firme na Região de Manaus.<u>Congresso Brasileiro de</u> <u>Agrometeorologia, 4 Anais</u> Londrina-Pr, 1986;
- MONTEITH, J.L. Principles of Environmental Physics. Elsevier New York, 241pp, 1973;
- MONTEITH, J.L. & SZEICZ, G. The Radiation Balance of Bare Soil and Vegetation.<u>Quart. J. Roy. Meteorol.</u> <u>Soc</u>, 87: 159-170, 1961;
 - NKEMDIRIM, L.C. Radiation Flux Relations Over Crops. Agric. Meteorol 11: 229-242, 1973;
- PENMAN, H.L. Natural Evaporation From Open Water, Bare Soil and Grass.<u>Proc. Roy Soc. Ser. A</u> 193: 120-145, 1948;
- PEDRO JUNIOR, M.J. Balanço de Energia em Soja (Glycine Max (L.) Merril). Piracicaba, <u>ESALO</u>, 82p. Tese Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, 1977;

- PRATES, J.E. Analise da Variação Temporal dos Componentes do Balanço de Radiação em cultura de Arroz(Oryza Sativa L.) de sequeiro. <u>V</u> <u>Congresso</u> <u>Brasileiro de Meteorologia. Anais I</u> 29-33. Rio de Janeiro, 1988;
- PRATES, J.E., STEINMETZ, G.C., & VIANELLO, R.L. Relação Entre os Componentes do Balanço de Energia em Diferentes Estágios de Desenvolvimentos do Arroz (Oryza Sativa L) de Sequeiro.<u>Congresso</u> <u>Brasileiro</u> <u>de Arometeorologia</u> V. <u>Coletânea</u> <u>de Trabalhos</u> Belém Pa. 333-336, 1987;
- PRESCOTT, J.A. Evaporation From a Water Surface in Relation to Solar Radiation. <u>Trans. Roy. Soc.</u> <u>South. Aust.</u> 64: 114-125, 1940;
- PRIESTLEY, C.H.B., & TAYLOR, R.J. On the Assessment of Surface Heat Flux Evaporation Using Large-Scale Parameters.Mon. Wea. Rev, 100: 81-92, 1972;
 - PRIESTLEY, C.H.B. Turbulent Tranfer in the Lower Atmosphere. Chicago.<u>University of Chicago</u> 1958;
- PROCTOR, J.T.A., KYLE, J.W. & DAVIES, J.A. The Radiation Balance of the Apple Tree. <u>Canadian</u> <u>J.</u> <u>Bot</u>, 50: 1731-1740, 1972;
 - PRUITT, W.O. Application of Several Energy Balance and Aerodynamic Evaporation Equations Under a Wide Range of Stability. <u>Final Report to USAERG</u> on <u>Contract</u> No. DA-36-039-SC-80334, University of California, Davis,pp.107-124, 1963;
 - PRUITT, W.O. and LOURENCE, F.J. Test of Aerodynamic, Energy Balance and Other evaporation Equations

Over a Grass Surface. In: Investigation of Energy, Momentum and Mass Transfers near the Ground <u>Final</u> <u>Report, USAEPG Contract</u> University of California, Davis, AD 635-588, pp. 37-63, 1966;

- REVHEIM, K.J.A and JORDAM, R.B. Precision of Evaporation Measurements Using the Bowen Ratio. <u>Boundary - Layer Meteorol.</u>, 10: 97-111, 1976;
- RIJKS, D.A. Water Use by Irrigated Cotton in Sudan. I. Reflection of Shortwave Radiation. J. Appl. Ecol. 4(2): 561-568, 1967;
- ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L. & VERMA, S.B. Microclimate: The Biological Environment. Sec. Edition. John Wiley & Sons. New York, 495p, 1983;
- SATTERLUND, D.K. An Improved Equation for Estimating Long-Wave Radiation From the Atmosphere. <u>Water</u> <u>Resour. Res.</u>, 15: 1649-1660, 1979;
- SEGUI, B. and ITIER, B. Using Midday Surface Temperature to Estimate Daily Evaporation from Satellite IR Data. <u>Int.J. Remote Sensing</u>. 4: 371-384, 1983;
- SELLERS, W.D. Physical Climatology. <u>The University</u> of <u>Chicago Press</u>, 272p, 1965;
- SHAW, R.H. and DECKER, W.L. The General Heat Budget of Canopies, 141-155. In: B.J. BARFIELD and J.F. GERBER (eds.). Modification of the Areal Environment of Crops. <u>Americam Society of Agricultural Engineers</u>, St. Josep, Michigan, 1979;

SINCLAIR, T.R., ALLEN, L.H., Jr. and LEMON, E.R. An

Analysis of Errors in the Calculation of Energy Flux Densities Above Vegetation by a Bowen-Ratio Profile Method. <u>Boundary - Layer Meteorol.</u>, 8: 129-139, 1975;

- SINGH, B. & TAILLEFFER, R. The Effect of Synoptic-Scale Advection on the Performance of the Priestley-Taylor Evaporation Formula. <u>Bound Layer</u> <u>Meteorol</u>, 36: 267-282, 1986;
- SLATYER, R.O. and MCILROY, J.C. Practical Micro Climatology. <u>CSIRO Melbourne</u>, 1961;
- SOUSA, J.L., AZEVEDO, P.V. & BASTOS, E.J. de B. Variação Estacional do Coeficiente de cultivo Numa Cultura de Milho Irrigado. <u>V Congresso</u> <u>Brasileiro</u> <u>de Agrometeorologia, Anais</u>: 126-129. Belém-Pa, 1987;
- SPITTERHOUSE, D.A. and BLACK, T.A Evaluation of the Bowen Ratio/Energy Balance Method for Determining Forest Evapotranspiration. <u>Atmos. Oceans</u>, 18: 98-116, 1980;
 - SUBRAHMANYAM, V.P & RATNAM, B.P. Albedo Studies in a Sugar Cane Field. India <u>J. Agric. Sci.</u>, 39: 774-779, 1969;
 - SUBRAHMANYAM, V.P. and KUMAR, K.K. Studies of Energy Budget of Finger Millet Crop, Part II: Net and Solar Radiation Relationships. <u>Tropical Ecology</u>, 25: 29-36, 1984;
- SUBRAHMANYAM, V.P. and KUMAR, K.K. Studies in Energy Budget of Finger Millet Crop. Part IV: Energy of Millet (Elensine Coracona) Crop. <u>Tropical</u> Ecology.

25: 44-51, 1984;

SWINBANK, W.C. Long-Wave Radiation From Clear Skies. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 09:339-348, 1963;

- TAN, C.S. and RAJARATNAM, A. Preliminary Results of Reflection Coefficients of Some Typical Terrains of Shor-Wave Radiation. <u>Malays. Agric. Res.</u>, 4: 221-225, 1975;
- TAN, C.S. and FULTON, J.M. Ratio Between Evapotranspiration of Irrigated Crops from Floating. Lysimeters and Class A Pan Evaporation. <u>Can. J.</u> <u>Plant Sci. 60: 197-201, 1980;</u>
 - TANNER, C.B. Energy Balance Approach to Evapotranspiration From Crops. <u>Soil Science</u> <u>Society of America. Proceedings</u>, Madison, 24(1):1-9, 1960;
 - TANNER, C.B. and LEMON, E.R. Radiation Energy Utilized In Evapotranspiration. Agron. Journal, 54: 207-212, 1962;
- VILA NOVA, N.A. Estudos Sobre o Balanço de Energia em Cultura de Arroz. Piracicaba, <u>ESALO/USP</u>, 89p. Tese, Liv. Doc. 1973;
- WEBB, E.K. Profile Relationships: The Log-Linear Range and Extension to Strong Stability. <u>Quart. J.</u> <u>Roy. Meteorol. Soc.</u>, 67-90, 1970;
- WRIGHT, J.L. New Evapotranspiration Crop Coefficients. Journal of Irrigation and Drainage Division. ASAE, Vol. 108, no IRZ: 57-74, 1982;

APÉNDICE A

TABELA - Al

Valores do fator ponderante (W) para correção do efeito da radiação na estimativa da evapotranspiração potencial para diferentes temperaturas e altitudes.

| TEMPERATURA ^O C | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 |
|----------------------------|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| W ALTITUDE | m | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| • | 0 | 0.43 | .46 | .49 | .52 | .55 | .58 | .61 | .64 | .66 | .68 | .71 | .73 | .75 | .77 | .78 | .80 | .82 | .83 | .84 | .85 |
| ж. — ^н | 500 | .44 | .48 | .51 | .54 | .57 | .60 | .62 | .65 | .67 | .70 | .72 | .74 | .76 | .78 | .79 | . 81 | .82 | .84 | .85 | .86 |
| | 1 000 | .46 | .49 | .52 | .55 | .58 | .61 | .64 | .66 | .69 | .71 | .73 | .75 | .77 | .79 | .80 | .82 | .83 | .85 | .86 | . 87 |
| | 2 000 | .49 | .52 | .55 | .58 | .61 | .64 | .66 | .69 | .71 | .73 | .75 | .77 | .79 | .81 | .82 | .84 | .85 | .86 | .87 | .88 |
| | 3 000 | .52 | .55 | .58 | .61 | .64 | .66 | .69 | .71 | .73 | .75 | .77 | .79 | .81 | .82 | .84 | .85 | .86 | .87 | .88 | . 89 |
| | 4 000 | .54 | .58 | .61 | .64 | .66 | .69 | .71 | .73 | .75 | .77 | .79 | .81 | .82 | .84 | .85 | .86 | .87 | .89 | .90 | .90 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Transcrito de Crop Water Requeriments - FAO (1975).

TABELA A2

Coeficientes do Tanque "classe A" (Kp) em função da cobertura vegetal e dos valores médios diários da umidade relativa e velocidade do vento.

| | | TANQUE C | EXPOSIÇÃO IRCUNDADO |) A POR GRAMA | - | EXPOSIÇÃO B TANQUE CIRCUNDADO POR SOLO NU | | | | | | |
|-------|----------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--|--|--|
| | URS (MÉDIA) | | BAIXA < 40 | MÉDIA 40-70 | ALTA > 70 | | BAIXA < 40 | MÉDIA 40-70 | ALTA > 70 | | | |
| - | VENTO (Km/DIA) | TAMANHO DA BOR DA DURA (m) | ž | | | TAMANHO DA BOR DA DURA (m) | | | | | | |
| - | · LEVE . <1175 | 0 10 100 1 000 | .55 .65 .7 .75 | .65 .75 .8 .85 | .75 .85 .85 .85 | 0 10 100 1 000 | .7 .6 .55 .5 | .8 .7 .65 .6 | .85 .8 .75 .7 | | | |
| · • • | MODERADO 175-425 | 0 10 100 100 1000 | • 5 • 6 • 6 5 • 7 | .6 .7 .75 .8 | .65 .75 .8 .8 | 0 10 100 1000 | 1.65 .55 .5 .45 | .75 .65 .6 .55 | .8 .7 .65 .6 | | | |
| | FORTE 425-700 | 0 10 100 1000 | .45 .55 .6 .65 | • 5 • 6 • 6 5 • 7 | .60 .65 .7 .75 | 0 10 100 1 000 | .6 .5 .45 .4 | .65 .55 .5 .45 | .7 .65 .6 .55 | | | |
| | MUITO FORTE > 700 | 0 10 100 1 000 | .4 .45 .5 .55 | .45 .55 .6 .6 | .5 .6 .65 .65 | . 0 10 100 1 000 | .5 .45 .4 .35 | .6 .5 .45 .4 | .65 .55 .5 .45 | | | |

Transcrito de Crop Water Requeriments - FAO (1975).