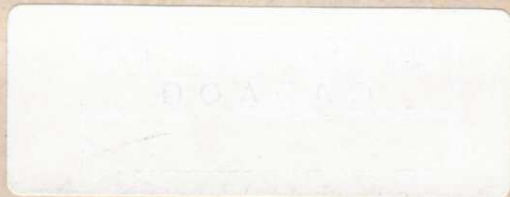


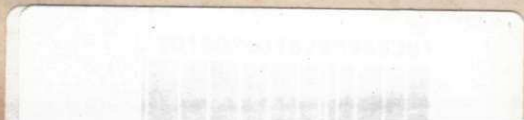
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE MESTRADO EM METEOROLOGIA



BALANÇO DE RADIAÇÃO E ENERGIA NUMA CULTURA DE SOJA IRRIGADA.

MÁRIO DE MIRANDA VILAS BOAS RAMOS LEITÃO

CAMPINA GRANDE - PB
JUNHO - 1989.



MÁRIO DE MIRANDA VILAS BOAS RAMOS LEITÃO

BALANÇO DE RADIAÇÃO E ENERGIA NUMA CULTURA DE SOJA IRRIGADA

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

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : AGROMETEOROLOGIA

PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
(Orientador)

KAMADA KARUNA KUMAR
(Co-Orientador)

CAMPINA GRANDE - PB.
JUNHO - 1989.



L533b

Leitao, Mario de Miranda Vilas Boas Ramos

Balanco de radiacao e energia numa cultura de soja irrigada / Mario de Miranda Vilas Boas Ramos Leitao. - Campina Grande, 1989.

110 f. : il.

Dissertacao (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraiba, Centro de Ciencias e Tecnologia.

1. Irrigacao Agricola 2. Soja Irrigada 3. Dissertacao I. Azevedo, Pedro Vieira de, Prof. II. Kumar, Kamada Karuna, Prof. III. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) IV. Título


CDU 631.67(043)

BALANÇO DE RADIAÇÃO E ENERGIA NUMA CULTURA DE SOJA IRRIGADA

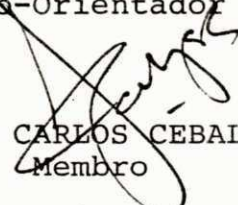
MÁRIO DE MIRANDA VILAS BOAS RAMOS LEITÃO


DISSERTAÇÃO APROVADA COM DISTINÇÃO EM 08/08/89


PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Orientador



KAMADA KARUNA KUMAR
Co-Orientador


JUAN CARLOS CEBALLOS
Membro


NILSON AUGUSTO VILLA NOVA
Membro

CAMPINA GRANDE
AGOSTO - 1989

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, esposa, filhos e irmãos.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece em especial, a Providência Divina, pela realização deste trabalho.

Ao Departamento de Ciências Atmosféricas, pelo apoio dado em todos os momentos.

A Direção do Centro de Ciências e Tecnologia, na pessoa do Prof. ADEMILSON MONTES FERREIRA, pelo apoio concedido à realização do experimento.

Ao CNPq através do Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico para o Nordeste (PDCT-NE), pelo apoio dado através da SUEP/UFPb, Projeto PB-25, com a liberação de alguns equipamentos.

Ao Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA/EMBRAPA), pelas valiosas contribuições oferecidas, através do apoio material e humano à execução das atividades experimentais.

Ao Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO, por sua dedicação e empenho na Orientação.

Ao Prof. Dr. KAMADA KARUNA KUMAR, por sua valiosa contribuição na Co-Orientação.

À todos os colegas do D.C.A., que direta ou indiretamente contribuíram para execução deste trabalho.

À JOSÉ MOACIR PINHEIRO LIMA FILHO, pesquisador M.Sc. do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA/

EMBRAPA), por sua expressiva contribuição e apoio na execução dos trabalhos de campo.

À MALAQUIAS DA SILVA AMORIM NETO, pesquisador M.Sc. do Centro Nacional do Algodão (CNPQ/EMBRAPA), pela sua participação nos entendimentos junto ao CPATSA/EMBRAPA, a qual foi decisiva para a realização deste trabalho.

À ARNÓBIO ANSELMO MAGALHÃES, pesquisador do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA/EMBRAPA), pelos serviços técnicos prestados na implantação do experimento de campo.

Ao amigo Prof. JOSÉ DE PAULO ROCHA DA COSTA, pela sua importantíssima contribuição, para o sucesso das atividades desenvolvidas durante a fase experimental deste trabalho.

Aos Prof^º BERNARDO BARBOSA DA SILVA e JUAN CARLOS CEBALLOS, pelo auxílio e orientação na parte computacional.

Ao amigo SEVERINO MARCOLINO IRMÃO, pela grande ajuda na coleta dos dados durante o período experimental.

Ao casal PEDRO PACHECO E LEOZITA DOS SANTOS, pela inesquecível acolhida e sincera amizade.

À JOSÉ FERNANDO SANTOS, pelos brilhantes serviços da tilogrâficos.

À EDIVANDRO SOUSA BARROS, pela contribuição dada nos serviços de planimetria.

À todos os funcionários do CPATSA/EMBRAPA, lotados

na Estação Experimental de Mandacaru, pelos serviços prestados.

E, por último, meus sinceros e profundos agradecimentos a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização des estudo.

RESUMO

Esta pesquisa foi conduzida na estação experimental do CPATSA/EMBRAPA, no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro-Ba, objetivando estudar o comportamento da soja (*Glycine max.* (L.) merrill) irrigada, cultivada nas condições semi-áridas do Nordeste Brasileiro. Procurou-se avaliar os componentes dos balanços de energia e radiação, comparando os resultados medidos àqueles obtidos por fórmulas empíricas convencionais, visando ajustá-las às condições locais e da cultura. As observações ocorreram ao longo do período experimental entre setembro e dezembro de 1987, com registros contínuos diurnos e leituras horárias do saldo de radiação (R_n); radiação global ($R_s \downarrow$); e radiação de ondas curtas refletida ($R_s \uparrow$). Também foram efetuadas medidas horárias da evapotranspiração da cultura (ET_m), fluxo de calor no solo (G), temperaturas do bulbo seco e úmido e temperatura da folhagem. Semanalmente, foram avaliados a produção de matéria seca, o índice de área foliar (IAF) e a cada três dias a altura da cultura (h).

O albedo (α), variou de 0,12 no início das observações, a um máximo de 0,25 na fase de floração, apresentando flutuações diárias, especialmente após as irrigações. IAF e h atingiram valores máximos de 8,5 a 89,2 cm, respectivamente. Os resultados mostram, que a estimativa diária de $R_s \downarrow$, através de leituras horárias, pode apresentar erros consideráveis, dependendo da cobertura e do tipo de nuvens. As melhores estimativas de R_n

foram obtidas pela equação de PENMAN (1948), adaptada as condições locais e da cultura. O saldo de energia radiante disponível representou 62% da radiação global incidente durante o período experimental. A energia utilizada na evapotranspiração excedeu consideravelmente R_n , enquanto que 1,45% do saldo de radiação foi usada na produção de matéria seca.

ABSTRACT

This research was conducted at the CPATSA/EMBRAPA experimental station in the irrigation project of Mandacaru, Juazeiro-Ba, with the objective of studying the behaviour of irrigated soybean (*Glycine max* (L.) merrill) crop, grown under the semi-arid conditions of Northeast Brazil. A major aim of the study was to compare measured values of radiation and energy balance components with those obtained from empirical equations and to adjust the equations to local and crop conditions. The field measurements were taken throughout experimental period between september and december, 1987 with daytime records and hourly readings of net radiation (R_n); global radiation ($R_s \downarrow$); and reflected shortwave radiation ($R_s \uparrow$). Daytime hourly values of evapotranspiration (ETm), soil heat flux (G), dry and wet bulb temperatures, and canopy cover temperature were also measured. Leaf area index and dry matter production were measured weekly and crop height was evaluated at each three days.

Shortwave reflectivity (α) varied from 0.12 at the beginning of the growing season to 0.25 in the flowering phase with pronounced fluctuations particularly after irrigations. Leaf area index and crop height reached maximum values of 8.5 and 89.2 cm, respectively. The results show that daily estimates of $R_s \downarrow$, on the basis of hourly readings can present considerable errors, depending upon the cloud type and cloud cover. The best estimates of R_n were obtained by Penman (1948) equation, adjusted to the local and crop conditions. Net radiant energy available

to the crop during the entire growing season was 62% of the shortwave radiation received. Energy used in evapotranspiration was found to exceed net radiation considerably. Energy used in dry matter production was 1.45% of the net radiation.

S U M Á R I O

	Página
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	09
3.1. Balanço de Radiação à Superfície	09
3.1.1. Equação do Balanço de Radiação à Superfície	09
3.1.2. Radiação de Ondas Curtas Incidente	11
3.1.3. Reflectividade da Radiação de Ondas Curtas	12
3.1.4. Radiação de Ondas Longas	13
3.2. Equação do Balanço de Energia	15
3.2.1. Fluxo de Calor Sensível	17
3.2.2. Fluxo de Calor Latente	17
3.2.3. Energia Usada no Processo Fotossintético	19
3.2.4. Fluxo de Calor no Solo	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. MATERIAIS	22
4.1.1. Experimento de Campo	22
4.1.1.1. Localização	22
4.1.1.2. Cultura	22
4.1.1.3. Instalação	24
4.1.1.4. Instrumental Utilizado	26

	Página
4.2. METODOLOGIA	27
4.2.1. Sistemática de Observações	27
4.2.2. Tratos Culturais	28
4.2.3. Componentes do Balanço de Radiação de <u>On</u> das Curtas	29
4.2.3.1. Radiação de Ondas Curtas Inciden <u>te</u> ($R_s \downarrow$)	29
4.2.3.2. Radiação de Ondas Curtas Refleti <u>da</u> ($R_s \uparrow$)	31
4.2.3.3. Coeficiente de Reflexão	31
4.2.4. Componentes do Balanço de Radiação de <u>On</u> das Longas	33
4.2.4.1. Radiação de Ondas Longas Proveni- ente da Atmosfera ($R_L \downarrow$)	33
4.2.5. Saldo de Radiação (R_n)	35
4.2.6. Relação entre R_n e $R_s \downarrow(1 - \alpha)$ e R_n e $R_s \downarrow$.	38
4.2.7. Balanço de Radiação	39
4.2.8. Componentes do Balanço de Energia	39
4.2.8.1. Fluxo de Calor Latente (LE)	39
4.2.8.2. Fluxo de Calor no Solo (G)	39
4.2.8.3. Fluxo de Calor Sensível (H)	39
4.2.8.4. Energia Utilizada no Processo <u>Fo</u> tossintético	40
4.2.8.5. Balanço de Energia	40
4.2.8.6. Parâmetros Estatísticos	41

	Página
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	43
5.1. Radiação Global ($R_s \downarrow$)	43
5.1.1. Estimativa da Radiação Global	43
5.1.2. Determinação da Radiação Global com Base em Valores Horários Instantâneos (R_{se}) ..	45
5.2. Determinação do Coeficiente de Reflexão (α)	47
5.2.1. Variação Estacional de α	47
5.2.2. Variação Diária de α	51
5.2.3. Coeficiente de Reflexão para o Estágio de Completo Desenvolvimento Vegetativo da Cul tura de Soja	55
5.2.4. Estimativa do Coeficiente de Reflexão (α), para a Cultura de Soja	55
5.3. Radiação de Ondas Longas da Atmosfera ($R_L \downarrow$)	57
5.3.1. Estimativa de $R_L \downarrow$	57
5.4. Saldo de Radiação (R_n)	62
5.4.1. Estimativa de R_n , com Base nas Equações Propostas por LINACRE (1967)	62
5.4.2. Estimativa de R_n , com Base na Equação de PENMAN (1948)	66
5.4.3. Estimativa de R_n , com Base em $R_s \downarrow (1 - \alpha)$ e $R_s \downarrow$	71
5.5. Balanço de Radiação Sobre a Cultura	78
5.5.1. Variação Diurna dos Componentes do Balanço de Radiação	78

	Página
5.5.2. Variação Estacional dos Componentes do Ba lanço de Radiação	80
5.6. Balanço de Energia Sobre a Cultura	83
5.6.1. Comportamento Diário do Balanço de Ener gia	83
5.6.2. Comportamento Estacional do Balanço de Energia	89
6. CONCLUSÕES	97
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura - 3.1 - Esquematização dos fluxos de energia num volume de controle	16
Figura - 4.1 - Localização do experimento	23
Figura - 4.2 - Distribuição dos instrumentos na área experimental e na estação meteorológica .	25
Figura - 5.1A - Registro da radiação global obtido com registrador Speedomax interligado ao piranômetro Eppley, para um dia de céu claro (07.10.87)	48
Figura - 5.1B - Registro diário da radiação global obtido com registrador Speedomax interligado ao piranômetro Eppley, para o dia de maior erro na estimativa de $R_s \downarrow$ com valores horários (12.12.87)	49
Figura - 5.2 - Variação estacional do albedo (α)	50
Figura - 5.3A - Variação diária de α , para dias representativos das fases de crescimento vegetativo, floração e maturação da cultura .	53
Figura - 5.3B - Variação diária média e desvio padrão de α	53

Figura - 5.4	- Projeção da abolada celeste, mostrando a trajetória do Sol	54
Figura - 5.5	- Variação do albedo (α), com o ângulo zenital solar no período de completo desenvolvimento da cultura da soja	54
Figura - 5.6	- Comparação de $R_L \downarrow (E)$ calculado pelas fórmulas de Idso, Swinbank e Brunt, com $R_L \downarrow (o)$ determinado pela equação do balanço de radiação, com base nos componentes observados: a) considerando a temperatura do ar e a pressão do vapor d'água observados sobre a cultura; b) considerando os dois parâmetros observados na estação meteorológica. $R_L \downarrow$ está em $\text{cal.cm}^{-2}/12$ horas	61
Figura - 5.7	- Comportamento estacional de R_n estimado pelas eqs. de LINACRE (1967): 4.12; 4.13; 4.14; 4.15 e 4.16, ao lado da curva de R_n observado	63
Figura - 5.8	- Comparação de R_n estimado, pelas eqs. de LINACRE (1967): 4.12; 4.13; 4.14; 4.15 e 4.16, com R_n observado. Ambos para o período diurno	65

<p>Figura - 5.9 - Comportamento estacional de R_n estimado pelas eqs. original de PENMAN (1948) e adaptadas as condições da cultura e do local: eqs. 4.17; 5.1; 5.2; 5.3 e 5.4 , ao lado de R_n observado</p>	<p>68</p>
<p>Figura - 5.10 - Comparação de R_n estimado pelas eqs. original de PENMAN (1948) e adaptadas 4.17; 5.1; 5.2; 5.3 e 5.4, com R_n observada. Ambos para o período diurno</p>	<p>70</p>
<p>Figura - 5.11A - Comportamento de R_n estimado com $R_s \downarrow (1-\alpha)$ e $R_s \downarrow$, curvas RNR e RNG e depois corrigidas RNR_c e RNG_c, ao lado de R_n observado. Ambos para o período de cobertura parcial do solo em (cal.cm^{-2})</p>	<p>73</p>
<p>Figura - 5.11B - Comportamento de R_n estimado com $R_s \downarrow (1-\alpha)$ e $R_s \downarrow$, curvas RNR e RNG e depois corrigidas RNR_c e RNG_c, ao lado de R_n observado. Ambos para o período de cobertura completa do solo em ($\text{cal.cm}^{-2}/12$ horas) ...</p>	<p>74</p>
<p>Figura - 5.12 - Comparação de R_n estimado por $R_s \downarrow (1-\alpha)$ e $R_s \downarrow$, com R_n observado para os períodos de cobertura parcial e completa do solo</p>	<p>75</p>

Figura - 5.13 -	Balanço de radiação diária, para as <u>si</u> tuações de nebulosidade: pouca (07.10.87); razoável (03.11.87); total (03.12.87) e nenhuma (12.11.87)	79
Figura - 5.14 -	Balanço de energia para os dias anterior e posterior a irrigação, no período de pouco desenvolvimento vegetativo da soja (12º e 14º dia após a germinação)	85
Figura - 5.15 -	Balanços de energia para os dias anterior e posterior a irrigação, no período de razoável desenvolvimento vegetativo da <u>so</u> ja (30º e 32º dia após a germinação) ..	86
Figura - 5.16 -	Balanços de energia para os dias anterior e posterior a irrigação, no período de floração da soja (50º e 52º dia após a germinação)	88
Figura - 5.17 -	Balanços de energia para os dias anterior e posterior a irrigação, no período de <u>ma</u> turação da soja (91º e 93º dia após a germinação)	90
Figura - 5.18 -	Variação estacional da razão G/R_n	95
Figura - 5.19 -	Evolução semanal da produção de matéria seca (M_s) e do índice de área foliar (IAF).	96

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela - 5.1 - Valores de radiação global diária em (cal.cm^{-2}) , observada (R_{so}) e estimada com base em leituras horárias instantâneas (R_{se}), erro percentual $E(\%)$, nebulosidade em $(N/8)$ e tipo de nuvens ...	46
Tabela - 5.2 - Coeficientes de reflexão diário (α), obtidos pelos métodos A, B e C	57
Tabela - 5.3A - Radiação atmosférica (R_L^\dagger), em $(\text{cal.cm}^{-2}/12 \text{ horas})$ para dias de céu claro, calculada com base na temperatura e pressão do vapor d'água observados sobre a cultura	60
Tabela - 5.3B - Radiação atmosférica (R_L^\dagger), em $(\text{cal.cm}^{-2}/12 \text{ horas})$ para dias de céu claro, calculada com base na temperatura e pressão do vapor d'água observados na estação meteorológica	60
Tabela - 5.4 - Valores médios diários dos componentes do balanço de radiação (cal.cm^{-2}) , para períodos semanais	81
Tabela - 5.5 - Razões entre os componentes do balanço de radiação (%)	82

Tabela - 5.6	-	Componentes do balanço de energia ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), observados sobre a cultura para períodos semanais	91
Tabela - 5.7	-	Energia radiante usada na produção de matéria seca, para períodos semanais ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)	92
Tabela - 5.8	-	Razões entre os fluxos diurnos de calor no solo (G) e radiação global (R_s^+) e líquida (R_n) para períodos semanais ..	93

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro - IV.1 - Pulverizações e adubações no decorrer do experimento	28
Quadro - V.1 - Valores de "a" e "b", para equação de PRESCOTT (1940) em Mandacarú-Ba	43
Quadro - V.2 - Valores de "a" e "b" para equação de PRESCOTT (1940) no semi-árido-NE	44
Quadro - V.3 - Valores das constantes "a" e "b" para equação de PRESCOTT (1940), em outros países	44
Quadro - V.4 - Valores dos coeficientes da eq. de BRUNT para Mandacarú-Ba (com "e" em mb)	58
Quadro - V.5 - Coeficientes determinados para equação de PENMAN (1948), adaptada as condições da cultura e do local	67
Quadro - V.6 - Algumas relações de $R_n = a R_s^\dagger - b$, citadas por LINACRE (1967), para diferentes localidades ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$)	77
Quadro - V.7 - Evapotranspiração média diária medida (mm.dia^{-1}) para períodos semanais	87

1 - INTRODUÇÃO

A produção agrícola tem sido ao longo dos anos, objeto de muita preocupação não apenas por parte de governantes, mas também de muitos pesquisadores em todas as partes do Globo. Isto se justifica, em virtude do aumento desproporcional da população mundial comparada à produção de alimentos. Notadamente nas Nações mais pobres, a fome tem causado seríssimos problemas, levando milhões de seres humanos à morte ou obrigando-os a emigrar para regiões distantes, em busca de sobrevivência, que na maioria das vezes ocorre em condições extremamente sub-humanas, habitando à periferia das grandes cidades.

Visando entender melhor o comportamento das culturas e encontrar meios para aumentar a produtividade agrícola, vários estudos têm sido desenvolvidos no mundo inteiro no sentido de avaliar como os fatores ambientais e fisiológicos podem contribuir mais significativamente para tal propósito.

Dentro deste contexto, é de fundamental importância o estudo de parâmetros meteorológicos que direta ou indiretamente possam afetar o desenvolvimento e o rendimento das culturas, em particular aqueles envolvidos com a diminuição ou aumento das perdas de água, têm recebido muita atenção por parte de muitos estudiosos do assunto.

Embora as medidas lisimétricas sejam a forma mais precisa de se quantificar diretamente as perdas de água ou evapotranspiração de uma cultura, a instalação de um lisímetro de pre

cisão é sempre difícil, bastante onerosa e sua utilização restrita a área experimental. Diante disto, muitos pesquisadores têm preferido recorrer a métodos estimativos, como forma mais viável de quantificar a evapotranspiração. Por conseguinte, existe uma grande diversidade de métodos. Contudo, para determinações a curtos intervalos de tempo, os métodos micrometeorológicos apresentam resultados mais precisos. Dentre estes, destaca-se o método das flutuações turbulentas que, embora bastante preciso tem a inconveniência de utilizar instrumentos sofisticados e ultrasensíveis, o que dificulta bastante sua aplicação de forma rotineira. Por outro lado, o método do balanço de energia tem sido bastante empregado, embora a falta de instrumentos para medição dos componentes individuais do balanço, tenha exigido o uso de expressões empíricas baseadas em parâmetros meteorológicos. Contudo, quando devidamente ajustado à região em estudo, este método pode conduzir a bons resultados.

A Região do Nordeste do Brasil, com uma área de aproximadamente 1,6 milhões de km², representando cerca de 12% do território brasileiro, é habitada em média por 35% da população Nacional (IBGE, 1980). Esta, ao longo dos anos tem vivido experiências terríveis, devido a baixa produção de alimentos em consequência da frequente irregularidade de chuvas, principalmente na área do Polígono das secas, caracterizada por apresentar um clima Semi-árido, onde a incidência de radiação solar é muito acentuada durante todo o ano, fator importante para a atividade agrícola quando associado a disponibilidade hídrica do solo. Entretanto,

embora existam no Nordeste, vários locais com disponibilidade de água suficiente para a implantação de "Perímetros Irrigados", como às margens do rio São Francisco e inúmeros açudes públicos e privados, muito pouco tem sido feito no sentido de aproveitar esse potencial para, através da irrigação planejada com a utilização de técnicas modernas e implantação de culturas economicamente viáveis, tentar mudar essa situação.

Por outro lado, a cultura da soja, da qual se derivam produtos importantes como: carne, leite, óleo, farelo e outros, tem sido bastante estudada em outras regiões e tida como economicamente viável, além de ser um produto de exportação de grande aceitação no mercado internacional. No entanto, a soja começa a ser cultivada em algumas partes da região Nordeste, sem nenhum estudo de caráter científico sobre as influências das condições ambientais.

Com o intuito de estudar o comportamento da cultura da soja sob as condições climáticas do semi-árido nordestino, foi implantado um experimento de campo, com os objetivos de avaliar os componentes dos balanços de energia e radiação numa cultura de soja irrigada, bem como comparar os resultados obtidos através de medidas diretas, com aqueles decorrentes do emprego de fórmulas empíricas convencionais, visando ajustá-las às condições locais e da cultura.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros estudos relativos ao balanço de energia sobre uma superfície natural, foram desenvolvidos por BOWEN (1926), que determinou a razão entre os fluxos de calor sensível e de calor latente numa superfície de água, em função da pressão de vapor e da temperatura observada sobre a superfície estudada, por ocasião do processo de evaporação. Essa relação foi denominada razão de BOWEN (β). Sua determinação em função da teoria introduzida por SCHMIDT (1925), "Austach Theory", tornou-se bastante simplificada. Quanto a aplicação do método em superfície vegetadas houve uma valiosa contribuição das aproximações da equação do balanço de energia propostas por SVERDRUP (1936) e ALBRECHT (1943), mais tarde confirmadas por RIDER et alii (1951) e SUOMI (1953).

Com o equacionamento do perfil aerodinâmico do vento na camada limite turbulenta inferior da atmosfera, sob condições de neutralidade proposto por PRANDTL (1932) e DEACON (1949), tornou-se possível a determinação de coeficiente de transferência turbulenta em função do vento à superfície. PASQUILL (1949) e RIDER (1954), investigando experimentalmente as relações existentes entre as razões dos coeficientes de transferência turbulenta de momentum, de calor sensível e de vapor d'água, concluíram serem estas muito próximas da unidade, para medições efetuadas um pouco acima da superfície. Isto foi confirmado por DYER (1967), DENMEAD et alii (1970) e WEBB (1970). Segundo PRUITT (1963), as

desigualdades existentes entre esses coeficientes, ocorrem sob condições de atmosfera não-neutra. Isso, concorre para o surgimento de erros em alguns métodos que utilizam a razão de BOWEN, principalmente para grandes valores de β .

Muitos outros pesquisadores, também estudaram a razão de BOWEN e procuraram resolver o balanço de energia através de sua utilização, entre esses, SUTTON (1953), SUOMI e TANNER (1958) GERBER e DECKER (1960), TANNER e PELTON (1960), SLATYER e McLLROY (1961), VISWANADHAM (1972) e ANDRÉ (1973).

Com o surgimento do saldo radiômetro, inicialmente utilizado por GIER e DUNKLE (1951) e dos medidores de fluxo de calor no solo, por DEACON (1950) e MONTEITH (1958), o método do balanço de energia tomou grande impulso, a medida que esses equipamentos foram sendo aperfeiçoados e fabricados em escala comercial.

HALSTEAD e CLAYTON (1958) propuseram parametrizações para fluxos de quantidade de movimento, de calor sensível e vapor d'água, em função dos gradientes de velocidade do vento, temperatura e pressão de vapor, revelando-se de grande precisão nos estudos do balanço de energia. PENMAN e LONG (1976) propuseram uma parametrização para o fluxo de vapor, em função dos gradientes de velocidade do vento e pressão do vapor, como também da velocidade de fricção e de um parâmetro de estabilidade. Por outro lado, os modelos numéricos de simulação na camada limite têm o ba

lanço de energia' como condição de contorno à superfície (ESTOQUE 1963 e SASAMORI, 1970).

AUGUSTINE e SHAW (1964), mostraram que a razão entre o saldo de radiação à superfície do solo e no topo de uma cultura de milho é menor para altas densidade de plantio. Para uma mesma população de plantas, essa razão será tanto maior quanto maior for o espaçamento entre fileiras. FRISTSCHEN (1967), analisando dados obtidos sobre uma vasta variedade de plantas, sugeriu que o saldo de radiação (R_n) pode ser estimado pela equação de regressão entre R_n e a radiação de ondas curtas incidente (R_s^+) e, afirma que a inclusão do termo albedo na equação não melhora sua precisão. DAVIES (1968), usando o método do balanço de energia como padrão para aferir diversos métodos de estimativa de evapotranspiração em grama, verificou ótima concordância com o método de PENMAN corrigido pela função de vento de BUSINGER (1956) em escala horária. DENMEAD (1970), comparando valores de evapotranspiração medidos com lisímetros de precisão e valores obtidos pelo método do balanço de energia em plantio de trigo, não encontrou diferenças superiores a 0,1 mm/hora. Por outro lado, GAY (1971) considera que tais modelos de regressão relacionando R_n e R_s são inadequados se não incluem um fator de correção para a variação da radiação de ondas longas, como uma função de variação da radiação de ondas curtas.

ROUSE et alii (1972), usaram o método do balanço de energia, como padrão para aferir a viabilidade de avaliação diária de evaporação em solos, pelos métodos gravimétrico e de sonda

de neutrons. Segundo MONTENY (1972), o método do balanço de energia quando aplicado à regiões semi-áridas pode indicar a existência de uma fonte adicional de energia, a advecção, que pode aumentar em mais de 100% a evaporação. Este fato foi confirmado por ROSENBERG (1972), que verificou 12 mm diários de evapotranspiração para um saldo de radiação de apenas 6,7 mm no mesmo período.

CHIN CHOY e KANEMASU (1974), determinaram que a evapotranspiração estacional foi cerca de 10% maior em sorgo plantado em fileiras mais esparsas, sugerindo como consequência, que a evapotranspiração em sorgo pode ser reduzida sensivelmente com a diminuição do espaçamento entre fileiras. ALBERTIN e PETERS, 1961 (citados por Owonubi et alii, 1975), observaram trabalhando com sorgo, que num espaçamento de 50 cm entre fileiras, a cultura absorveu 3,1 vezes mais energia do que num de 100 cm. Por outro lado, num espaçamento de 100 cm, a superfície do solo absorveu 1,4 vezes mais energia do que no espaçamento de 50 cm.

MOTA (1976), afirma que o erro padrão de estimativa do saldo de radiação não aumenta expressivamente quando se usam dados de insolação em lugar de dados de radiação solar.

Segundo MARTINEZ-LOZANO et alii (1984), existem cerca de 120 trabalhos baseados na formulação de Ångström e a grande inconstância dos coeficientes a e b é principalmente devido a variabilidade das condições atmosféricas.

SUBRAHMANYAM e KUMAR (1984), afirmam que apenas 2,2% da radiação de ondas curtas incidente sobre a cultura finger millet, foram utilizados na produção de matéria seca desde o

transplântio até a colheita. Em termos de saldo de radiação, isto representou 3,6% do total para o mesmo período.

Segundo JACKSON et alii (1985), através da combinação de dados de sensores remotos com dados de superfície, é possível avaliar fluxos de energia sobre áreas relativamente grandes. CLOTHIER et alii (1986), afirmaram que o saldo de radiação e o fluxo de calor sensível podem ser avaliados por medidas obtidas em sensores remotos combinados com medidas à superfície, bem como o fluxo de calor no solo pode ser estimado a partir do saldo de radiação com razoável precisão.

FONTANA et alii (1987), trabalhando com soja na região subtropical do Brasil observaram um albedo médio de 0,26 para um índice de área foliar variando de 4,7 a 7,7 e um saldo de radiação de ondas longas representando cerca de 30% do saldo de radiação diário e 20% do saldo de radiação de ondas curtas. Estes autores também propuseram equações para estimativas do saldo de radiação com base na radiação global e saldo de radiação de ondas curtas.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Balanço de Radiação à Superfície.

A determinação das perdas de água de superfícies cultivadas é um elemento muito valioso no planejamento das atividades agrícolas. Por outro lado, o saldo de radiação é o principal parâmetro em métodos que estimam a evapotranspiração tais como o método da razão de BOWEN (TANNER, 1960 e FRITSCHEN, 1965) e o método combinado (PENMAN, 1948; FERGUSON, 1952 e SLATYER & McLLROY, 1961). Entretanto, o saldo de radiação raramente é medido de forma rotineira, tendo em vista que o instrumental para essa finalidade, além de ser delicado e exigir habilidade técnica em sua operação, seus custos são elevados. Para solucionar o problema, muitas tentativas têm sido feitas no sentido de encontrar as relações existentes entre o saldo de radiação e a radiação de ondas curtas através de funções semi-empíricas (FRITSCHEN, 1967; LINACRE, 1968 e FITZPATRICK & STERN, 1973).

3.1.1. Equação do Balanço de Radiação à Superfície.

A soma algébrica dos fluxos de radiação à superfície pode ser escrita na seguinte forma:

$$R_n = R_{S\downarrow} (1 - \alpha) + L_N \quad (3.1)$$

onde: $R_{S\downarrow}$ é a radiação de ondas curtas incidente, α a reflectiv

dade da superfície e L_N o saldo da radiação de ondas longas.

Por aproximação linear pode se obter a seguinte formulação empírica para a eq. (3.1):

$$\begin{aligned}
 R_n &= R_{S\downarrow}(1-\alpha) + L_N & L_N &= R_n - R_{S\downarrow}(1-\alpha) \\
 R_n &= a(1-\alpha)R_{S\downarrow} + b & L_N &= a(1-\alpha)R_{S\downarrow} + b - R_{S\downarrow}(1-\alpha) \\
 & & L_N &= (1-\alpha)R_{S\downarrow}(a-1) + b
 \end{aligned}
 \tag{3.2}$$

onde "b" é uma constante empírica e "a" o coeficiente de regressão.

Da igualdade entre as eqs. (3.1) e (3.2) obtem-se que:

$$L_N = \frac{b}{a} - R_n \left(\frac{1-a}{a} \right) \tag{3.3}$$

$$\therefore - \frac{d L_N}{d R_n} = \frac{1-a}{a} = B$$

onde B é o coeficiente térmico ou de aquecimento.

Assumindo ainda que $L_N = L_{No}$, quando $R_{S\downarrow} = 0$, resulta:

$$R_n = R_{S\downarrow} \left(\frac{1-\alpha}{1+B} \right) + L_{No} \tag{3.4}$$

onde L_{No} representa o saldo de radiação de ondas longas durante a noite.

MONTEITH & SZEICZ (1961), ao derivarem a eq. (3.4) sugeriram que um aumento no saldo de radiação está associado a um acréscimo da temperatura à superfície e que o saldo de radiação

de ondas longas está intimamente relacionado com o coeficiente de aquecimento (B). Deste modo, assume-se a hipótese de que a radiação de ondas longas proveniente da atmosfera é constante em dias de céu claro.

O conceito de coeficiente de aquecimento tem sido objeto de consideráveis críticas. STANHILL et alii (1966), afirmaram que a radiação de ondas longas proveniente da atmosfera não foi constante durante dias de céu claro em Israel e estabelecem que B define interações entre a superfície e a atmosfera e não se refere exclusivamente à superfície.

3.1.2. Radiação de Ondas Curtas Incidente.

A quantidade de radiação solar recebida pela superfície da Terra é de considerável importância para a agricultura. As plantas respondem instantaneamente a radiação solar incidente e valores altos de radiação podem ser prejudiciais as plantas. A radiação incidente, integrada para períodos longos, pode influenciar cumulativamente na utilização de água, armazenamento de açúcar e crescimento das plantas, bem como influencia diretamente a temperatura das plantas que por sua vez governa as taxas de processos bioquímicos.

Do total de radiação que chega à superfície, uma parte é imediatamente refletida, outra é transmitida e o resto é absorvido pelas plantas. A quantidade de radiação absorvida, transmitida e refletida por uma superfície vegetada difere dentro do espec

tro solar. Em geral, as plantas absorvem cerca de 50% da radiação de ondas curtas incidente e 97% da radiação de ondas longas proveniente da atmosfera (GATES, 1965). As folhas das plantas absorvem eficientemente nos comprimentos de onda azul e vermelho e fracamente no infra-vermelho próximo.

3.1.3. Reflectividade da Radiação de Ondas Curtas.

O coeficiente de reflexão de ondas curtas (albedo) é ^{importante} essencial na determinação do balanço de radiação à superfície. O albedo de uma superfície vegetada varia com a elevação do Sol, tipo de vegetação, condição de umidade do ar, estado de umidade e tipo de solo e com a quantidade e tipo de cobertura de nuvens.

O albedo decresce com a elevação do Sol durante o dia, geralmente alcançando valores máximos no nascer e no pôr do Sol, enquanto que os valores mínimos ocorrem próximo ao meio dia (DAVIES & BUTTIMOR, 1969; GRAHAM & KING, 1961; MONTEITH & SZEICZ, 1961; RIJKS, 1967 e PROCTOR et alii, 1972). A assimetria diurna de reflectividade foi observada por RIJKS (1967), com os valores ao pôr do Sol, menores que aqueles ao amanhecer, considerando pequena elevação. Sobre superfícies vegetadas esta diferença é explicada em função de que ocorrem alterações na postura das folhas, causadas pela redução do conteúdo de água nas mesmas. Entretanto, outros pesquisadores, encontraram valores de reflectividade de mais elevadas ao entardecer do que ao amanhecer (PROCTOR et alii, 1972); NKEMDIRIM, 1973 e LOMAS et alii, 1974).

A reflectividade de superfície vegetadas varia com o comprimento de onda da radiação solar. Grandes valores de re flectância têm sido observado para comprimentos de ondas superio res a $0,74\mu$, enquanto valores muito pequenos são observados para a parte visível do espectro. A absorptância, transmitância e re flectância espectral para muitas espécies de plantas é descrita por GATES (1965). A dependência do albedo com o comprimento de onda é também descrita, entre outros pesquisadores por ALLEN et alii (1964), os quais afirmam que 3,5% do total de radiação solar incidente sobre uma cultura de milho foi refletida como radiação visível e 13,5% como radiação infra-vermelha próximo.

Valores de albedo para várias culturas são dados por FRITSCHEN (1967); DAVIES & BUTTIMOR (1969) e NKEMDIRIM (1973).

3.1.4. Radiação de Ondas Longas.

Para propósitos práticos, é conveniente dividir o re gime de radiação do sistema Terra-Atmosfera em duas partes: ra diação de ondas curtas e radiação de ondas longas. Isto é possível porque há grande diferença de temperatura entre a Ter ra e o Sol. Devido a altíssima temperatura do Sol (aproximadamen te 6000°K), cerca de 99% da energia solar está compreendida em com primento de onda menor que 4μ . Por outro lado, a energia ra diante emitida pela atmosfera e superfície da Terra (temperatura geralmente inferior a 300°K), normalmente está situada na região de 4 a 100μ .

A superfície da Terra pode ser considerada aproximadamente como um corpo negro com uma temperatura em torno de 300°K e intensidade máxima de emissão de radiação no comprimento de onda de aproximadamente 10μ . Quanto a emissão e absorção de radiação pela superfície da Terra e sua atmosfera, a parte relativa ao vapor d'água é decisiva. Os elementos responsáveis pela absorção e emissão da radiação de ondas longas na atmosfera são: o vapor d'água, dióxido de carbono e ozônio, porém a complexibilidade do problema ocorre em grande parte, devido ao fato de que o vapor d'água absorve seletivamente em todo o espectro.

A reconhecida significância da radiação de ondas longas é peculiar em meteorologia, na qual os efeitos dos fluxos de radiação de ondas longas para a atmosfera e proveniente da mesma, são conhecidos largamente através de cálculos e não por observação. Assim, as medidas de radiação de ondas longas à superfície da Terra não são numerosas. Muitas cartas de radiação tem sido desenvolvidas para a estimativa de radiação de ondas longas. Dentre essas destacam-se: MUGGE & MOLLER (1932); ELSASSER (1942); ROBINSON (1950) e YAMAMATO & ONISHI (1953).

Em particular, muitas tentativas têm sido feitas no sentido de avaliar a radiação de ondas longas à superfície em dias de céu claro. ÅNGSTRÖM (1915, 1936) e BRUNT (1932) sugeriram fórmulas baseadas na temperatura do ar e na pressão do vapor d'água. IDSO & JACKSON (1969) e SWINBANK (1963) derivaram fórmulas que só dependem da temperatura.

A radiação de ondas longas emitida por uma superfície é geralmente obtida pela Lei de Stefan-Boltzman ($\epsilon \sigma T_s^4$) onde ϵ é a emissividade da superfície. A emissividade da superfície da Terra é muito próxima da unidade e frequentemente a temperatura do ar é usada no lugar da temperatura da superfície, cuja medida envolve certas dificuldades.

A radiação de ondas longas proveniente da atmosfera em dias de céu claro, obtida pelo uso de fórmulas, tais como aquelas mencionadas anteriormente, podem ser usadas para estimar a radiação de ondas longas em dias com nuvens, para tanto deve ser incluído um fator de correção para nebulosidade (FITZPATRICK & STERN, 1965 e RIJKS, 1968).

3.2. Equação do Balanço de Energia.

Qualquer estudo envolvendo um sistema, para que haja eficiência se faz necessário uma adequada caracterização do mesmo, visto que em algumas situações a existência de complexibilidade requer uma análise bem aprofundada de todos os elementos envolvidos. No caso específico do balanço de energia é muito comum adotar-se para estudá-lo um volume de controle, idealizado especificamente quando se trata de superfícies contendo algum tipo de vegetação, como sendo um volume hipotético, mais ou mesmo localizado no centro da área vegetada com determinada altura z , comprimento x e largura y , logicamente contendo plantas e ar, sendo denominada de meio, a parte externa que interage com esse siste

ma. As principais trocas de energia que ocorrem entre o sistema e o meio, são caracterizadas na figura 3.1.

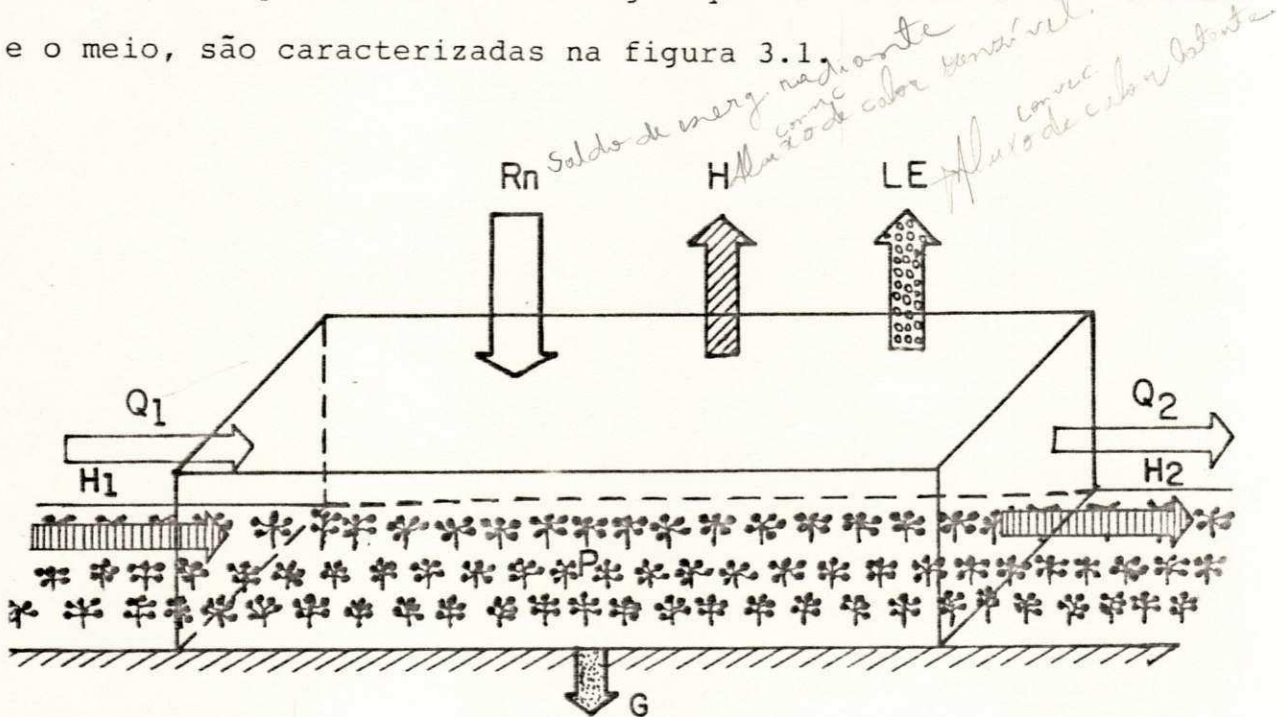


Figura - 3.1 - Esquemática dos fluxos de energia num volume de controle.

onde:

- R_n é o saldo de energia radiante;
- H é o fluxo convectivo de calor sensível;
- LE é o fluxo convectivo de calor latente;
- G é o fluxo de calor no solo;
- Q_1 e Q_2 são os fluxos advectivos de calor latente;
- H_1 e H_2 são os fluxos advectivos de calor sensível;
- P é a energia usada no processo fotossintético.

Considerando que os fluxos advectivos (Q_1 e Q_2) e (H_1 e H_2) são desprezíveis, quando são efetuadas medidas a baixa altura e dentro de uma área tampão suficientemente grande para que os gra

dientes horizontais de temperatura e umidade sejam absorvidos, a equação do balanço de energia pode então ser escrita na forma:

$$R_n = LE + H + G + P \quad (3.5)$$

3.2.1. Fluxo de Calor Sensível.

A energia solar absorvida pela superfície da Terra é convertida em outras formas de energia, provocando muitas variações espaciais e temporais nos parâmetros meteorológicos. Estas variações ocorrem mais acentuadamente próximo a superfície da Terra, sendo de fundamental importância seu conhecimento em micrometeorologia.

O fluxo de calor sensível representa o transporte vertical de calor, devido a turbulência próximo a superfície e concorre para um maior ou menor aquecimento e resfriamento da atmosfera. O conhecimento da transferência de calor sensível para a atmosfera é usado no prognóstico de temperatura máxima. A temperatura do solo e das camadas mais baixas da atmosfera é importante nos problemas relacionados com a agricultura.

3.2.2. Fluxo de Calor Latente.

A relação entre evaporação e precipitação é o maior fator determinante do clima, das características da vegetação natural e do solo de uma região. A maior parte do saldo de radiação

à superfície da Terra é usado no processo de evaporação do solo, de superfícies líquidas e transpiração das plantas.

Em solos úmidos e/ou superfície vegetadas grande parte da energia disponível é transferida para a atmosfera em forma de calor latente. Quando o solo é nú, suas características físicas, altura do lençol freático, etc, controlam a taxa de evaporação, enquanto numa superfície vegetada fatores ligados a planta, também exercem alguma influência na taxa de perda d'água para a atmosfera. Muitos métodos que estimam as perdas d'água à superfície são baseadas nos métodos aerodinâmicos e do Balanço de Energia.

Os fluxos verticais na camada limite superficial, devido a difusão turbulenta tais como: fluxo de quantidade de movimento, fluxo de calor sensível e fluxo de vapor d'água são assumidos serem proporcionais aos gradientes verticais da velocidade do vento, temperatura e umidade específica, respectivamente. As seguintes equações são relevantes:

$$\tau = \rho K_M \frac{d\bar{u}}{dz} \quad \text{fluxo de quantidade de movimento} \quad (3.6)$$

$$H = - \rho c_p K_H \frac{d\bar{\theta}}{dz} \quad \text{fluxo de calor sensível} \quad (3.7)$$

$$E = - \rho K_W \frac{d\bar{q}}{dz} \quad \text{fluxo de vapor d'água} \quad (3.8)$$

onde: ρ é a densidade do ar, c_p é o calor específico do ar, K_M , K_H e K_W são os coeficientes de transferência turbulenta para quan

tidade de movimento, calor sensível e vapor d'água e $\frac{d\bar{u}}{dz}$, $\frac{d\bar{\theta}}{dz}$ e $\frac{d\bar{q}}{dz}$, são os gradientes médios da velocidade horizontal do vento, temperatura potencial e umidade específica, respectivamente.

Os gradientes verticais podem ser medidos facilmente, embora a avaliação direta de K_M , K_H e K_W seja bastante difícil.

3.2.3. Energia Usada no Processo Fotossintético.

A energia utilizada no processo fotossintético, pode ser contabilizada ao longo do desenvolvimento da cultura, multiplicando-se o índice de produção de matéria seca (g/cm^2) no período pela constante energética apropriada à cultura, necessária para produzir uma grama de matéria seca. Entretanto, em muitos casos a energia usada no processo fotossintético é negligenciada. Com isso a equação do balanço de energia pode ser escrita na seguinte forma:

$$R_n = LE + H + G \quad (3.9)$$

A razão entre o fluxo de calor sensível e o fluxo de calor latente foi denominada de razão de BOWEN (BOWEN, 1926), dada por:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{-\rho c_p K_H \frac{d\bar{\theta}}{dz}}{-\rho L K_W \frac{d\bar{q}}{dz}} = \frac{c_p K_H}{L K_W} \frac{d\bar{\theta}}{d\bar{q}} \quad (3.10)$$

onde: $\Delta\theta$ e Δq , são as diferenças de temperatura potencial e de umidade específica entre dois níveis Z_1 e Z_2 . Para condições de estabilidade atmosférica próxima a neutralidade, $K_H = H_W$, então a equação (3.10) resume-se a:

$$\beta = \frac{c_p}{L} \frac{\overline{\Delta\theta}}{\overline{\Delta q}} \quad (3.11)$$

Para corrigir os efeitos de instabilidade atmosférica um caminho, é recorrer as relações propostas por DYER (1974) que tem como base o número RICHARDSON.

Obtida a razão de BOWEN β , a evaporação é então dada por:

$$E = \frac{R_n - G}{L(1 + \beta)} \quad (3.12)$$

Esse método é chamado de Método do Balanço de Energia e tem sido usada por um grande número de investigadores para estimar a perda d'água da superfície para a atmosfera (SUOMI e TANNER, 1958; FRITSCHEN, 1966; MUKAMMAL et alii, 1966; STORR et alii, 1970 e NKEMDIRIM e YAMASHITA, 1972).

3.2.4. Fluxo de Calor no solo.

Durante o período diurno, a superfície do solo é aquecida pela radiação com uma temperatura mais elevada à superfície, provocando uma condução de calor para as camadas mais profundas.

das. Durante a noite a temperatura à superfície, sendo menor que a temperatura das camadas inferiores, o fluxo de calor ocorrerá no sentido oposto, das camadas inferiores para a superfície.

Sobre condições de tempo firme, os fluxos para dentro do solo durante o dia e para fora durante a noite, são aproximadamente iguais. Em muitas investigações envolvendo períodos grandes, maiores que um dia, o fluxo de calor no solo é considerado muito pequeno sendo, na maioria das vezes, negligenciado.

As camadas superficiais do solo atuam como um reservatório de calor, absorvendo parte do excesso de calor ao meio-dia e no verão, enquanto durante a noite e no inverno devolve para a atmosfera. Este armazenamento de calor no solo favorece a diminuição da variação de temperatura na atmosfera e atua como um estabilizador. O fluxo de calor no solo pode ser medido diretamente por meio de placas para medir fluxo colocadas no interior do solo.

4 - MATERIAIS E MÉTODOS.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Experimento de Campo.

4.1.1.1. Localização:

O experimento de campo foi desenvolvido numa área de aproximadamente 1.100 m², ao lado da Estação Meteorológica do Campo Experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA), da EMBRAPA, no Perímetro Irrigado de Mandacaru, na cidade de Juazeiro-Ba (Lat. 09°24'S, Long. 40°26'W e Alt. 375 m), na região semi-árida do médio São Francisco (Fig. 4.1).

4.1.1.2. Cultura:

A cultura implantada no experimento foi a soja (*Glycine max* Merrill), cultivar tropical. O plantio foi efetuado no dia 10 de setembro de 1987, após o terreno ter sido preparado em sistema de sulcos no sentido leste-oeste, obedecendo um espaçamento de 0,6 m entre fileiras e uma semeadura de aproximadamente 25 grãos por metro linear (Ilustração - 4.a). O solo da área é classificado como vertissolo.



Figura - 4.1 - Localização do experimento.

4.1.1.3. Instalação:

A instalação do experimento no local acima descrito, prendeu-se ao fato de que, além de se poder utilizar 2 (dois) evapotranspirômetros de lençol freático constante com 5,25 m² de área, instalados a mais de 10 anos poder-se-ia obter dados de todos os parâmetros observados na estação meteorológica, como mostra a figura 4.2.

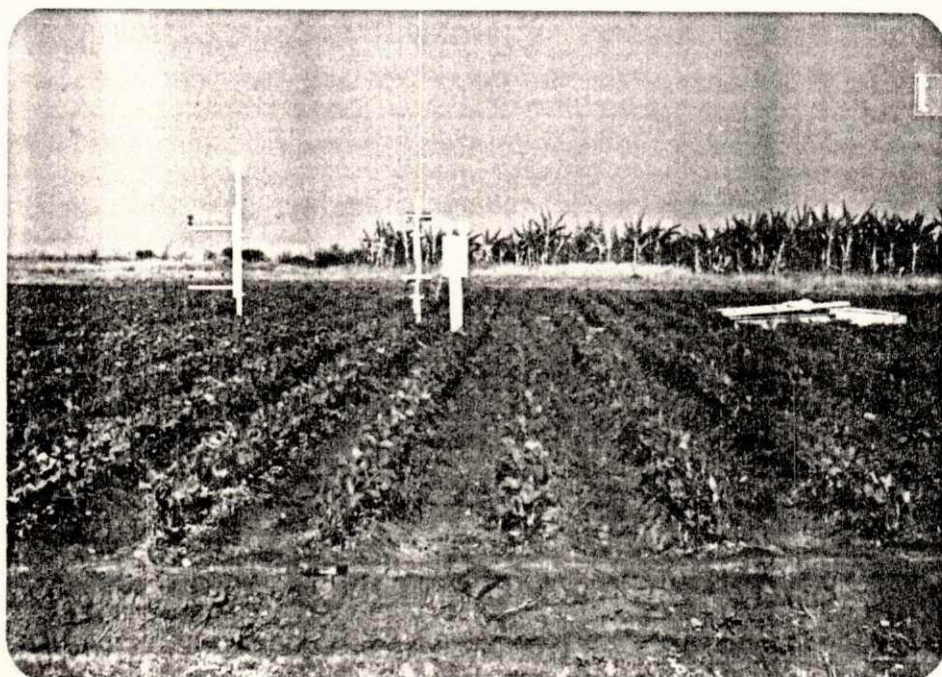


Ilustração - 4.a - Foto mostrando o espaçamento entre fileiras, localização dos evapotranspirômetros e as torres com anemômetros e psicrômetros, 25 dias após a germinação.

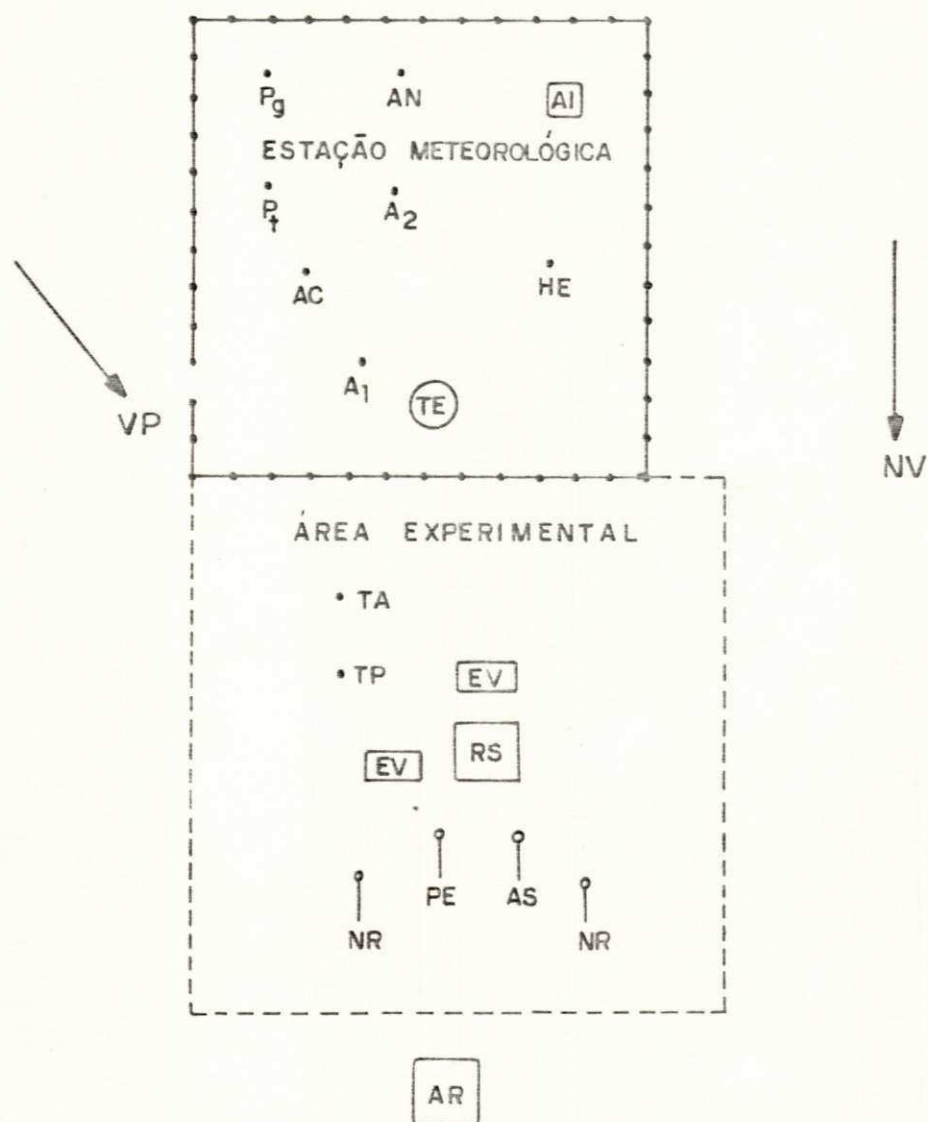


Figura - 4.2 - Distribuição dos instrumentos na área experimental e na estação meteorológica.

LEGENDA : P_q - Pluviógrafo; AN - Anemógrafo; AI - Abrigo de instrumentos; P_t - Pluviômetro; A₂ - Anemômetro a 2m; AC - Actinôgrafo; HE - Heliôgrafo; A₁ - Anemômetro a 0,5m; TE - Tanque classe "A"; NV - Norte verdadeiro; VP - Vento predominante; TA - Torre com anemômetros; TP - Torre com psicrômetros; EV - Evapotranspirômetro; RS - Reservatório de suprimento; NR - Net radiometer; PE - Piranômetro Eppley; AS - Albedômetro; e AR - Abrigo de registradores.

4.1.1.4. Instrumental Utilizado.

a) Na Estação Meteorológica:

- Actinógrafo de radiação global;
- Actinógrafo de radiação difusa;
- Heliógrafo;
- Termômetros de máxima e mínima;
- Psicrômetro ventilado;
- Termohigrógrafo;
- Pluviômetro;
- Pluviógrafo;
- Anemógrafo;
- Anemômetro a 0,5 m de altura;
- Atmômetro de piche;
- Tanque classe "A";
- Termômetro de solo a 2 cm de profundidade.

b) Na Área Experimental:

- Dois evapotranspirômetros de lençol freático;
- Dois saldo radiômetros (net radiometers);
- Albedômetro;
- Piranômetro Eppley;

- Placas para medir fluxo de calor no solo;
- Registradores Speedomax;
- Integrador de radiação;
- Milivoltímetros digitais;
- Psicrômetros instalados a 50 e 130 cm acima da superfície da cultura;
- Anemômetros de conchas instalados a 50 e 130 cm acima da superfície da cultura;
- Termômetro infravermelho.

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. Sistemática de Observações.

Durante o período de 18.09.87 a 20.12.87, foram efetuadas medições horárias de 06:00 às 18:00 hs dos seguintes parâmetros: temperaturas do ar; do solo e da superfície foliar; umidade do ar; velocidade do vento; evapotranspiração; radiação solar incidente e refletida; saldo de radiação; fluxo de calor no solo e pressão atmosférica. Foram ainda registradas continuamente do nascer ao pôr do Sol, as radiações incidente e refletida, a insolação e o saldo de radiação. A nebulosidade e os tipos de nuvens, também foram avaliados horariamente todos os dias. Como parâmetros fisiológicos, foram feitas medições da altura da cultura a

cada três dias e semanalmente determinados o índice de área foliar, peso de matéria seca e teor de umidade do solo.

4.2.2. Tratos Culturais.

A cultura durante o período experimental, esteve sempre livre da ação de ervas daninhas, devido as capinagens efetuadas periodicamente a medida da necessidade, visando proporcionar um bom desenvolvimento a cultura. O controle de doenças e pragas, além das necessidades de adubação, tiveram acompanhamento de técnicos do CPATSA, para que não se tornassem fatores limitantes ao pleno desenvolvimento da cultura. Para tanto, foram efetuadas três pulverizações e duas adubações (Quadro IV.1).

QUADRO - IV.1

Pulverizações e adubações no decorrer do experimento.

DATA	OCORRÊNCIA
26/09/87	. Pulverização contra lagarta a base de carvin-85 PM
28/09/87	. Adubação com NPK a razão de 06-24-12, numa proporção de 500 Kg/ha.
16/10/87	. Adubação com NPK a razão de 10-10-10, numa proporção de 250 Kg/ha.
20/10/87	. Pulverização contra lagarta e manchas na folha gem a base de carvin mais Pepronon.
19/11/87	. Pulverização contra lagarta e vaquinha a base de carvin mais Pepronon.

Durante o período experimental foram efetuadas 10 irrigações, obedecendo a intervalos variando de 7 a 10 dias entre uma e outra irrigação de acordo com as necessidades hídricas da cultura. Mesmo nos dias de irrigação não deixaram de ser feitas observações, já que foram construídas passarelas de tábua dando acesso aos instrumentos.

4.2.3. Componentes do Balanço de Radiação de Ondas Curtas.

4.2.3.1. Radiação de Ondas Curtas Incidente (R_S^\downarrow).

a) Medição de R_S^\downarrow .

A radiação de ondas curtas incidente (R_S^\downarrow) sobre a cultura foi medida com um piranômetro Eppley e registrada continuamente por meio de um registrador speedomax todos os dias ao longo do experimento, com exceção daqueles dias em que houve precipitação. Para obtenção dos valores diários de R_S^\downarrow , determinou-se as áreas registradas nos diagramas para cada dia com o auxílio de um planímetro, em seguida empregou-se a seguinte expressão:

$$R_S^\downarrow = A \cdot K \cdot F_C \quad (4.1)$$

onde: R_S^\downarrow é a radiação de ondas curtas incidente em cal/cm².dia;

A é a área registrada pelo speedomax em cm^2 ; K é a constante do instrumento e F_C é o fator de correção devido a declinação do Sol.

Também foram efetuadas leituras horárias de $R_S \downarrow$ diariamente das 06:00 às 18:00 hs, com o objetivo de estimar $R_S \downarrow$ para cada dia e compará-los com os valores de $R_S \downarrow$ obtidos continuamente conforme foi descrito anteriormente.

b) Estimativa de $R_S \downarrow$.

A radiação de ondas curtas incidente à superfície foi estimada com base na razão de insolação e na radiação no topo da atmosfera, na forma proposta por PRESCOTT (1940):

$$R_S \downarrow = (a + b \frac{n}{N}) Q_S \quad (4.2)$$

onde: Q_S é a radiação solar no topo da atmosfera; n é a insolação real (obtida no heliógrafo); N é a insolação máxima teórica; "a" e "b" são os coeficientes empíricos, os quais foram determinados para cada mês e para todo período experimental. Como os valores de Q_S e N são avaliados em função da latitude e da declinação do Sol, empregou-se para seus respectivos cálculos as seguintes expressões:

$$Q_S = \frac{1440}{\pi} \cdot S_0 \cdot \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 (H \text{ sen } \phi \cdot \text{sen } \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen} H) \quad (4.3)$$

e

$$N = \frac{2}{15} \text{ arc.cos}(-\text{tg } \phi \cdot \text{tg } \delta) + 0,83^\circ \quad (4.4)$$

onde:

\bar{d} - é a distância média Terra-Sol;

d - é a distância Terra-Sol no dia considerado;

S_0 - é a constante solar;

H - é o ângulo horário (compreendido entre o nascer e o meio dia), H no primeiro termo à direita é expresso em radianos ($180^\circ = \pi \text{ rad.}$);

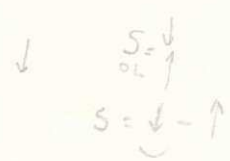
ϕ - é a latitude;

δ - é a declinação do Sol.



4.2.3.2. Radiação de Ondas Curtas Refletida (R_S^\uparrow).

A radiação de ondas curtas refletida pela superfície da cultura, foi medida com um albedômetro e registrada continuamente por meio de um registrador speedomax durante o experimento, exceto nos dias em que houve precipitação. Os valores diários de R_S^\uparrow , a exemplo do que ocorreu com R_S^\downarrow , também foram calculados com base na eq. 4.1, levando-se em consideração as áreas resultantes da planimetria efetuada para cada dia, conforme os registros no diagrama de reflectância.



4.2.3.3. Coeficiente de Reflexão.

Diferentes métodos foram utilizados para obtenção do coeficiente de reflexão da cultura (α):

- a) Determinação de α para Qualquer Condição de Nebulosidade.

Neste método o total diário de radiação de ondas curtas refletida ($R_S \uparrow$) é dividido pelo total diário de radiação de ondas curtas incidente ($R_S \downarrow$), (MONTEITH & SZEICZ, 1961; FRITZCHEN, 1967; IDSO et alii, 1969 e SUBRAHMANYAN e KUMAR, 1984), ou seja:

$$\alpha = \frac{R_S \uparrow}{R_S \downarrow} \quad (4.5)$$

- b) Determinação de α , para Condições de Céu Claro.

Neste método a razão entre $R_S \uparrow$ e $R_S \downarrow$, é computada levando-se em consideração os valores horários observados apenas naqueles dias de céu claro, com os quais foram obtidos valores médios diários de α para estes mesmos dias.

- c) Determinação de α com Base na Dependência do Ângulo zenital (Z), para o Período em que a Cultura Cobriu Completamente o Solo.

Por este método, o albedo médio para um determinado dia é obtido pela equação resultante da regressão linear entre a razão $R_S \uparrow / R_S \downarrow$ e o ângulo zenital médio do Sol (\bar{Z}), com base em leituras horárias de $R_S \uparrow$, $R_S \downarrow$ e Z , efetuadas de 6 às 18 horas nos dias de céu claro durante o período de completa cobertura do solo.

(STANHILL et alii, 1966; SUBRAHMAYAM & KUMAR, 1984 e SANSIGOLO & FARIA 1988).

4.2.4. Componentes do Balanço de Radiação de Ondas Longas.

4.2.4.1. Radiação de Ondas Longas Proveniente da Atmosfera (R_L^\downarrow).

a) Determinação de R_L^\downarrow .

A radiação de ondas longas proveniente da atmosfera (R_L^\downarrow), foi determinada com base na seguinte equação em cal/cm².12 horas:

$$R_L^\downarrow = R_n - (R_S^\downarrow - R_S^\uparrow) + \sigma \bar{T}_s^4 \quad (4.6)$$

onde: o termo R_n representa o saldo de radiação; σ é a constante de Stefan-Boltzmann; \bar{T}_s é a temperatura absoluta à superfície da cultura.

b) Estimativa de R_L^\downarrow .

Para comparar-se os resultados de R_L^\downarrow obtidos com a eq. (4.6) para os dias de céu claro, foram utilizadas as seguintes equações na estimativa de R_L^\downarrow :

b.1. Equação de IDSO & JACKSON (1969).

$$R_L^\downarrow = \sigma T_{ac}^4 (1 - c \cdot e^{-d(273 - \bar{T}_{ac})^2}) \quad (4.7)$$

onde: $c = 0,261$ e $d = 7,77 \times 10^{-4}$ são constantes empíricas; \bar{T}_{ac} a temperatura absoluta do ar próximo a superfície da cultura.

b.2. Equação de SWINBANK (1963).

$$R_L^\downarrow = \theta T_{ac}^6 \quad (4.8)$$

onde: $\theta = 7,612 \times 10^{-12} \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{min}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-6}$, é a constante proposta por SWINBANK.

b.3. Equação de BRUNT (1932).

$$R_L^\downarrow = \sigma T_{ac}^4 (0,44 + 0,079\sqrt{e}) \quad (4.9)$$

onde: e é a pressão parcial do vapor d'água em mb.

b.3.1. Equação de BRUNT adaptada, levando-se em consideração que a pressão parcial do vapor d'água foi calculada com base nas temperaturas do ar (T_{ac}) e de bulbo úmido (T_{wc}), observadas sobre a cultura.

$$R_L^\downarrow = \sigma T_{ac}^4 (a_c + b_c \sqrt{e}) \quad (4.10)$$

b.3.2. Equação de BRUNT adaptada, levando-se em consideração que a pressão do vapor d'água foi calculada com base nas temperaturas do ar (T_{ae}) e de bulbo úmido (T_{we}), observadas no abrigo da estação meteorológica localizada ao lado da área experimental.

$$R_L \downarrow = \sigma T_{ae}^4 (a_e + b_e \sqrt{e}) \quad (4.11)$$

4.2.5. Saldo de Radiação (R_n).

a. Medida de R_n .

Para medição de R_n foram utilizados dois saldo radiômetros (net radiometers) ligados a um integrador.

b. Estimativa de R_n .

Algumas equações foram empregadas na estimativa de R_n , visando comparar os resultados obtidos com aqueles observados:

b.1. Equação de LINACRE (1968).

$$(A) R_n = (1 - \alpha) R_s \downarrow - 16 \times 10^{-4} \left(0,2 + 0,8 \frac{n}{N} \right) \left(100 - \frac{50 \times R_s \downarrow}{T_{ac}} \right) \quad (4.12)$$

Segundo LINACRE (1968), efetuou-se a substituição

da temperatura do ar próximo a superfície (T_{ac}) na eq. 4.12, por $50 \times R_s \downarrow$, resultando:

$$(B) R_n = R_s \downarrow (1,016 - \alpha + 0,064 \frac{n}{N}) (0,128 \frac{n}{N} + 0,032) \quad (4.13)$$

Para simplificar a eq. (4.13), utilizou-se a equação de Ångström modificada, empregando-se os coeficientes \underline{c} e \underline{d} determinados para o local no período do experimento, obtendo-se:

$$(C) R_n = (c + d \frac{n}{N}) Q_s (1,016 - \alpha + 0,064 \frac{n}{N}) - (0,128 \frac{n}{N} + 0,032) \quad (4.14)$$

Ainda, considerando que após a cultura cobrir completamente o solo, o albedo torna-se constante e substituindo $\frac{n}{N}$ pela média para o período do experimento, a eq. (4.14) assume a seguinte fórmula:

$$(D) R_n = [c + d (\frac{\bar{n}}{N})] Q_s [1,016 - \bar{\alpha} + 0,064 (\frac{\bar{n}}{N})] - [0,128 (\frac{\bar{n}}{N}) + 0,032] \quad (4.15)$$

Por último, utilizando os valores médios: $c = 0,25$; $d = 0,50$; $\bar{\alpha} = 0,26$ e $(\frac{\bar{n}}{N}) = 0,5$, propostos por LINACRE (1968), com base em observações efetuadas em diferentes locais, a eq. (4.14), resulta na seguinte expressão:

$$(E) R_n = (1 + 2 \frac{n}{N}) (0,2 Q_s - 0,064) + 0,032 \quad (4.16)$$

b.2. Equação de PENMAN (1948).

A equação de Penman na sua forma original

$$R_n = R_s \downarrow (1 - \alpha) - \sigma T_a^4 (0,56 - 0,079 \sqrt{e}) (0,1 + 0,9 \frac{n}{N}), \quad (4.17)$$

foi adaptada as condições locais e da cultura, obedecendo aos seguintes critérios:

1. ajustamento dos coeficientes de correção da nebulosidade, com a pressão parcial do vapor d'água (e) determinada a partir das temperaturas do ar (T_{ac}) e de bulbo úmido (T_{wc}), observadas sobre a cultura;
2. ajustamento dos coeficientes de correção da nebulosidade, com a pressão parcial do vapor d'água (e) obtida com as temperaturas do ar (T_{ae}) e de bulbo úmido (T_{we}), observadas na estação meteorológica;
3. ajustamento dos coeficientes do termo referente ao balanço de radiação de ondas longas a céu claro, com a pressão parcial do vapor d'água (e) determinada a partir das temperaturas do ar (T_{ac}) e de bulbo úmido (T_{wc}), observadas sobre a cultura;
4. ajustamento dos coeficientes do termo referente ao balanço de radiação de ondas longas a céu claro, com a pressão parcial do

vapor d'água (e) determinada a partir das temperaturas do ar (T_{ac}) e de bulbo úmido (T_{we}), observadas na estação meteorológica;

- . reajustamentos dos coeficientes de correção da nebulosidade para os critérios 1 e 2, utilizando os coeficientes do termo do balanço de radiação de ondas longas descritos nos critérios 3 e 4.

A determinação da pressão parcial do vapor d'água (e), foi efetuada através da equação de Ferrel:

$$e(t_a) = e_s(t_w) - 0,00066(1 + 0,00115t_w)(t_a - t_w)P \quad (4.18)$$

O termo da pressão de saturação do vapor d'água a temperatura úmida é derivado da equação de Tetens, que assume a seguinte expressão:

$$e_s(t_w) = 6,1078 \text{ Exp}(17,269 t_w / 237,3 + t_w) \quad (4.19)$$

4.2.6. Relação entre o R_n e $R_s^\downarrow(1 - \alpha)$ e, R_n e R_s^\downarrow .

Com os valores instantâneos horários de R_n , R_s^\downarrow e α , foram determinadas as regressões lineares entre o saldo de radiação (R_n) e o saldo de radiação de ondas curtas [$R_s^\downarrow(1 - \alpha)$] e do saldo de radiação (R_n) e a radiação de ondas curtas incidente (R_s^\downarrow).

4.2.7. Balanço de Radiação.

Para análise do comportamento diurno do balanço de radiação em alguns dias especificamente sob diferentes condições de nebulosidade, foram determinados os valores horários de cada um componente. Por outro lado, calculou-se o saldo de radiação diária pela equação adaptada as condições da cultura, já que este parâmetro foi medido apenas para o período diurno.

4.2.8. Componentes do Balanço de Energia.

4.2.8.1. Fluxo de Calor Latente (LE).

O fluxo de calor latente foi obtido a partir das medidas de evapotranspiração efetuadas nos evapotranspirômetros de lençol freático constante (já descritos), por meio dos quais determinou-se as perdas diárias de água da cultura durante o período experimental.

4.2.8.2. Fluxo de Calor no Solo (G).

O fluxo diário de calor no solo, foi determinado com base em valores horários, obtidos com placas medidoras de fluxo colocadas no solo, nas profundidades de 1; 10 e 20 cm.

4.2.8.3. Fluxo de Calor Sensível (H).

O fluxo de calor sensível foi determinado, utilizando-se a equação do balanço de energia, tendo em vista, que os demais componentes foram medidos.

4.2.8.4. Energia Utilizada no Processo Fotossintético.

A energia utilizada pela cultura da soja na produção de matéria seca, foi determinada multiplicando-se por 4.000 cal/g o índice de produção de matéria seca. Este índice foi obtido semanalmente com o sacrifício de 5 plantas da população vegetal do experimento, que após arrancadas eram imediatamente pesadas com balança de alta precisão (determinação do peso da matéria verde), em seguida eram coladas em estufa a 105°C, de onde após 24 horas eram retiradas completamente secas para novamente serem pesadas (determinação do peso da matéria seca).

4.2.8.5. Balanço de Energia.

Para analisar o balanço de energia foram inicialmente calculados os valores horários de seus componentes, para os dias anteriores e posteriores ao dia da irrigação em quatro oportunidades representativas das seguintes situações: pouco desenvolvimento vegetativo; razoável desenvolvimento vegetativo; período de floração e período de maturação. Posteriormente, com base em valores médios diários, foi efetuado o balanço de energia

para os períodos semanais do início ao término do experimento, considerando desprezível o fluxo de calor no solo. Também foram determinados com base nos valores médios diários para períodos semanais os percentuais de energia utilizado na produção de matéria seca, bem como as razões G/R_s^\dagger e G/R_n para o período diurno.

4.2.8.6. Equações Utilizadas na Determinação de Parâmetros Estatísticos:

a) Erro padrão de estimativa:

$$\varepsilon_{yx} = \left[\frac{(X_o - X_e)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (4.20)$$

b) Desvio padrão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_o - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (4.21)$$

c) Erro percentual (relativo):

$$E(\%) = \left(\frac{X_e - X_o}{X_o} \right) \cdot 100 \quad (4.22)$$

Nas eqs (4.20); (4.21) e 4.22): X_o é o valor observado, \bar{X} é o valor médio, X_e é o valor estimado e N é o número de observações consideradas.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.

5.1. Radiação Global (R_s^\downarrow).

5.1.1. Estimativa da Radiação Global.

Diante da importância da radiação global, como um componente fundamental para o balanço de radiação, sua quantificação torna-se indispensável. Entretanto, muitas vezes a obtenção direta deste parâmetro, por observações em locais isolados ou em áreas experimentais, ou mesmo em estações meteorológicas não é possível. Nos dois primeiros casos por inexistência de instrumentos, e no terceiro devido a problemas de pane no instrumental. Desta forma, visando encontrar uma expressão para estimativa de R_s^\downarrow em Mandacaru, com base nas horas de brilho solar e na radiação que chega no topo da atmosfera, efetuou-se a regressão linear de R_s^\downarrow (observado), respectivamente contra $\frac{n}{N}$ e Q_s , utilizando-se para tanto a fórmula de Ångström modificada por PRESCOTT (1940), eq. 4.2; cujos resultados para cada mês individualmente e para todo o período de observações, são mostrados no quadro V.1.

QUADRO - V.1.

Valores de "a" e "b", para eq. de PRESCOTT(1940), para Mandacaru-Ba.

Período	Nº de dias	a	b	Coef. de Correlação
Setembro	13	0,29	0,43	0,95
Outubro	30	0,28	0,42	0,89
Novembro	29	0,22	0,46	0,95
Dezembro	18	0,23	0,38	0,92
Set. a Dez.	90	0,24	0,44	0,88

Para efeito de comparação, alguns valores das constantes "a" e "b" obtidos para diferentes localidades da região semi-árida nordestina, são mostrados no quadro V.2 (AZEVEDO et alli, 1981). Tais dados indicam que, no semi-árido do Nordeste do Brasil, os coeficientes "a" e "b" tendem para valores médios de 0,28 e 0,43, respectivamente, o que está em concordância com os valores encontrados para o mês de outubro em Mandacaru-Ba (Quadro V.1).

QUADRO - V.2.

Valores de "a" e "b" para eq. de PRESCOTT (1940), no semi-árido-NE.

Localidade	Período	Lat.	Nº dias	a	b	Coef. de Correlação
Quixeramobim-Ce	Outubro	05°12'	122	0,26	0,42	0,85
São Gonçalo-Pb	Outubro	06°45'	175	0,25	0,48	0,82
Petrolina-Pe	Outubro	09°23'	120	0,33	0,43	0,92
Paulo Afonso-Ba	Outubro	09°21'	83	0,29	0,37	0,87

Visando ainda uma comparação mais abrangente, são mostrados no Quadro V.3, mais valores de "a" e "b" obtidos para diferentes localidades em países distintos (BRUTSAERT, 1984).

QUADRO - V.3.

Valores de "a" e "b" para eq. DE PRESCOTT (1940), em outros países.

Localidade	Lat.	Período	a	b	Referência
Accra (Chana)	6°	mensal	0,30	0,37	Davies (1965)
Kano (Nigéria)	12°	mensal	0,26	0,54	Davies (1965)
Delhi (India)	29°	semanal	0,31	0,46	Yadav (1961)
Dodge City (Kansas, USA)	38°	diário	0,230	0,54	Baker and Haines (1969)
Cleveland (Ohio, USA)	41°	diário	0,188	0,539	Baker and Haines (1969)

Os valores mostrados nos quadros V.2 e V.3, indicam uma variação de "a" entre 0,188 e 0,33, e de "b" entre 0,37 e 0,54, o que evidencia um decréscimo de "a" e um acréscimo de "b" com o aumento da latitude. Como os valores mensais determinados para o período experimental em Mandacarú, para "a" e "b" se encontram respectivamente entre 0,22 a 0,29 e 0,38 a 0,46, pode-se afirmar que os mesmos indicam uma perfeita coerência, quando comparados aos resultados mostrados nos quadros V.2. e V.3.

5.1.2. Determinação da Radiação Global Diária com Base em Valores Horários Instantâneos (R_{se}).

A Tabela 5.1, mostra os valores diários de radiação global, obtidos por integração dos registros diários (R_{so}) e com base em leituras horárias instantâneas (R_{se}), bem como o erro percentual (E) de R_{se} em relação a R_{so} , além da quantidade e tipo de nuvens para cada dia de observação durante o experimento. Uma análise desses dados indica que R_{se} supera R_{so} na maioria dos dias. Já para os dias de céu claro (Δ) o erro percentual não ultrapassou a 3,7%, enquanto que para os dias de muito pouca nebulosidade (*), o erro percentual não foi maior do que 5,6%. Por outro lado, em 13 dos 90 dias observados, ocorreram erros percentuais superiores a 10%, com uma concentração de 7 dias no mês de dezembro e um máximo de 24,7%. Observa-se ainda que dezembro apresentou uma maior nebulosidade em comparação com os demais meses. Uma explicação para erros acentuados pode ser atribuído ao fato de que a ne

bulosidade predominante por ser formada por pequenos núcleos como cirrocumulus (Cc), autocumulus (Ac) e cumulus (Cu) principalmente. Estes, interpondo-se entre o Sol e o piranômetro, impedem a passagem da radiação direta ou não interpondo-se deixam a radiação direta passar livremente, como se não existisse nuvens. Tais ocorrências, contribuem para, em alguns dias, diminuir ou aumentar os valores de R_s nas horas de observações. Desta forma, naqueles dias em que houve uma predominância acentuada de leituras horárias instantâneas, devido a interposição de nuvens, isto contribuiu para diminuir o valor diário de R_{se} , enquanto que nos dias em que a predominância acentuada de leituras horárias instantâneas, ocorreu de forma oposta, onde mesmo tendo nuvens, estas não impediram a passagem da radiação direta, isto contribuiu para aumentar os valores diários de R_{se} . Os registros do comportamento da marcha diária da radiação global para um dia de céu claro e para o dia de maior erro percentual, são mostrados nas figuras 5.1A (07.10.87) e 5.1B (12.12.87) respectivamente.

5.2. Determinação do Coeficiente de Reflexão (α).

5.2.1. Variação Estacional de α .

De acordo com a Figura 5.2, observa-se que no início do experimento, quando o solo estava ainda quase que totalmente descoberto, o albedo alcançou os valores mais baixos (12%), e que a medida em que a cultura foi se desenvolvendo e o solo se reves



Figura - 5.1A - Registro da radiação global obtido com registrador Speedomax interligado ao piranômetro Eppley, para um dia de céu claro (07.10.87).

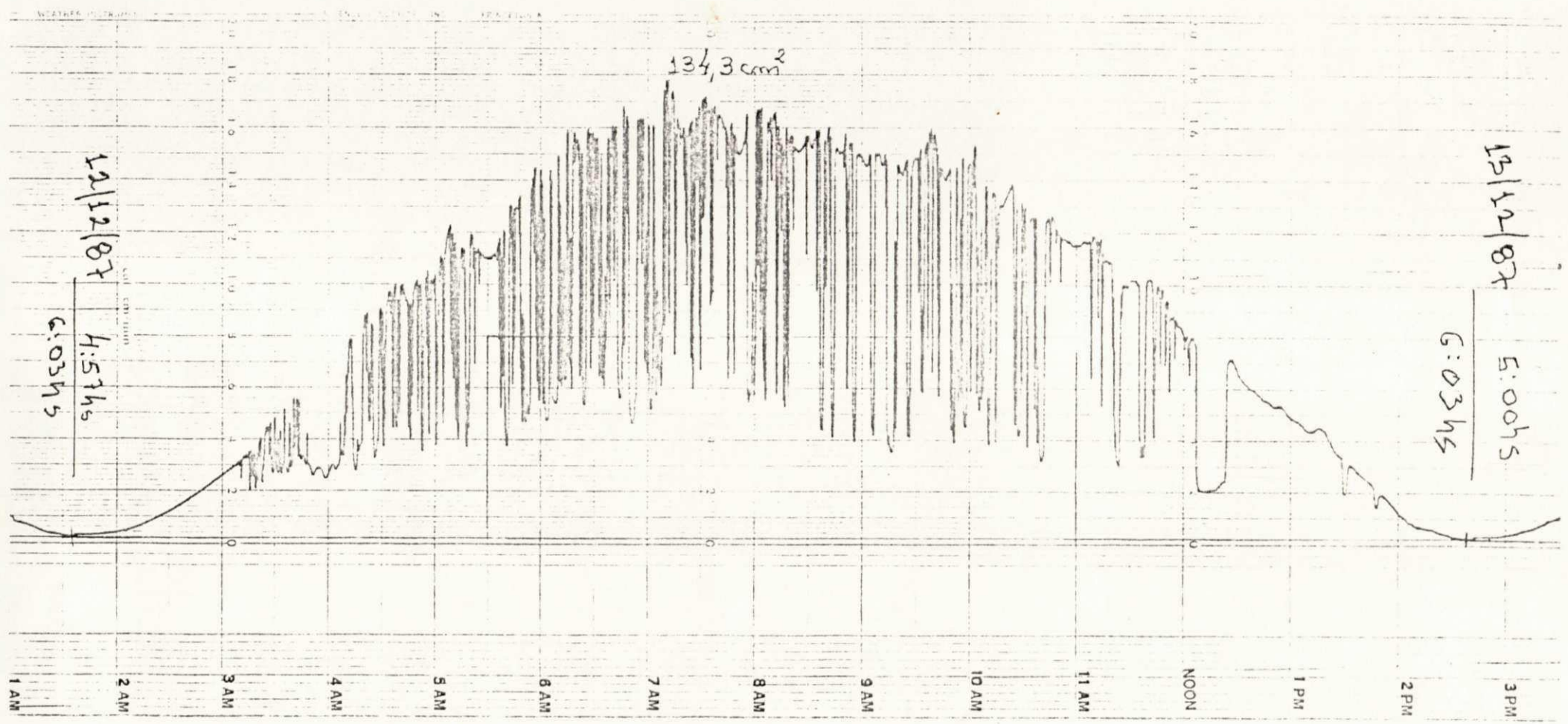


Figura - 5.1B - Registro diário da radiação global obtido com registrador Speedomax interligado ao piranômetro Eppley, para o dia de maior erro na estimativa de $R_s \downarrow$ com valores horários (12.12.87).

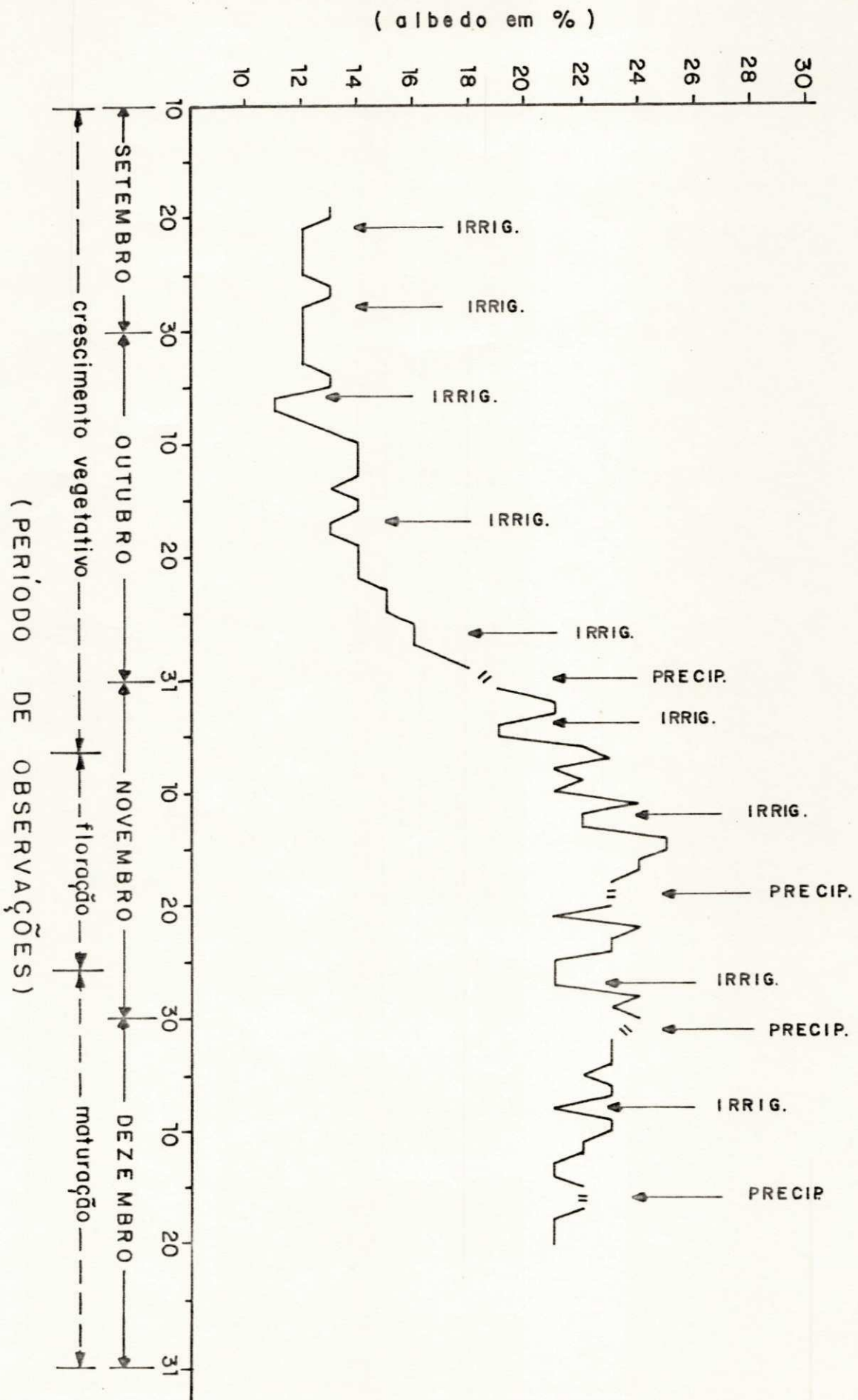


Figura - 5.2 - Variação estacional do albedo (α).

tindo, o albedo foi aumentando até alcançar o valor máximo (25%), por ocasião do período de floração, quando o índice de área foliar atingiu valores próximo a 6. Após essa data, o albedo começou a diminuir lentamente chegando a 21% no término das observações. Pode-se observar ainda que o albedo apresentou certas flutuações ao longo do experimento, especialmente após os dias de irrigação, atingindo valores de até 2% para menos. Já nos dias posteriores a ocorrência de precipitação, o albedo aumentou ou permaneceu com o valor anterior. Por outro lado, no início do experimento, quando o solo ainda estava quase que totalmente nudo, as flutuações foram menos acentuadas do que quando o mesmo ficou completamente coberto pela vegetação.

5.2.2. Variação Diária de α .

A variação diária do albedo para dias representativos das fases de crescimento vegetativo, floração e maturação da cultura, é mostrada na Figura 5.3A, onde observa-se que durante a fase de crescimento vegetativo o albedo apresentou valores maiores ao nascer do Sol. Já nos dias representativos das fases de floração e maturação ocorreu exatamente o contrário. Por outro lado, conforme o esperado, os menores valores do albedo ocorreu em torno do meio-dia, independente do estágio de desenvolvimento da cultura. Observa-se ainda, pela curva do dia 05.10.87, que o albedo apresentou uma variação acentuada: diminuindo muito rapidamente nas primeiras horas da manhã, mantendo-se quase que constante en

tre 8 e 16 hs e a partir daí, aumentando rapidamente. A melhor as simetria foi observada no dia 13.12.87, representativo da fase de maturação. Valores de albedo mais altos ao entardecer são atribuídos por PROCTOR et alii (1972) a um aumento da quantidade de par tículas em suspensão e do conteúdo de vapor d'água na atmosfera no período da tarde. O fato de ter-se efetuado leituras em hora legal, baseada no fuso horário de $45^{\circ}W$, o que pode defazar a hora local em relação a hora solar verdadeira para menos, em até 30 minutos a época em que foi realizado o experimento (ou seja, a pas sagem do Sol pelo plano do meridiano local ($39^{\circ}26'W$) pode ocorrer até 30 minutos mais cedo do que a hora local), somado ao aumento da duração efetiva dos dias como pode ser observado na Figura - 5.4, pode ter contribuído conjuntamente com os fenômenos citados para o aumento do albedo ao entardecer.

Por outro lado, a Figura - 5.3B, mostra a variação diária média e o desvio padrão do albedo da cultura da soja, para o período de completo desenvolvimento vegetativo (soja cobrindo totalmente o solo). Nesta figura pode-se observar, considerando que o meio dia solar se dá em torno de 11:30 horas local, devido ao que foi dito anteriormente, que há uma ligeira tendência, com os valores do albedo durante o período da manhã sendo um pouco maiores do que a tarde. Nota-se ainda que, como na Figura - 5.3A, a variação do albedo entre 16 e 17 hs é muitíssimo acentuada com parada aos demais intervalos. Já o desvio padrão para as 17 hs é maior do que o dobro daqueles observado para qualquer outro horá

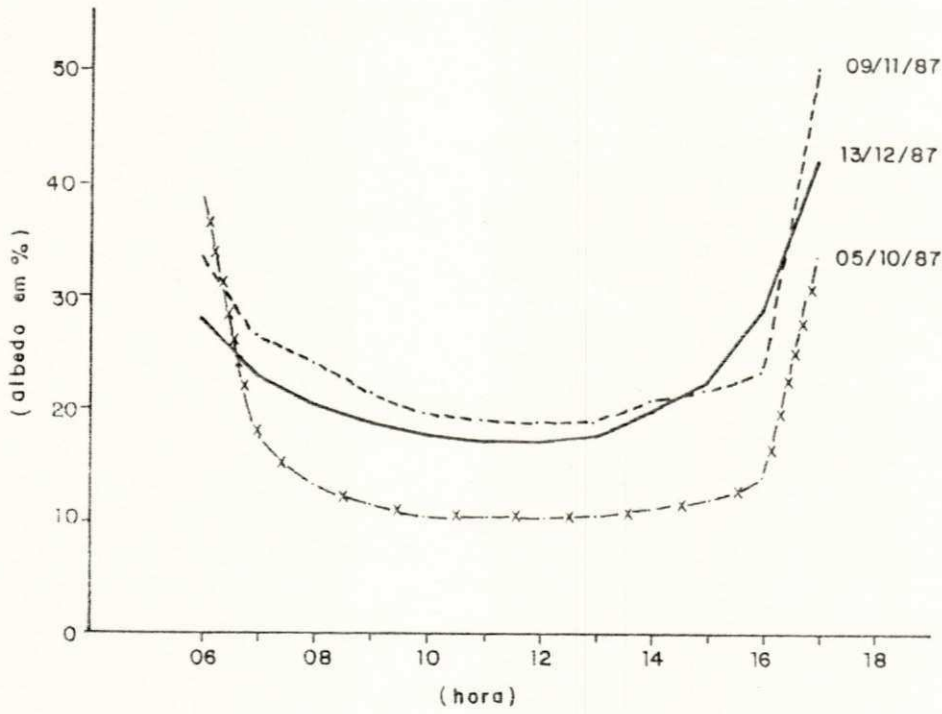


Figura - 5.3A - Variação diária de α , para dias representativos das fases de crescimento vegetativo, floração e maturação da cultura.

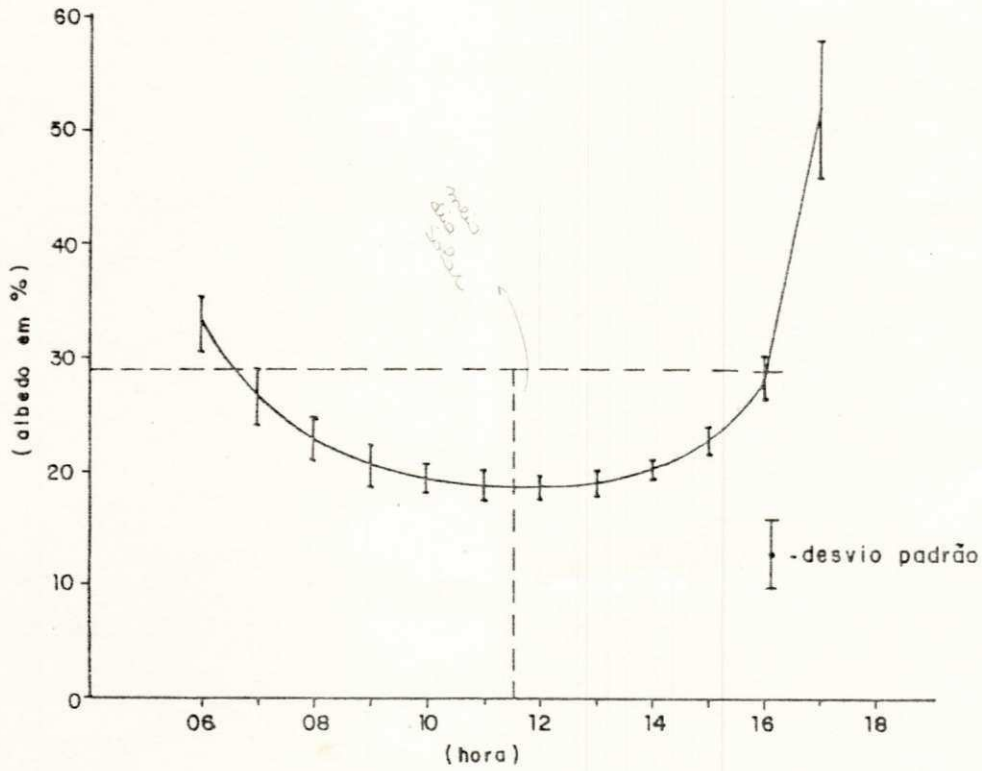
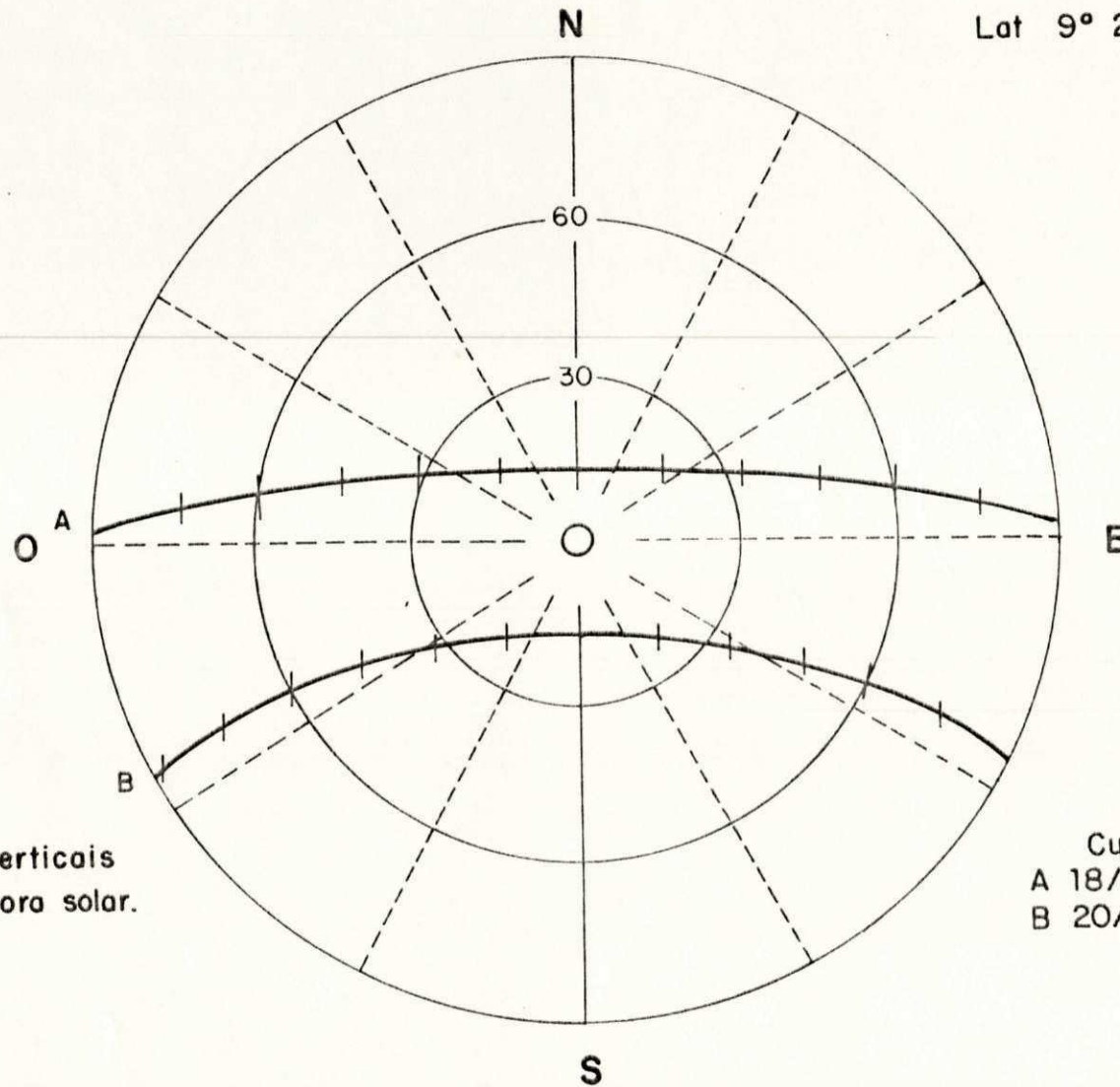


Figura - 5.3B - Variação diária média e desvio padrão de α .

MANDACARU - JUAZEIRO - BA

Lat 9° 24' S



Os traços verticais
indicam a hora solar.

Curvas
A 18/9/1987
B 20/12/1987

Figura - 5.4 - Projeção da abolada celeste, mostrando a trajetória do Sol.

rio. A explicação para ocorrências de valores altos do albedo no nascer e no pôr do Sol, tem sido atribuído também a possíveis reflexões dentro da própria cúpula hemisférica do albedômetro (FRITSCHEN, 1967 e IDSO et alii, 1969).

5.2.3. Coeficiente de Reflexão para o Estágio de Completo Desenvolvimento Vegetativo da Cultura de Soja.

O coeficiente de reflexão (albedo) da cultura da soja para o estágio de completo desenvolvimento vegetativo, também foi obtido em função do ângulo zenital do Sol como mostra a Figura - 5.5. Desta forma, com base na equação $\alpha = 13,39 + 0,179Z$, obtida a partir da regressão linear entre valores horários do albedo e do ângulo zenital do Sol, é possível determinar-se o albedo para qualquer momento em função do ângulo zenital assumido naquele instante, ou para um dia, em função do ângulo zenital médio para o citado dia. É importante salientar que o uso deste método só deve ser feito quando não há variações no comportamento reflexivo da superfície.

5.2.4. Estimativa do Coeficiente de Reflexão (α) para a Cultura de soja.

A Tabela 5.2 mostra os valores diários do coeficiente de reflexão (albedo) obtidos por três métodos: A) considerando os valores diários integrados de R_s^{\uparrow} e R_s^{\downarrow} ; B) considerando os valores diários de R_s^{\uparrow} e R_s^{\downarrow} obtidos com base em leituras horárias; e C)

pela equação $\bar{\alpha} = 13,39 + 0,179\bar{Z}$ aplicada apenas para o período de cobertura completa do solo. Todos os dias indicados na tabela 5.2 foram de céu claro. Uma análise dos valores do albedo apresentados na tabela 5.2, indica que o método B apresenta valores de até 3% maiores do que aqueles obtidos pelo método A. Por outro lado, o método C exceto para o dia 13.12.87, apresenta valores menores que aqueles obtidos pelos métodos A e B, com uma razoável aproximação em relação aos valores do método A. A explicação para o método B superar os demais métodos, pode está ligada ao fato de que o mesmo ao utilizar valores horários instantâneos, estes concorrem para aumentar os valores do albedo.

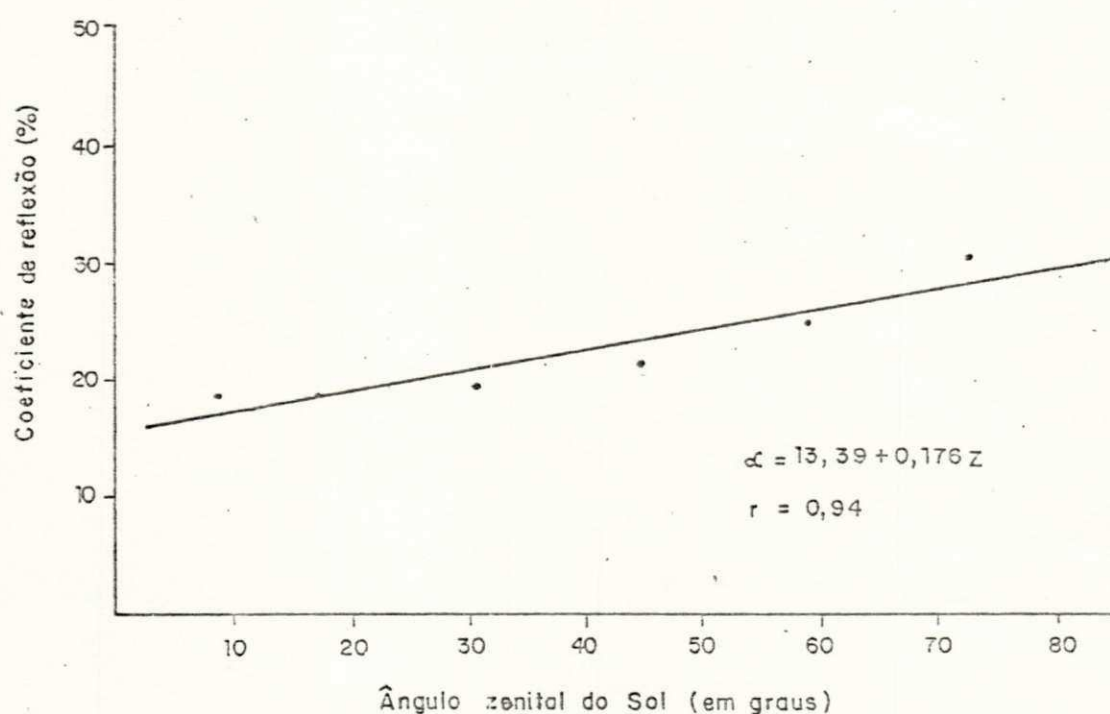


Figura - 5.5 - Variação do albedo (α) com ângulo zenital solar no período de completo desenvolvimento da cultura de soja.

TABELA - 5.2.

Coeficientes de reflexão diário obtidos pelos métodos A, B e C.

D A T A	M É T O D O		
	A	B	C
05.10.87	0,13	0,15	-
07.10.87	0,11	0,13	-
11.10.87	0,14	0,16	-
19.10.87	0,14	0,16	-
29.10.87	0,17	0,19	-
06.11.87	0,22	0,23	0,21
07.11.87	0,23	0,24	0,21
09.11.87	0,22	0,23	0,21
12.11.87	0,22	0,25	0,21
13.12.87	0,21	0,21	0,22

5.3. Radiação de Ondas Longas da Atmosfera ($R_L \downarrow$).5.3.1. Estimativa de $R_L \downarrow$.

As estimativas da radiação de ondas longas provenientes da atmosfera, para dias de céu claro, obtidas pelo emprego de diferentes equações, são mostradas nas tabelas 5.3A e 5.3B. No caso da tabela 5.3A, os cálculos foram efetuados com base nos valores de temperatura do ar e pressão de vapor d'água observados sobre a cultura. Já para a tabela 5.3B, esses dois parâmetros foram observados na estação meteorológica, o que representa as con

dições do local e não especificamente da cultura como anteriormente. É importante salientar que durante todo período de observações, ocorreram apenas 6 dias de céu completamente claro, como mostram as tabelas citadas. Por outro lado, as equações adaptadas as condições da cultura (eq. 4.10) e as condições do local (eq. 4.11), obtidas através de regressão linear aplicada a fórmula de Brunt, apresentaram os resultados expostas no quadro V.4.

QUADRO - V.4.

Valores dos coeficientes da eq. de BRUNT para Mandacaru-Ba (com "e" em mb).

Fórmula	Coeficientes		Coef. de Correlação
	a	b	
Adaptada as condições da cultura (eq. 4.10).	0,37	0,093	0,993
Adaptada as condições do local (eq. 4.11).	0,44	0,089	0,943

Estes coeficientes comparados àqueles da equação original de Brunt, onde "a" e "b" correspondem respectivamente a 0,44 e 0,079, indicam a existência de uma boa coerência, o que proporciona confiança nos resultados obtidos.

Uma análise dos resultados apresentados na tabela - 5.3A, indica que os valores de R_{L} estimados pela eq. de Brunt adaptada as condições da cultura (eq. 4.10), apresentou o menor erro padrão de estimativa ($1,7 \text{ cal.cm}^{-2}$) para o período diurno, enquanto a eq. original de Brunt (eq. 4.9), também apresentou re

sultados satisfatórios, com um erro padrão de estimativa de apenas $2,9 \text{ cal.cm}^{-2}$ para o mesmo período. Com relação a tabela 5.3B, os resultados indicam que o menor erro padrão de estimativa ocorreu para a eq. de Brunt adaptada as condições do local (eq 4.11), com $3,8 \text{ cal.cm}^{-2}$ para o período diurno, enquanto a eq. original de Brunt (eq. 4.9), apresentou um erro padrão de estimativa bem maior para o mesmo período ($18,6 \text{ cal.cm}^{-2}$). Isto, reforça a ideia de que se deve determinar, para cada local, seus próprios coeficientes. Por outro lado, torna-se bastante evidente diante dos resultados, que a equação original de Brunt, apresentou resultados bastantes satisfatórios, quando foram empregados os parâmetros representativos das condições da cultura ao invés de parâmetros representativos das condições locais. Isto, pode ser justificado pelo fato de que as condições de umidade sobre a cultura, foram bem diferentes daquelas observadas na estação meteorológica, quase sempre com menor umidade, uma vez que o vento predominante de Sudeste (SE), acarretava um fluxo de ar passando primeiro sobre a estação meteorológica (Figura - 4.2), para em seguida atingir a área experimental. Quanto aos resultados obtidos pelas eqs. de IDSO (eq. 4.7) e SWINBANK (eq. 4.8), apresentados em ambas as tabelas, os valores da tabela 5.3A, são um pouco melhores do que os da tabela 5.3B, porém os erros padrões de estimativa muito altos comparados àqueles obtidos pelas eqs. 4.10 e 4.11, respectivamente. Esta discrepância pode ser explicada pelo fato de que as eqs. 4.7 e 4.8 levam em consideração, para o cálculo de $R_L \downarrow$, apenas o valor da temperatura do ar, enquanto que as eqs. 4.10 e 4.11, além da temperatura do ar, levam em conta o conteúdo de vapor

TABELA -5.3A

Radiação atmosférica (R_L) em ($\text{Cal.cm}^{-2}/12$ horas), para dias de céu claro calculada com base na temperatura e pressão de vapor d'água observados sobre a cultura.

Fórmula utilizada	07.10.87	11.10.87	19.10.87	29.10.87	06.11.87	07.11.87	ϵ_{yx}
OBSERVADO (eq. 4.6)	400	406	398	399	420	440	—
IDSO (eq. 4.7)	442	442	434	420	433	446	28,9
SWINBANK (eq. 4.8)	437	437	429	414	428	440	24,6
BRUNT ORIGINAL (eq. 4.9)	402	409	403	401	418	438	2,9
BRUNT ADAPTADA AS CONDIÇÕES DA CULTURA (eq. 4.10)	400	407	401	400	419	441	1,7

TABELA -5.3B

Radiação atmosférica (R_L) em ($\text{cal.cm}^{-2}/12$ horas), para dias de céu claro calculada com base na temperatura do ar e pressão de vapor d'água, observados na estação meteorológica.

Fórmula Utilizada	07.10.87	11.10.87	19.10.87	29.10.87	06.11.87	07.11.87	ϵ_{yx}
OBSERVADO (eq. 4.6)	400	406	398	399	420	440	—
IDSO (eq. 4.7)	433	441	441	425	444	455	31,1
SWINBANK (eq. 4.8)	428	436	436	420	439	450	25,9
BRUNT ORIGINAL (eq. 4.9)	378	382	384	382	399	416	18,6
BRUNT ADAPTADA AS CONDIÇÕES DO LOCAL (eq. 4.11)	399	403	405	404	422	440	3,8

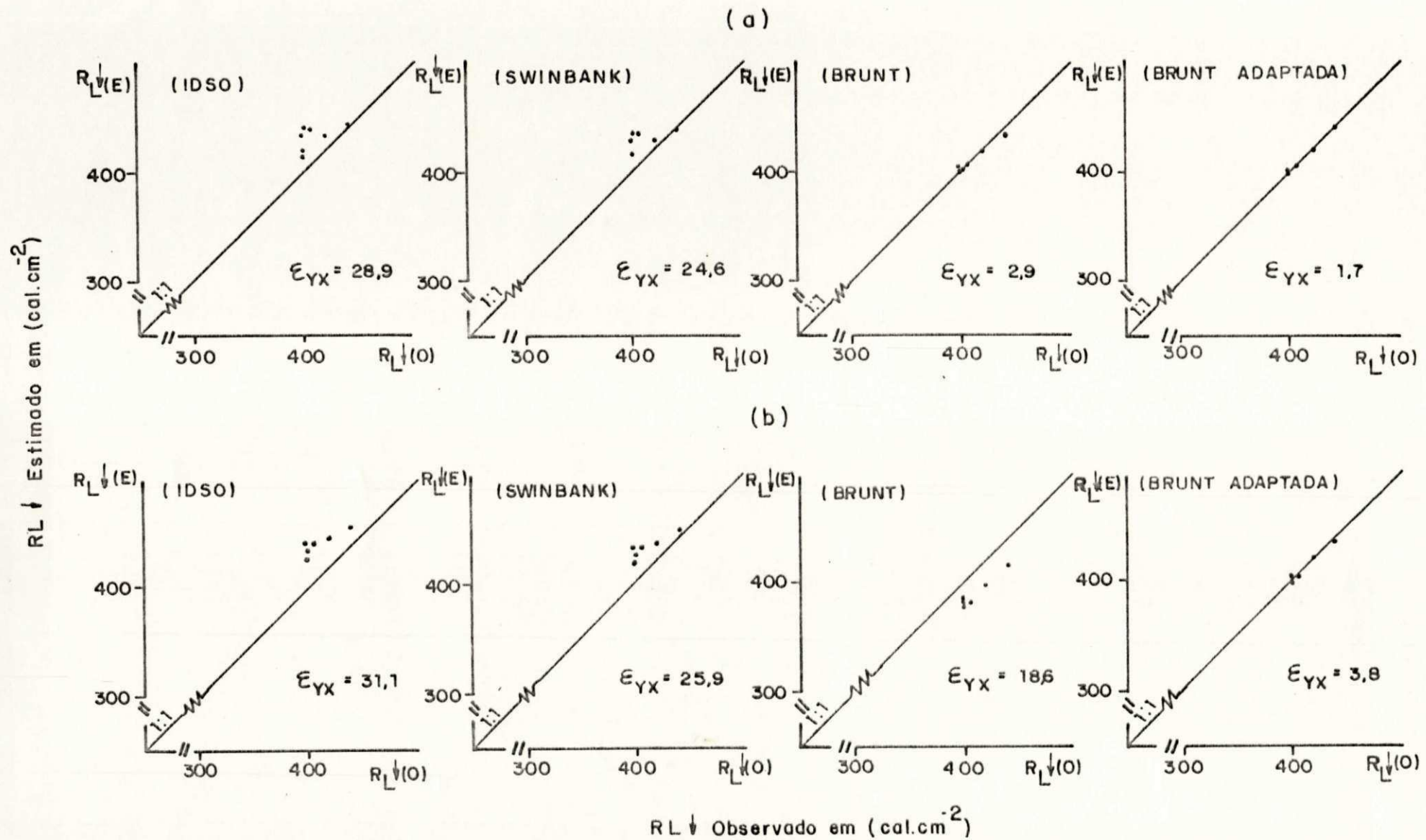


Figura - 5.6 - Comparação de $R_L \downarrow (E)$ calculado pelas fórmulas de Idso, Swinbank e Brunt, com $R_L \downarrow (O)$ determinado pela equação do balanço de radiação, com base nos componentes observados: a) considerando a temperatura do ar e a pressão do vapor d'água observados sobre a cultura; b) considerando os dois parâmetros observados na estação meteorológica. $R_L \downarrow$ está em $\text{cal.cm}^{-2}/12$ horas.

d'água presente na atmosfera.

Para um melhor entendimento do estudo antes descrito, é mostrada na figura 5.6, os gráficos comparativos das duas situações: (a) os que levam em consideração os resultados de R_L^\downarrow observado e os estimados com base nas condições da cultura, que mostra uma boa concordância dos valores estimados pela eq. original de Brunt (eq. 4.9) e uma perfeita concordância dos valores estimados pela eq. de Brunt adaptada as condições da cultura; e (b) onde os resultados estimados com base nas condições observadas na estação meteorológica, mostram que o melhor ajustamento de pontos ocorreu para os valores de R_L^\downarrow estimados pela eq. de Brunt adaptada (eq. 4.11), enquanto os valores da eq. original de Brunt subestimaram os observados. Quanto as eqs. de Idso (eq. 4.6) e Swinbank (eq. 4.7), em ambas condições, os valores estimados superam os valores de R_L^\downarrow observados.

5.4. Saldo de Radiação (R_n).

5.4.1. Estimativa de R_n com Base nas Equações Propostas por LINACRE (1968).

Com base nos resultados obtidos para o saldo de radiação (R_n) através das equações propostas pro LINACRE (1968), foram construídos os gráficos da figura 5.7, que mostram o comportamento das curvas construídas com os valores estimados pelas eqs. 4.12; 4.13; 4.14; 4.15 e 4.16; obedecendo a seguinte denominação

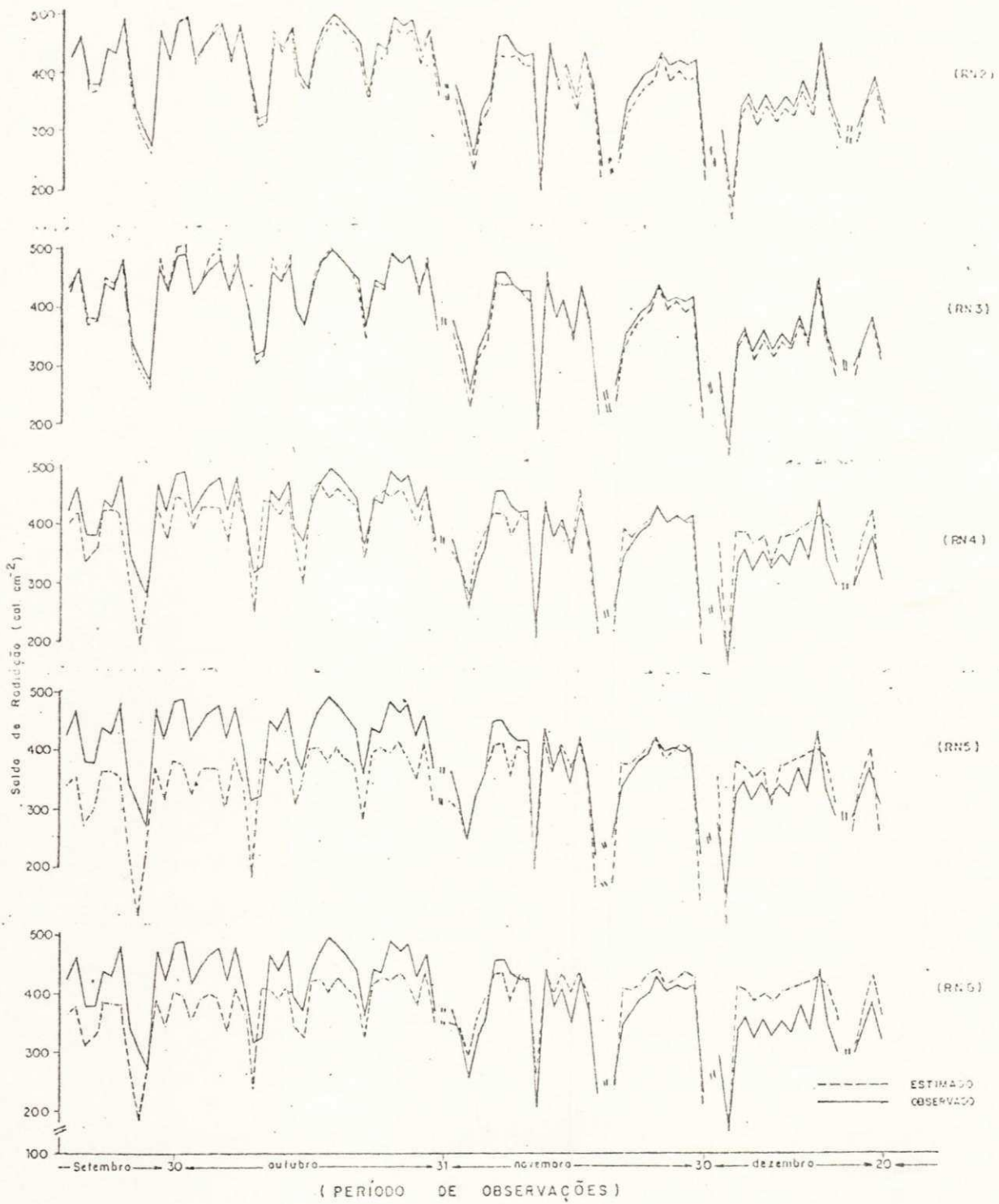


Figura - 5.7 - Comportamento estacional de R_n estimado pelas eqs. de LINACRE (1968): 4.12; 4.13; 4.14; 4.15 e 4.16, ao lado da curva de R_n observado.

por ordem: RN2; RN3; RN4; RN5; e RN6. Cada uma das curvas citadas está acompanhada da curva construída com os valores observados e todas representam a situação ao longo do período de observação. Observa-se que as curvas RN2 e RN3, apresentam um bom comportamento em relação a curva dos valores observados, com os valores estimados muito próximos dos observados. Por outro lado, as curvas RN4, RN5 e RN6, não apresentam bom comportamento, com os valores estimados indicando uma grande discrepância em relação aos observados para muitos dias durante o período experimental. Essas diferenças acentuadas entre R_n observado e estimado, são justificadas em função das substituições de parâmetros observados por equações que os estimam ou/e por valores médios. A medida que isto vai ocorrendo, a tendência natural é acontecer simultaneamente uma perda de precisão. Esta ocorrência, torna-se visível a partir da substituição da radiação global (R_s^\dagger) na eq. 4.13, por sua estimativa através da equação de PRESCOTT (1940), resultando no afastamento verificado na curva RN4; em seguida com a substituição na eq. 4.14, da razão $\frac{n}{N}$ e de α pelos respectivos valores médios observados, o afastamento torna-se ainda mais acentuado, como mostra a curva RN5. Finalmente, com a substituição das constantes "c" e "d", de $\frac{n}{N}$ e α , na eq. 4.14, pelos respectivos valores médios propostos por LINACRE (1968), mais uma vez verifica-se perda de precisão, pronunciado pelo comportamento da curva RN6, em relação a curva dos valores observados, que embora seja um pouco menos afastada do que a curva RN5, mesmo assim há uma grande discrepância entre R_n estimado e observado. Para uma melhor avaliação

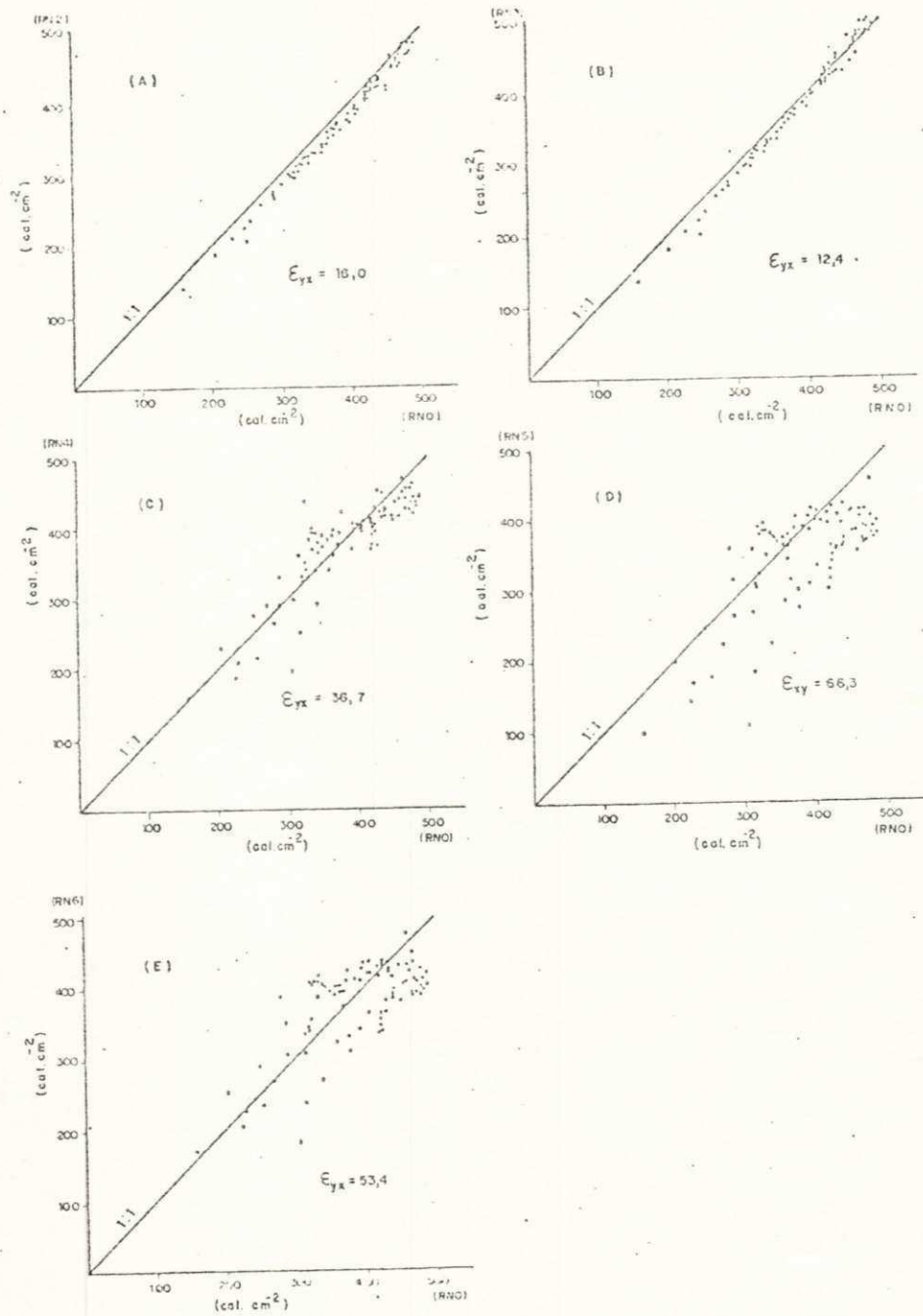


Figura - 5.8 - Comparação de R_n estimado, pelas eqs. de LINACRE (1968): 4.12; 4.13; 4.14; 4.15 e 4.16, com R_n observado. Ambos para o período diurno.

da precisão das estimativas de R_n pelas equações propostas por LINACRE (1967), são mostrados na figura 5.8, os gráficos de R_n observado contra R_n estimado para cada caso. No gráfico (B) eq. 4.13, observa-se o melhor ajustamento de pontos em torno da reta 1:1, com um erro padrão de estimativa (ϵ_{yx}) de $12,4 \text{ cal.cm}^{-2}$ para 12 horas. Já no gráfico (A) - eq. 4.12 também houve um bom ajustamento, com $\epsilon_{yx} = 16,0 \text{ cal.cm}^{-2}$ em 12 horas. Nos demais gráficos, observa-se a perda de precisão já enfocada, através da grande dispersão dos pontos em torno da reta 1:1, especialmente no gráfico (D) - eq. 4.15, onde o erro padrão de ajustamento foi de $66,3 \text{ cal.cm}^{-2}$ para 12 horas e nos gráficos (C) - eq. 4.14 e (E) - eq. 4.16, os erros padrões de estimativa foram respectivamente $35,7$ e $53,4 \text{ cal.cm}^{-2}$ para 12 horas.

5.4.2. Estimativa de R_n com Base na Equação de PENMAN (1948).

Utilizando-se os resultados da estimativa de R_n pela equação de PENMAN (1948), com o emprego de diferentes coeficientes, conforme descrito na metodologia, eq. 4.17 e eqs. similares (adaptadas), foram construídas as curvas apresentadas na figura 5.9. Nesta figura, observa-se que todas as curvas mostram ótimas concordâncias, com aproximações muito boas, em relação a curva dos valores de R_n observados, exceto a curva RN7, construída com os valores estimados pela equação original, que apresentou um pequeno afastamento. Esta melhoria do comportamento das curvas construídas com os valores estimados, pode ser atribuída, a de

terminação de coeficientes apropriados para as condições da cultura e do local. Isto, inicialmente foi efetuado, apenas para o termo de correção devido a nebulosidade, mantendo-se os coeficientes da equação original para o termo do saldo de radiação de ondas longas nas curvas RN8 e RN9. Posteriormente, todos os coeficientes foram determinados, tanto para as condições da cultura, como para as condições do local - curvas RNC e RNE (Quadro - V.5).

QUADRO - V.5.

Coeficientes determinados para eq. de PENMAN (1948) adaptada as condições da cultura e do local.

Fórmula	Coeficientes				Coef. de Correlação
	a	b	c	d	
RN7	0,56	0,079	0,1	0,9	—
RN8	0,56	0,079	0,03	0,8	0,97
RN9	0,56	0,079	0,06	0,6	0,88
RNC	0,63	0,093	0,03	0,8	0,97
RNE	0,56	0,089	0,1	0,7	0,87

Desta forma, a determinação dos coeficientes apresentados no quadro V.5, proporcionaram efetuar-se estimativas do saldo de radiação através das equações adaptadas:

$$RN8 = R_s \downarrow (1 - \alpha) - 720 \sigma T_{ac}^4 (0,56 - 0,079 \sqrt{e_c}) (0,03 + 0,8); \quad (5.1)$$

$$RN9 = R_s \downarrow (1 - \alpha) - 720 \sigma T_{ae}^4 (0,56 - 0,079 \sqrt{e_e}) (0,06 + 0,6 \frac{n}{N}) \quad (5.2)$$

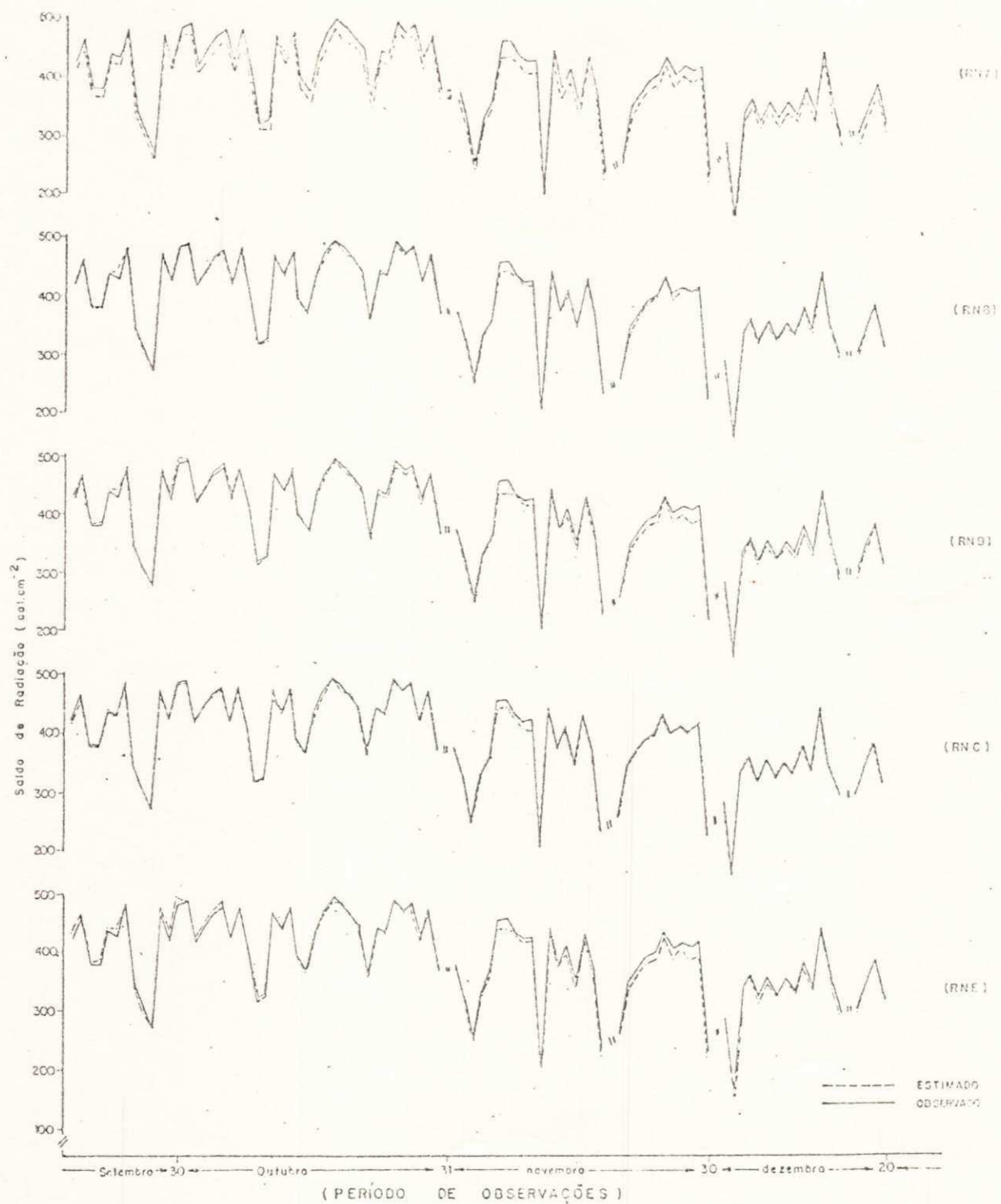


Figura - 5.9 - Comportamento estacional de R_n estimado pelas eqs. original de PENMAN (1948) e adaptadas as condições da cultura e do local: eqs. 4.17; 5.1; 5.2; 5.3 e 5.4, ao lado de R_n observado.

$$RNC = R_s \downarrow (1-\alpha) - 720\sigma T_{ac}^4 (0,63 - 0,093\sqrt{e_c}) (0,03 + 0,8 \frac{n}{N}); \text{ e } \quad (5.3)$$

$$RNE = R_s \downarrow (1-\alpha) - 720\sigma T_{ae}^4 (0,56 - 0,089\sqrt{e_e}) (0,1 + 0,7 \frac{n}{N}) \quad (5.4)$$

onde: T_{ac} e T_{ae} são as temperaturas do ar observadas sobre a cultura e na estação meteorológica respectivamente; e_c e e_e são as pressões parciais do vapor d'água sobre a cultura e estação meteorológica; a constante 720 corresponde a duração do período diurno em minutos, já que os valores observados também correspondem ao período diurno. Para estimativas diárias deve-se colocar 1440 no lugar de 720.

Uma avaliação da precisão das estimativas de R_n pelas equações adaptadas as condições da cultura e do local, pode ser melhor efetuada analisando-se os gráficos da figura 5.10, que representam as dispersões dos valores estimados em relação aos observados numa reta 1:1. Nesta figura, os gráficos (B); (C); (D) e (E), mostram uma ótima concentração de pontos em torno da reta 1:1, com o maior erro padrão de estimativa sendo 7,5 cal.cm⁻² para 12 horas, no gráfico (C) eq. 5.3, enquanto o menor ocorreu no gráfico (B), eq. 5.2, com 4,1 cal.cm⁻²/12 horas. Portanto, confirma-se o que foi dito antes, quanto a introdução dos coeficientes determinados para as condições da cultura e do local, haja vista, a notável melhoria da aproximação das estimativas de R_n pelas eqs. (B); (C); (D); e (E), em relação a R_n observado, quando comparadas as estimativas de R_n pela equação de PENMAN (1948), cujo erro padrão de estimativa, foi superior a 2

vezês o maior erro encontrado para as eqs. adaptadas.

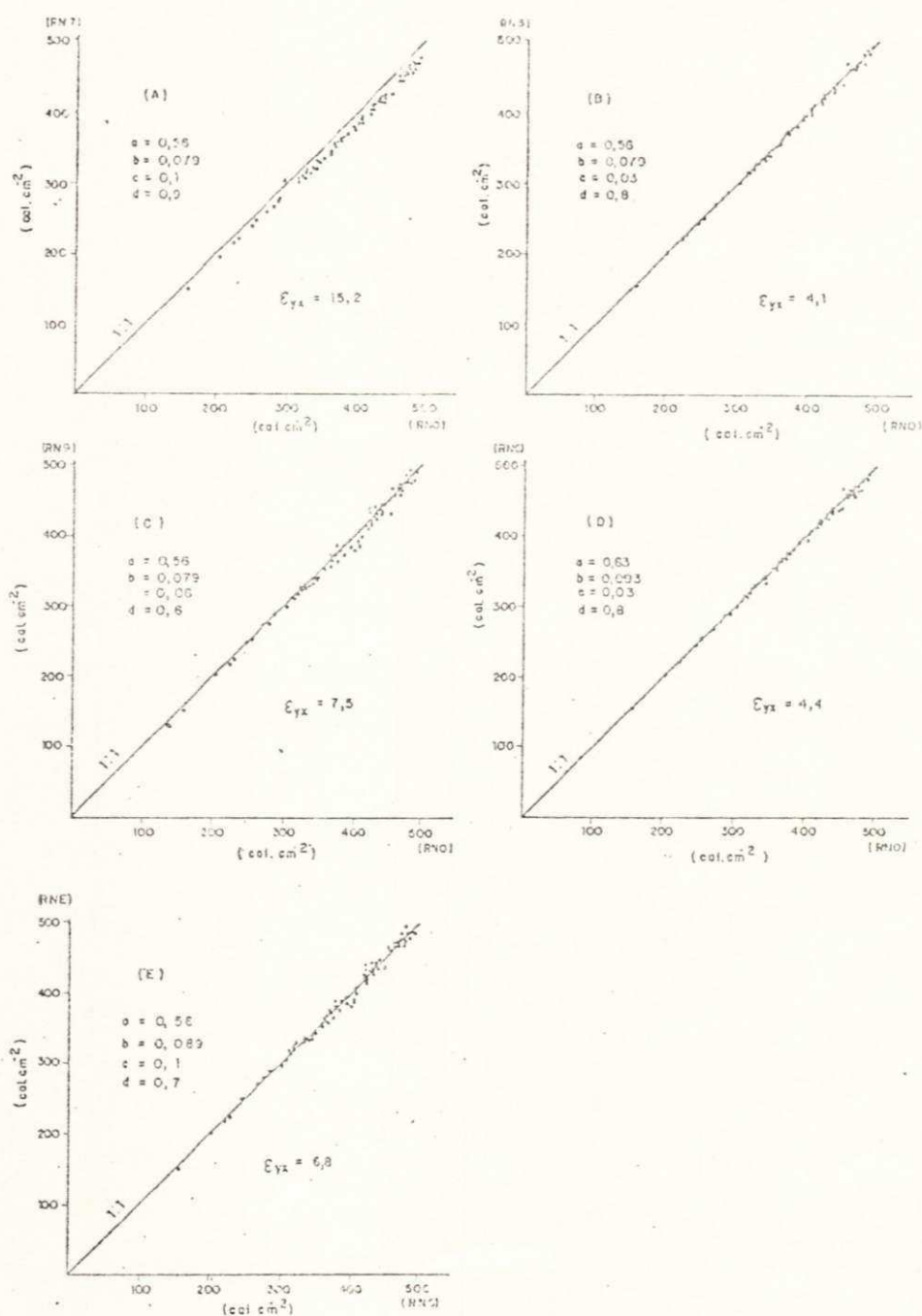


Figura - 5.10 - Comparação de R_n estimado pelas eqs. original de PENMAN (1948) e adaptadas 4.17; 5.1; 5.2 ; 5.3 e 5.4, com R_n observado. Ambos para o período diurno.

5.4.3. Estimativa de R_n com Base em $R_s^+(1 - \alpha)$ e R_s^+ , para Dias de Céu Claro.

Os resultados das regressões lineares entre os valores instantâneos horários de $R_s^+(1 - \alpha)$ e R_n e de R_n e R_s^+ , proporcionaram a determinação dos coeficientes inseridos nas equações abaixo:

$$R_n = 0,85 \times (1 - \alpha) R_s^+ - 0,04 \quad (5.5)$$

$$e \quad R_n = 0,75 R_s^+ - 0,08 \quad (5.6)$$

Porém, para estimar R_n durante o período diurno multiplicou-se as constantes que substituem o saldo de radiação de ondas longas nas eqs. (5.5) e (5.6) por 720, e considerou-se α e R_s^+ para o período diurno. Desta forma as citadas equações tomaram a seguinte forma:

$$R_n = 0,85 (1 - \alpha) R_s^+ - 28,80 \quad (5.7)$$

$$e \quad R_n = 0,72 R_s^+ - 57,60 \quad (5.8)$$

Para analisar os resultados das estimativas de R_n com base no saldo de radiação de ondas curtas $R_s^+(1 - \alpha)$ e radiação de ondas curtas incidente, foram construídas as curvas representativas do comportamento R_n estimado por ambos os métodos, eqs. 5.7 (RNR) e 5.8 (RNG), ao lado da curva de R_n observado. Porém, como o albedo no início do experimento era muito mais representa

tivo das condições de um solo nú, do que de uma superfície coberta por vegetação, tendo em vista, que a soja ainda não revestia o solo suficientemente, de modo que ocorresse o contrário, dividiu-se as citadas curvas em duas partes: período de cobertura parcial do solo (figura 5.11A) e período de completa cobertura do solo (figura 5.11B). Com a elaboração das curvas dos valores estimados RNR (a) e RNG (b), observou-se que nos dois períodos, haviam diferenças de comportamento de ambas as curvas, em relação a curva de R_n observado, evidenciado por um afastamento, mais acentuado no período de cobertura parcial do solo. Isto, pode ser melhor observado na figura 5.12, onde os gráficos representando as relações de R_n observado e estimado pelos dois métodos, em ambos os períodos, indicam uma concentração de pontos um pouco menos afastada da reta 1:1, no gráfico representativo de RNR (que considera o albedo), para o período de completa cobertura do solo (do 49º ao 90º dia), com um erro padrão de estimativa de $42,7 \text{ cal.cm}^{-2}/12 \text{ horas}$, contra $45,3 \text{ cal.cm}^{-2}/12 \text{ horas}$, para o período de cobertura parcial do solo (do 1º ao 48º dia), já nos gráficos representativos de RNG (que não considera o albedo), os pontos estão muito afastados da reta 1:1, para o período de cobertura parcial do solo (do 1º ao 48º dia), com um erro padrão de estimativa de $64,9 \text{ cal.cm}^{-2}/12 \text{ horas}$, enquanto que para o período de cobertura completa do solo (do 49º ao 90º dia), observa-se a melhor aproximação de pontos em relação a reta 1:1, de todos os gráficos, bem como o menor erro padrão de estimativa $27,9 \text{ cal.cm}^{-2}/12 \text{ horas}$.

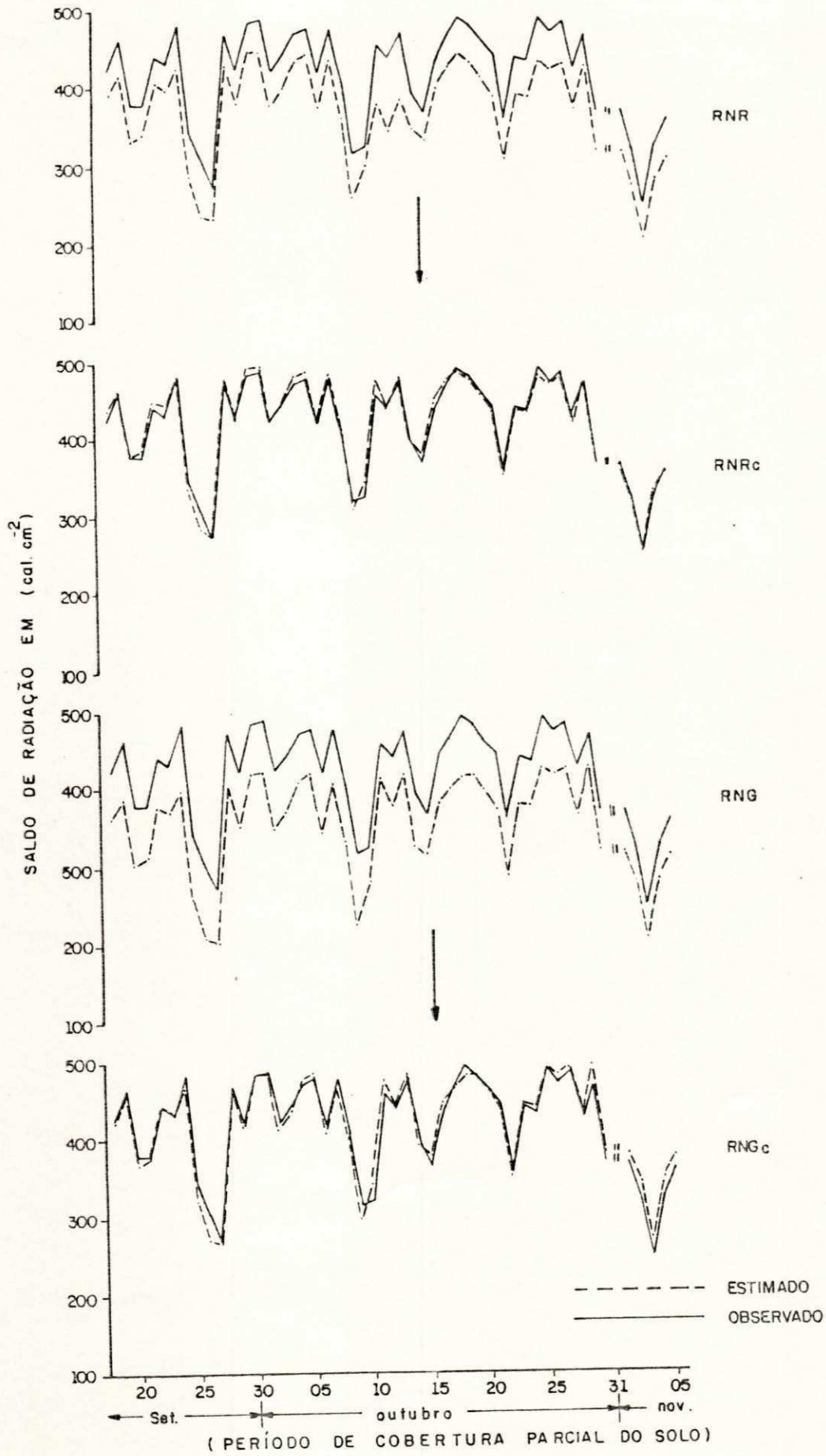


Figura - 5.11A - Comportamento de R_n estimado com $R_s \downarrow (1 - \alpha)$ e $R_s \downarrow$, curvas RNR e RNG e depois corrigidas RNR_c e RNG_c , ao lado de R_n observado.

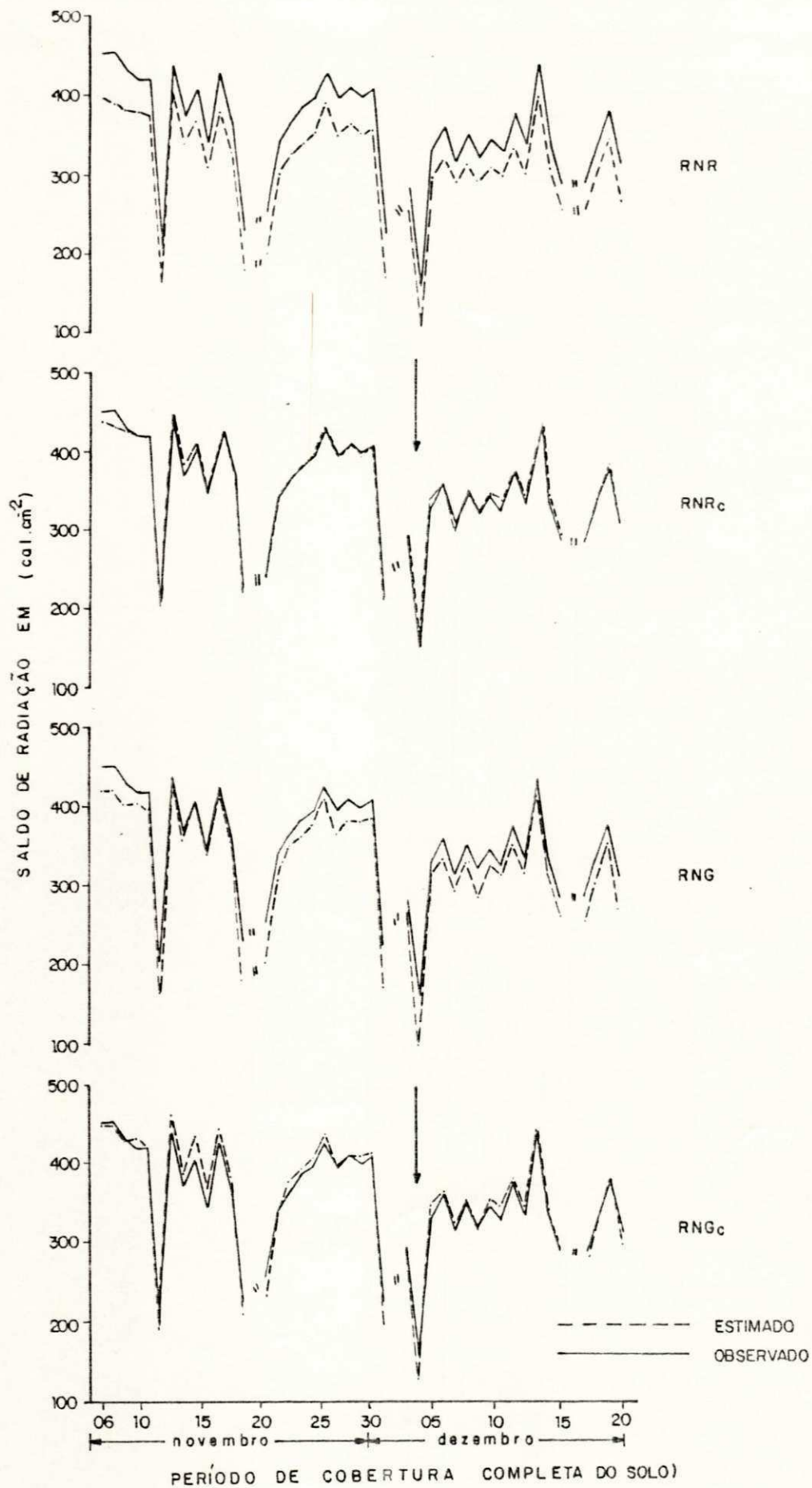


Figura - 5.11B - Comportamento de R_n estimado com $R_s \downarrow (1 - \alpha)$ e $R_s \downarrow$, curvas RNR e RNG e depois corrigidas RNR_c e RNG_c , ao lado de R_n observado.

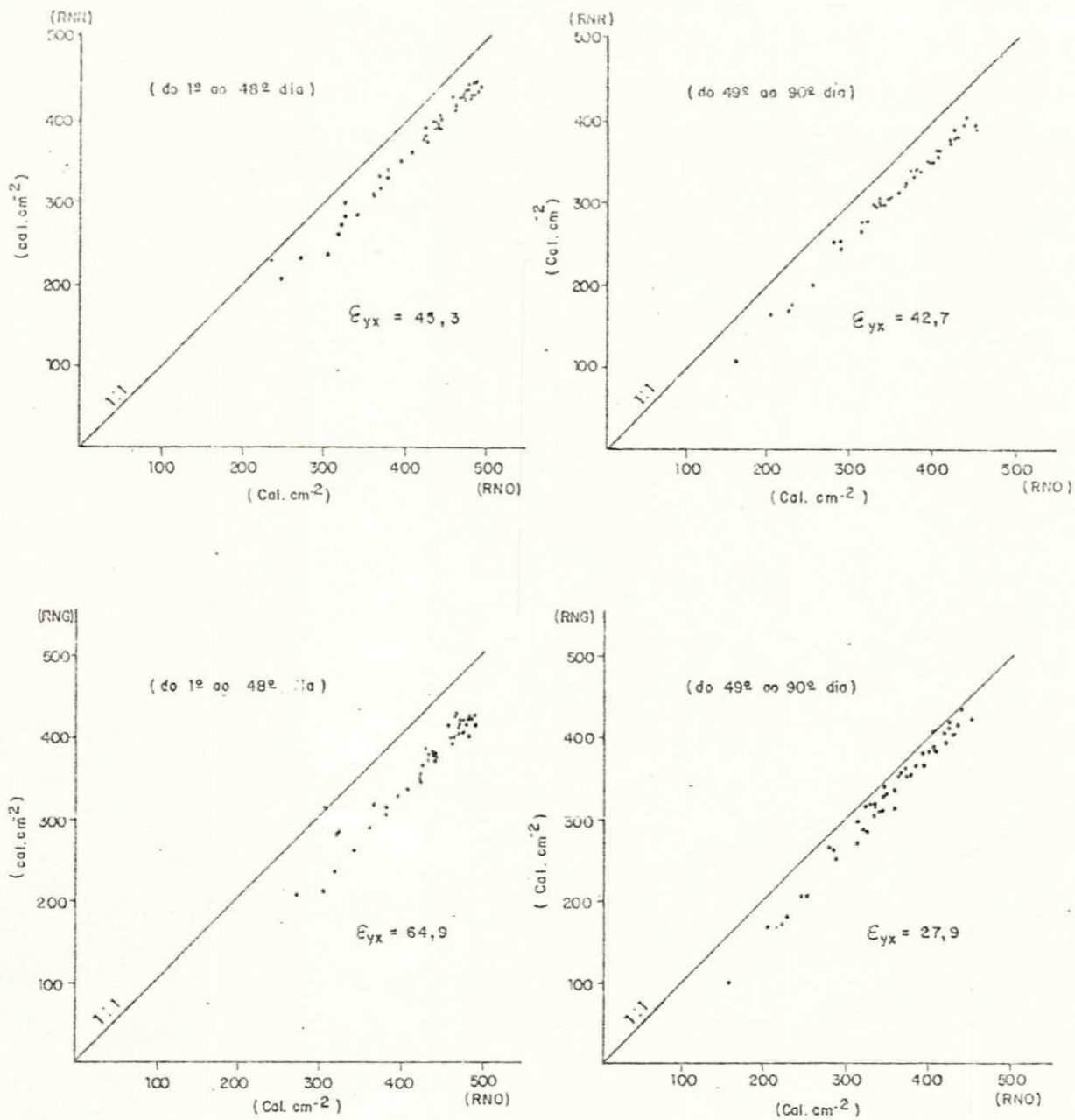


Figura - 5.12 - Comparação de R_n estimado por $R_s \downarrow (1 - \alpha)$ e $R_s \downarrow$, com R_n observado para os períodos de cobertura parcial e completa do solo.

Por outro lado, uma análise global dos gráficos da figura 5.12, evidencia fatos que chamam a atenção: primeiro, que se todos os pontos nos 4 gráficos estão situados abaixo da reta

1:1, indicando uma subestimação dos valores estimados em relação aos observados; segundo, a concentração de pontos em cada gráfico individualmente, indica a existência de uma reta paralela a reta 1:1; terceiro, os gráficos de RNR (que considera o albedo) em ambos os períodos, apresentam comportamento praticamente semelhantes; e quarto, a razoável aproximação dos pontos no gráfico de RNG (que não considera o albedo) para o período de completa cobertura do solo (do 49º ao 90º dia) em relação a reta 1:1, indica uma melhoria acentuada comparando-se ao período de cobertura parcial do solo, bem como em relação aos gráficos RNR (que considera o albedo) para ambos os períodos. Esta última observação é muito importante, especialmente para o período de completa cobertura do solo (albedo mais ou menos constante), porque, além de confirmar aquilo que afirma FRITSCHEN (1967), quando diz que a inclusão do termo albedo neste tipo de equação não melhora a estimativa de R_n , também mostra, que tal inclusão até piorou as estimativas de R_n , como indica o erro padrão de estimativa, que no caso da inclusão do albedo foi de $42,7 \text{ cal.cm}^{-2}/12 \text{ horas}$, enquanto que sem a inclusão este erro foi de $27,9 \text{ cal.cm}^{-2}/12 \text{ horas}$.

Por outro lado, uma análise dos gráficos da figura 5.12, mostra a existência de um erro sistemático na estimativa de R_n sempre para menos. Porém, como tais erros em cada gráfico, são mais ou menos constantes (paralelismo das retas já comentado), imaginou-se adicionar constantes diferenciadas a RNR e RNG, para os dois períodos, como forma de se obser

QUADRO - V.6.

Algumas relações de $R_n = a R_s^\downarrow - b$, citadas por LINACRE (1968), para diferentes localidades ($\text{Cal.cm}^{-2}\text{min}^{-1}$)

Fonte	Localidade	Período de Medições	Cultura	Albedo	Céu	a	b	Coef. de Correlação
SHAW, 1956	Iowa	Diurno Jun.-Nov.	Gramma	-	Claro	0,87	0,06	0,98
CHANG, 1961	Hawaii	Diário Jun.-Ago.	Cana-de-açucar	0,16	Vários	0,72	0,02	0,95
FRITSCHEN, 1967	Arizona	Horário Jan.-Set.	Vários	0,24	Claro	0,81	0,17	0,995
FRITSCHEN, 1967	Arizona	Horário Jan.-Set.	Cevada	0,23	Claro	0,73	0,12	0,995
DAVIES, 1967	West Africa	Diurno Fev.-Mai.	Gramma	0,20	Vários	0,61	0,02	0,93
Presente Trabalho	Mandacaru-Ba	Horário Set.-Dez.	Soja	0,18	Claro	0,75	0,08	0,972

var o que aconteceria com o comportamento das curvas. Então, adicionou-se a cada caso, em ambos os períodos, seus próprios erros padrão de estimativa e com os novos valores de R_n , foram construídas as curvas RNR_c e RNG_c , para os períodos de parcial e completa cobertura do solo, como indicam as setas nas figuras 5.11A e 5.11B. Observa-se agora, que as curvas estimadas corrigidas apresentam em ambos os casos e períodos, aproximações muito boas em relação a curva de R_n observado. O Quadro V.6, mostra os resultados da relação $R_n = a R_s^r - b$, obtidas para diferentes localidades (LINACRE, 1967).

5.5. Balanço de Radiação Sobre a Cultura.

5.5.1. Variação Diurna dos Componentes do Balanço de Radiação.

A variação diurna dos componentes do balanço de radiação para quatro dias, sob diferentes condições de nebulosidade, é mostrada na figura 5.13. Observa-se nesta figura, que a curva do saldo de radiação (R_n) é mais ou menos paralela a curva da radiação global (R_s), com esta última apresentando uma aproximação maior a R_n nas primeiras horas após o nascer e nas últimas horas do dia antes do pôr do Sol. Por outro lado, mesmo em dias de completa cobertura de nuvens (dia 03.12.87 - insolação = 0,0hs), as curvas de R_n e R_s apresentam-se paralelas, ou seja a presença de nuvens não impede que as curvas se mantenham paralelas duran

BALANÇO DE RADIAÇÃO

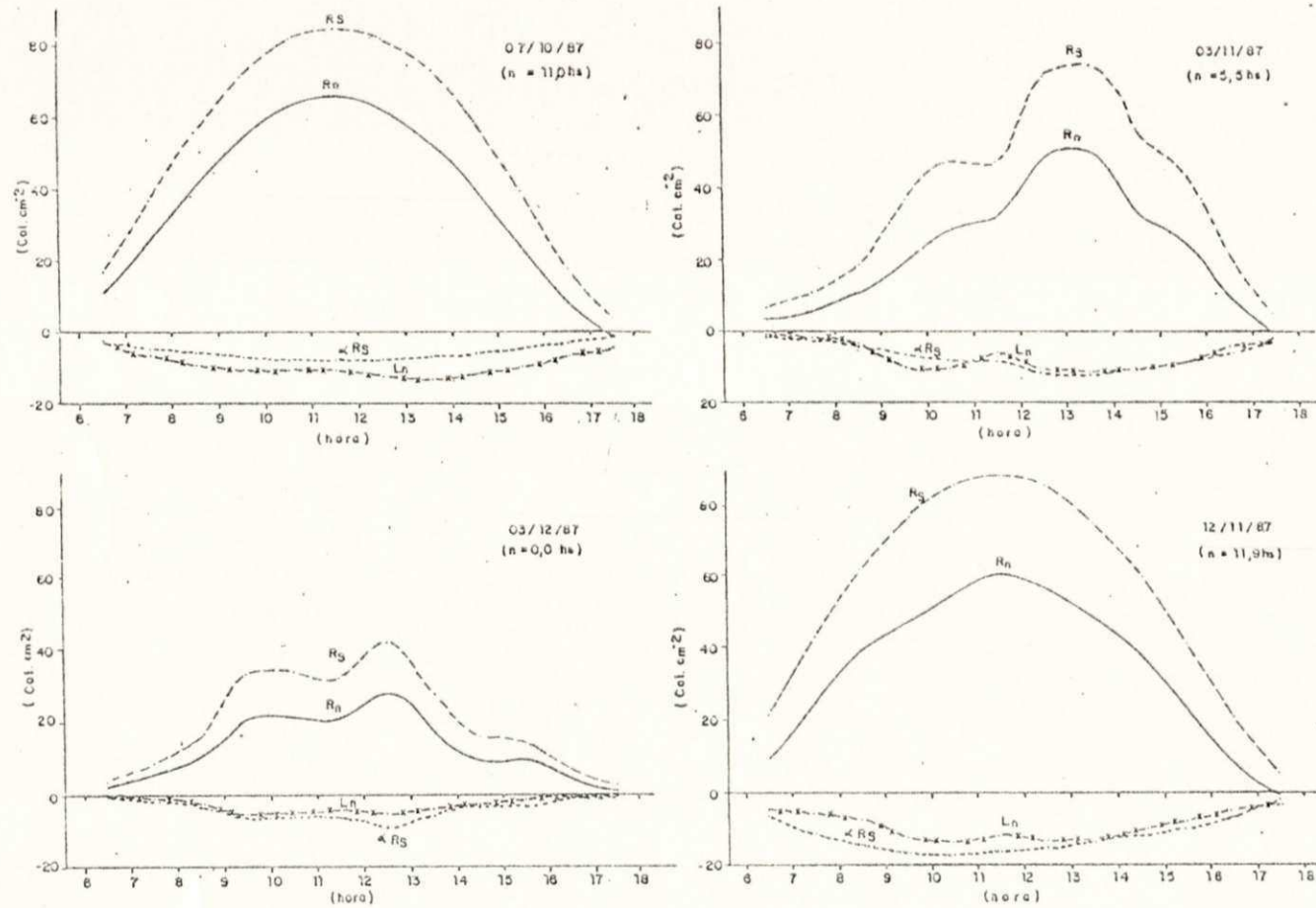


Figura - 5.13 - Balanço de radiação diária, para as situações de nebulosidade: pouca (07.10.87); razoável (03.11.87), total (03.12.87) e nenhuma (12.11.87).

te o período diurno. O gráfico representativo do dia de céu completamente claro (dia 12.11.87 - insolação de 11,9 hs), mostra que a curva de R_n ao contrário da curva da radiação global, não apresentou uma perfeita simetria, enquanto o gráfico do dia (07.10.87 - insolação de 11,0 hs) com pouca nebulosidade, indica uma perfeita simetria da curva de R_n . A explicação para essa ocorrência é que no dia 12.11.87, houve provavelmente um aumento na emissão de radiação de ondas longas, tornando o saldo de radiação de ondas longas mais negativo. Como R_n resulta do somatório de $R_s^+ (1-\alpha)$ e L_n , também diminuiu. Uma análise de todos os gráficos mostra que a radiação de ondas curtas refletida, foi menor do que o saldo de radiação de ondas longas apenas para o dia 07.10.87 (solo com pouca vegetação). Nos demais dias R_s^+ apresentou-se sempre maior ou igual a L_n e, especialmente naqueles dias de muita nebulosidade, as curvas de R_s^+ e L_n estiveram muito próximas uma da outra, ou seja essas radiações praticamente foram iguais.

5.5.2. Variação Estacional dos Componentes do Balanço de Radiação.

A variação estacional dos componentes do balanço de radiação, pode ser observada pelos valores médios diários para períodos semanais ao longo do experimento mostrados na tabela 5.4. Considerando os valores médios diários para cada parâmetro indicado na tabela 5.4 e que transcorreram 96 dias da germinação ao dia de encerramento das observações, as seguintes afirmações

TABELA - 5.4.

Valores médios diários dos componentes de radiação (cal.cm^{-2}), para períodos semanais.

Períodos	$R_s \downarrow$	$\alpha R_s \downarrow$	$R_s \downarrow (1-\alpha)$	$R_n - \text{pd}$	R_n	L_n
16.09 a 29.09.87	525,00	64,31	460,69	401,62	359,25	-101,44
26.09 a 02.10.87	523,71	64,34	459,37	403,57	352,00	-107,37
03.10 a 09.10.87	554,57	67,34	487,23	423,14	365,71	-121,52
10.10 a 16.10.87	553,29	76,67	476,62	407,71	346,14	-130,48
17.10 a 23.10.87	582,43	79,04	503,39	442,14	385,43	-117,96
24.10 a 30.10.87	559,14	96,72	502,42	441,86	387,29	-115,13
31.10 a 06.11.87	483,83	97,57	386,26	341,83	300,00	-86,26
07.11 a 13.11.87	566,86	125,52	441,34	380,57	329,43	-111,91
14.11 a 20.11.87	499,00	119,76	379,24	331,83	290,00	-89,24
21.11 a 27.11.87	563,86	124,05	439,81	380,29	328,71	-111,10
28.11 a 04.12.87	435,67	101,66	334,01	295,67	260,33	-73,68
05.12 a 11.12.87	503,19	112,86	390,33	337,00	289,00	-101,33
12.12 a 20.12.87	490,25	102,95	387,30	334,00	285,25	-101,05
Médias	529,29	94,83	434,46	378,48	329,20	-105,27

Obs.: $R_n - \text{pd}$ é o saldo de radiação para o período diurno $\alpha R_s \downarrow$ é a radiação de ondas curtas refletida pela cultura, L_n é o saldo diário de radiação de ondas longas (o sinal negativo, indica que saiu mais radiação de ondas longas do que entrou) e os demais termos já foram descritos antes.

TABELA - 5.5.

Razões entre os componentes do balanço de radiação (%)

Razões	CULTURA e LOCALIDADE			
	Soja Mandacarú-Ba (9°26'S) Brasil	Finger Millet Anakaplle (17°40'N) India	Gero Millet Somaru (11°11'N) Nigéria	Milho Somaru (11°11'N) Nigéria
$R_s \downarrow / \alpha R_s \downarrow$	17,92	18,26	19,00	17,08
$R_n - pd / R_s \downarrow$	71,50	66,56	62,12	64,51
$L_n - pd / R_s \downarrow$	10,58	15,18	20,15	18,41
$R_n / R_s \downarrow$	62,20	60,77	-	56,77
$L_n / R_s \downarrow$	19,88	20,97	-	26,15
$L_n - pn / R_s \downarrow$	9,40	5,79	-	7,74

Obs.: $R_s \downarrow$ = Radiação de ondas curtas diária; $R_s \downarrow (1 - \alpha)$ = Saldo diário de radiação de ondas curtas, R_n = Saldo diário de radiação; $R_n - pd$ = Saldo diurno de radiação; $L_n - pd$ = Saldo de radiação de ondas longas no período diurno; $L_n - pn$ = Saldo de radiação de ondas longas no período noturno.

podem ser feitas: a radiação de ondas curtas incidente alcançou um total de 50.812 langleys; dos quais 9.104 langleys ou 18% foram refletidos pela superfície para a atmosfera e 41.708 langleys ou 82% foram absorvidos pela cultura e pelo solo; o saldo de radiação para o período diurno totalizou 36.334 langleys; a radiação líquida de ondas longas ascendente totalizou 5.374 langleys, durante o período diurno e 4.739 langleys durante o período noturno; e por fim, o saldo de radiação total disponível para a cultura foi de 31.595 langleys.

Uma interpretação mais apurada do comportamento de cada componente do balanço de radiação, para todo o período de observações, pode ser feita em termos das razões percentuais, na tabela 5.5, que também mostra alguns resultados (citados por SUBRAHMANYAM e KUMAR, 1984), obtidos para outras culturas em diferentes localidades dentro da região tropical. Os resultados encontrados para Mandacarú, conforme a tabela 5.5, mostram uma boa aproximação em relação aos demais resultados, mesmo considerando que as culturas são diferentes.

5.6. Balanço de Energia Sobre a Cultura.

5.6.1. Comportamento Diário do Balanço de Energia.

Os resultados do balanço de energia levando em consideração o comportamento diurno de cada componente, em dias anteriores e posteriores ao da irrigação, representativos das si

tuações: 1) pouco desenvolvimento vegetativo, 12º e 14º dia após a germinação; 2) cultura com razoável desenvolvimento vegetativo, 30º e 32º dia após a germinação; 3) período de floração 48º e 50º dia após a germinação; e 4) período de maturação, 91º e 93º dia após a germinação, deram origem aos gráficos das figuras 5.14; 5.15; 5.16 e 5.17 respectivamente.

Observa-se na figura 5.14 que o fluxo de calor no solo é menor após a irrigação (29.09.87), ou seja parte da energia que poderia armazenar-se no solo, deve ter sido utilizada no processo de evapotranspiração. Por outro lado, tanto antes como depois da irrigação o fluxo de calor sensível saiu para a atmosfera, já com relação ao fluxo de calor latente não é observado nenhuma variação significativa.

Na figura 4.15 a situação é bastante diferente da anterior, observa-se que o fluxo de calor latente aumentou em ambos os dias, o que de certa forma, era esperado tendo em vista que o crescimento das plantas é acompanhado de uma demanda hídrica maior. Com respeito ao fluxo de calor sensível, observa-se que durante certo período do dia o mesmo está saindo da cultura, mas durante outro período é recebido pela cultura, principalmente à tarde. O fluxo de calor no solo, não apresenta variações significativas após a irrigação embora uma possível diminuição deste, possa ter sido compensada pelo aumento do saldo de radiação em relação ao dia anterior a irrigação.

Na figura 5.16 observa-se que o fluxo de calor no solo é muito pequeno antes da irrigação (12.11.87), e praticamen

BALANÇO DE ENERGIA

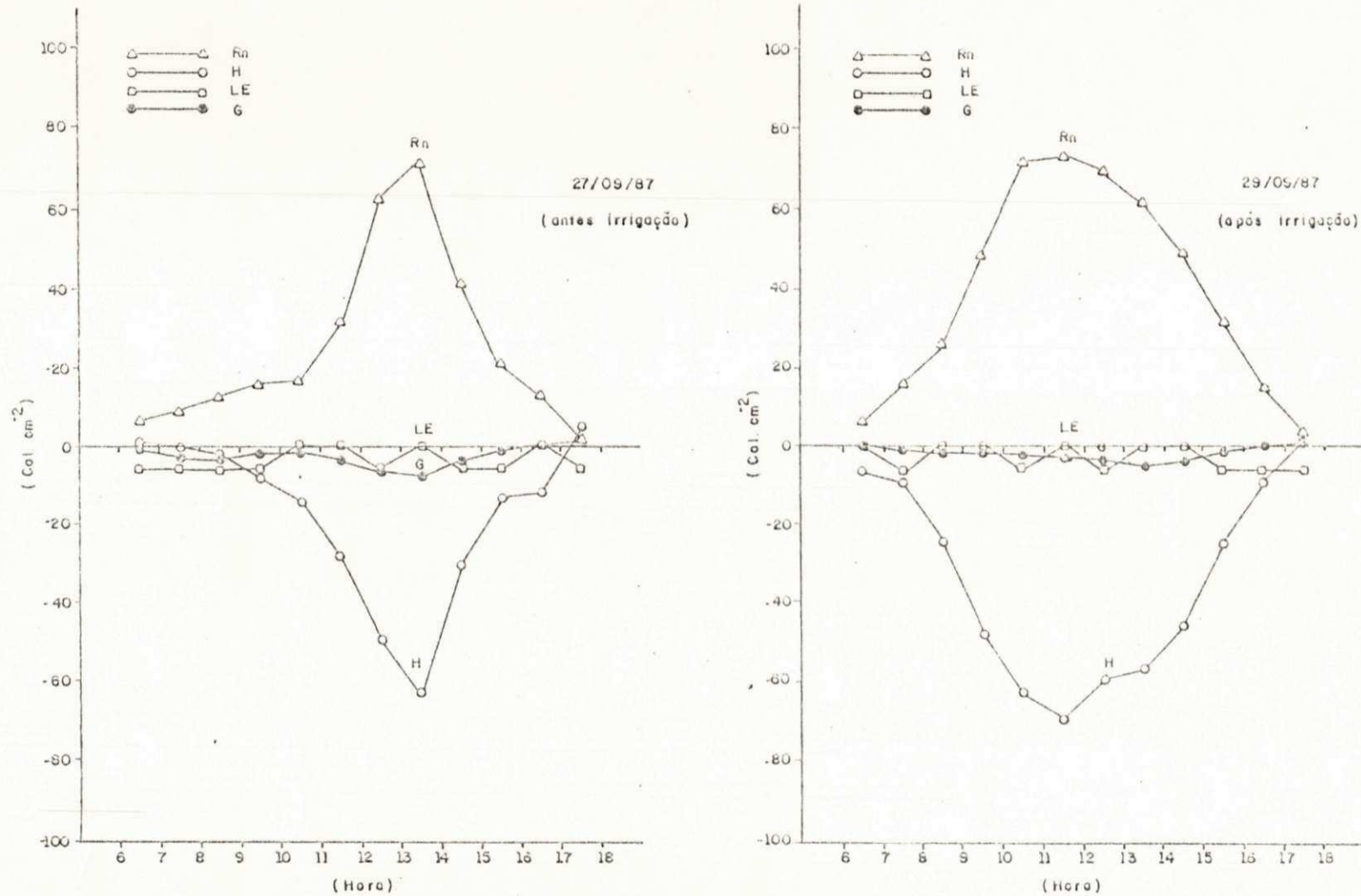


Figura - 5.14 - Balanço de energia para os dias anterior e posterior a irrigação, no período de pouco desenvolvimento vegetativo da soja (12º e 14º dias após a germinação).

BALANÇO DE ENERGIA

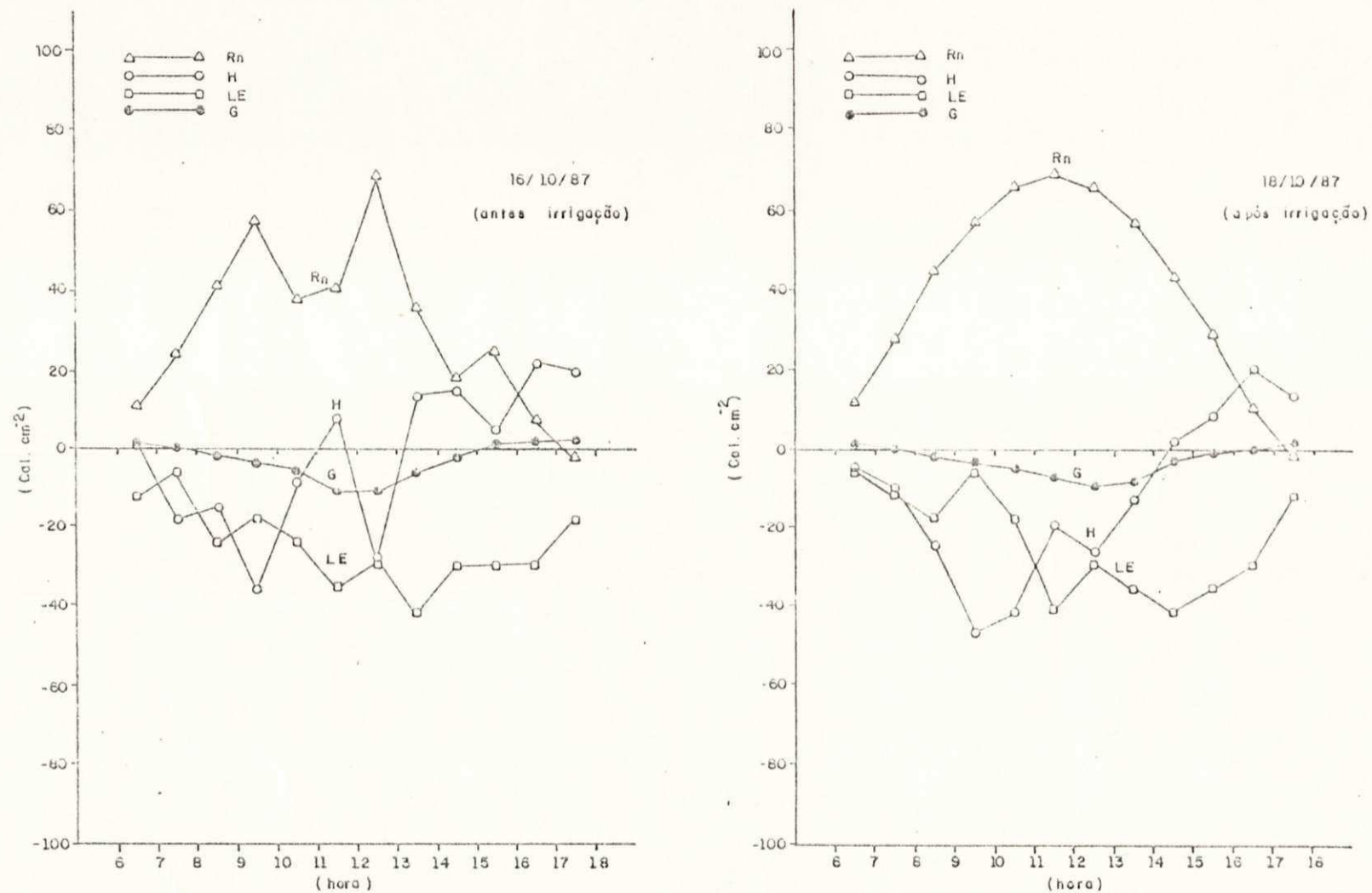


Figura - 5.15 - Balanços de energia para os dias anterior e posterior a irrigação, no período de razoável desenvolvimento vegetativo da soja (30^o e 32^o dias após a germinação).

te insignificantes após a irrigação (14.11.87). Já o fluxo de calor sensível apresentou uma diminuição no dia posterior a irrigação, o que deve ter contribuído para diminuir também o fluxo de calor latente, sendo provável que em ambos os dias houve advecção de massa seca para a cultura. É importante salientar que durante este período a cultura apresentou uma grande demanda de água, com uma média de 8,8 mm/dia no período de 07 a 13/11/87, só superada por 8,9 mm/dia entre 20 e 27/11/87 (Quadro V.7).

QUADRO - V.7.

Evapotranspiração diária média medida (mm/dia), para períodos semanais.

PERÍODO	EVAP. MEDIDA
19 a 25.09.87	3,6
29.09 a 02.10.87	4,0
03 a 09.10.87	4,2
10 a 16.10.87	5,3
17 a 23.10.87	6,8
24 a 30.10.87	7,8
31 a 06.11.87	8,1
07 a 13.11.87	8,8
14 a 20.11.87	7,2
20 a 27.11.87	8,9
28.11 a 04.12.87	7,9
05 a 11.12.87	8,4
12 a 20.12.87	7,3

Na figura 5.17 observa-se que o fluxo de calor no solo continua pequeno no dia anterior a irrigação e menor ainda

BALANÇO DE ENERGIA

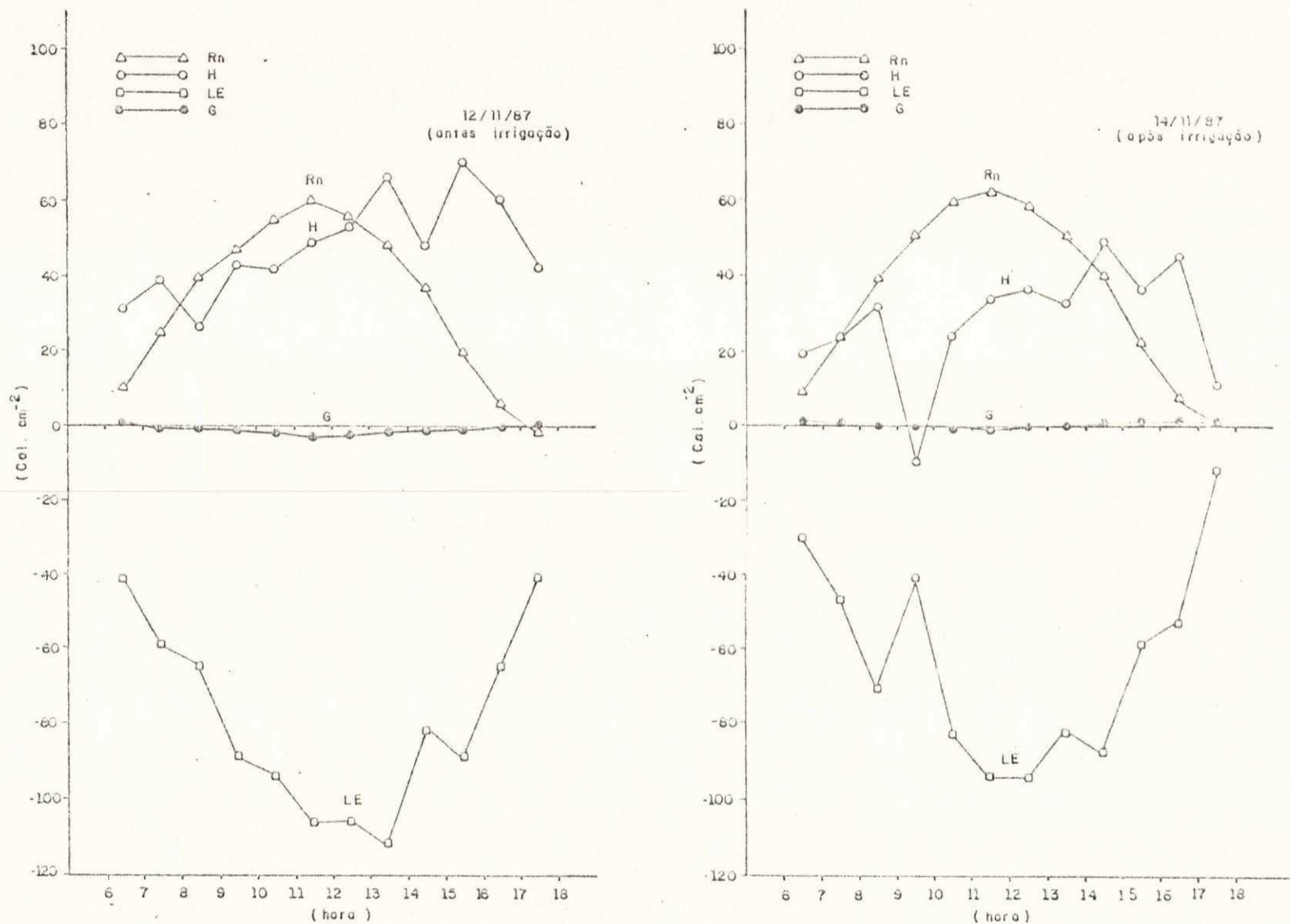


Figura - 5.16 - Balanços de energia para os dias anterior e posterior a irrigação, no período de floração da soja (50ª e 52ª dia após a germinação).

no dia posterior. O fluxo de calor sensível, ainda indica advecção para cultura, porém de forma menos acentuada que no período de floração. O fluxo de calor latente é menor que no período anterior (floração). Isto está associado ao fato de que no período de maturação, em função da queda de algumas folhas e da velhice de outras, a cultura reduziu sua demanda hídrica. Por outro lado, da mesma forma que nas outras fases, também não foi observado aumento do fluxo de calor latente após a irrigação. Esta ocorrência pode estar relacionada ao fato de que a evapotranspiração foi medida com evapotranspirômetro de lençol freático constante, o qual mantém a capacidade de campo independente das condições de umidade do solo fora do mesmo (na cultura). Entretanto, imagina-se que após a irrigação, o conteúdo de vapor d'água dentro e imediatamente sobre a cultura torna-se bastante expressivo, por conseguinte, como o evapotranspirômetro localiza-se no centro da área experimental, as plantas contidas em seu interior tendem a experimentar uma redução na difusão de vapor d'água para a atmosfera, devido a pressão do vapor d'água do ar nestas condições ser bem maior do que no dia anterior a irrigação.

5.6.2. Comportamento Estacional do Balanço de Energia.

Com os resultados diários dos componentes do balanço de energia, foram efetuadas as médias para os períodos semanais ao longo do período experimental. Estes valores médios podem ser

BALANÇO DE ENERGIA

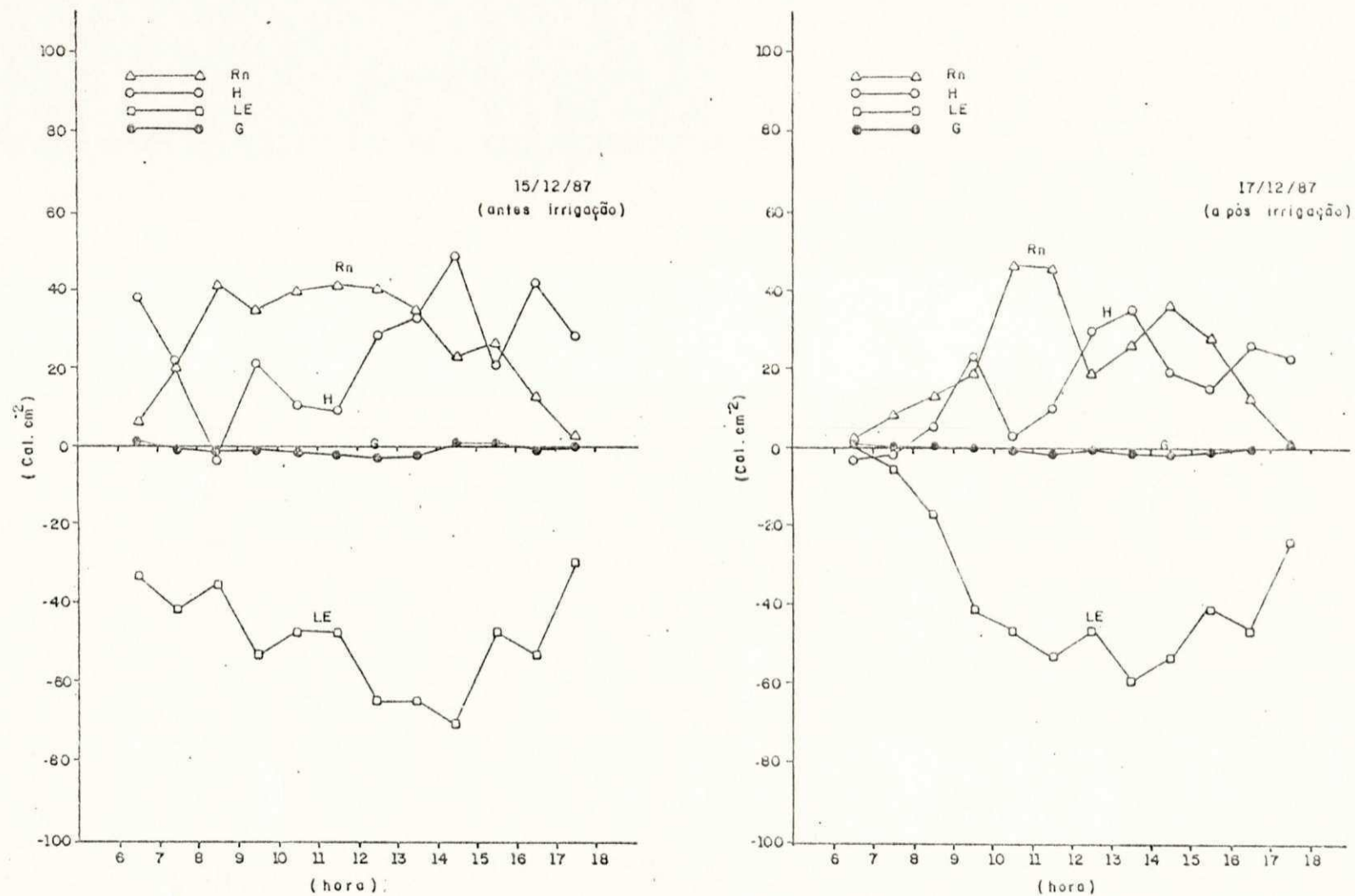


Figura - 5.17 - Balanços de energia para os dias anterior e posterior a irrigação, no período de maturação da soja (91ª e 93ª dia após a germinação).

observados na tabela 5.6. Como o fluxo de calor no solo foi observado apenas durante o período diurno, o mesmo foi considerado nulo para efeito dos cálculos que deram origem a tabela 5.7. Desta forma, considerou-se que o fluxo de calor que entrou no solo foi igual ao que saiu. Observa-se que o fluxo de calor latente foi muito maior do que o saldo de radiação, ou seja LE representou 122% de R_n , enquanto a energia utilizada na produção de matéria seca foi 1,45% de R_n . Assim, a energia complementar só poderia vir por advecção, ou seja a contribuição do fluxo de calor sensível representou 23,45% do saldo de radiação. Isto, de for

TABELA - 5.6.

Componentes do balanço de energia ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$) sobre a cultura, para períodos semanais.

Período	R_n	LE	H	P
16/09 a 15/09/87	359,25	212,41	146,45	0,39
26/09 a 02/10/87	352,00	236,03	115,54	0,43
03/10 a 09/10/87	365,71	247,81	117,39	0,51
10/10 a 16/10/87	346,14	312,67	32,12	1,31
17/10 a 23/10/87	385,43	401,19	-17,42	1,66
24/10 a 30/10/87	387,29	460,21	-77,72	4,80
31/10 a 06/11/87	300,00	477,92	-184,38	6,46
07/11 a 13/11/87	329,43	519,17	-196,25	6,51
14/11 a 20/11/87	290,00	424,79	-143,33	8,51
21/11 a 27/11/87	328,71	525,13	-208,25	11,83
28/11 a 04/12/87	260,33	466,10	-215,20	9,43
05/12 a 11/12/87	289,00	495,64	-216,70	10,06
12/12 a 18/12/87	286,25	441,82	-155,57	-
Médias	329,20	401,61	-77,18	4,76
Percentuais (%)		LE/RN 122,00	H/R _n 23,45	P/R _n 1,45

ma alguma poderá se constituir em surpresa, tendo em vista, que outros pesquisadores (MONTENY, 1972; ROSENBERG, 1972), mostraram que em regiões semi-áridas, a advecção poderia chegar a mais de 100% do saldo de energia disponível.

A tabela 5.7, mostra os percentuais da radiação global e do saldo de radiação, utilizados na produção de matéria seca (P) ao longo do experimento, ou seja 1,00% da radiação global em média e 1,45% do saldo de radiação em média, foram usados na produção de matéria seca, com os máximos respectivos de 2,164 e 3,622%, ambos verificados no período de 28.11 a 04.12.87, que coincide com o término do período de floração e início da maturação.

TABELA - 5.7.

Energia radiante usada na produção de matéria seca, para períodos semanais ($\text{cal.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$)

Período	$R_s \downarrow$	R_n	P	$P/R_s \downarrow$ (%)	P/R_n (%)
16.09 a 25.09.87	525,00	359,25	0,39	0,074	0,109
26.09 a 02.10.87	523,71	352,00	0,43	0,082	0,122
03.10 a 09.10.87	554,57	365,71	0,51	0,092	0,139
10.10 a 16.10.87	553,29	346,14	1,31	0,237	0,378
17.10 a 23.10.87	582,43	385,43	1,66	0,285	0,431
24.10 a 30.10.87	599,14	387,29	4,80	0,801	1,239
31.10 a 06.11.87	483,83	300,00	6,46	1,335	2,153
07.11 a 13.11.87	566,86	329,43	6,51	1,148	1,976
14.11 a 20.11.87	499,00	290,00	8,51	1,705	2,934
21.11 a 27.11.87	563,86	328,71	11,83	2,098	3,599
28.11 a 04.12.87	435,67	260,33	9,43	2,164	3,622
05.12 a 11.12.87	503,19	289,00	10,06	1,999	3,481
12.12 a 18.12.87	490,25	286,25	-	-	-
Médias	529,29	329,20	5,16	1,00	1,45

A tabela 5.8, mostra as razões percentuais entre o fluxo de calor no solo e radiação global ($G/R_s\downarrow$) e o saldo diurno de radiação ($G/R_n\text{-pd}$). Nesta tabela, observa-se que em média, durante o período experimental, 4,18% da radiação global e 5,68% do saldo de radiação foram armazenados no solo durante o período diurno. Observa-se de acordo com os dados da tabela 5.8, que exatamente, os valores máximos destas razões chegaram a 9,30 e 12,16% respectivamente, na primeira semana do experimento e a medida que a cultura foi cobrindo o solo, essas razões foram diminuindo até alcançarem os valores mínimos respectivos de 0,85 e 1,20%, entre 31.10 e 06.11.87, época em que a cultura cobriu totalmente o solo. A partir daí, mesmo com o aumento do IAF, essas razões começaram a aumentar vagarosamente até atingirem 3,52 e 5,16% respectivamente, no término das observações. A evolução

TABELA - 5.8.

Razões entre os fluxos diurno de calor no solo (G) e radiação global ($R_s\downarrow$) e líquida (R_n) para períodos semanais.

Períodos	$R_s\downarrow$	$R_n\text{-pd}$	G	$G/R_s\downarrow$ (%)	$G/R_n\text{-pd}$ (%)
18.09 a 25.09.87	525,00	401,62	48,82	9,30	12,16*
26.09 a 02.10.87	523,71	403,57	46,26	8,83	11,46
03.10 a 09.10.87	554,57	423,14	46,16	8,32	10,91
10.10 a 16.10.87	553,29	407,71	41,22	7,45	10,11
17.10 a 23.10.87	582,43	442,14	24,15	4,15	5,46
24.10 a 30.10.87	559,14	441,86	12,67	2,11	2,87
31.10 a 06.11.87	483,83	341,83	4,11	0,85	1,20*
07.11 a 13.11.87	566,86	380,57	9,11	1,61	2,39
14.11 a 20.11.87	499,00	331,83	5,00	1,00	1,51
21.11 a 27.11.87	563,86	380,29	11,60	2,06	3,05
28.11 a 04.12.87	435,67	294,67	9,17	2,10	3,11
05.12 a 11.12.87	503,19	334,00	15,18	3,02	4,50
12.12 a 18.12.87	490,25	335,00	17,25	3,52	5,16
Médias	522,29	378,48	22,36	4,18	5,68

estacional de G/R_n dia a dia é mostrada na figura 5.18. Observa-se nesta figura, além de tudo aquilo já dito, que nos dias em que houve irrigação, a razão G/R_n apresenta valores muito baixos, quase sempre próximos de zero. Isto, indica que o estado de umidade do solo afeta consideravelmente o fluxo de calor no solo (G).

O desenvolvimento vegetativo da cultura da soja durante o período experimental, é mostrado na figura 5.19 através da evolução semanal da produção de matéria seca (M_s) e do índice de área foliar (IAF). Observa-se, que a curva do IAF é acompanhada pela curva de M_s até o início da maturação (28.11.87. A partir daí, o IAF começa a diminuir como consequência da queda de folhas, enquanto que, M_s continua aumentando, devido ao processo de desenvolvimento de vargens e enchimento de grãos, atingindo um máximo em 12.12.87, quando começa a decrescer em função da intensificação da queda de folhas.

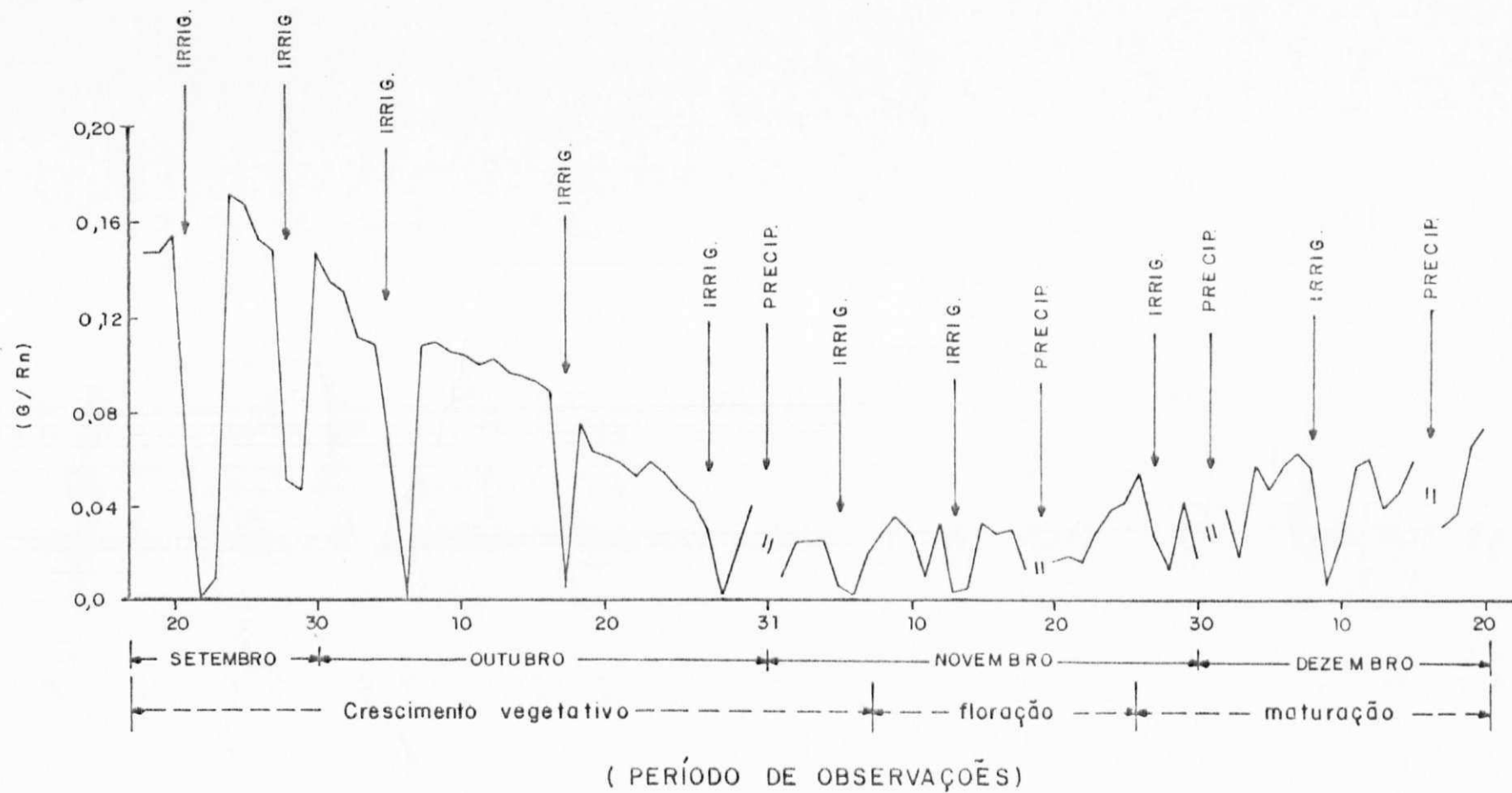


Figura - 5.18 - Variação estacional da razão G/R_n .

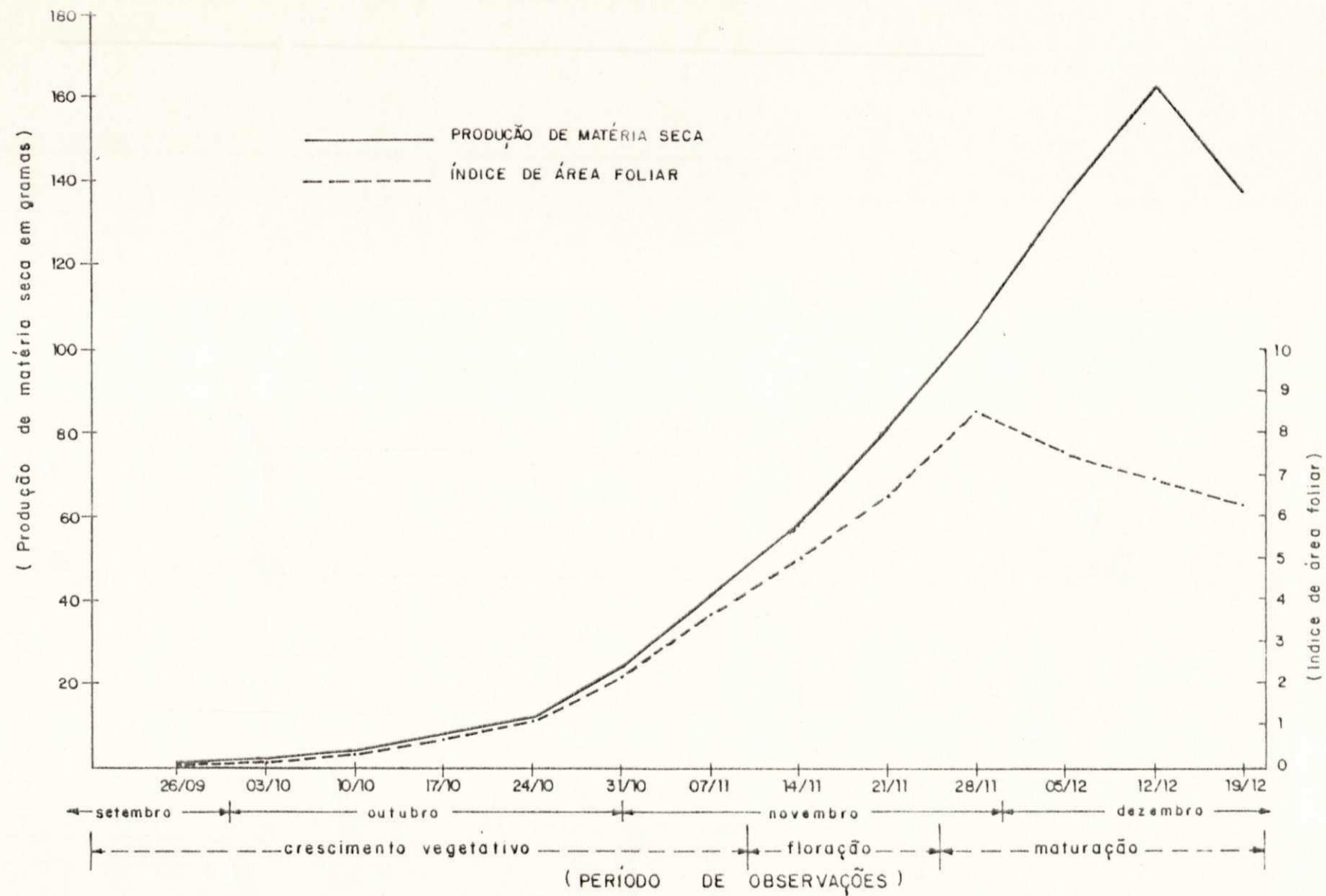


Figura - 5.19 - Evolução semanal da produção de matéria seca (M_s) e do índice de área foliar (IAF).

6 - CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos e das discussões levantadas, as seguintes conclusões são anunciadas:

- 1) A advecção se constituiu numa fonte adicional de energia para o sistema, contribuindo com cerca de 19% do total de energia utilizado no processo de evapotranspiração, enquanto a produção de matéria seca consumiu 1,45% de R_n .
- 2) As eqs. A e B propostas por Linacre (1968) e a eq. original de Penman (1948) para estimar R_n , apresentaram bons resultados. Contudo, a eq. de Penman (1948) adaptada às condições do local e da cultura, permitiu estimativas ainda melhores.
- 3) O estado de umidade da camada superficial do solo, além de afetar o armazenamento de energia no solo, ao lado do desenvolvimento da cultura e da velocidade do vento influenciou consideravelmente o albedo da superfície, conferindo-lhe uma certa inconstância mesmo depois de atingido o pleno desenvolvimento vegetativo pela cultura.
- 4) A estimativa diária de $R_s \downarrow$ baseada em leituras instantâneas, especialmente em dias com razoável nebulosidade, não deve ser efetuada tomando-se intervalos entre leituras superiores a 30 minutos.
- 5) A inclusão do termo albedo (α) nas equações resultantes de regressões lineares não melhorou as estimativas de R_n .
- 6) Recomenda-se que os resultados encontrados nesta pesquisa, sejam testados em outros locais do semi-árido nordestino.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ALBRECHT, F. Der gegenwertig stand und die aufgaben der warmehanshalt forshung. Met.Z., Braunschweig, 60: 43-56, 1943.

ALLEN, L.H. YOCUM, C.S. & LEMON, E.R. Photosynthesis under field conditions, VII. Radiant energy exchange within a corn crop and implications in water use efficiency. Agron. J., 56: 253-259, 1964.

ANDRÉ, R.G.B. Obtenção da razão de Bowen para estimativa da evaporação potencial em condições micrometeorológicas. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos, 1973. 66 p. (Doutoramento . E.E. S.C. USP).

ÅNGSTROM, A. A study of the radiation of the atmosphere. Smithsonian Misc. Coll. 65(3), 159 pp., 1915.

ÅNGSTROM, A. Effective radiation during the second international polar year. Medd. Statens. Meteorol. Hydrogr. Amst., Stockholm, 6(8), 1936.

AUGUSTINE, Y.M. & R.H. SHAW. Effect of plant population and planting date pattern of corn on the distribution of net radiation. Agron. J. 165-170, 1974.

AZEVEDO, P.V., VAREJÃO-SILVA, M.A. & VARGAS, G.A.O. Zoneamento do Potencial de Energia Solar do Nordeste. Coleção Politécnica. Univ. Federal da Paraíba, C. Grande - Pb, 1981.

- BERLATO, M.A. & FONTANA, D.C. O parâmetro α da equação de Priestley e Taylor para estimativa da evapotranspiração da soja. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 5. Belém, 1987. Coletânea de trabalhos - SBA, 178A-178C.
- BLAD, B.L. & D.G. BAKER. Reflected radiation from a soybean crop. Agron. J., 64:277-280, 1972.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. Phys. Rev. Ser. 2, Ithaca, 27: 779-787, 1926.
- BRUN, L.J., J.W. ENZ & J.K. LARSEN. Evaluation of energy balance and water use by spring wheat during a normal and dry season. Agric. and Forest Meteorol. 35: 103-111, 1985.
- BRUNT, D. Notes on radiation in the atmosphere. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 58 : 389-418, 1932.
- BUSINGER, J.A. Some remarks on Penman's equation for the evapotranspiration. Neth. J. Agric. Sci., Wageningen, 4: 77-80, 1956.
- CHIN, CHOY, E.W. & E.T. KANEMASU. Energy balance comparisons in sorghum. Agron. J., 66: 98-100, 1974.
- CHOTHIER, B.E., CLAWSON, K.L., PINTER, P. J. Jr., MORAN, M. S., REGINATO, R.J. & JACKSON, R.D. Estimation of soil heat flux net radiation during the growth of alfafa. Agric. Meteorol., 37: 109-115. 1967.

- CHOUDRURY, B.J., R.J. REGINATO & S.B. IDSO. Analysis of infrared temperature observations over wheat and calculations of latent flux. Agric. and Forest Meteorol. 37: 76-89, 1986.
- DAVIES, J.A. A note on relationship between net radiation and solar radiation. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 93: 109-115, 1967.
- DAVIES, J.A. & P.H. BUTIMOR. Reflection coefficients, heating coefficients and net radiation at Simcoe. Southern Ontario. Agric. Meteorology, 6: 373-386, 1969.
- DEACON, E.L. Vertical diffusion in the lowest layers of the atmosphere. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 75:89, 1949.
- DEACON, E.L. The measurement and recording of the heat flux into the soil. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 76: 479-487, 1950.
- DEACON, E.L. The Derivation of Swinbank's long-wave radiation formula. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 96, 313-319, 1970.
- DENMEAD, O.T. & I.C. McILROY. Measurements of nonpotential evaporation from wheat. Agric. Meteorology, 7(4): 285-302, 1970.
- DICKINSON, R.E. Land surface processes and climate-surface albedos and energy balance. Advances in Geophysics, 25: 305-353, 1983.

DYER, A.J. The turbulent transport of heat and water vapour in an instable atmosphere. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 93:501-508, 1967.

DYER, A.J. A review of flux-profile relations, Boundary-Layer Meteorol. 7: 363-372, 1974.

ELSASSER, W.M. Heat transfer by infrared radiation in the atmosphere. Harvard Meteorol. Studies, Nº 6, 107 pp.

ESTOQUE, M.A. A numerical model of the atmosphere boundary layer. J. Geophys. Res., 68: 1103-1113, 1963.

FERGUSON, J. The rate of evaporation from shallow ponds. Australian J. Sci. Res., 5: 315-330, 1952.

FITZPATRICK, E.A. & STERN, W.R. Components of the radiation balance of irrigated plots in a dry monsoonal environment, J. Appl. Meteorol. 4: 649-660, 1965.

FITZPATRICK, E.A. & STERN, W.R. Net radiation estimated from global solar radiation. Plant response to climatic factors. Proc. Uppasala Symp. UNESCO. 403-410, 1973.

FONTANA, D.C., BERLATO, M.A. & BERGAMASCHI H. Balanço de Radiação da soja em região subtropical do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 5. Belém, 1987. Coletânea de trabalhos - SBA, 317-321.

FRITSCHEN, L.J. Net and solar radiation relations over irrigated field crops. Agric. Meteorol., 4: 55-62, 1967.

FRITSCHEN, L.J. & BAVEL, C.H.M. Energy balance components of evaporating surfaces in arid lands. J. Geophysics Res., 67(13): 5179-5185, 1962.

GATES, D.M. Energy exchange in the Biosphere. Harper & Row, New York, 51 pp., 1962.

GATES, D.M. Radiant energy, its receipt and disposal. Agricultural Meteorology (P.E. Waggoner, ed.), Chap. 1 (Meteorol. Monogr. 6: 1-26). Am. Meteorol. Soc., Boston, 1965.

GAY, L.W. The regression of net radiation upon solar radiation. Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol B, 19: 1-14, 1971.

GERBER, J.F. & DECKER, W.L. Estimation of Bowen ratio by heat budget measurements of a corn field. J. Geophys. Res., 65(11): 3699-3702, 1960.

GIER, J.L. & DUNKLE, R.V. Total hemispherical radiometers. Trans. An. Inst. Elect. Engrs., 70: 339-343, 1951.

GRAHAM, W.G. & KING, K.M. Short-wave reflection coefficient for a field of maize. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. 87: 425-428, 1961.

HAESTEAD, M.H. & CLAYTON, W.H. Evaluation of the fluxes of sensible and latent heat from measurement of wind,

temperature and dew point profiles. Geoph. Res. Papers, 59: 97-122, 1958

HAMER, P.J.C. The heat balance of apple buds and blossoms. Part III. The water requirements for evaporative cooling by overhead sprinkler irrigation. Agric. and Forest. Meteorol. 37: 175-188, 1986.

IDSO, S.B. Transformation of a net radiometer into hemispherical radiometer. Agric. Meteorol. 9: 109-121, 1971.

IDSO, S.B. Systematic deviations of clear sky atmosphere thermal radiation from predictions of empirical formulae. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 98: 399-401, 1972.

IDSO, S.B. On the use of equations to estimate atmosphere thermal radiation. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 22: 287-299, 1974.

IDSO, S.B., BAKER, D.G. & BLAD, B.L. Relations of radiation fluxes over natural surfaces. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 95: 244-227, 1969.

IDSO, S.B. & BLAD B.L. The effect of air temperature upon net and solar radiation relations. J. Appl. Meteorol., 10: 604-605, 1971.

IDSO, S.B. & JACKSON, R.D. Thermal radiation from the atmosphere. J. Geophysics Res., 74: 5397-5403, 1969.

JACKSON, R.D., PINTER, P.J. Jr. and REGINATO, R.J. Net radiation calculated from remote multispectral and ground station meteorological data. Agric. and Forest Meteorol., 35: 153-164, 1985.

KANEMASU, E.T. & ARKIN, G.F. Radiant energy and light environment of crop. Agric. Meteorol., 14: 211-225, 1974.

KUMAR, K.K. Studies on some aspects of the energy budget of an agricultural crop. Unpublished Ph.D. Thesis submitted to Andhra University. 225 pp, 1979.

KUMAR, K.K. Estimation of net longwave radiation at a crop surface using temperature data. GEOBIOS, 9: 237-239, 1982.

KUMAR, K.K. & MAHESWARA RAO, V.U. Net radiation distribution in India. Mausan, 36(2): 229-232, 1985.

LANG, A.R.G. & YUEQIN, X. Estimations of leaf area index from transmission of direct sunlight in discontinuous canopies. Agric. and Forest Meteorol. 37: 229-243, 1986.

LINACRE, E.T. Climate and the evaporation from crops. J. Irrig. Drain. Div. Proc. ASCE, 93(IR4): 61-79, 1967.

LINACRE, E.T. Estimating the net radiation flux. Agric. Meteorol., 5: 49-63, 1968.

LOMAS, J., SCHLESINGER, E. and LEWIN, J. Effects of environmental and crop factors on the evapotranspiration rate and water use efficiency of maize. Agric. Meteorol., 13: 239-251, 1974.

MARTINEZ-LOZANO, J.A., TENA, F., ONRUBIA, J.E, de LA RUBIA, J.

The historical evolution the Ångström formula and its modifications: review and bibliograpy. Agric. Forest. Meteorol., 33: 109-128, 1984.

MONTEITH, J.L. The heat balance of soil beneath crops. UNESCO Arid Zone Res., 15: 9-36, 1968.

MONTEITH, J.L. & SZEIZ, G. The radiation balance of bare soil and vegetation. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 87: 159-170, 1961.

MONTEITH, J.L. & SZEIZ, G. Radiative temperature in the heat balance of natural surface. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 88: 496-507, 1962.

MONTENY, B. Evapotranspiration de diferents couverts vegetaux in region mediterranéene semi-aride. Agric. Meteorol., 10: 19-38, 1972.

MOTA, F.S., BEIRSDORF, M.I.C. & COSTA, M.J.C. Estimates of solar radiation in Brazil. Agric. Meteorol., 18: 241-254, 1977.

MUGGE, R. & MOLLER, F. Zur Berechnung von Strablungs-Stromen und Temperaturand kungen in Atmosphären von Beliebigen Aufbau. J. Geophys., 8: 53-64, 1932.

MUKAMAL, E.I. KING, K.M. & CORK, H.F. Comparison of aerodynamic and energy budget techniques in estimating

- evapotranspiration from a corn field. Arch. Meteorol. Geophys. and Bioklimatol. Ser. B, 14: 384-395, 1966.
- NKEMDIRIM, L.C. A note on the albedoes of surfaces. J. Appl. Meteorol., 11: 867-874, 1972.
- NKEMDIRIM, L.C. Radiative flux relations over crops. Agric. Meteorol., 11: 229-242, 1973.
- OWONUBI, J.J., KANEMASU, E.T. & POWER, W.L. The microclimate of narrow and wide-row sorghum with equal plant densities. Agric. Meteorol., 15: 61-69, 1975.
- PALTRIDGE, G.W. Daytime long-wave radiation from the sky. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 90: 448-493, 1964.
- PASQUILL, F. Eddy diffusion of water vapour and heat near the ground. Proc. Roy. Soc. Ser. A, 198: 116, 1949.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proc. Roy. Soc. Ser. A, 193: 120-145, 1948.
- PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. Neth. J. Agric. Sci., 4: 9-29, 1956.
- PENMAN, H.L. & LONG, I.F. Profiles and evaporation. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 102: 841-885, 1976.
- PRANDTL, L. Meteorologische Anwendungen der Stromungslehre, Beitr. Phys. Fr. Atmosph., 19: 188-202, 1932.

PRESCOTT, J.A. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Trans. Roy. Soc. South. Aust. 64: 114-125, 1940.

PROCTOR, J.T.A., KYLE, J.W. & DAVIES, J.A. The radiation balance of the apple tree. Canadian J. Bot., 50 1731-1740, 1972.

PRUITT, W.O. & ATRON, M.J. Atmospheric and surface factors affecting evapotranspiration. In: BROOKS, F.A. et alii., (ed.) Investigation of energy and mass transfer near the ground including the influences of the soil-plant-atmosphere system. Davis, Univ. California, Dept. Agric. Eng. and Dept. Irrigation, 1963. 285 pp.

RIDER, N.E. Eddy diffusion of momentum, water vapour, and heat near the ground. Phil. Trans. Roy Soc., A246: 841-501, 1954.

RIDER, N.E. & ROBINSON, G.D. A study of the transfer of heat and water vapour above a surface of short grass. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 77: 375-401, 1951.

ROBINSON, G.D. Notes on the measurement and estimation of atmospheric radiation. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 76: 37-51, 1950.

RIJKS, D.A. Water use by irrigated cotton in Sudan I: reflection of short-wave radiation. J. Appl. Ecology., 4: 561-568, 1967.

- RIJKS, D.A. Water use by irrigated cotton in Sudan II: Net radiation and soil heat flux. J. Appl. Ecology, 5: 685-706, 1968.
- ROSENBERG, N.J. Frequency of evapotranspiration rates in Central Great Plains. J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Engrs., 98(2): 203-206, 1972.
- ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L. and VERMA, S. B. MICROCLIMATE: The Biological environment. Sec. edition. John Wiley & Sons. New York, 495 pp, 1983.
- ROUSE, W.R. & WILSON, R.G. Test of potential accuracy of the water budget approach to estimating evapotranspiration. Agric. Meteorol., 9: 421-446, 1972.
- SANSIGOLO, C.A. & FARIA, A.J. Balanços de radiação e energia numa floresta tropical de Pinus Elliottii. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 5. Rio de Janeiro, 1988. Anais 1, SBMET, 2(x): 17-21.
- SASAMORI, T. A numerical study of atmospheric and soil boundary layers. J. Atmos. Sci., 27: 1122-1137, 1970.
- SCHMIDT, W. Massenaustach in freier luft und Verwandte Erscheinungen. Probleme Kosm. Phys., 7; 1925. Apud SUOMI, V.E. (50).
- SIVAKUMAR, M.V.K. & HUDA, D.A.K.S. Solar energy utilizations by tropical sorghums. Agric. and Forest. Meteorol. 35: 47-57, 1985.

- SLATYER, R.O. & McILROY, I.C. Practical micrometeorology. CSIRO. Australia and UNESCO, 1961.
- STANHILL, G., HOFSTEDE, G.J. & KALMA, J.D. Radiation balance of natural and agricultural vegetation. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 92: 128-140, 1966.
- STORR, D., FERGUSON, H.L. & CORK, H.F. Graphical and for Bowen ratio calculations. J. Appl. Meteorol., 6: 940-942, 1970.
- SUBRAHMANYAM, V.P. & KUMAR, K.K. Study in energy budget of Finger Millet crop. Part I: Short-wave reflectivity. Tropical Ecology. 25: 22-28, 1984.
- SUBRAHMANYAM, V.P. & KUMAR, K.K. Study in energy budget of Finger Millet crop. Part II: Net and solar radiation relationships. Tropical Ecology. 25 29-36, 1984.
- SUBRAHMANYAM, V.P. & KUMAR, K.K. Study in energy budget of Finger Millet crop. Part IV: Energy budget of Millet (Eleansine coracona) crop. Tropical Ecology. 25: 44-51, 1984.
- SUOMI, V.E. & TANNER, C.B. Evapotranspiration estimates from heat budget measurements over a field crop. Trans. Amer. Geophys. Union, 39: 298-304, 1958.
- SUTTON, O.G. Micrometeorology. McGraw-Hill Book Co. New York, 333 pp., 1953.
- SVERDRUP, H.U. The eddy conductivity of the air over a smooth snow field. Geophys. Publs., 11(7): 1936.

- SWINBANK, W.C. Long-wave radiation from clear skies. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 09: 339-348, 1963.
- TANNER, C.B. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 24: 1-9, 1960.
- TANNER, C.B: & PELTON, W.L. Potential Evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. J. Geophys. Res. 65: 3391-3413, 1960.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. Geograph. Rev. 38: 55-94, 1948, 78 pp.
- VILLA NOVA, N.A. Estudos sobre o balanço de energia em culturas de arroz. Tese de Livre Docência. ESALQ-USP. Piracicaba, 1973.
- VILLA NOVA, N.A., PEREIRA, A.R. & PEDRO Jr. M.J. Balanço de energia numa cultura de arroz em condições de sequeiro. Bragantia. 34: 171-176, 1975.
- VISWANADHAM, Y. Studies on radiation balance at a tropical station. Pure and Appl. Geophys., 97: 183-213, 1972.
- WEBB, E.K. Profile relationships: The log-linear long and extension to strong stability. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 96: 67-90, 1970.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (W.M.O). Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration: Report of a working group on evaporation measurement of the commission

for Instruments and Methods of Observation, Geneva, SW.
(W.M.O. n^o 210, TP 105, TECHINAL NOTE n^o 83), 1968.

YAMAMATO, G. & ONISHI, G. A chart for the calculation of
radiative temperature changes. Sci. Rept. Ser. 5(Geophys.):
108-115, 1953.