

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

COMPORTAMENTO FISIOLÓGICO E CONSUMO HÍDRICO DA CULTURA  
DE SOJA (*GLYCINE MAX (L.) MERRILL*) IRRIGADA, NAS CONDI  
ÇÕES SEMI-ÁRIDAS DO NORDESTE BRASILEIRO.

POR

JOSÉ DE PAULO ROCHA DA COSTA

CAMPINA GRANDE  
ABRIL/1989

JOSÉ DE PAULO ROCHA DA COSTA

COMPORTAMENTO FISIOLÓGICO E CONSUMO HÍDRICO DA CULTURA  
DE SOJA (*GLYCINE MAX* (L.) MERRILL) IRRIGADA, NAS CONDI  
ÇÕES SEMI-ÁRIDAS DO NORDESTE BRASILEIRO.

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO CURSO DE  
MESTRADO EM METEOROLOGIA, DA UNIVER  
SIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, EM CUM  
PRIMENTO ÀS EXIGÊNCIAS PARA OBTEN  
ÇÃO DO GRAU DE MESTRE (M.Sc.).

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: AGROMETEOROLOGIA

PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO  
(ORIENTADOR)

JOSÉ MOACIR PINHEIRO LIMA FILHO  
(CO-ORIENTADOR)

CAMPINA GRANDE  
ABRIL/1989



C837c Costa, Jose de Paulo Rocha da  
Comportamento fisiologico e consumo hidrico da cultura de soja (GLYCINE MAX (L.) MERRILL) irrigada, nas condicoes semi-aridas do Nordeste brasileiro / Jose de Paulo Rocha da Costa. - Campina Grande, 1989.  
111 p.

Dissertacao (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraiba.

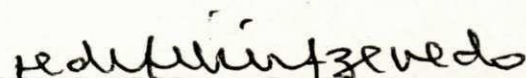
1. Soja - Cultura - Nordeste - Brasil 2. Irrigacao - Cultivo da Soja - Nordeste - Brasil 3. Semi-Arido - Cultura Irrigada - Soja 4. Dissertacao I. Azevedo, Pedro Vieira de, Dr. II. Universidade Federal da Paraiba - Campina Grande (PB) III. Título

CDU 633.34(043)

COMPORTAMENTO FISIOLÓGICO E CONSUMO HÍDRICO NA CULTURA DE SOJA  
(GLYCINE MAX (L.) MERRILL) IRRIGADA NAS CONDIÇÕES SEMI-ÁRIDAS  
DO NORDESTE BRASILEIRO.

JOSÉ DE PAULO ROCHA DA COSTA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 05/04/89

  
PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO

Orientador

  
JOSÉ MOACIR PINHEIRO LIMA FILHO

Co- Orientador

  
KAMADA KARUNA KUMAR

Membro

  
MALAQUIAS DA SILVA AMORIM NETO

Membro

CAMPINA GRANDE

ABRIL - 1989

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e irmãos,

dedico.

À minha esposa Maria Júlia  
e filhos, Helen e Bruno,

ofereço.

## AGRADECIMENTOS

O autor especialmente agradece a ajuda do Pai Celestial, sem a qual nada seria possível.

À Universidade Federal do Pará (UFPA), pela permissão para realização do programa de mestrado.

À Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Campus II, pelo apoio e contribuição para o meu aperfeiçoamento profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido, através de bolsa de estudo, modalidade demanda social.

Ao Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA/EMBRAPA), pelo apoio material e humano para execução do experimento de campo.

Ao Prof. Dr. Pedro Vieira de Azevedo, pela eficiente orientação e amizade.

Ao Prof. Dr. Kamada Karuna Kumar, pelas sugestões e atenção dispensada.

Ao Prof. José Carvalho de Moraes, pelo apoio e incentivo à minha formação profissional.

Aos colegas do Departamento de Meteorologia da UFPA, pela compreensão durante a ausência das minhas atividades acadêmicas.

A José Moacir Pinheiro Lima Filho, pesquisador M.Sc. do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA/EMBRAPA), pela co-orientação durante a fase experimental deste trabalho.

A Malaquias da Silva Amorim Neto, pesquisador M.Sc. do Centro Nacional de Pesquisa do Algodão (CNP/EMBRAPA), pelas sugestões apresentadas.

A Arnóbio Anselmo Magalhães, pesquisador do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido (CPATSA/EMBRAPA), pelo auxílio e acompanhamento técnico do experimento de campo.

Ao colega Prof. Mário Miranda Vilas Boas Leitão, pelo auxílio durante a fase experimental, deste estudo e amizade.

À Sra. Maria de Nazaré Vasconcelos Pereira, pelo incentivo e amparo à minha formação profissional.

Ao amigo Gustavo Adolfo di Pace, pelo auxílio nos trabalhos de computação.

Ao Sr. Pedro Pacheco e Sra. Leozita dos Santos, pela acolhida durante a fase experimental deste estudo.

Ao Sr. Severino Marcolino, pela ajuda na coleta de dados durante todo o período experimental.

E, finalmente, meus sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Esta pesquisa foi conduzida na estação experimental do CPATSA/EMBRAPA, Juazeiro-Ba, objetivando estudar a necessidade hídrica de uma cultura irrigada de soja (*Glycine max* (L.) *merrill*), variedade tropical, no período de setembro a dezembro de 1987. Foram feitas medições semanais da produção de matéria seca e verde e do Índice de área foliar (IAF) e, altura da cultura (h) a intervalos de três dias. Medidas horárias dos parâmetros climáticos foram realizadas com instrumentos instalados sobre a cultura e na estação meteorológica adjacente à área experimental. Igualmente, a temperatura da folhagem (dossel) foi medida com termômetro infravermelho. Três vezes ao dia (09:00, 12:00 e 15:00 horas) foram medidos os parâmetros fisiológicos utilizando-se porômetros de difusão. A evapotranspiração máxima da cultura (ET<sub>m</sub>) foi medida em dois evapotranspirômetros de lençol freático constante e a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi estimada pelos métodos de Penman, Tanque "classe A", Penman-Monteith, Priestley & Taylor, Doorenbos & Pruitt e Jury & Tanner. Os valores de ET<sub>m</sub> e ET<sub>o</sub>, foram utilizados para calcular o coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>).

IAF e h atingiram valores máximos de 8,5 e 89,2 cm, respectivamente. As resistências estomática e da cultura apresentaram valores crescentes das 09:00 às 15:00 horas. Os métodos de Penman-Monteith e Tanque "classe A", estimaram melhor a evapotranspiração medida para o período estudado e fase de completa cobertura do solo respectivamente, apresentando inclusive melhor significância estatística. A análise estatística revelou não haver diferenças significativas entre os valores de K<sub>c</sub> sugeridos pela FAO e estimados pelos diferentes métodos, ao nível de 1%.



## ABSTRACT

This research was conducted in the experimental station of the CPATSA/EMBRAPA at Juazeiro-Ba, with the objective of studying the water requirement of an irrigated Soybean crop (*Glycine max* (L.) *merrill*), variety tropical, grown from September to December of 1987. Measurements of dry and wet matters production and leaf area index (LAI) were taken at a weekly basis while the crop height (h) was measured at a three days interval. Hourly measurements of the climatic parameters were made with instruments installed above the crop canopy and at the meteorological station contiguous to the experimental area. Similarly, canopy temperature was measured with an infrared thermometer. The physiological parameters were measured three times a day (09:00, 12:00 and 15:00 hours) employing a diffusion porometer. Crop maximum evapotranspiration (ET<sub>m</sub>) was measured at two constant water level evapotranspirometers and reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) was estimated by the methods of Penman, "class A" pan, Penman-Monteith, Priestley & Taylor, Doorenbos & Pruitt and Jury & Tanner. Values of ET<sub>m</sub> and ET<sub>o</sub> were used to calculate crop coefficient (K<sub>c</sub>).

LAI and h reached maximum values of 8.5 and 89.2 cm, respectively. Stomatal and crop resistances showed increasing values from morning (09:00) to afternoon (15:00) observation hours. Measured evapotranspiration was better estimated by the Penman-Monteith and "class A" pan methods for the whole crop season and full soil cover periods, respectively, showing also a better statistical significance. The statistical analysis revealed no significant differences between FAO suggested and estimated by different methods K<sub>c</sub> values, at a 1% level.

## LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 2.1 - Balanço de energia num volume de controle (SHAW & DECKER, 1979).....	16
FIGURA 4.1 - Localização do experimento.....	34
FIGURA 4.2 - Distribuição dos instrumentos na área experimental e na estação meteorológica....	37
FIGURA 5.1 - Variação estacional da altura da cultura (h) e do índice de área foliar (IAF).....	49
FIGURA 5.2 - Produção semanal de matérias seca e verde..	51
FIGURA 5.3 - Relação entre as resistências estomáticas da vegetação medida e estimada.....	54
FIGURA 5.4 - Variação diária e estacional da resistência estomática da cultura.....	55
FIGURA 5.5 - Variação estacional da transpiração ( $T_r$ ), resistência estomática de amostras de folhas ensolaradas ( $r_{SS}$ ), e da cultura ( $r_C$ ) para o horário das 09:00 horas.....	56
FIGURA 5.6 - Variação estacional da transpiração ( $T_r$ ), resistência estomática de amostras de folhas ensolaradas ( $r_{SS}$ ) e da cultura ( $r_C$ ) para o horário das 12:00 horas.....	57
FIGURA 5.7 - Variação estacional da transpiração ( $T_r$ ), resistência estomática de amostras de folhas ensolaradas ( $r_{SS}$ ) e da cultura ( $r_C$ ) para o horário das 15:00 horas.....	58

- FIGURA 5.8 - Variação diurna dos fluxos de energia na cultura de soja - fase de crescimento vegetativo - nos dias 27/09/87 e 29/09/87, antes e após a irrigação respectivamente... 61
- FIGURA 5.9 - Variação diurna dos fluxos de energia na cultura de soja - fase de floração - nos dias 04/11/87 e 06/11/87, antes e após a irrigação respectivamente..... 62
- FIGURA 5.10 - Variação diurna dos fluxos de energia na cultura de soja - fase de maturação - nos dias 15/12/87 e 17/12/87, antes e após a irrigação respectivamente..... 63
- FIGURA 5.11 - Correlação entre os valores diários médios para períodos semanais de  $ET_m$  e  $ET_o$ , estimada por diferentes métodos, referente ao período de completa cobertura do solo..... 67
- FIGURA 5.12 - Comparação entre os valores diários da  $ET_m$  e  $ET_o$ , estimada pelo método do Tanque "classe A" (ETCA), para o período de completa cobertura do solo..... 68
- FIGURA 5.13 - Comparação entre os valores diários da  $ET_m$  e  $ET_o$ , estimada pelo método de Penman-Monteith (ETPM), para o período de completa cobertura do solo..... 68
- FIGURA 5.14 - Comparação entre os valores diários da  $ET_m$  e  $ET_o$ , estimada pelo método de Priestley & Taylor (ETPT), para o período de completa cobertura do solo..... 69

- FIGURA 5.15 - Comparação entre os valores diários da ET<sub>m</sub> e ET<sub>o</sub>, estimada pelo método de Jury & Tanner (ETJT), para o período de completa cobertura do solo..... 69
- FIGURA 5.16 - Comparação entre os valores diários da ET<sub>m</sub> e ET<sub>o</sub>, estimada pelo método de Doorenbos & Pruitt (ETDP), para o período de completa cobertura do solo..... 70
- FIGURA 5.17 - Comparação entre os valores diários de ET<sub>m</sub> e ET<sub>o</sub>, estimada pelo método de Penman (ETPE), para o período de completa cobertura do solo.. 70
- FIGURA 5.18 - Comportamento estacional da evapotranspiração diária, medida e estimada pelos métodos de Penman-Monteith e Tanque "classe A".. 72
- FIGURA 5.19 - Comportamento estacional da evapotranspiração diária, medida e estimada pelos métodos de Priestley & Taylor e Jury & Tanner... 73
- FIGURA 5.20 - Comportamento estacional da evapotranspiração diária, medida e estimada pelos métodos de Penman e Doorenbos & Pruitt..... 74
- FIGURA 5.21 - Valores acumulados da evapotranspiração, medida e estimada pelos métodos de Penman & Monteith e Tanque "classe A"..... 75
- FIGURA 5.22 - Valores acumulados da evapotranspiração, medida e estimada pelos métodos de Priestley & Taylor e Jury & Tanner..... 76


- FIGURA 5.23 - Valores acumulados da evapotranspiração, medida e estimada pelos métodos de Penman e Doorenbos & Pruitt..... 77
- FIGURA 5.24 - Correlação entre os valores diários médios para períodos semanais de  $K_C$ , sugeridos pela FAO (1975) e estimados pelos métodos de Penman e Tanque "classe A"..... 82
- FIGURA 5.25 - Correlação entre os valores diários médios para períodos semanais de  $K_C$ , sugeridos pela FAO (1975) e estimados pelos métodos de Doorenbos & Pruitt e Priestley & Taylor.. 83
- FIGURA 5.26 - Correlação entre os valores diários médios para períodos semanais de  $K_C$ , sugeridos pela FAO (1975) e estimados pelo método Jury & Tanner..... 84
- FIGURA 5.27 - Comparação entre os valores diários médios para períodos semanais de  $K_C$ , estimados por diferentes métodos e sugeridos pela FAO (1975)..... 86
- FIGURA 5.28 - Curva representativa do coeficiente de cultivo para a cultura de soja nas condições ambientais do experimento..... 87

# ÍNDICE

	Página
1 — INTRODUÇÃO.....	1
2 — FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	6
2.1 — Processos aerodinâmicos na camada limite superficial turbulenta.....	6
2.1.1 — Perfil logarítmico do vento e estabilidade do ar.....	8
2.1.2 — Resistências aos fluxos na camada limite superficial turbulenta.....	11
2.2 — Princípios do balanço de energia sobre superfícies vegetadas.....	15
2.3 — Métodos combinados para a estimativa de fluxos na camada limite superficial turbulenta.....	20
3 — REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
4 — MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1 — Materiais.....	33
4.1.1 — Descrição do experimento de campo.....	33
4.1.1.1 — Localização.....	33
4.1.1.2 — Cultura.....	33
4.1.1.3 — Instalação do experimento....	33

4.1.2 – Instrumentação utilizada no experimento.....	35
4.2 – Metodologia.....	38
4.2.1 – Medições da cultura e do solo.....	38
4.2.2 – Sistemática de observações.....	38
4.2.3 – Tratos culturais.....	39
4.2.4 – Medidas diretas da evapotranspiração máxima da cultura (ET <sub>m</sub> ).....	40
4.2.5 – Processos de estimativa da evapotrans- piração de referência (ET <sub>o</sub> ).....	40
4.2.5.1 – Método de Penman.....	40
4.2.5.2 – Método combinado de Penman- Monteith (Monteith, 1965)....	44
4.2.5.3 – Método de Priestley-Taylor...	45
4.2.5.4 – Método de Penman modificado por Doorenbos & Pruitt.....	46
4.2.5.5 – Método do Tanque "classe A"..	47
4.2.6 – Determinação do coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ).....	47
5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1 – Comportamento fenológico da cultura.....	48
5.2 – Comportamento fisiológico da cultura.....	52
5.3 – Componentes do balanço de energia na cultura de soja.	59

	Página
5.4 – Medidas e estimativas da evapotranspiração.....	64
5.5 – Coeficiente de cultivo.....	79
6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	88
7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
APÊNDICE A.....	101
APÊNDICE B.....	105





## LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 5.1 - Evapotranspiração diária média (mm/dia), medida e estimada por diferentes métodos..	65
TABELA 5.2 - Valores diários médios para períodos se- manais de $K_c$ , estimados por diferentes métodos e sugeridos pela FAO (1975).....	80
TABELA A <sub>1</sub> - Valores do fator de correção do vento, medido em altura diferente de 2m (Dooren- bos & Pruitt, 1975).....	102
TABELA A <sub>2</sub> - Valores do fator ponderante (W) para a correção do efeito da radiação, na esti- mativa da evapotranspiração potencial pa- ra diferentes temperaturas e altitude.....	103
TABELA A <sub>3</sub> - Coeficiente do Tanque "classe A" ( $K_p$ ) em função da cobertura vegetal e dos valo- res médios diários da umidade relativa e velocidade do vento.....	104
TABELA B <sub>1</sub> - Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais da evapo- transpiração medida e estimada pelos mē- todos de Penman-Monteith e Tanque "classe A".	106
TABELA B <sub>2</sub> - Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais da evapo- transpiração medida e estimada pelos mē- todos de Penman e Doorenbos & Pruitt.....	107

- TABELA B<sub>3</sub> - Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais da evapo transpiração medida e estimada pelos métodos de Priestley & Taylor e Jury & Tanner...108
- TABELA B<sub>4</sub> - Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais do coeficiente de cultivo sugeridos pela FAO (1975) e estimados pelos métodos de Penman e Tanque "classe A".....109
- TABELA B<sub>5</sub> - Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais do coeficiente de cultivo sugeridos pela FAO (1975) e estimados pelos métodos de Doorenbos & Pruitt e Priestley & Taylor..... 110
- TABELA B<sub>6</sub> - Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais do coeficiente de cultivo sugeridos pela FAO (1975) e estimados pelo método de Jury & Tanner.. 111

## 1 - INTRODUÇÃO

O fenômeno da transferência natural de água na forma de vapor pela evaporação de superfícies líquidas, úmidas e/ou vegetadas para a atmosfera, constitui importante componente do ciclo hidrológico da natureza, de essencial interesse nos diversos campos da atividade humana que tratam do aproveitamento e manejo da água.

A informação quantitativa sobre a perda de água dos campos cultivados, juntamente com a ação dos fatores climáticos, são de fundamental importância na exploração agrícola, projetos de irrigação e, indispensáveis na caracterização da aptidão agroclimática de uma região. Tais informações são, também, úteis mesmo na agricultura de sequeiro, uma vez que permitem ajustamentos da época de semeaduras dentro da estação de cultivo em função das disponibilidades hídricas médias do local considerado, possibilitando maior eficiência no aproveitamento das chuvas.

A produtividade de uma cultura depende, essencialmente, do potencial genético da planta, das disponibilidades edáficas e do clima. De modo geral, os fatores edafo-climáticas governam o estabelecimento das atividades agrícolas. Assim, o conhecimento tanto das exigências climáticas das culturas quanto das características dos solos é de preeminência decisiva no desenvolvimento da prática agrícola de determinado local. Portanto, o limite superior de produção de qualquer espécie vegetal é, pois, o resultado combinado dos fatores climáticos, do solo e da própria planta.

A necessidade cada vez maior de produzir alimento para atender ao abastecimento da crescente população mundial, tem estimulado o estudo do comportamento das culturas, principalmente daquelas de maior valor econômico (café, arroz, trigo, sorgo, soja, etc.). Este problema, por ser de interesse geral, tem unido os diversos segmentos da ciência, preocupados com a problemática da dieta humana para, num esforço interdisciplinar, assegurar de forma racional a continuidade alimentar das próximas gerações. Portanto, torna-se necessário que se intensifiquem as pesquisas, visando entender melhor os efeitos combinados: solo-planta-atmosfera, os quais são realmente importantes para o aprimoramento da atividade agrícola de uma região, uma vez que a planta também necessita de condições ambientais adequadas para se desenvolver e produzir.

Nas regiões áridas e semi-áridas, a disponibilidade de água no solo condiciona significativamente a produção agrícola. Porém, a utilização dos diferentes sistemas de irrigação tem melhorado substancialmente a produtividade nestas áreas. No caso da região semi-árida do nordeste brasileiro, que tem sido considerada como economicamente inviável do ponto de vista da produção de alimento, o emprego da irrigação tem mostrado que é possível reverter esse quadro conseguindo-se altos índices de produção para a maioria das culturas aí exploradas, tanto no aspecto quantitativo quanto no qualitativo. O uso da irrigação nas regiões semi-áridas do Nordeste também tem possibilitado ao agricultor obter mais de uma colheita por ano, face à pequena variação anual das condições atmosféricas reinantes.

No tocante à irrigação, duas questões devem ser observadas: quanto e quando irrigar. De modo geral, o agricultor

desconhece as necessidades hídricas reais das culturas e irriga com base em calendários ou tabelas de irrigação estabelecidas para outras regiões. É fato conhecido que, tanto a falta como o excesso de água são prejudiciais ao desenvolvimento pleno da planta; a água corretamente ministrada torna os nutrientes mais prontamente disponíveis à planta e, superior à requerida leva-os do solo. Tal procedimento tem a conveniência adicional de evitar que os solos agrícolas se salinizem. Para um escalonamento eficiente e racional da irrigação, informações como: características físico-hídricas do solo, tipo de planta, estágio de desenvolvimento e necessidade hídrica para cada fase fenológica, são indispensáveis para o irrigante saber quando iniciar a irrigação e quanto de água deverá ser fornecida ao solo para restabelecer as condições de umidade ótimas ao desenvolvimento das plantas.

O método mais empregado na programação da irrigação é o balanço hídrico. Nele, a evapotranspiração é estimada, utilizando-se dados climáticos e índices culturais, ou medições diretas das variações do conteúdo de umidade do solo obtidas pelo balanço entre a água aplicada (chuva ou irrigação) e a drenagem, além da zona radicular da cultura. Devido às limitações instrumentais envolvidas nas determinações direta e indireta da evapotranspiração, a estimativa deste consumo é frequentemente feita através de métodos empíricos. São inúmeros os métodos desenvolvidos por vários pesquisadores, objetivando a determinação da evapotranspiração que utilizam parâmetros meteorológicos. Basicamente, estes modelos fundamentam-se em medidas da radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade do ar acima da superfície evaporante. Porém, raramente tais modelos refletem fielmente o potencial da energia dis

ponível ao processo evaporativo. Caracteriza-se, assim, a importância da condução de pesquisas com o objetivo de quantificar com a máxima precisão possível a evapotranspiração em culturas irrigadas.

A cultura, objeto desta pesquisa, foi soja (*Glycine max* (L.) Merrill) variedade tropical. Justifica-se o presente estudo pelo fato da soja, um dos produtos agrícolas de maior importância econômica, estar ocupando posição de destaque e extraordinária expansão, considerando-se sua recente introdução na agricultura ocidental como cultivo para a produção de grãos.

Atualmente a soja é a mais importante oleaginosa sob cultivo extensivo, produzindo mais proteína por hectare do que qualquer outra planta cultivada. Suas qualidades como fonte de calorías fazem desta leguminosa o alimento básico potencial na luta contra o flagelo da fome que já vislumbra em áreas densamente populosas e menos desenvolvidas. Portanto, o estabelecimento de novas áreas de produção e a difusão do consumo de soja, podem ser fundamentais para o suprimento alimentar diário de grande parte da população nas diferentes latitudes.

O presente trabalho representa uma contribuição na área da pesquisa aplicada, visando estudar as necessidades hídricas da cultura de soja, bem como, identificar os fatores fenológicos e ambientais que são realmente significativos na produtividade, além de fornecer subsídios à agricultura irrigada do semi-árido do nordeste brasileiro. Tem como objetivo pois, obter informações do consumo hídrico em uma cultura de soja irrigada e desenvolver modelos de relacionamento entre a evapotranspiração medida através de evapotranspirômetros de lençol freático constante e estimativas da evapotranspiração

de referência obtida por diferentes métodos empíricos, assim como analisar o comportamento do coeficiente de cultivo ao longo do ciclo da cultura.

## 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em termos da teoria dos fluxos-gradientes, há três enfoques básicos para a determinação dos fluxos na camada limite superficial turbulenta: método aerodinâmico, método do balanço de energia e o método combinado.

### 2.1 - Processos aerodinâmicos na camada limite superficial turbulenta

Os fluxos de calor e massa na camada turbulenta próxima à superfície são gerados pelo movimento turbulento do ar, como uma consequência, na maior parte, do retardamento sofrido pelo vento, soprando horizontalmente sobre essa superfície. Esse retardamento do movimento do vento pode ser considerado como um processo de absorção contínuo da quantidade de movimento do vento, gerando um fluxo descendente de momento.

A magnitude do fluxo da quantidade de movimento em relação ao vento medido e a rugosidade da superfície, fornecem uma indicação da efetividade do processo turbulento no transporte de outras propriedades tais como: vapor d'água, CO<sub>2</sub>, calor sensível, etc.

Assim, os transportes (fluxos) de calor sensível (H), calor latente ( $\lambda E$ ) e da quantidade de movimento ( $\tau$ ) na camada limite superficial turbulenta, podem ser expressos, respectivamente, por:

$$H = \rho_a C_p K_h \partial \bar{T} / \partial Z \quad (2.1)$$



$$\lambda E = \rho_a \frac{\lambda \epsilon}{p} K_v \partial \bar{e} / \partial Z \quad (2.2)$$

$$\tau = \rho_a K_m \partial \bar{U} / \partial Z \quad (2.3)$$

onde  $\rho_a$  é a densidade do ar;  $C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante;  $K_h$ ,  $K_v$  e  $K_m$  são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível, vapor d'água e quantidade de movimento, respectivamente;  $\bar{T}$ ,  $\bar{e}$  e  $\bar{U}$  representam os valores médios da temperatura, pressão parcial do vapor d'água e componente horizontal da velocidade do vento;  $\lambda$  é o calor latente de vaporização;  $p$  é a pressão atmosférica; sendo  $\epsilon$ , a razão entre o peso molecular do vapor d'água ( $M_w$ ) e do ar ( $M_a$ ), ou seja,  $M_w/M_a = 0,622$  e  $Z$  é a coordenada vertical.

A quantidade de movimento é uma propriedade associada a um objeto em movimento. O ar estando em movimento, apresenta certa quantidade de movimento que lhe é associada. Por outro lado, o ar soprando sobre uma superfície, torna-se bastante turbulento ou irregular. Essa turbulência é causada por dois fatores: efeitos de fricção gerados pela rugosidade da superfície e pelos efeitos da estratificação térmica do ar. Essa quantidade de movimento é transportada através do movimento, gerando a chamada tensão de cisalhamento ou fluxo quantidade de movimento, representado alternadamente pela expressão:

$$\tau = \rho_a u_*^2 \quad (2.4)$$

em que  $u_*$  é a velocidade de fricção, que mede a capacidade de transferência da quantidade de movimento pelo ar.

### 2.1.1 – Perfil logarítmico do vento e estabilidade do ar

Na ausência de convecção livre causada pelos gradientes verticais de temperatura, a distribuição natural dos vórtices (eddies) de ar gerados pelos efeitos de fricção sobre superfícies uniformes, resulta numa variação típica da velocidade do vento com a altura. Isto é, quando a velocidade média do vento ( $\bar{U}$ ) medida em vários níveis acima da superfície é plotada contra a altura ( $Z$ ); o cisalhamento (gradiente) vertical do vento ( $\partial\bar{U}/\partial Z$ ) é máximo próximo da superfície e de cresce uniformemente com a altura, isto é:

$$\frac{\partial\bar{U}}{\partial Z} = \frac{A}{Z} \quad (2.5)$$

onde a constante  $A$  tem dimensões de velocidade, e é considerada proporcional a  $u_*$  e independente da altura. Essa proporcionalidade é usualmente expressa na forma  $A = u_*/K$  ( $K$ , constante de van Karman = 0,4). Assim, a equação (2.5) fica:

$$\frac{\partial\bar{U}}{\partial Z} = \frac{u_*}{KZ} \quad (2.6)$$

a qual, após a integração, resulta na bem conhecida equação do perfil logarítmico da velocidade média do vento, dada por:

$$\bar{U}(Z) = \frac{u_*}{K} \ln(Z/Z_0) \quad (2.7)$$

onde  $Z_0$  é o coeficiente de rugosidade da superfície. Para superfícies vegetadas, o plano-zero deve ser deslocado de certa distância vertical,  $d$ , chamada de plano-zero de deslocamento e a equação (2.7) torna-se:

$$\bar{U}(Z) = \frac{u_*}{K} \ln\left(\frac{Z-d}{Z_0}\right) \quad (2.8)$$

As equações (2.7) e (2.8) somente são válidas para condições de estabilidade atmosférica neutras ou muito próxi-

mas da neutralidade. A condição de estabilidade do ar pode ser determinada pelo número de Richardson (Ri), definido como a razão entre as forças térmicas e mecânicas, isto é:

$$Ri = \frac{g}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{\theta} / \partial Z}{(\partial \bar{U} / \partial Z)^2} \quad (2.9)$$

em que  $g$  é a aceleração devido a gravidade,  $\partial \bar{\theta} / \partial Z$  e  $\partial \bar{U} / \partial Z$  são os gradientes verticais da temperatura potencial média ( $\bar{\theta}$ ) e da velocidade do vento ( $\bar{U}$ ) e  $\bar{T}$  ( $^{\circ}K$ ) é a temperatura absoluta média da camada de ar para a qual os gradientes estão sendo considerados. Ri, assume os seguintes valores:

Ri > 0 — condições estáveis

Ri = 0 — condições neutras

Ri < 0 — condições instáveis

Os parâmetros aerodinâmicos,  $Z_0$  e  $d$ , são geralmente estimados pela equação (2.8) para condições muito próximas da neutralidade  $|Ri| < 0,003$ . O método consiste da plotagem de  $\bar{U}$  contra  $\ln(z-d)$  para diferentes valores estimados de  $d$ , até que uma relação aproximadamente linear é alcançada.  $Z_0$  e  $u_* / K$  são, então, obtidos respectivamente com a interseção e inclinação dessa reta (AZEVEDO, 1984).

Observações sobre culturas têm mostrado que  $Z_0$  é aproximadamente uma ordem de magnitude menor do que a altura dos elementos de rugosidade, ou seja,  $Z_0 \approx 0,13 h$  ( $h$  = altura da cultura). Já o plano-zero de deslocamento é da ordem de 0,6 a 0,7 da altura da cultura (THOM, 1971):

$$\begin{aligned} Z_0 &\approx 0,13 h \\ d &\approx 0,65 h \end{aligned} \quad (2.10)$$

Entretanto, recentes pesquisas têm mostrado que  $Z_0$  e  $d$  dependem também do regime de vento e do estágio de desenvolvimento da cultura (AZEVEDO & VERMA, 1986).

Assumindo a analogia de Reynolds, isto é, que os coeficientes de difusividade turbulenta da quantidade de movimento, calor sensível, vapor d'água, etc., são iguais em ordem de magnitude, tem-se:

$$K_m \approx K_h \approx K_v \quad (2.11)$$

a qual é válida apenas para condições de estabilidade térmica neutras ou quase neutras ( $|Ri| < 0,003$ ), donde deduz-se a relação:

$$K_m = K u_* (Z-d) \quad (2.12)$$

Para outras condições de estabilidade atmosférica, a equação (2.11) não é aplicada, prevalecendo as seguintes relações empíricas:

a) condições estáveis,  $Ri > 0,003$

$$K_h/K_m \approx K_v/K_m \approx 1 \quad (\text{WEBB, 1970}) \quad (2.13)$$

b) condições instáveis,  $Ri < -0,003$

$$K_h/K_m \approx K_v/K_m = (1-16 Ri)^{1/4} \\ (\text{DYER & HICKS, 1970}) \quad (2.14)$$

Vale salientar, aqui, que o ar permanece predominantemente instável no período diurno, e predominantemente estável no período noturno.

### 2.1.2 — Resistências aos fluxos na camada limite superficial turbulenta

Na camada limite superficial turbulenta, o fluxo de uma propriedade qualquer,  $\chi$ , é proporcional ao gradiente do parâmetro determinante do fluxo (temperatura-fluxo de calor sensível; pressão de vapor-fluxo de vapor-d'água; vento-fluxo da quantidade de movimento, etc.). As equações (2.1) e (2.3) são inversamente proporcionais a esses gradientes, quando se consideram as resistências, ao invés dos coeficientes de transferência turbulenta. No caso do transporte vertical de calor sensível e latente — aquecimento do ar e evaporação direta do solo ou de superfícies líquidas — o único obstáculo ao fluxo é a resistência aerodinâmica do ar ( $r_a$ ), então, as equações (2.1) e (2.2) podem ser escritas como:

$$H = -\rho_a C_p (T_s - T_a) / r_a \quad (2.15)$$

$$\lambda E = -\rho_a \frac{\lambda e}{p} (e_{su} - e_a) / r_a \quad (2.16)$$

Nestas equações,  $T_a$  e  $T_s$ , são: temperatura do ar e temperatura da superfície considerada;  $e_a$  e  $e_{su}$  são pressão de vapor do ar e pressão de vapor na superfície considerada.

No caso do transporte de vapor d'água para a atmosfera, proveniente de superfícies vegetadas, a fonte de vapor d'água para o processo de transpiração é a cavidade estomatal das folhas, onde o ar está saturado, exceto se houver deficiência hídrica, causando dessecação da planta. Na transpiração, o vapor d'água deve ser, primeiro, propagado através da abertura estomatal para em seguida ser difundido no meio atmosférico. Assim, na estimativa do fluxo de vapor d'água sobre superfícies vegetadas, deve-se levar em conta a resistência

aerodinâmica, bem como a resistência estômática ( $r_s$ ) extrapolada para a vegetação ( $r_c$ ) as quais atuam em série. Neste caso a equação (2.16) fica:

$$\lambda E = -\rho_a \frac{\lambda \epsilon}{p} \left( \frac{e_{sv} - e_a}{r_a + r_c} \right) \quad (2.17)$$

onde  $r_c$  ( $s \cdot cm^{-1}$ ) é a resistência da cobertura vegetal (dossel) ao fluxo de vapor d'água para a atmosfera e  $e_{sv}$  é a pressão de vapor na superfície vegetada.

Em condições de convecção forçada,  $r_a$  ( $s \cdot cm^{-1}$ ) é uma função da dimensão característica da folha ( $D$ ) e da velocidade média do vento. Já na convecção livre,  $r_a$  é uma função de  $D$  (m) e do gradiente de temperatura média entre o ar e as folhas ( $\bar{T}_s - \bar{T}_a$ ) (CAMPBELL, 1977):

$$r_a \approx 180(D/\bar{U})^{1/2} \quad - \text{convecção forçada} \quad (2.18)$$

$$r_a \approx 345 [D/(\bar{T}_s - \bar{T}_a)]^{1/4} \quad - \text{convecção livre} \quad (2.19)$$

A resistência aerodinâmica pode também ser estimada com base nos princípios aerodinâmicos do perfil logarítmico do vento. Assim, combinando as equações (2.3), (2.4), (2.6), (2.8) e (2.12) obtêm-se:

$$r_a = \frac{\{ \ln[(Z-d)/Z_0] \}^2}{k^2 \bar{U}} \quad (2.20)$$

a qual é válida apenas para condições de estabilidade atmosférica neutra ou muito próximas da neutralidade. Para quaisquer condições de estabilidade, a equação (2.20) deve ser corrigida de um fator  $\phi_m$  (HIPPS, 1983).

Em geral, a resistência estômática da vegetação ( $r_c$ ) é da ordem de 5 a 10 vezes superior a  $r_a$ ;  $r_c$  deve ser calcula

da com base em medições da resistência estomatal, o que não é nada fácil, uma vez que  $r_s = f$  (temperatura da folha ( $T_f$ ); luz; potencial de água na folha; déficit de saturação, etc.). Por outro lado, os estômatos estão distribuídos desigualmente nas faces superior e inferior das folhas. Algumas plantas apresentam estômatos em apenas uma face das folhas (hipoestomatosas) enquanto que outras, apresentam estômatos distribuídos igualmente em ambas as faces (anfiestomatosas). Neste último caso, as resistências das faces superior (adaxial -  $r_{ss}$ ) e inferior (abaxial -  $r_{si}$ ) atuam em paralelo e a resistência efetiva da folha é, então, expressa, segundo ROSENBERG et alii (1983), por:

$$r_s = \frac{r_{ss} \cdot r_{si}}{r_{ss} + r_{si}} \quad (2.21)$$

De forma simplificada,  $r_c$  é obtida através do índice de área foliar (IAF), ou seja:

$$r_c = r_s / \text{IAF} \quad (2.22)$$

Entretanto, na maioria dos casos a expressão (2.22) não é aplicada, haja vista que a inclinação das folhas com relação aos raios solares, faz com que as folhas ensolaradas (estômatos abertos) apresentem resistência estomática bastante diferente daquela de folhas sombreadas (estômatos parcialmente fechados). Assim, a resistência estomatal deve ser calculada levando-se em consideração a transmitância da vegetação ( $T_{rs}$ ), dada por (NORMAN, 1982):

$$T_{rs} = e^{-\frac{\text{IAF}}{2 \cos \theta}} \quad (2.23)$$

onde  $\theta$  é o ângulo de inclinação das folhas com relação à dire

ção dos raios solares. Pode-se, então, separar o Índice de área foliar nas componentes de folhas ensolaradas ( $IAF_{ss}$ ) e sombreadas ( $IAF_{sb}$ ) respectivamente como:

$$IAF_{ss} = (1 - T_{rs}) 2 \cos \theta \quad (2.24)$$

$$IAF_{sb} = IAF - IAF_{ss} \quad (2.25)$$

Com isto, a resistência efetiva da vegetação  $\bar{e}$  obtida pela média ponderada das resistências de folhas ensolaradas e sombreadas com os respectivos Índices de área foliar, isto é, a equação (2.22) toma a forma:

$$r_c = \frac{r_{ss} \cdot IAF_{ss} + r_{sb} \cdot IAF_{sb}}{IAF_{ss} + IAF_{sb}} \quad (2.26)$$

O método aerodinâmico para estimativa do fluxo de vapor d'água para a atmosfera leva em consideração a relação entre os fluxos de calor latente, equação (2.2) e da quantidade de movimento, equação (2.3). Deste modo, tem-se:

$$\frac{\lambda E}{\tau} = \frac{\lambda \epsilon}{\rho} \frac{\Delta \bar{e}}{\Delta \bar{U}} \quad (2.27)$$

associada às condições de estabilidade dadas pelas equações (2.11) e (2.13).

A equação (2.27) descreve o fundamento do processo aerodinâmico e viabiliza quantificar o fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) desde que se possa medir os valores de  $\bar{T}$ ,  $\bar{e}$  e  $\bar{U}$  em dois níveis,  $Z_1$  e  $Z_2$ , muito próximos da superfície considerada ou, ainda, que se conheça a lei de variação de  $\tau$  com  $\bar{U}$  e  $Z$ . Por outro lado, o método aerodinâmico — baseado na difusão turbulenta do vapor — apresenta sérias dificuldades, pois é sabido que só em condições especiais, a equação geral de difusão pos





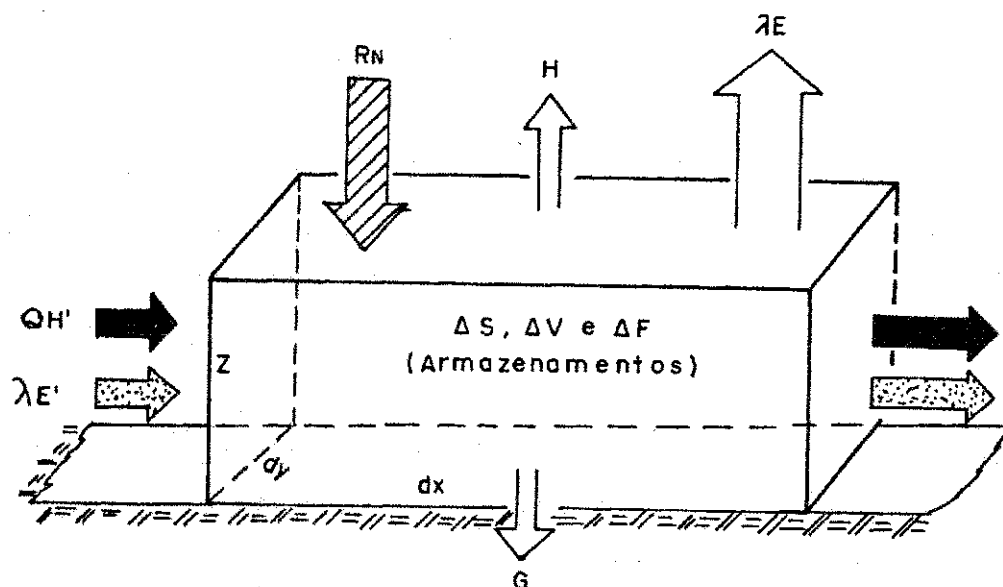




Figura 2.1 – Balanço de energia num volume de controle (SHAW & DECKER, 1979).

-  Advecção de calor sensível -  $QH'$   
 Advecção de calor latente -  $\lambda E'$

Armazenamentos de:

$\Delta S$  - calor sensível pelo sistema;

$\Delta V$  - calor latente pelo sistema;

$\Delta F$  - energia, devido a atividade fotossintética.

onde  $R_n$  representa o fluxo saldo de radiação, isto é, o fluxo de energia radiante efetivamente disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem no volume de controle;  $QH'$ , o fluxo de calor sensível, decorrente da advecção de calor;  $\lambda E'$  é o fluxo de calor latente associado à advecção de vapor d'água;  $G$  é o fluxo de calor para o interior do solo;  $\Delta F$  é o armazenamento de energia, decorrente da atividade fotossintética da vegetação;  $\Delta S$  e  $\Delta V$  são respectivamente os armazenamentos de calor sensível e latente pelo sistema.

As seguintes afirmações são válidas (VILA NOVA, 1967):

- a) os termos  $\Delta S$  e  $\Delta V$  podem ser desprezados em relação a  $R_n$ ;
- b) a fração de energia envolvida no processo de fotossíntese ( $\Delta F$ ), quase nunca ultrapassa a 3% de  $R_n$ , podendo também ser desprezada;
- c) os fluxos advectivos de calor  $QH'$  e  $\lambda E'$  serão desprezíveis, se as medições forem realizadas a baixa altura e dentro de uma área tampão suficientemente extensa para que os gradientes horizontais de temperatura e umidade sejam praticamente absorvidos. E, finalmente, o termo fluxo de calor no solo ( $G$ ) ao longo de um dia ou período maior, pode ser negligenciado (SELLERS, 1965).

Em decorrência das considerações acima e convencio-  
nando-se que os fluxos dirigidos para o interior do volume de  
controle são positivos e os que saem são negativos, a equação  
do balanço de energia (2.28) na superfície considerada torna-se:

$$R_n + H + \lambda E = 0 \quad (2.29)$$

A utilização de (2.29), na prática, não é simples  
devido a necessidade de quantificar  $H$ . FERREIRA & PEIXOTO (1962)

afirmam que o valor de  $H$  é difícil de ser obtido diretamente pelos mesmos motivos que dificultam a medição da evaporação ( $E$ ). Mesmo através da equação de definição, sua obtenção não é viável (VILELA & MATOS, 1975). Para contornar esse obstáculo, costuma-se usar a razão entre os fluxos de calor sensível e calor latente, conhecida por razão de Bowen,  $\beta$ , (Bowen, 1926) dada por:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} \quad (2.30)$$

Na expressão acima, se  $\beta$  é maior do que a unidade, indica que  $H$  é maior do que  $\lambda E$  e a maior parte da energia con vectada é na forma de calor sensível, proveniente de superfícies com teor de umidade limitado; neste caso o clima é relati vamente quente. Por outro lado, se  $\beta$  for menor que a unidade,  $\lambda E$  é maior do que  $H$  e o calor transferido para o meio atmosférico é, principalmente, na forma latente. Esta situação não contribui diretamente para o aquecimento do ar, mas, concorre para aumentar a umidade da camada atmosférica adjacente à superfície; isto se verifica normalmente em climas temperados e úmidos.

Valores negativos de  $\beta$  indicam que os fluxos apre sentam sinais diferentes. Esta condição é comum à noite, quando o fluxo de calor sensível é da atmosfera para a superfície ( $H$ , positivo); porém, a evaporação deverá continuar para que o fluxo de calor latente seja da superfície para a atmosfera ( $\lambda E$ , negativo).

Combinando-se as equações (2.30) e (2.29) obtêm-se:

$$R_n = -[\lambda E (1 + \beta)] \quad (2.31)$$

Substituindo-se as equações (2.1) e (2.2) e utilizando-se as aproximações de (2.13) em (2.30) obtêm-se:

$$\beta = \gamma \left( \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{e}} \right) \quad (2.32)$$

onde  $\gamma$ , geralmente designada por constante psicrométrica, é definida por:

$$\gamma = \frac{PC_p}{\epsilon \lambda} \quad (2.33)$$

Na equação (2.32) foi admitido o princípio da similaridade para os transportes turbulentos de calor sensível e calor latente, ou seja, os coeficientes de troca turbulenta de calor e vapor d'água foram considerados iguais e, portanto, a razão  $K_h/K_v = 1$ . Segundo SELLERS (1965), esta aproximação para a camada atmosférica abaixo de 1 metro de altura, não é considerada muito grosseira, uma vez que, nela, a maior parte da turbulência está associada a rugosidade. Tanner, citado por VAREJÃO SILVA (1977) concorda que, quando um dos pontos de medição é a superfície evaporante, o quociente  $K_h/K_v$  pode ser tomado como unitário, o que equivale considerar que os perfis de temperatura e umidade têm a mesma forma.

Substituindo-se (2.32) em (2.31) resulta:

$$R_n = -\lambda E \left[ 1 + \gamma \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{e}} \right] \quad (2.34)$$

Se as medições são realizadas em níveis muito próximos, a equação (2.34) pode ser escrita como:

$$\lambda E = - \frac{R_n}{[1 + \gamma (\Delta \bar{T} / \Delta \bar{e})]} \quad (2.35)$$

O conjunto de equações (2.30), (2.34) e (2.35) constitui a formulação básica do método do balanço de energia — baseado no princípio da conservação de energia — com ênfase no saldo de radiação disponível ao processo evaporativo, que permite estabelecer a energia consumida na evaporação, se todas as grandezas que nelas figuram forem conhecidas ou mensuráveis.

### 2.3 — Métodos combinados para a estimativa de fluxos na camada limite superficial turbulenta

Os métodos combinados inicialmente desenvolvidos por PENMAN (1948) reúnem os efeitos da energia suprida pela radiação e do transporte turbulento de vapor d'água causado pelo efeito do vento. Assim, a evapotranspiração é estimada através da equação do balanço de energia (2.29), onde o fluxo de calor sensível é obtido com base numa equação aerodinâmica. Neste sentido, a equação do balanço de energia pode ser escrita como:

$$\lambda E = - \left[ R_n - \rho_a C_p \left( \frac{\bar{T}_s - \bar{T}_a}{r_a} \right) \right] \quad (2.36)$$

onde todos os termos da equação acima já foram definidos anteriormente.

A equação (2.36), segundo ROSENBERG et alii (1983), tem possibilidade boas estimativas de  $\lambda E$ , independentemente do período de tempo e das condições de advecção, quando a temperatura da superfície ( $T_s$ ) é medida diretamente através da técnica de sensoriamento remoto. Entretanto, quando não for possível medições diretas de  $T_s$ , a equação (2.36) pode ser escrita na forma:

$$\lambda E = - \left[ \frac{S}{S + \gamma} R_n - \frac{\rho_a c_p}{S + \gamma} \left( \frac{e_s - e_a}{r_a} \right) \right] \quad (2.37)$$

em que  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor d'água, e  $S$  é o coeficiente angular (inclinação) da curva de saturação do vapor d'água, função da temperatura do ar.

### 3 — REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A estimativa do uso consuntivo de água pelas plantas, além do conhecimento dos fatores climáticos, do solo e da própria planta, são de fundamental importância, de forma a proporcionar condições de otimização da produtividade agrícola. Nesse sentido, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de entender melhor as diferentes fases de desenvolvimento das culturas, as quais desempenham significativa influência na produção final (DESJARDINS & QUELLET, 1980; GARDNER et alii, 1981; STENGMAN & LEMERT, 1981).

A informação do consumo hídrico estacional ou dos diversos subperíodos do ciclo vegetativo de cada espécie vegetal, constitui elemento fundamental para o estudo das relações água-solo-planta. Esse dado torna-se mais relevante no caso de haver necessidade de suplementação de água através de irrigação, proporcionando seu manejo de forma mais racional e efetiva, de acordo com a exigência da cultura. Também o consumo de água nos vários estágios de desenvolvimento da cultura, permite ajustamentos da época da semeadura em função das disponibilidades hídricas da região considerada, determinando maior eficiência no aproveitamento das precipitações (BERLATO et alii, 1978).

Em áreas climaticamente aptas à prática agrícola, particularmente aquelas localizadas nas regiões amazônica, Sul e Sudeste do Brasil, as condições de umidade no solo apresentam-se favoráveis à agricultura e, as irrigações são normalmente dispensáveis, em virtude da quantidade e frequência das chu



vas serem adequadas durante o período de cultivo. Porém, outras regiões como: Centro-Oeste e Nordeste, a ocorrência de seca prolongada ou estiagem em alguma fase crítica da estação de cultivo é bem mais freqüente, necessitando de irrigações suplementares para a restauração das condições ótimas de umidade às plantas. De acordo com o exposto acima, JACKSON (1982) afirma que a produção agrícola nas regiões áridas é quase totalmente dependente da irrigação e, nas regiões semi-áridas, a irrigação é cada vez mais usada para suprir a falta de precipitação. Já naquelas normalmente úmidas, os sistemas de irrigação estão sendo implantados para amenizar as condições de estresse das culturas após a ocorrência de alguns dias sem chuva (veranicos) ao longo da estação chuvosa.

A determinação do consumo de água pelas culturas é feita com base nas perdas para a atmosfera pelo processo da evaporação do conjunto solo-planta (evapotranspiração). Segundo ROSENBERG et alii (1983) a evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente na natureza e não é fácil distinguir o vapor d'água produzido pelos dois processos. Deste modo, o termo evapotranspiração é usado para descrever o processo total de transferência de água na forma de vapor de superfícies vegetadas para a atmosfera. MONTEITH (1981) assegura que do total de água evapotranspirada pelas plantas, aquela perdida por meio da cutícula representa fração insignificante. A demanda evaporativa de um sistema solo-planta, está sujeita a alguns fatores controladores de forma a inibir ou favorecer o processo. Para LEMON et alii (1957) e SLATIER & MCILROY (1961), a evapotranspiração é uma função dos fatores meteorológicos, do solo e da própria planta. Em boas condições de umidade do solo, a evapotranspiração potencial depende, também, do tipo

e estágio de desenvolvimento da cultura (TANNER & LEMON, 1962; BERLATO & MOLION, 1981). Por outro lado, quando a cultura cobre completamente o solo, a evaporação processa-se quase que exclusivamente pela planta e, se a disponibilidade hídrica na zona das raízes é propícia ao processo, a transferência de vapor para a atmosfera será controlada apenas pelos fatores climáticos (WITHERS, 1984). Entre as variáveis do clima, a radiação solar é, sem dúvida, a que mais contribui para a ocorrência do complexo fenômeno da evaporação. Posteriormente, com menor grau de influência vêm o vento, a temperatura e a umidade do ar.

Apesar da evapotranspiração ser um parâmetro de real importância no transporte de umidade da superfície para a atmosfera, KNAPP (1985) salienta que esta é, ainda, pouco conhecida e aponta duas razões básicas para tal desconhecimento. Primeira, não existe instrumentação que possa verdadeiramente medir a evaporação ou evapotranspiração de superfícies naturais e, segunda, a evaporação e a transpiração são altamente sensíveis às influências do microclima, e apresentam grande variabilidade espacial. Segundo ainda o autor, a intensidade da evapotranspiração em superfícies vegetadas geralmente difere significativamente, mesmo sob condições meteorológicas semelhantes e, por esta razão, muitas técnicas de estimativa não são suficientemente precisas.

Na tentativa de universalizar os métodos de determinação da evaporação e/ou evapotranspiração, muitos pesquisadores, em diferentes locais e climas, têm testado diversas maneiras de quantificar este importante componente do ciclo hidrológico da natureza. Entre muitos, Jansen, citado por JURY et alii (1980) confrontaram o desempenho de dezesseis modelos

em climas diferentes, e concluíram não existir um único método que fosse universalmente adequado para uso em todos os regimes climáticos.

No transcurso dos tempos, tem-se reconhecido que os elementos meteorológicos que formam o clima, são os mais marcantes no estabelecimento das perdas hídricas por evapotranspiração em superfícies vegetadas. Inúmeros métodos de cálculo desse parâmetro, a partir de dados climáticos, têm sido sugeridos, descritos, testados e utilizados com variados graus de sucesso. Estes modelos variam desde cálculos complexos, baseados no processo físico da evaporação, necessitando, por conseguinte, de grande precisão das medições microclimáticas até simples métodos empíricos, fundamentados em uma correlação linear entre a evaporação medida e a temperatura do ar, ou a radiação solar.

Vários pesquisadores (VILA NOVA, 1967; DYLLA et alii, 1980; BERLATO & MOLION, 1981; SHAW, 1983; ROSENBERG et alii, 1983 e KLAR, 1984) descrevem diferentes técnicas para medir e estimar a transferência de vapor d'água para a atmosfera. Porém, nem sempre reúnem precisão, facilidade de uso e baixo custo de utilização. No entanto, todos estes modelos buscam obter valores mais próximos daqueles que realmente se verificam na superfície evaporante. Dada as dificuldades instrumentais envolvidas nas determinações direta e indireta da evapotranspiração em condições naturais, os métodos empíricos que utilizam dados climatológicos, têm sido empregados em condições agrônômicas e climáticas diferentes daquelas onde foram originalmente desenvolvidos. Em tais circunstâncias é prudente que seja testada a precisão do método antes de empregá-lo em outra situação climática. A aplicação de qualquer método empírico

para determinação da evapotranspiração em determinado local é de validade duvidosa, a menos que tenha sido desenvolvido ou previamente testado nesse local (DOORENBOS & PRUITT, 1975; RAMOS et alii, 1980).

Conforme RUSSELL (1980) a publicação da equação de Penman (1948) marcou o início dos estudos da evaporação em campos cultivados. A equação de Penman que combina os métodos do balanço de energia e aerodinâmico é, em geral, considerada de boa precisão para estimativas de evapotranspiração, proporcionando, assim, sua utilização em várias partes do mundo. Segundo THOM & OLIVER (1977) o sucesso da fórmula de Penman na maioria dos regimes climáticos depreende, desta, reunir os principais parâmetros que regulam o processo, revelando limitações apenas com relação ao termo aerodinâmico. MARQUES FILHO et alii (1982) através da generalização da fórmula de Penman proposta por (Thom & Oliver, 1977) encontraram que a contribuição do termo aerodinâmico para o cálculo da evapotranspiração de florestas da Amazônia, foi semelhante àquele correspondente ao balanço de energia. Nesse estudo, os valores médios globais dos termos aerodinâmico e do balanço de energia estimados pelo modelo foram 3,4 e 3,6, respectivamente. No semi-árido do nordeste brasileiro VAREJÃO SILVA (1977), estudando a demanda hídrica de uma cultura de alfafa irrigada, obteve bom ajustamento ( $r = 0,94$ ) entre a evapotranspiração medida pela variação de umidade no solo e aquela estimada por uma variante da equação de Penman, utilizando como termo aerodinâmico a evaporação do Piche.

Monteith, citado por RUSSELL (1980), introduziu na expressão de Penman duas resistências à transferência de vapor d'água; uma relativa à cobertura vegetal,  $r_c$ , (resistência

da cultura) e outra, relacionada com o meio ambiente,  $r_a$ , (resistência aerodinâmica). Conforme ainda o autor, essa equação modificada é aplicável para todos os tipos de vegetação, inclusive as de grande porte, porém, necessita que  $r_c$  seja medida ou relacionada com algumas características simples do solo e da planta; de modo semelhante,  $r_a$  poderá ser estimada a partir da altura da planta e da velocidade do vento. Para STEWART & GASH (1975) a equação de Penman-Monteith (Monteith, 1965) possibilita determinações da evapotranspiração de qualquer superfície vegetada, sob quaisquer condições meteorológicas ou do solo, usando-se parâmetros climáticos medidos sobre o local considerado, se os valores das resistências da cultura e aerodinâmica forem medidos ou estimados por modelos apropriados.

BLACK et alii (1970) empregou a expressão de Monteith (1965) para calcular a evapotranspiração, estimando separadamente as componentes da transpiração e da evaporação do solo. Confrontados os valores medidos e estimados em cultura de feijão, constatou que o modelo sobrestimou em 4%, o que foi atribuído à imprecisão nas estimativas da evaporação do solo. Em estudo semelhante com soja e sorgo, LYNN et alii (1972) mostraram que a porção de água perdida por transpiração foi estreitamente correlacionada com o índice de área foliar (IAF), sendo a transpiração aproximadamente 50% da evapotranspiração total, quando  $IAF = 2$  e 95% para  $IAF = 4$ .

MILNE (1978) estimou a resistência à transferência de vapor d'água de uma floresta de pinho, utilizando a equação combinada Penman-Monteith para verificar sua influência na taxa de vapor perdida por transpiração obtida pelo método da correlação turbulenta. Durante seis dias consecutivos de medições, foi constatado que a resistência seguiu tipicamente

uma tendência de decréscimo, desde valores altos ( $\approx 150 \text{ s.m}^{-1}$ ) ao amanhecer para cerca de  $40 \text{ s.m}^{-1}$ , por volta do meio dia, voltando novamente a crescer e manter-se estável com valores maiores que  $100 \text{ s.m}^{-1}$  ao entardecer. A transpiração média no período estudado foi de  $3 \text{ mm/dia}$  e as alterações observadas nas taxas diárias, foram significativamente correlacionadas com as variações no saldo de radiação. Recentes estudos têm apresentado versões da equação Penman-Monteith. Exemplos de tais modelos foram propostos por (BAILEY & DAVIES, 1980; THOMPSON, 1982; WEBB, 1984).

Devido ao surgimento de instrumentação sofisticada nos últimos anos, têm-se tornado mais precisas, simples e fáceis as medidas de parâmetros climáticos e fisiológicos. No campo das medições da evaporação e evapotranspiração, pouco avanço pode ser notado e estas variáveis continuam sendo avaliadas, a partir de instrumentos utilizados nas estações meteorológicas, os quais fornecem apenas indicações de casos particulares do processo evaporativo (por exemplo: atmômetro, tanque de evaporação e lisímetros); indiretamente como uma quantidade residual em uma expressão, envolvendo muitos outros processos naturais (balanço de energia e água) ou empregando equações empíricas. Apesar do grande número de métodos desenvolvidos para medir e estimar a perda de água por evapotranspiração nas condições ambientais reinantes, VILA NOVA et alii (1975) garantem que desses somente os baseados em medidas lisimétricas e em determinações do balanço de energia, fornecem resultados satisfatórios. Para ROSENBERG (1974), os métodos micrometeorológicos apresentam vantagens sobre os demais, por permitirem estimativas da evapotranspiração para períodos curtos como hora ou fração, sendo válidos, ainda, para calibrar

outros métodos. Embora dispendioso e complexo, o lisímetro de pesagem é o método mais seguro e preciso para medições da evapotranspiração. Porém, são necessárias precauções no manejo, operação e montagem - além do que, o lisímetro de pesagem é recomendado para aferição de outros métodos de medida da evapotranspiração (GANGOPADHYAYA, 1971).

TAJCHAMAN (1971), utilizando os métodos do balanço de energia e da difusão turbulenta de vapor em cultivo de alfafa, batata e floresta de pinho, encontrou boa concordância na estimativa da evapotranspiração para plantas baixas e não para florestas; a evapotranspiração na floresta foi 4% menor do que aquela calculada para a alfafa; esta, porém, 14% maior que a estimada para a cultura de batata. GRANT (1975) comparou a evapotranspiração calculada por três métodos empíricos, em lavoura de cevada, com medições em lisímetro de pesagem e sonda de nêutron. Foi comprovado que o método do balanço de energia apresentou resultados tão bons quanto os da razão de Bowen, com a vantagem de não precisar de medições de umidade do solo, as quais, segundo Grant, são difíceis de serem realizadas precisamente para períodos longos de tempo. BLACK et alii (1980) compararam estimativas da evapotranspiração pelo método da razão de Bowen/balanço de energia com outros cinco modelos numa floresta de pinho. Os resultados revelaram que esse método apresenta limitações para avaliar a evapotranspiração em florestas; no entanto, não citam quais as restrições. Confrontando vários modelos para estimar a evapotranspiração potencial, FERNANDEZ & GONDIN (1980), em Areia - Paraíba, encontraram que a fórmula de Makkink, foi a melhor, seguida da de Penman, Garcia-Lopez e por fim, a de Thorntwaite, sem, no entanto, procederem a uma análise de erro dos resultados.

Muitos pesquisadores têm comprovado que os métodos empíricos subestimam significativamente a evapotranspiração em condições de moderada e forte advecção de calor sensível que ocorrem nas regiões áridas e semi-áridas. Segundo JURY et alii (1980), pouco é conhecido sobre os efeitos da advecção de calor sensível sobre os modelos de estimativa da evapotranspiração. Brakke et alii, citado por SINGH et alii (1986), encontraram que numa base diária, a advecção de calor sensível em escala regional, aumenta de 7 a 40% a energia consumida no processo evapotranspiratório. Rosenberg, mencionado por SOUZA (1983), estudando a evapotranspiração em cultura de alfafa, utilizando lisímetro, constatou que a fórmula de Penman subestimou em 30% os valores da evapotranspiração de referência em condições de forte advecção de calor sensível.

PRIESTLEY & TAYLOR (1972) apresentaram uma interessante simplificação do método combinado, em que a evapotranspiração é expressa pelo produto entre o termo energético da equação de Penman e uma constante,  $\alpha$ , função da temperatura média do ar. A equação de Priestley & Taylor com a aplicação restringida a superfícies líquidas, solo vegetado sem restrições hídricas e condições ambientais sem advecção, foi ajustada e testada por JURY & TANNER (1975) para ser utilizada em situações onde ocorre fluxo advectivo de calor sensível. Os resultados da evapotranspiração, obtidos para uma cultura de batata irrigada, mostraram boa consistência com aqueles medidos em lisímetros. O ajustamento foi feito através da adaptação da constante,  $\alpha$ , (usada originalmente com valor médio de 1,26 para condições não ou pouco advectivas) às condições de advecção reinantes no local do experimento.

Nos últimos anos, muitas pesquisas têm sido realiza



das, visando determinar as necessidades hídricas de culturas por meio do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), definido como a razão entre a evapotranspiração medida em lisímetros ( $ET_m$ ) e a evapotranspiração de referência da cultura ( $ET_o$ ) estimada por vários métodos. Segundo Daker, citado por SOUZA & VAREJÃO SILVA (1985), esse coeficiente é uma função do tipo de solo, do seu conteúdo de umidade, sendo influenciado também pelas características biológicas da planta, variando de cultura para cultura e com o estágio de crescimento. SOUZA et alii (1987) asseguram que estimativas confiáveis de  $K_c$  ao longo da estação de cultivo, permitem que se conheça as necessidades de irrigação de uma cultura, além de facilitar o estabelecimento da frequência de irrigação, sem necessidade de medições da umidade do solo.

A determinação do melhor método de estimativa de  $ET_o$  é muito importante, uma vez que a precisão do método e/ou falta de informações meteorológicas, inviabilizam sua utilização. Isto justifica o emprego por muitos pesquisadores, das medidas de evaporação do Tanque "classe A" na estimativa de  $ET_o$ , por não envolver outros parâmetros meteorológicos e estar disponível em qualquer estação climatológica ou agrometeorológica. ENCARNAÇÃO (1980), utilizando um evapotranspirômetro de lençol freático constante para medida de  $ET_m$  numa cultura de feijão, constatou que as estimativas da evapotranspiração potencial pelo Tanque "classe A", entre outros métodos estudados, forneceu valores de  $K_c$ , mais próximos daqueles sugeridos pela FAO. FONTANA et alii (1987) obtiveram melhores resultados ( $r = 0,91$ ) na estimativa da evapotranspiração de um cultivo de soja com o método do Tanque "classe A" em comparação com outros métodos estudados. AZEVEDO et alii (1987) e

SOUZA et alii (1987) recomendam o uso deste instrumento (Tanque "classe A") para estudos do consumo hídrico de culturas irrigadas.

Nos últimos anos, várias pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de estimar o comportamento do gradiente de temperatura,  $\Delta T$ , entre a folhagem e o ar, visando estabelecer a relação entre  $\Delta T$  e o estresse hídrico da cultura, e com isso, determinar as necessidades hídricas em termos de quando e quanto irrigar. Para tal, emprega-se o termômetro infravermelho para medir a diferença de temperatura entre as folhas e o ar na vizinhança destas; como uma medida quantitativa da variação na evapotranspiração resultante da redução do teor de umidade do solo (REICOSKY et alii, 1980; KANEMASU et alii, 1981; JACKSON, 1982). Com base nesse princípio, foram desenvolvidos modelos de determinação do escalonamento de irrigação (BLAD & ROSENBERG, 1976; GARDNER, 1981; GEISER et alii, 1982). Desse modo, a temperatura das folhas pode ser considerada como uma medida indireta da exigência de água para as plantas e um indicador das necessidades hídricas da cultura (SUMAYAO et alii, 1980; JACKSON et alii, 1981). Empregando a técnica da termometria infravermelho, DANTAS (1987) estudou o comportamento de uma cultura de milho, nas condições semi-áridas do nordeste brasileiro, sob vários níveis de umidade do solo, e constatou a viabilidade desta técnica para determinação das necessidades de água para a cultura.

REICOSKY (1980), pesquisando o efeito do estresse hídrico das plantas sobre a evapotranspiração por meio da temperatura da cobertura foliar de um cultivo de soja irrigada e não irrigada, comprovou que, quando o estresse aumenta, a taxa de evapotranspiração decresce de 40 a 70%, e observou um aumento de temperatura no interior do dossel.

## 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 - Materiais

#### 4.1.1 - Descrição do experimento de campo

##### 4.1.1.1 - Localização

O experimento foi instalado numa área de aproximadamente 1.100 m<sup>2</sup>, em solo classificado como vertissolo, ao lado da estação meteorológica (09° 24' S, 40° 26' W, 375 m) da Estação Experimental do Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-árido (CPATSA) da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), localizado no perímetro irrigado do Projeto Mandacaru, no município de Juazeiro - Ba, região semi-árida da Baía do Médio São Francisco (figura 4.1).

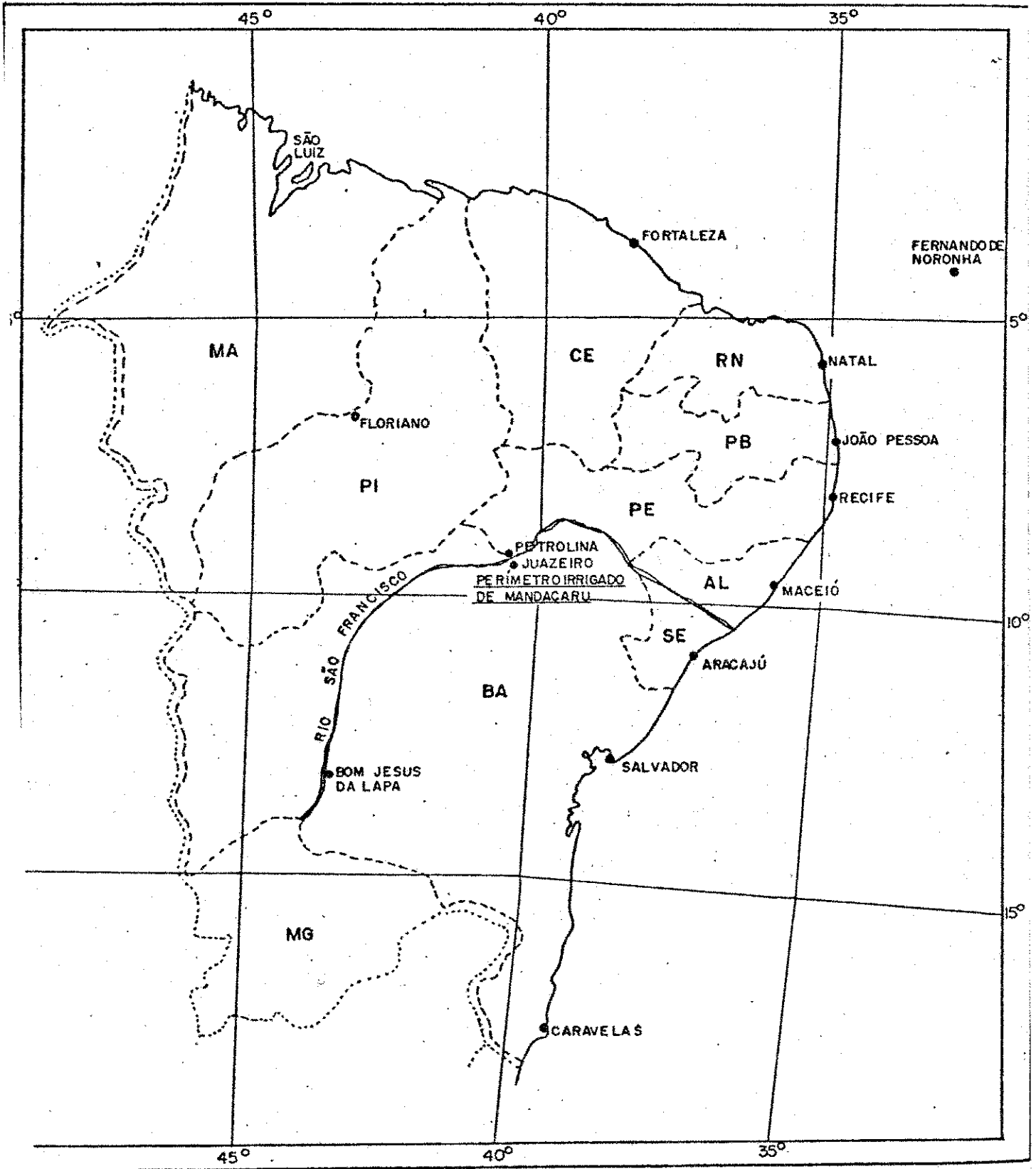
##### 4.1.1.2 - Cultura

Após o preparo do solo em sistemas de sulcos no sentido leste-oeste, a área foi plantada com soja (*Glycine max* (L.) Merrill, cultivar tropical), obedecendo ao espaçamento de 0,60 m entre fileiras e semeio de aproximadamente 25 sementes por metro linear, com uma densidade de aproximadamente 400.000 plantas por hectare.

##### 4.1.1.3 - Instalação do experimento

A instalação do experimento no local descrito acima, proporcionou a utilização de dois evapotranspirômetros de lençol freático constante, com dimensões de 3,40 m de comprimen

Figura - 4.1. Localização do experimento.



to, 1,50 m de largura e 1,00 m de profundidade, instalados no local a mais de dez anos, possibilitando também a obtenção de todos os parâmetros climáticos observados na estação meteorológica, limitada ao norte da área experimental. A pesquisa foi conduzida no período de setembro a dezembro de 1987.

#### 4.1.2 — Instrumentação utilizada no experimento

Os parâmetros atmosféricos foram medidos com os seguintes instrumentos:

##### a) na área experimental

- albedômetro solar;
- piranômetro eppley;
- radiômetro térmico;
- dois saldos radiômetros (net radiometer);
- dois registradores speedomax;
- integrador de radiação;
- placas de fluxo de calor sensível no solo, instaladas nas profundidades de 0,02, 0,10 e 0,20 m, respectivamente;
- dois evapotranspirômetros de lençol freático constante;
- dois anemômetros totalizadores de conchas, instalados a 0,50 m e 1,30 m acima da cultura;
- para medir o perfil de temperatura do ar (bulbos seco e úmido), instalou-se termopares de cobre-constantan em abrigos construídos de tubos PVC de 4", devidamente protegidos com papel alumínio, colocados a 0,50 m e 1,30 m sobre a cultura;
- barômetro de aneróide.

b) na estação meteorológica

- Tanque "classe A";
- heliôgrafo tipo Campbell-Stokes (FUESS);
- actinôgrafo bimetálico para medir a radiação global;
- actinôgrafo bimetálico para medir a radiação difusa;
- pluviômetro e pluviôgrafo tipo FUESS - com área de captação de 200 e 100 cm<sup>2</sup>;
- anemômetro totalizador instalado a 0,50 m de altura;
- termômetro de solo a 2 cm de profundidade;
- anemôgrafo;
- abrigo meteorológico com: termômetros convencionais de máxima e mínima, evaporímetro de Piche, psicrômetro ventilado do tipo August e termohigrôgrafo mecânico de rotação semanal.

A temperatura da cobertura vegetal foi medida com um termômetro de emissão infravermelho, modelo Barnes 14-220-1. Os dados de área foliar foram obtidos, empregando-se um integrador de área, modelo LI-3100, da Lambda. A variação da altura da cultura foi acompanhada, utilizando-se uma escala graduada em centímetros, tomando-se amostras aleatórias de dez plantas.

A figura 4.2 mostra a distribuição dos instrumentos instalados na estação meteorológica e na área experimental, respectivamente.

Para a determinação do teor de umidade no solo, foram colhidas amostras a 05, 10 e 20 centímetros de profundidade e utilizou-se o processo termogravimétrico de secagem em estufa a 105°C. Empregando a mesma técnica, obteve-se, também, dados de biomassa fresca e seca.

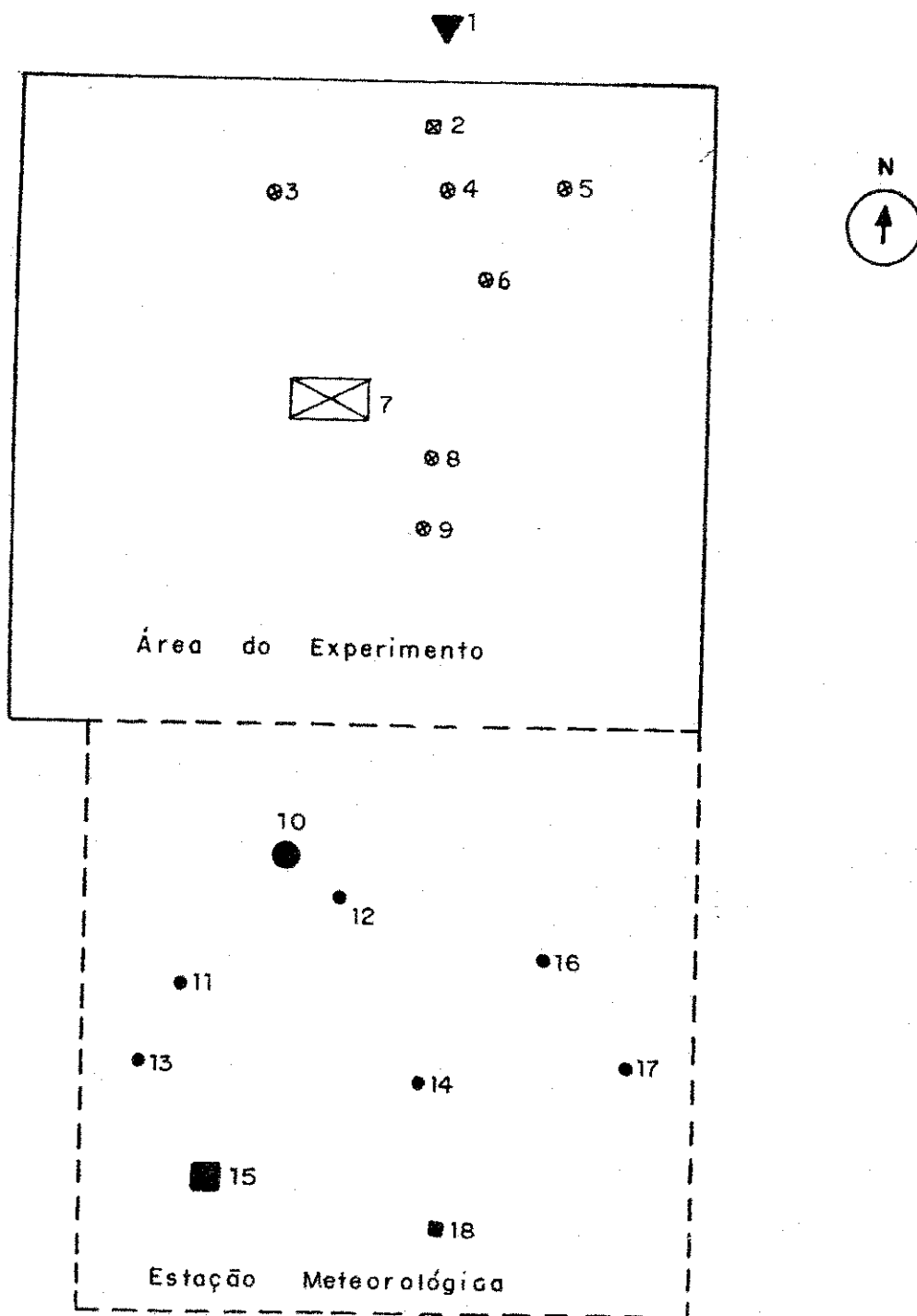


Figura 4.2 – Distribuição dos instrumentos na área experimental e na estação meteorológica.

- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1 - Abrigo dos instrumentos registradores | 10 - Tanque "classe A"      |
| 2 - Placas de fluxo de calor no solo      | 11 - Actinógrafo            |
| 3 - Saldo radiômetro                      | 12 - Anemômetro totalizador |
| 4 - Saldo radiômetro ventilado            | 13 - Pluviógrafo            |
| 5 - Saldo radiômetro                      | 14 - Actinógrafo sombreado  |
| 6 - Piranômetro eppley                    | 15 - Abrigo meteorológico   |
| 7 - Evapotranspirômetros                  | 16 - Heliógrafo             |
| 8 - Torre de psicrômetros                 | 17 - Pluviômetro            |
| 9 - Torre de anemômetros                  | 18 - Anemógrafo             |

## 4.2 – Metodologia

### 4.2.1 – Medições da cultura e do solo

Dezesseite dias após o plantio, iniciou-se o monitramento do comportamento fisiológico da cultura através de um porômetro de equilíbrio dinâmico (LI-1600), sendo avaliados os seguintes parâmetros:

- resistência estomática à difusão de vapor;
- transpiração por unidade de área foliar;
- temperatura da folha;
- temperatura e umidade do ar no interior da câmara em contato com a folha.

As medidas dos parâmetros acima descritos foram efetuadas sempre na face abaxial das folhas mais expostas à radiação solar e mais desenvolvidas da planta. Porém, quando foi possível identificar folhas sombreadas, as mesmas medidas foram nelas realizadas. Para se ter médias mais representativas, as medições foram repetidas em quatro folhas expostas e respectivamente sombreadas.

### 4.2.2 – Sistemática de observações

Diariamente, no período de 18/09 a 20/12/87, foram realizadas medições horárias das 06:00 às 18:00 horas dos seguintes parâmetros: saldo de radiação; radiação térmica; radiação solar incidente e refletida; fluxo de calor no solo; temperatura do ar no abrigo meteorológico e sobre a cultura; umida-de do ar; velocidade do vento; evaporação e evapotranspiração; temperatura da cobertura vegetal; pressão atmosférica e nebulo



sidade. Foram medidas três vezes ao dia (09:00, 12:00 e 15:00 h.) resistências estomáticas; transpiração e temperatura de folhas ensolaradas e sombreadas. A altura da cultura foi avaliada a cada três dias, enquanto que semanalmente foram determinados o teor de umidade do solo, índice de área foliar e dados de biomassa fresca e seca. Finalmente, registrou-se para todo o período de estudo - do nascer ao por do sol - as informações de radiação solar incidentes, refletida pela cultura, saldo de radiação e insolação diária.

Para efeito da elaboração deste trabalho, somente foram utilizados os dados medidos nos seguintes instrumentos: evapotranspirômetros; psicrômetros ventilados; termômetros de máxima e mínima; termohigrógrafo; Tanque "classe A"; heliógrafo; actinógrafo bimetálico de radiação global; placas medidoras do fluxo de calor no solo; anemômetro totalizador instalado a 0,50 m sobre a cultura; barômetro de aneróide; saldo radiômetro; psicrômetro "termopar" instalado a 0,50 m acima da cultura; termômetro infravermelho; porômetro (LI-1600) e integrador de área (LI-3100).

#### 4.2.3 - Tratos culturais

Durante o experimento, a cultura foi mantida livre de ervas daninhas, mediante a prática de capina periódica, sempre que necessária, de forma a não prejudicar o bom desenvolvimento das plantas. O controle de doenças e pragas, bem como as necessidades de adubação, foram acompanhadas por técnicos do CPATSA, de modo que estes fatores não fossem limitantes ao pleno desenvolvimento da cultura.

A irrigação foi realizada por infiltração, utilizando-se sifões plásticos de 3,8 cm de diâmetro e 1,50 m de com

primento. No período inicial do estágio vegetativo da cultura, a frequência das irrigações variou de 07 a 10 dias. Posteriormente a esta fase, as irrigações foram estabelecidas de acordo com as necessidades da cultura, ou seja, quando a taxa de evapotranspiração diária - medida através dos evapotranspirômetros - acumulava uma lâmina correspondente à irrigação anterior.

#### 4.2.4 - Medidas diretas da evapotranspiração máxima da cultura (ET<sub>m</sub>)

A evapotranspiração máxima foi medida, utilizando-se dois evapotranspirômetros de lençol freático constante (descritos anteriormente) através dos quais determinou-se o consumo hídrico diário da cultura ao longo do experimento.

#### 4.2.5 - Processos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>)

##### 4.2.5.1 - Método de Penman

A expressão proposta por PENMAN (1948) para estimar a evaporação, E, fundamenta-se em resultados obtidos no estudo dos processos aerodinâmico e do balanço de energia, anteriormente considerados. Assim, combinando as equações (2.29) e (2.1) obtêm-se:

$$R_n = - \left[ \lambda E + \rho_a C_p K_h \frac{\partial T}{\partial Z} \right] \quad (4.1)$$

que também pode ser escrita na forma:

$$R_n = - \left[ \lambda E + \rho_a C_p K_h \frac{\partial T}{\partial q_m} \frac{\partial q_m}{\partial Z} \right] \quad (4.2)$$

sendo  $q_m$ , a umidade específica saturante do ar, função exclusi

va da temperatura,  $T$ , e os demais símbolos têm o habitual significado. Admitindo-se o princípio da similaridade, para que,  $K_h = K_v$ , e considerando-se que,  $\partial q_m = \partial(q_m - q) + \partial q$ , quando a atmosfera não se afasta da condição de neutralidade, a equação (4.2) pode ser escrita na forma:

$$R_n = - \left\{ \lambda E + \rho_a C_p K_v \frac{\partial T}{\partial q_m} \left[ \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z} (q_m - q) \right] \right\}. \quad (4.3)$$

A pressão de vapor d'água,  $e$ , está relacionado com a umidade específica,  $q$ , do ar pela expressão (OKE, 1978):

$$q = \frac{\epsilon e}{p}. \quad (4.4)$$

Usando a definição (4.4), quando a pressão de vapor  $e$  assume um valor máximo,  $e_s$ , a temperatura e pressão atmosférica,  $p$ , constantes, a equação (4.3) fica:

$$\frac{R_n}{\lambda} = - \left\{ E + \frac{p C_p}{\epsilon \lambda} \rho_a K_v \frac{\partial T}{\partial e_s} \left[ \frac{\partial q}{\partial Z} + \frac{\partial}{\partial Z} (q_m - q) \right] \right\}. \quad (4.5)$$

Introduzindo o conceito de poder evaporante do ar,  $E_a$ , definido por:

$$E_a = \rho_a K_v \frac{\partial}{\partial Z} (q_m - q). \quad (4.6)$$

E empregando as definições (2.33), (4.4) e (4.6), a equação (4.5) torna-se:

$$\frac{R_n}{\lambda} = - \left[ E + \gamma \frac{\partial T}{\partial e_s} (E + E_a) \right] \quad (4.7)$$

mas,  $\frac{\partial T}{\partial e_s} = \frac{1}{S}$ . Rearranjando convenientemente os termos e desprezando o sinal negativo convencional dos fluxos, tem-se fi-

nalmente a fórmula originalmente derivada por Penman, isto é:

$$E = \frac{\frac{S}{\gamma} \frac{R_n}{\lambda} + E_a}{\frac{S}{\gamma} + 1} \quad (4.8)$$

ou na forma:

$$E_o = \frac{\frac{S}{0,1\lambda} R_n + \gamma E_a}{S + \gamma} \quad (4.9)$$

A equação (4.9) foi derivada para estimar a evaporação de uma superfície livre de água,  $E_o$ . Para estimativas da evapotranspiração de referência, no caso de um sistema solo-planta,  $E_o$  deve ser corrigido por um fator de conversão,  $f$ , ou seja:

$$E_{To} = fE_o \quad (4.10)$$

O valor de  $f$  varia de 0,6 no inverno para 0,8 no verão (PENMAN, 1948). Essa correção torna-se desnecessária quando  $R_n$  é medida diretamente sobre a vegetação (THOM & OLIVER, 1977). Por outro lado, como  $f$  é uma constante empírica, só é válida para as condições ambientais em que gerado, pois ele depende do tipo de vegetação e, possivelmente, da natureza do solo (BERLATO & MOLION, 1981). Conforme ainda os mesmos autores, na prática, a equação (4.9) é utilizada para determinar a evapotranspiração de referência; apenas o saldo de radiação é referente à superfície vegetada. Quando o saldo de radiação não é medido, mas apenas estimado, deve-se levar em conta o albedo da cultura em questão.

Em virtude de não se terem efetuado medidas diretas

do saldo de radiação,  $R_n$ , no período de 24 horas, o mesmo foi obtido pela expressão de Brunt, modificada por Penman e adaptada às condições locais do experimento por AZEVEDO et alii (1988), dada pela expressão:

$$R_n = R_g (1 - r) - 1.440 \epsilon_s \sigma T_a^4 (0,513 - 0,062 \sqrt{e}) (0,03 + 0,97 \frac{n}{N}) \quad (4.11)$$

onde  $R_g$  é a radiação solar global;  $r$  é o albedo da cultura;  $\epsilon_s$  a emissividade da superfície considerada;  $\sigma = 8,132 \times 10^{-11}$  cal.  $\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-4}$  é a constante de Stefan Boltzman;  $T_a$  é a temperatura média do ar ( $^\circ\text{K}$ );  $n$  é a insolação ou duração diária do brilho solar e  $N$  é a duração efetiva do dia para o local considerado.

Para o cálculo do poder evaporante do ar,  $E_a$ , utilizou-se a expressão:

$$E_a = 0,35 \left(1 + \frac{\bar{U}_2}{160}\right) (e_s - e) \quad (4.12)$$

em que  $\bar{U}_2$  é a velocidade média do vento ao nível de 2m acima da cultura (Km/dia) e  $(e_s - e)$  é o déficit de saturação do ar, em (mb), ou seja, é a diferença entre a pressão de saturação,  $e_s$ , e real,  $e$ , de vapor d'água.

A velocidade do vento medido a 50cm acima da cultura foi corrigida para o nível de 2m, utilizando-se a tabela  $A_7$  (Apêndice A).  $e_s$  foi obtida pela expressão ROSENBERG et alii (1983):

$$e_s = 6,1078 \text{ Exp } (17,269 T_a / 237,3 + T_a) \quad (4.13)$$

e a pressão de vapor do ar foi obtida pela equação proposta por Ferrel (LIST, 1951):

$$e = e_w - 0,00066 (1 + 1,15 \times 10^{-3} \cdot T_{min}) p(T_a - T_{min}) \quad (4.14)$$

onde  $T_{min}$  é a temperatura mínima e  $e_w$  representa a pressão de saturação do vapor d'água à temperatura mínima. *bulbo úmido*

Os valores de  $\gamma$  foram obtidos através da equação (2.33);  $\lambda$  e  $s$ , foram calculados pelas expressões (WRIGHT, 1982):

$$\lambda = 595 - 0,51 T_a \quad (4.15)$$

$$s = 33,8639 [0,05904 (0,00738 T_a + 0,8072)^7 - 3,42 \times 10^{-5}]. \quad (4.16)$$

#### 4.2.5.2 – Método combinado Penman-Monteith (Monteith, 1965)

A equação de Monteith (1965) para estimar a evapotranspiração de uma cultura, pode ser escrita na forma de fluxo, conforme (RUSSELL, 1980):

$$\lambda E = \frac{S(R_n - G) + \rho_a C_p [e_s(T) - e]/r_a}{S + \gamma (1 + r_c/r_a)} \quad (4.17)$$

Desprezando o fluxo de calor no solo,  $G$ , empregou-se a equação (4.17) na forma:

$$ET_o = \left[ \frac{S \cdot R_n + 24,88 (e_s + e)/r_a}{S + \gamma (1 + r_c/r_a)} \right] (0,1 \lambda)^{-1} \quad (4.18)$$

O cálculo de  $r_c$ , para o período inicial do estágio vegetativo da cultura, quando ainda não se identificavam folhas sombreadas, empregou-se a equação (2.22), e para o período subsequente, foi usada a expressão (2.26). O termo  $(0,1 \lambda)^{-1}$  converte o fluxo de calor latente,  $\lambda E$ , em mm/dia.

A resistência aerodinâmica,  $r_a$ , foi estimada com base nas propriedades aerodinâmicas da cultura, usando-se a equação (2.20), corrigida para o efeito da estabilidade do ar, conforme MONTEITH (1973) através da expressão:

$$r_a = \frac{[\ln(Z - d) / Z_0]^2}{k^2 \bar{U}(Z)} \cdot \left[ \frac{1 - 5g(Z - d)(T_f - T_a)}{\bar{T}_c \bar{U}(Z)^2} \right] \quad (4.19)$$

onde  $\bar{U}(Z)$  é a velocidade média do vento medida a 0,5 m acima da cultura ( $m \cdot s^{-1}$ );  $T_f$  e  $T_a$  são as temperaturas absolutas da cobertura vegetal e do ar, respectivamente, e  $\bar{T}_c$  é a média das temperaturas absolutas do ar e da folhagem, dada por:

$$\bar{T}_c = (T_f + T_a) / 2 \quad (4.20)$$

Os demais termos foram obtidos pelas expressões anteriormente citadas.

#### 4.2.5.3 – Método de Priestley & Taylor

PRIESTLEY & TAYLOR (1972) mostraram que, para superfícies líquidas, solo vegetado sem restrição hídrica e na ausência de advecção de calor sensível, a evaporação e/ou a evapotranspiração de referência podem ser obtidas pela expressão:

$$E_{To} = \alpha \left( \frac{S}{S + \gamma} \right) (R_n - G). \quad (4.21)$$

A equação (4.21) constitui-se num modelo semi-empírico correspondente a equação (4.9), na qual o termo aerodinâmico é substituído por uma constante,  $\alpha$ , a qual deve ser obtida para o local e cultura considerada. Com base em superfícies bem supridas de água, Priestley e Taylor obtiveram valores de  $\alpha$ , variando entre 1,08 a 1,34, com um valor médio de 1,26.

Visando adaptar o modelo de Priestley e Taylor às condições advectivas, JURY & TANNER (1975) propuzeram um procedimento para viabilizar a estimativa de  $E_{To}$ , através da equação (4.21). A expressão utilizada para tais situações, segundo SHOU SE et alii (1980), é expressa por:

$$E_{To} = \left[ 1 + (\alpha - 1) \frac{\Delta e}{\Delta e_a} \right] \frac{S}{S + \gamma} (R_n - G) \quad (4.22)$$

onde  $\Delta e$  é o déficit da pressão de vapor, e  $\Delta e_a$  é o déficit médio da pressão de vapor para o período considerado.

A constante,  $\alpha$ , foi obtida diariamente pela expressão:

$$\alpha = \frac{E_{Tm}}{\frac{S}{S + \gamma} R_n} \quad (4.23)$$

#### 4.2.5.4 — Método de Penman modificado por Doorenbos & Pruitt

A fim de tornar mais simples a estimativa da evapotranspiração de referência de uma cultura a FAO (1975) sugeriu a adoção do seguinte modelo DOORENBOS & PRUITT (1975):

$$E_{To} = W \cdot R_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d) \quad (4.24)$$

onde  $R_n$  é o saldo de radiação em unidade equivalente a evaporação (mm/dia);  $W$  é um fator ponderante do efeito da temperatura (tabela A<sub>2</sub>);  $(e_a - e_d)$  é o déficit de saturação do ar, equivalente ao termo  $(e_s - e)$ , considerado anteriormente, e  $f(u)$  é um coeficiente de transferência de vapor d'água para o ar, dado por DOORENBOS & PRUITT (1975):

$$f(u) = 0,27 \left( 1 + \frac{\bar{u}_2}{100} \right) \quad (4.25)$$



#### 4.2.5.5 – Método do Tanque "classe A"

A evapotranspiração de referência de uma superfície vegetada, pode ser relacionada à evaporação medida no Tanque "classe A", pela expressão:

$$E_{To} = K_p \cdot ECA \quad (4.26)$$

onde ECA é a evaporação medida no Tanque "classe A" (mm/dia) e  $K_p$  é um fator de correção determinado em função da umidade relativa, velocidade média diária do vento, bordadura e exposição do tanque (tabela A<sub>3</sub>), conforme DOORENBOS & PRUITT (1975).

#### 4.2.6 – Determinação do coeficiente de cultivo (Kc)

Com a evapotranspiração medida e estimada pelos processos acima descritos, efetuou-se o cálculo do coeficiente de cultivo, Kc, para o período do experimento. O coeficiente de cultivo é definido como a razão entre a evapotranspiração medida, E<sub>Tm</sub>, e a de referência, E<sub>To</sub>, conforme DOORENBOS & KASSAM (1979):

$$Kc = \frac{E_{Tm}}{E_{To}} \quad (4.27)$$

Para efeito da estimativa de Kc pelos métodos de Priestley & Taylor e Jury & Tanner,  $\alpha$  foi obtido pela equação (4.23), com base na evapotranspiração de referência de Penman. A análise estatística dos valores estimados pelos diferentes métodos e sugeridos pela FAO (1975), foi feita com base na metodologia proposta por (STELL & TORRIE, 1960; BACHOUSE, 1967; HOEL, 1981 e GOMES, 1985).

## 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 - Comportamento fenológico da cultura

O ótimo desenvolvimento da cultura deveu-se às condições potenciais de umidade e fertilidade proporcionadas, uma vez que as condições climáticas em regiões semi-áridas não constituem fator limitante para culturas irrigadas, principalmente quando se trabalha com variedades geradas para a região, como foi o caso.

Durante o período experimental (da germinação à fase de maturação da semente) - com exceção das três primeiras semanas - observou-se que as plantas situadas fora dos evapotranspirômetros apresentaram desenvolvimento vegetativo inferior, mas com uma produção de vargens talvez superior àquelas das plantas no interior dos evapotranspirômetros. Esse comportamento já era esperado, haja vista que, dentro dos evapotranspirômetros as plantas dispunham de franca disponibilidade hídrica, oferecida pelo bom funcionamento dos evapotranspirômetros de lençol freático constante e por irrigações quantificadas pelos próprios evapotranspirômetros.

A figura 5.1 mostra a variação estacional da altura da cultura (h) e do índice de área foliar (IAF), respectivamente; onde pode ser observado que a cultura atingiu seu máximo crescimento (89,2cm) na mesma época em que o índice de área foliar apresentou também valor máximo de 8,5, isto é, na semana entre 26/11 e 03/12, quando se identificava o término da fase de floração.

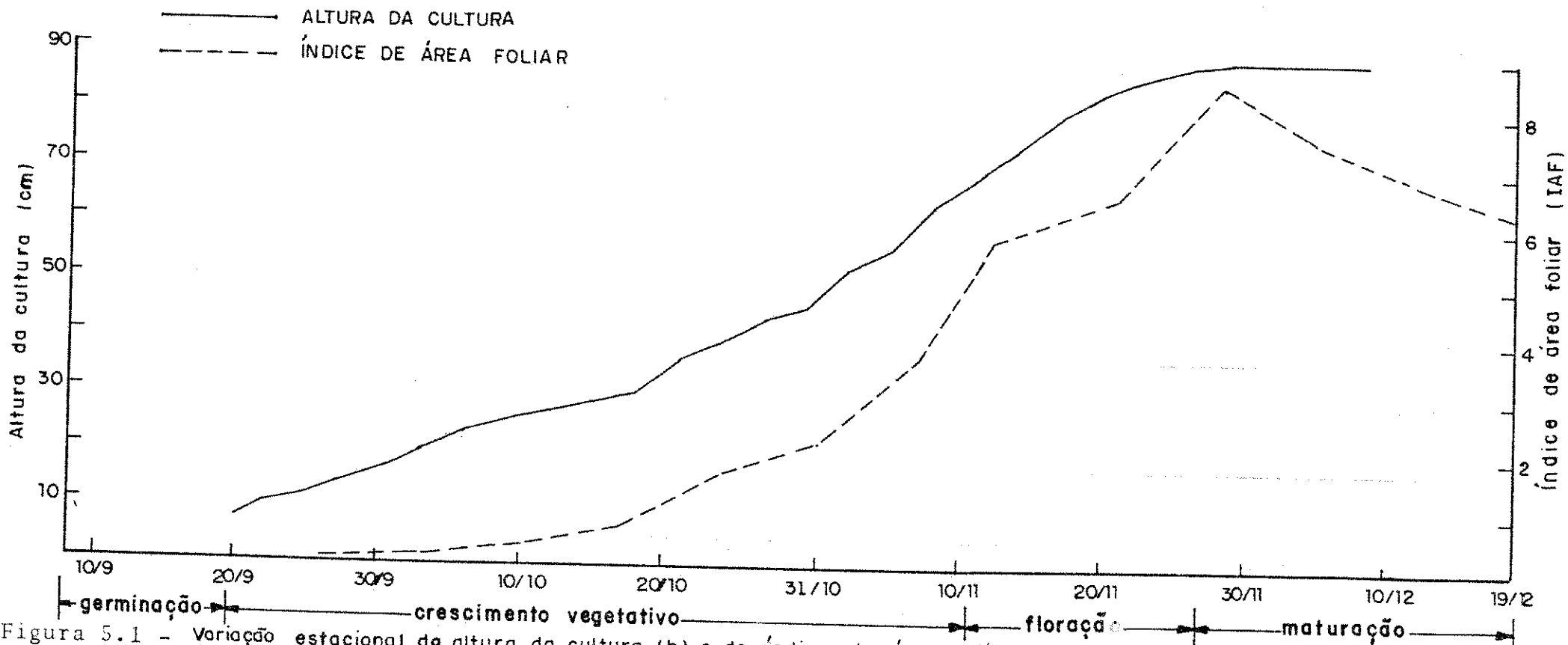


Figura 5.1 - Variação estacional da altura da cultura (h) e do índice de área foliar (IAF).

Vale salientar que as plantas no interior dos evapotranspirômetros atingiram uma altura média de 130cm. Como pode ser observado na figura 5.1, as plantas apresentaram um desenvolvimento mais lento no início da fase vegetativa (até aproximadamente 20/10) e mais uniformemente acentuado após esta data, atingindo seu máximo desenvolvimento em torno de 26/11. O período de senescência — queda das folhas caducas — pode ser observado pelo decréscimo do índice de área foliar ocorrida a partir de 26/11, sugerindo assim que o IAF mostrou-se um bom índice fisiológico para a parametrização e modelagem do desenvolvimento vegetativo da soja nas condições semi-áridas do nordeste brasileiro.

Por outro lado, na figura 5.2 são representados os dados de produção semanal de biomassa (matérias verde e seca), cujo valor máximo de ambos ocorreu no dia 12/12, época em que a vegetação apresentava-se com pelo menos 30% do vorgeamento com coloração amarelada. Observa-se, entretanto, uma variação mais desuniforme da matéria seca, consequência do estado de turgescência das folhas, as quais apresentam-se mais aquosas após, e mais secas antes das irrigações. A redução, tanto da matéria seca como da verde, após 12/12, indica que nesta data a cultura atingiu a maturação plena, iniciando portanto o processo de secagem dos grãos.

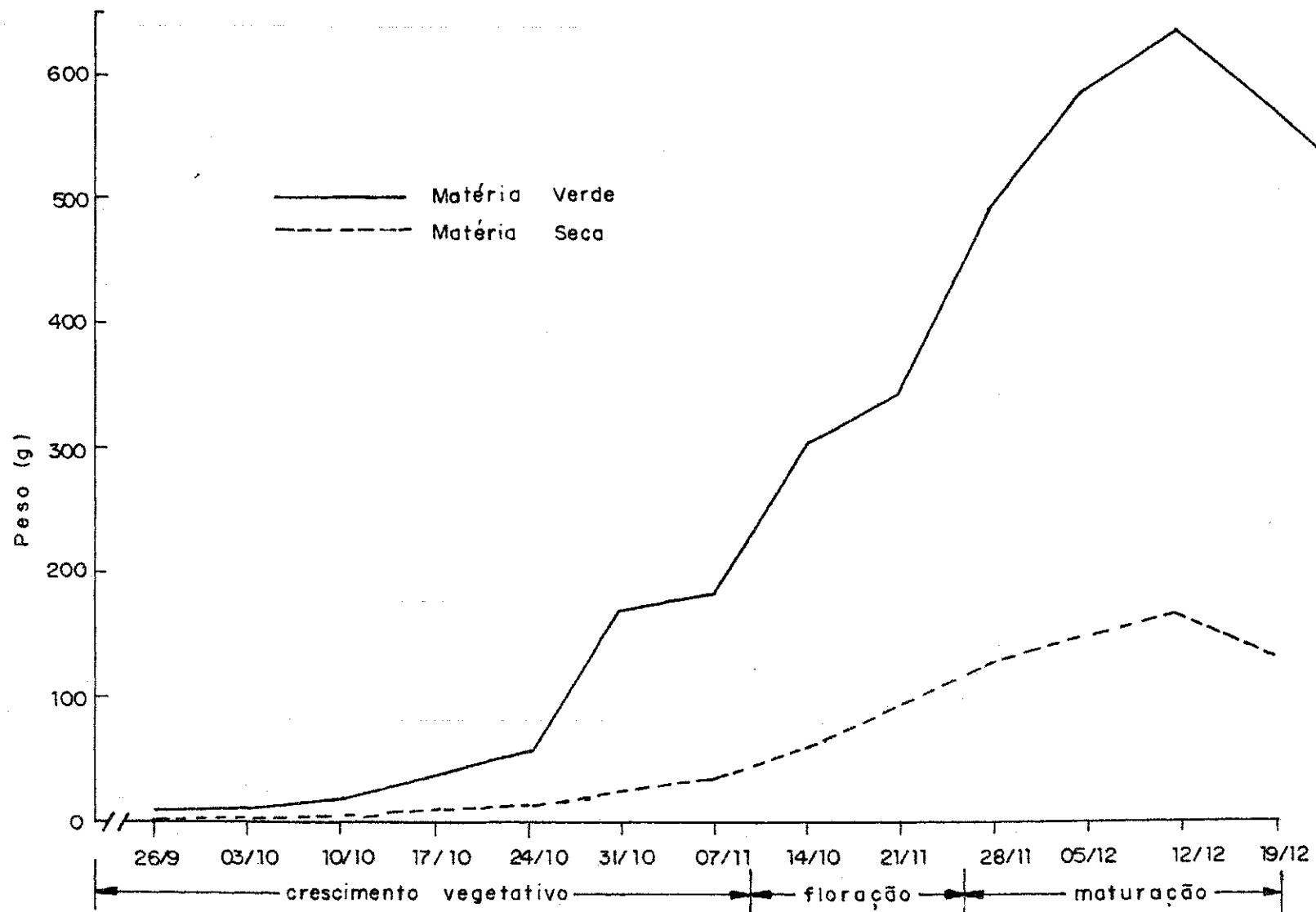


Figura 5.2 - Produção semanal de matérias verde e seca.

## 5.2 — Comportamento fisiológico da cultura

Quase todos os processos fisiológicos das plantas são afetados direta ou indiretamente pela disponibilidade hídrica do solo em que a cultura se encontra. Um decréscimo da turgescência na cavidade subestomática, em decorrência do déficit de saturação com o ar atmosférico, acompanhado de insuficiente suprimento de água ao solo, afeta invariavelmente a taxa de transpiração e ainda outras atividades fisiológicas como: fotossíntese, síntese de proteínas, taxa de alongação celular, etc. A transpiração é controlada então pelo processo de abertura e fechamento parcial ou total dos poros estomatais, via pela qual as partes internas da planta interagem com o meio atmosférico externo.

Os fluxos de gás carbônico do ar para o interior da planta e de vapor d'água da planta para a atmosfera, são controlados pelas resistências aerodinâmica — função da dissipação turbulenta de calor sensível e massa na interface entre a vegetação e o ar — e, pela resistência estomática de folhas isoladas ou da cultura como um todo — função do estado hídrico do solo e da planta. Essas duas resistências são pois, os principais obstáculos ao fluxo evaporativo de uma superfície vegetada, desde que, outros fatores como: suprimento de umidade, energia disponível, gradiente de umidade, etc., sejam favoráveis.

A resistência estomática da cultura ( $r_c$ ) usualmente é medida com porômetros. Porém, dadas as dificuldades envolvidas na utilização de tais instrumentos, na prática, informações da resistência estomática da cultura podem ser obtidas pelo método do gradiente vertical de vapor d'água, que leva em conta a analogia da lei de Ohm, conforme BAILEY & DAVIES (1981) dada por:

$$r_c = \frac{\rho_a c_p}{\gamma} \left[ \frac{e_s(\theta_f) - e_z}{\lambda E} \right] - r_a \quad (5.1)$$

onde  $e_s(\theta_f)$  é a pressão de saturação do ar (mb) à temperatura potencial da folhagem, e  $e_z$  é a pressão de vapor (mb) do ar num nível  $z$  acima da cultura.

Na figura 5.3, são comparados os valores de  $r_c$  medidos e estimados pela equação 5.1, onde pode ser observado uma ligeira subestimação pelo método do gradiente vertical de vapor, uma vez que não considera todo o balanço de energia e nem a energia advinda da advecção. Contudo, os valores calculados são similares àqueles obtidos pelo autor anteriormente citado, também para uma cultura de soja. Essa subestimação está também expressa pelo baixo grau de correlação entre  $r_c$  medido e estimado ( $r = 0,73$ ). A figura 5.4 mostra a variação diária e estacional dos valores da resistência estomática da cultura, para os horários das 09:00, 12:00 e 15:00 h. e a média diária. No período de 18/10 a 03/11, são plotados os valores de  $r_c$  determinados com base na equação (2.22), ao passo que, para o período subsequente, plotou-se os dados obtidos pela equação (2.26). Isto explica a ordem de magnitude de  $r_c$  diferenciada de um período para o outro. Pode ser observado ainda naquela figura que  $r_c$ , tende para valores mais elevados no horário das 15:00, principalmente nos dias anteriores às irrigações. Atribui-se esta tendência ao fato da planta já apresentar um certo grau de estresse hídrico com conseqüente fechamento parcial dos estômatos nesse horário.

As figuras 5.5, 5.6 e 5.7, mostram as variações diárias e estacionais da taxa de transpiração por unidade de área foliar ( $T_r$ ), resistência estomática ( $r_{ss}$ ), medidas com o porô-

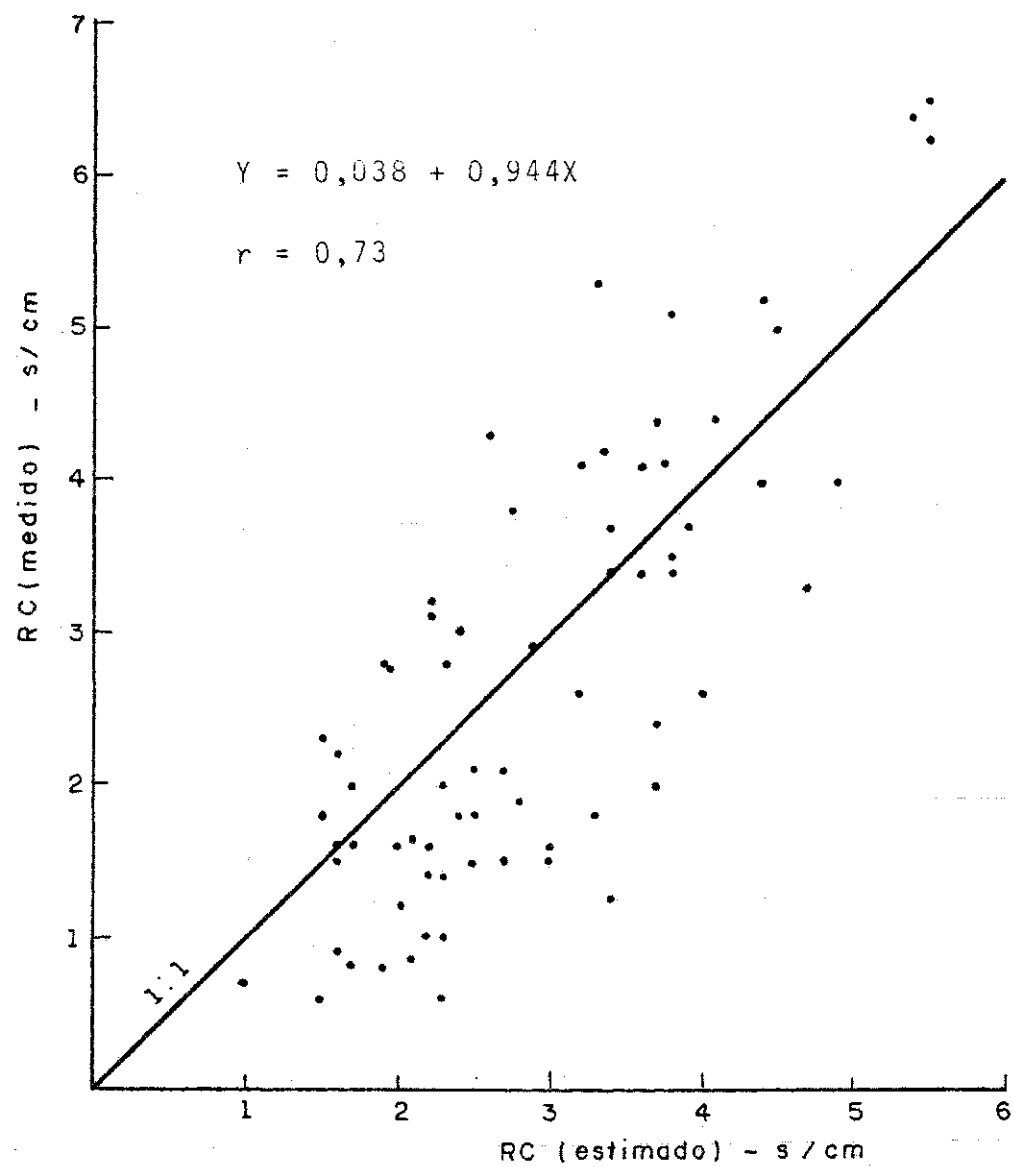


Figura 5.3 - Relação entre as resistências estomáticas da vegetação medida e estimada.



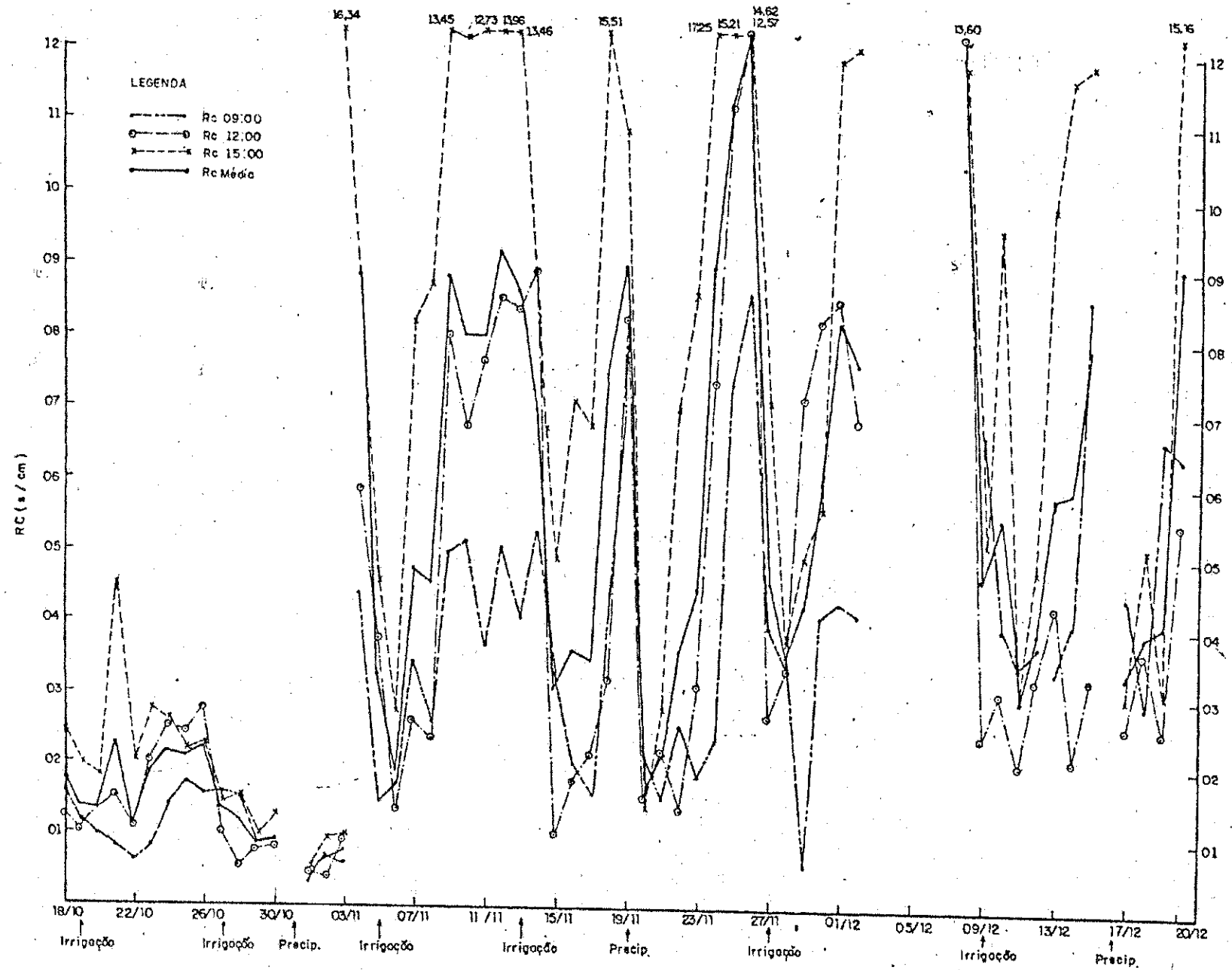


Figura 5.4 - Variação diária e estacional da resistência estomática da cultura.

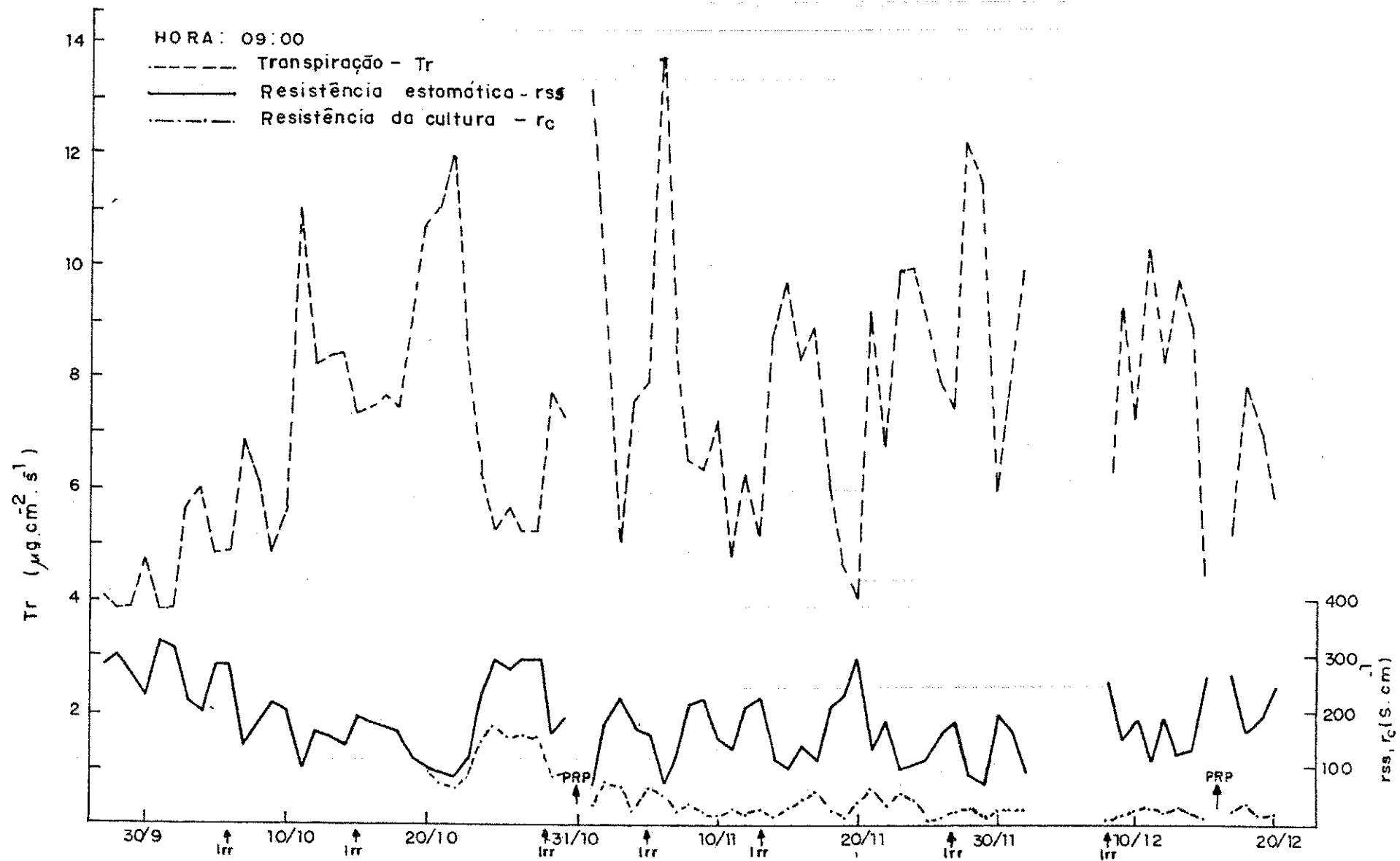


Figura 5.5 - Variação estacional da transpiração ( $T_r$ ), resistência estomática de amostras de folhas ensolaradas ( $r_{ss}$ ) e da cultura ( $r_c$ ).

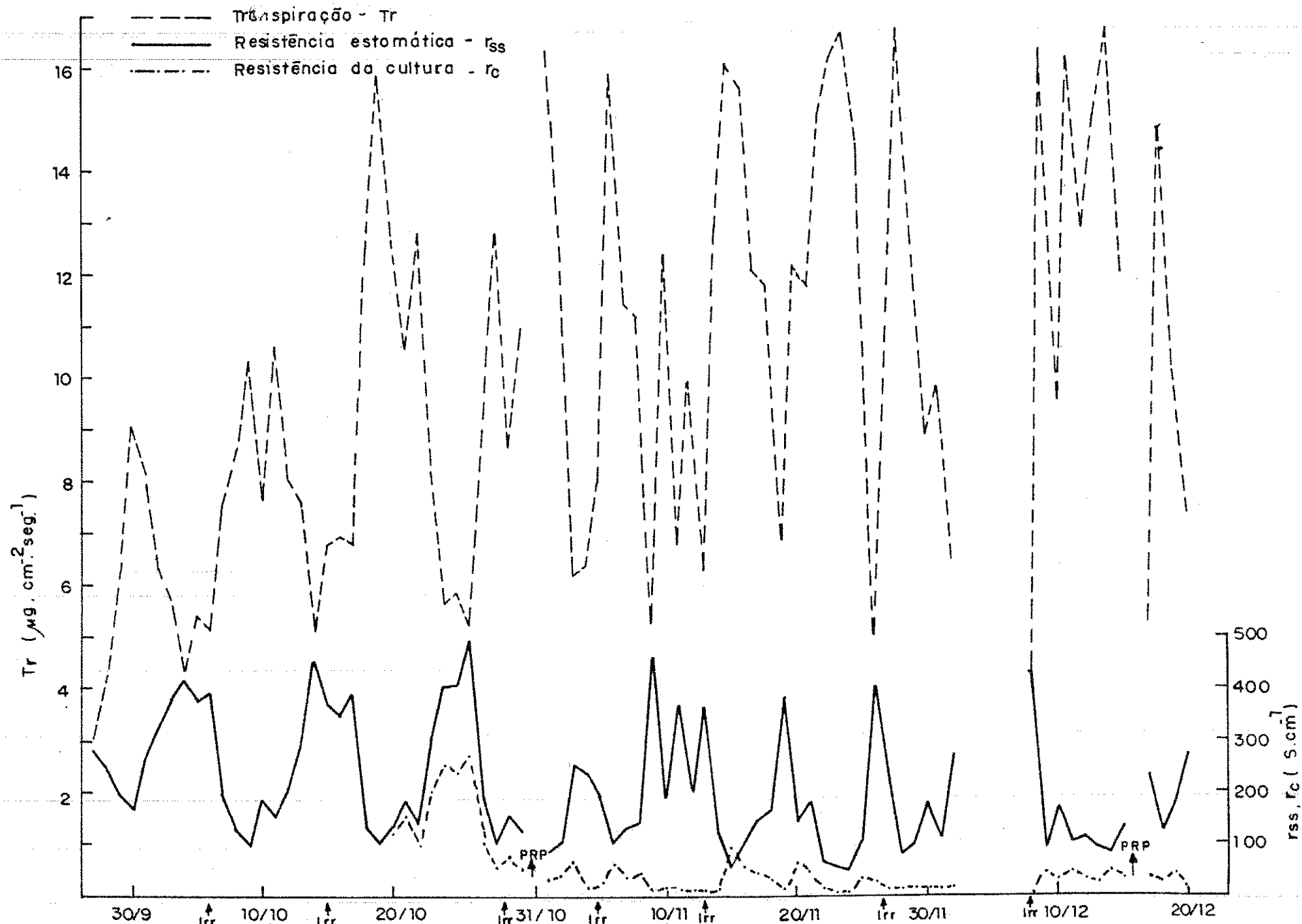


Figura 5.6 - Variação estacional da transpiração ( $T_r$ ), resistência estomática de amostras de folhas ensolaradas ( $r_{ss}$ ) e da cultura ( $r_c$ ).

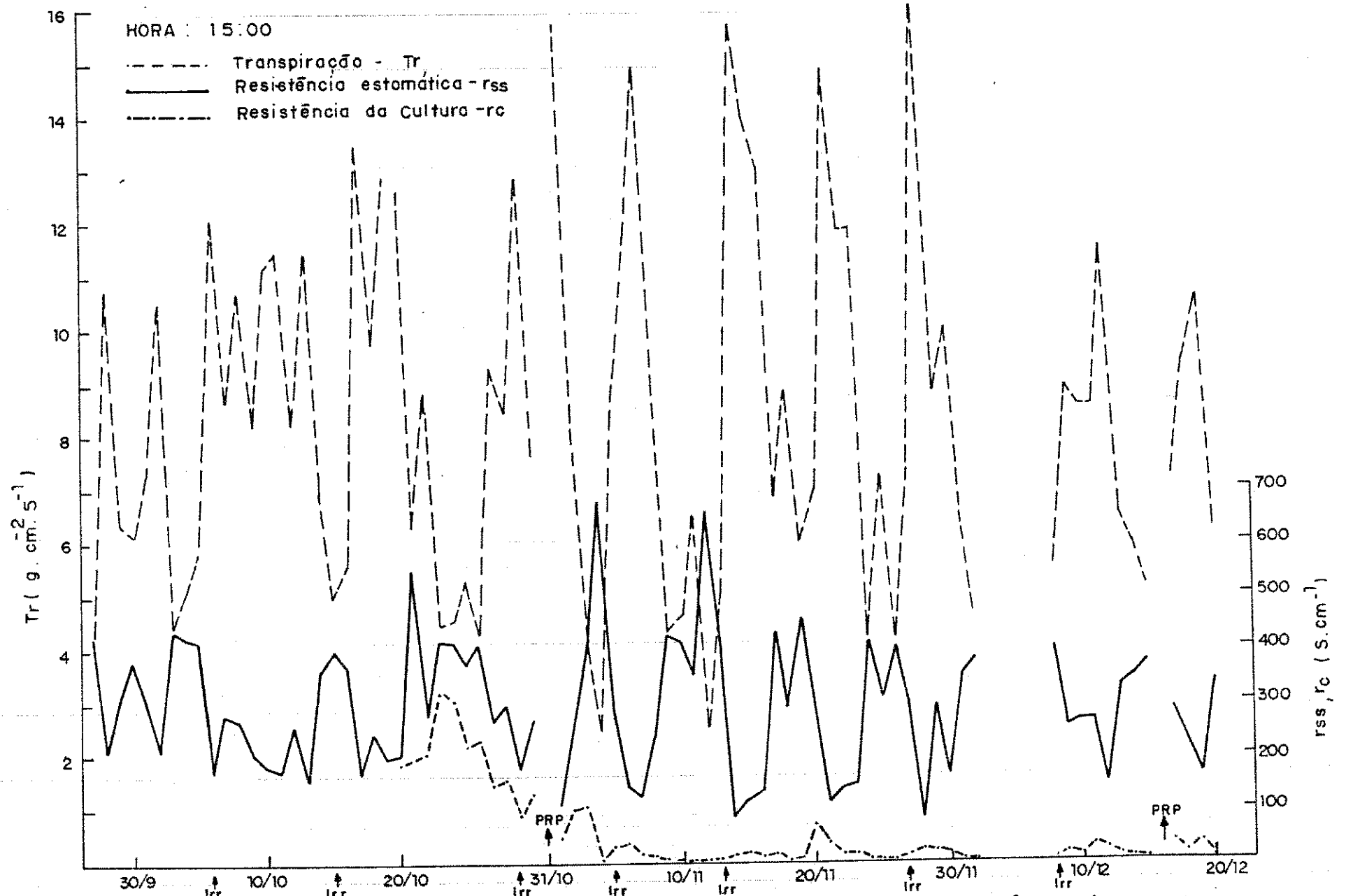


Figura 5.7 - Variação estacional da transpiração ( $T_r$ ), resistência estomática de amostras de folhas ensolaradas ( $r_{ss}$ ) e da cultura ( $r_c$ ).

metro, e a resistência estomática efetiva da cultura ( $r_c$ ) determinada através da equação (2.22), no período de 20/10 a 03/11, e pela equação (2.26), no período posterior, para os horários de 09:00, 12:00 e 15:00 h. Pode ser observado, nestas figuras, que a resistência estomática de uma amostra aleatória de folhas ensolaradas, difere significativamente da resistência efetiva da cultura, quando se leva em consideração também as resistências de folhas sombreadas. Observa-se ainda, que no início das medições, quando as folhas eram jovens, a taxa de transpiração mostrou-se relativamente baixa, comparada àquela do período posterior, com valores significativamente mais elevados.

As interrupções nas medidas mostradas nas respectivas figuras, referem-se aos dias em que não realizou-se medições, em virtude da ocorrência de precipitação no horário das observações, com exceção do período de 03 a 07/12, quando o porômetro apresentou problemas.

### 5.3 – Componentes do balanço de energia na cultura de soja

O conhecimento quantitativo do curso diário das componentes do balanço de energia, numa superfície vegetada, representa as trocas verticais de energia entre esta superfície e a atmosfera. Tal conhecimento é de fundamental relevância para a obtenção dos fluxos de energia e massa no sistema solo-planta-atmosfera (FONTANA et alii, 1987). As determinações das componentes do balanço de energia, são ainda úteis, quando aplicadas em estudos evaporimétricos, que objetivam quantificar o consumo de água pelas plantas (PRATES et alii, 1988) e de fundamental interesse para projetos racionais de irrigação (BERGAMASCHI et alii, 1987).

As figuras 5.8, 5.9 e 5.10, mostram a variação diurna das componentes do balanço de energia na cultura de soja para os dias imediatamente anterior e posterior aos das irrigações, nas seguintes fases fenológicas da cultura: crescimento vegetativo, floração plena e maturação. O fluxo de calor latente ( $\lambda E$ ) foi estimado com base na equação (2.17), e o fluxo de calor sensível (H) foi obtido por resíduo da equação do balanço de energia (2.29).

Os resultados revelaram significativa diferença com a evolução do ciclo da cultura e com o estado de umidade do solo. As diferenças são mais caracterizadas para os fluxos de H e  $\lambda E$ , onde observa-se um predomínio de valores elevados de H, em relação aos de  $\lambda E$ , nestas figuras, com exceção da 5.9b. O fluxo de calor no solo (G), apenas apresentou significativa variação na figura 5.8a, porém nas demais, pode ser visto que houve pouca variabilidade antes e após a irrigação, principalmente nas fases de floração e maturação, quando a cultura cobria completamente o solo. Observa-se ainda naquelas figuras, que no final do período diurno houve uma inversão na direção do fluxo de calor sensível, tanto nos dias anteriores como posteriores às irrigações.

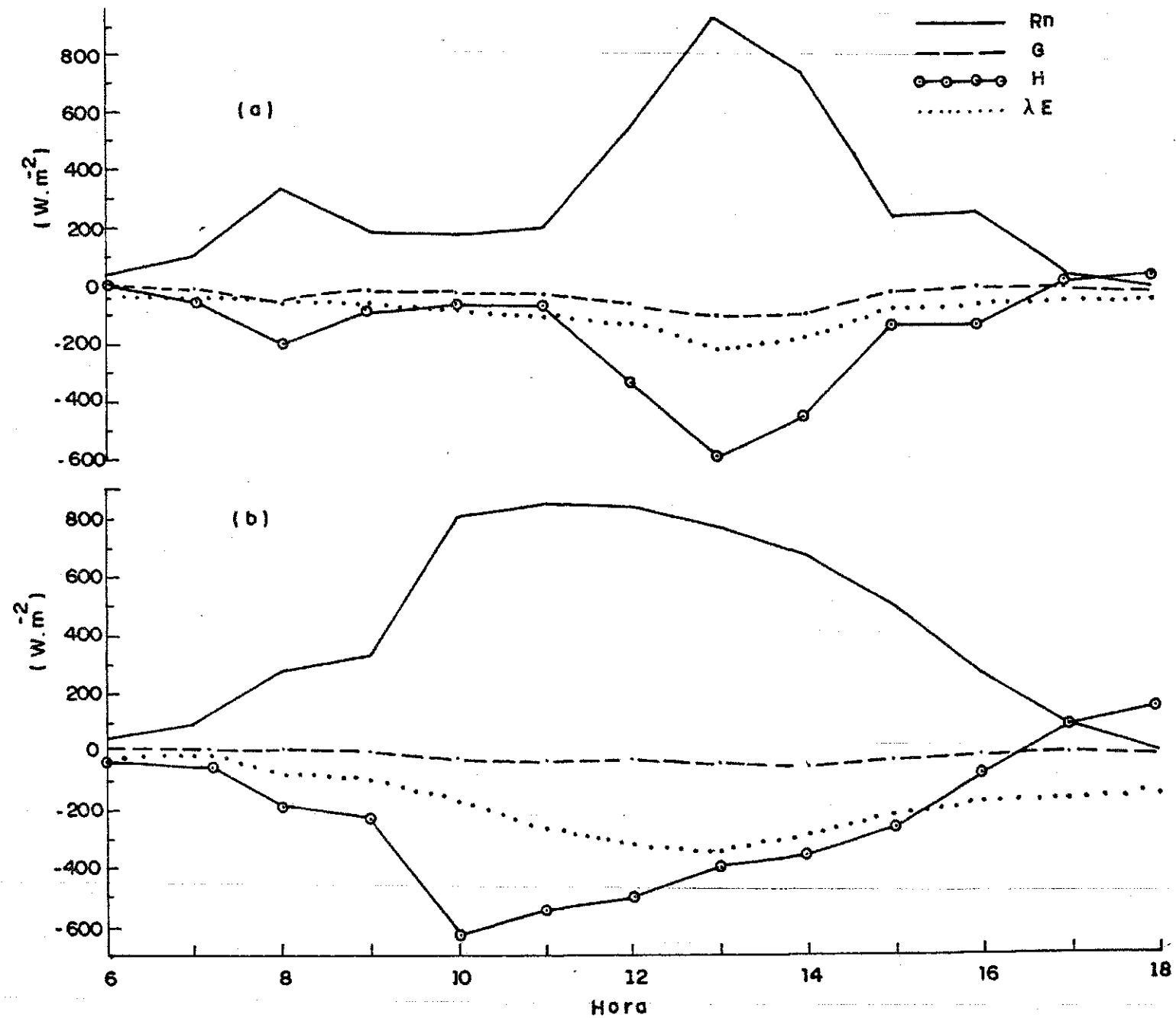


Figura 5.8 - Variação diurna dos fluxos de energia na cultura de soja – fase de crescimento vegetativo – (a) dia 27/09/87 e (b) 29/09/87, dias estes imediatamente anterior e posterior à irrigação.

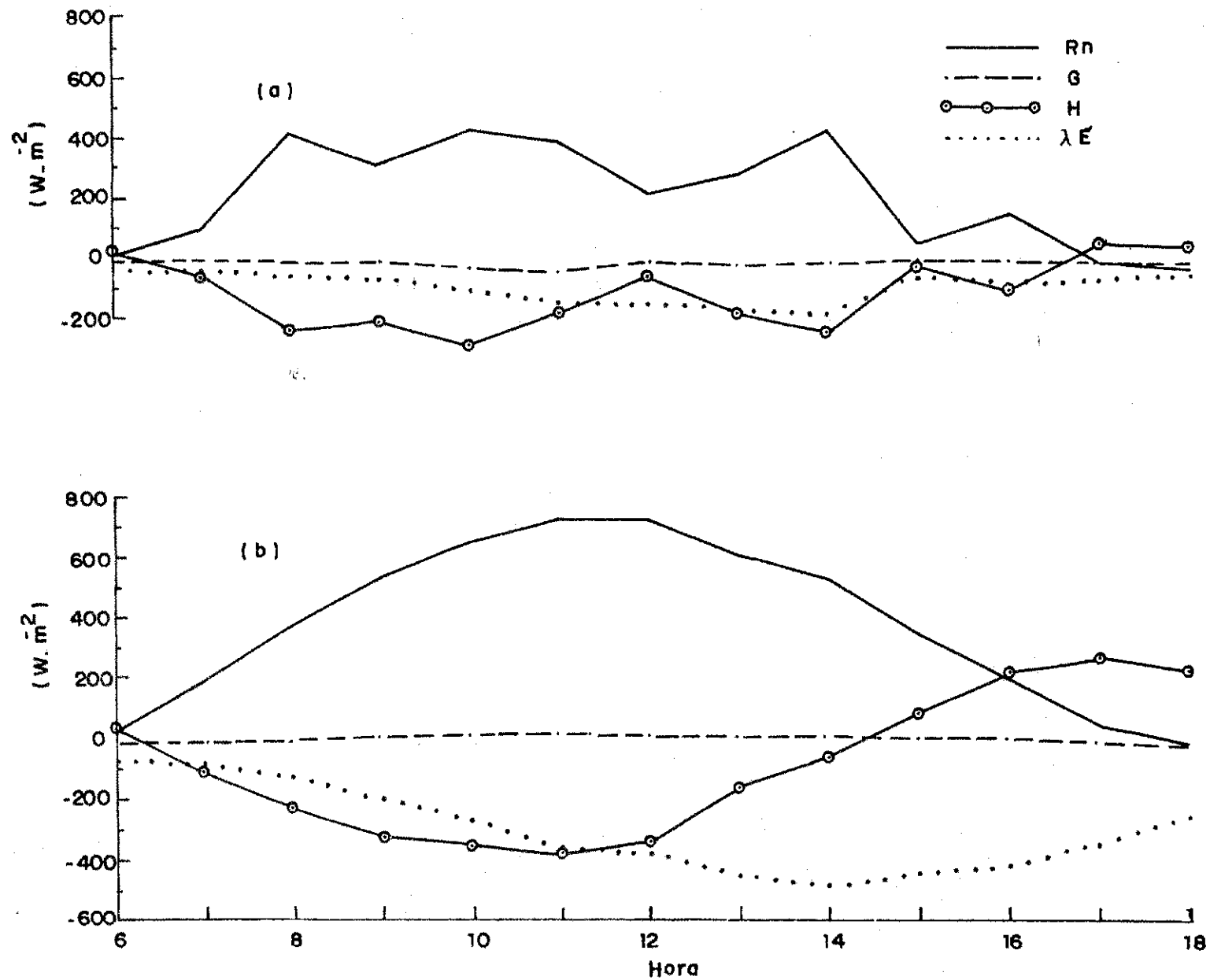


Figura 5.9 - Variação diurna dos fluxos de energia na cultura de soja - fase de floração - (a) dia 04/11/87 e (b) 06/11/87, dias estes imediatamente anterior e posterior à irrigação.



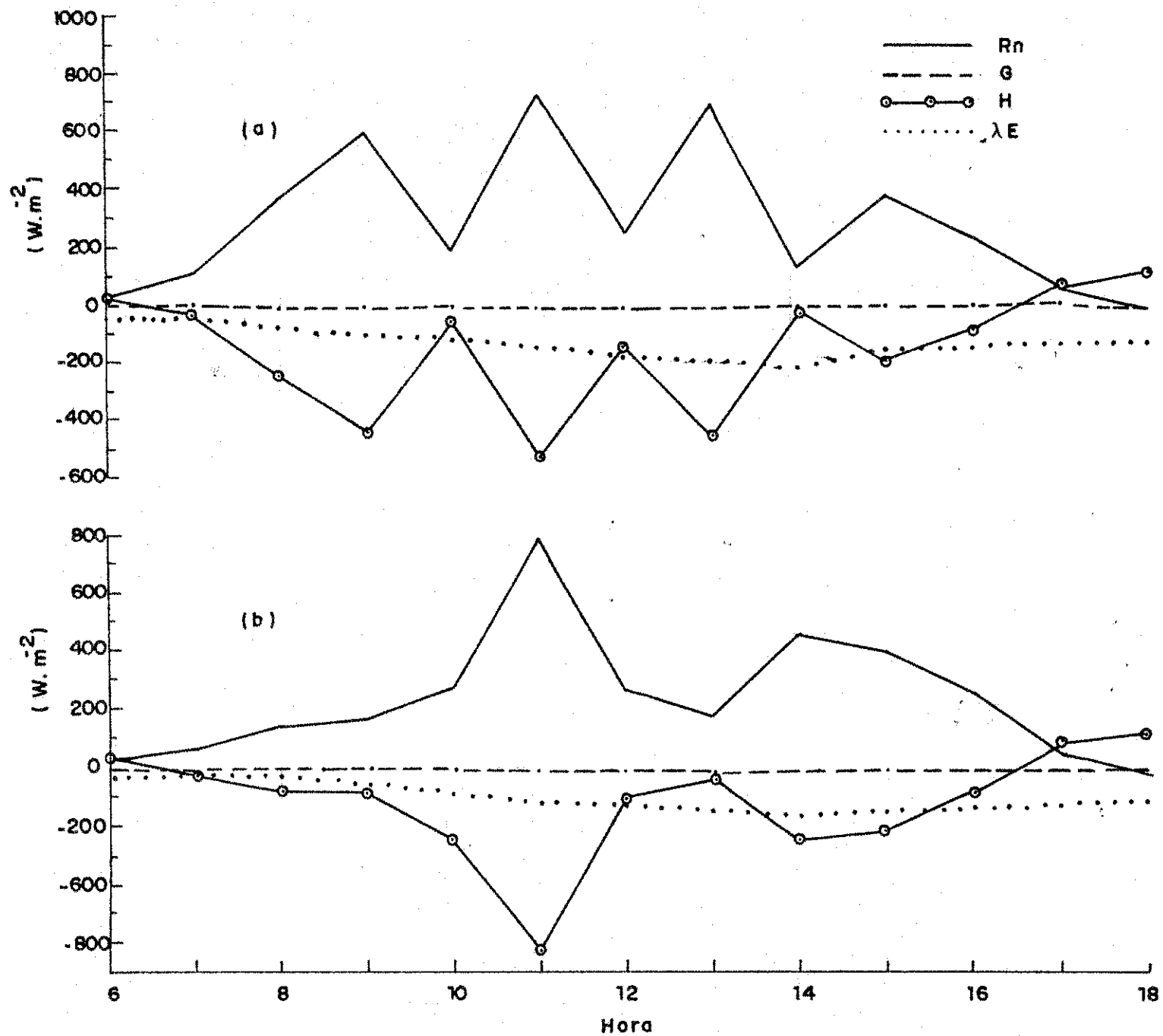


Figura 5.10 - Variação diurna dos fluxos de energia na cultura de soja - fase de maturação - (a) dia 15/12/87 e (b) 17/12/87, dias estes imediatamente anterior e posterior à irrigação.

#### 5.4 – Medidas e estimativas da evapotranspiração

Medidas diretas da evapotranspiração de superfícies vegetadas, normalmente inexitem na maioria das áreas agrícolas. Em vista disso, a única alternativa para se quantificar a demanda hídrica das culturas é através de modelos fundamentados em princípios físicos e fisiológicos relacionados com o processo ou, ainda, empregando-se métodos mais realísticos que utilizam parâmetros climáticos simples.

De um modo geral, a magnitude da evapotranspiração medida (ET<sub>m</sub>) é influenciada por fatores como: suprimento adequado de água e energia disponível ao processo, tipo e estágio fenológico da cultura, características fisiológicas das plantas, condições climáticas, etc. Enquanto a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é principalmente função dos fatores climáticos locais.

Os valores da evapotranspiração diária média para períodos semanais, medida e estimada por diferentes métodos, são mostrados na tabela 5.1.

Esses resultados indicam que a evapotranspiração estimada pelo método combinado Penman-Monteith, apresentou boa concordância com os valores medidos ao longo de todo o período experimental. Ao passo que, o método do Tanque "classe A" só apresentou boa correspondência para o período de completa cobertura do solo. Com relação aos demais métodos estudados, pode ser observado que os valores estimados sobrestimaram significativamente os medidos, nas primeiras quatro semanas do início das medições, enquanto que no período posterior os valores medidos foram acentuadamente superiores àqueles estimados.

TABELA 5.1

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

Período	Ordem	MÉTODOS						
		Medido	Penman-Monteith Eq. 4.18	"Classe A" Eq. 4.26	Penman Eq. 4.8	Doorenbos-Pruitt Eq. 4.24	Priestley-Taylor Eq. 4.21	Jury-Tanner Eq. 4.22
19-25/09	1	3,6	3,5	7,6	6,8	7,0	7,3	7,5
26/09-02/10	2	4,0	3,8	7,8	7,3	7,6	7,5	7,5
03-09/10	3	4,2	4,8	8,6	6,6	6,7	7,8	7,8
10-16/10	4	5,3	5,4	9,0	7,5	7,8	7,9	8,0
17-23/10	5	6,8	6,4	8,4	6,8	6,9	7,6	8,2
24-30/10	6	7,8	6,8	8,9	6,7	6,9	7,5	7,7
01-07/11	7	8,1	8,7	8,0	6,0	6,2	6,1	6,1
08-14/11	8	8,8	9,0	8,8	6,4	6,5	7,3	7,3
15-21/11	9	7,2	7,7	7,2	5,4	5,4	5,8	5,8
22-28/11	10	8,9	9,5	8,9	6,0	6,1	6,9	6,9
29/11-05/12	11	7,9	7,6	7,7	5,4	5,3	5,7	5,7
06-12/12	12	8,4	8,2	8,5	5,2	5,3	5,8	5,8
13-20/12	13	7,3	7,8	7,5	5,3	5,8	6,0	6,1

Os diagramas de dispersão e as respectivas curvas de regressão dos valores referidos na tabela 5.1, são apresentados na figura 5.11, onde pode-se verificar que, para todo período experimental, o método de Penman-Monteith apresentou coeficiente de correlação igual a 0,97, e para o período de completa cobertura do solo, o método melhor correlacionado foi o do Tanque "classe A" ( $r = 0,98$ ). Os outros modelos não apresentaram boa concordância entre a evapotranspiração medida e estimada — apesar de terem sido feitas tentativas de ajustamentos a outras curvas, os valores obtidos mostraram-se igualmente baixos — contudo, pode-se verificar, pela análise de variância de regressão, tabelas  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$  (Apêndice B) que houve significância para a regressão linear. Isto explica que somente em certas circunstâncias as estimativas podem ser consideradas fisicamente aceitáveis. Isso revela também que a cultura oferece certa resistência ao fluxo d'água, além de alterar as condições de turbulência do ar sobre a cultura, reduzindo a predictabilidade desses modelos. Tais resultados sugerem que o modelo de estimativa da evapotranspiração proposto por Penman-Monteith, é o mais recomendável para modelagem da evapotranspiração durante toda a estação de cultivo — desde o início da fase vegetativa até a maturação do grão. Entretanto, para a fase de completo desenvolvimento, pode-se empregar modelos mais simples como o do Tanque "classe A".

Em termos de desempenho diário dos métodos pesquisados, são apresentados, nas figuras 5.12 a 5.17, o erro padrão de estimativa da evapotranspiração diária, em relação aos valores estimados, para o período de completo desenvolvimento da cultura. Observa-se que o menor erro padrão diário da estimativa está associado ao método do Tanque "classe A" e representa

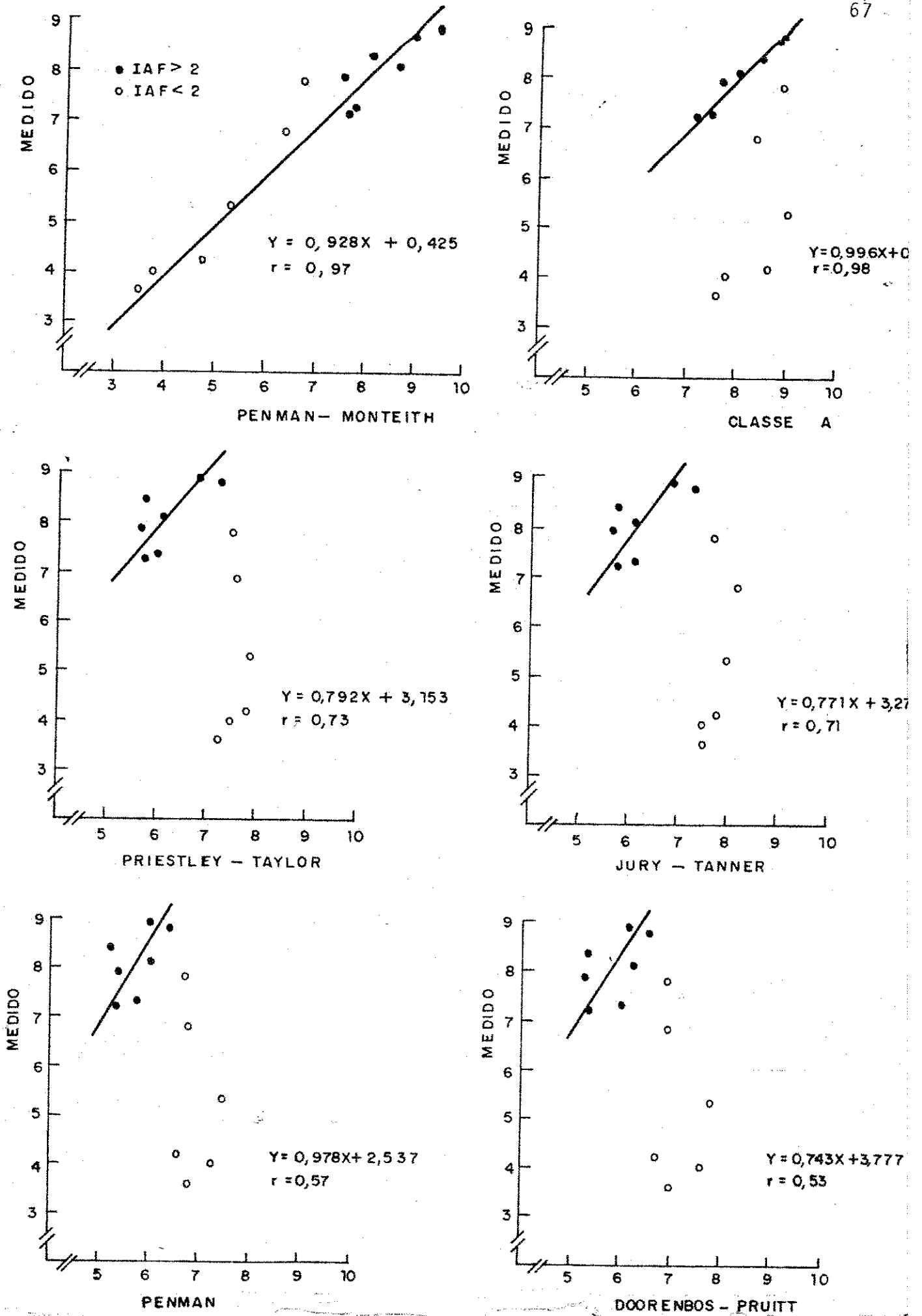


Figura 5.11 - Correlação entre os valores diários médios para períodos semanais da ETm e ETo, estimada por diferentes métodos, para o período de completa cobertura do solo.

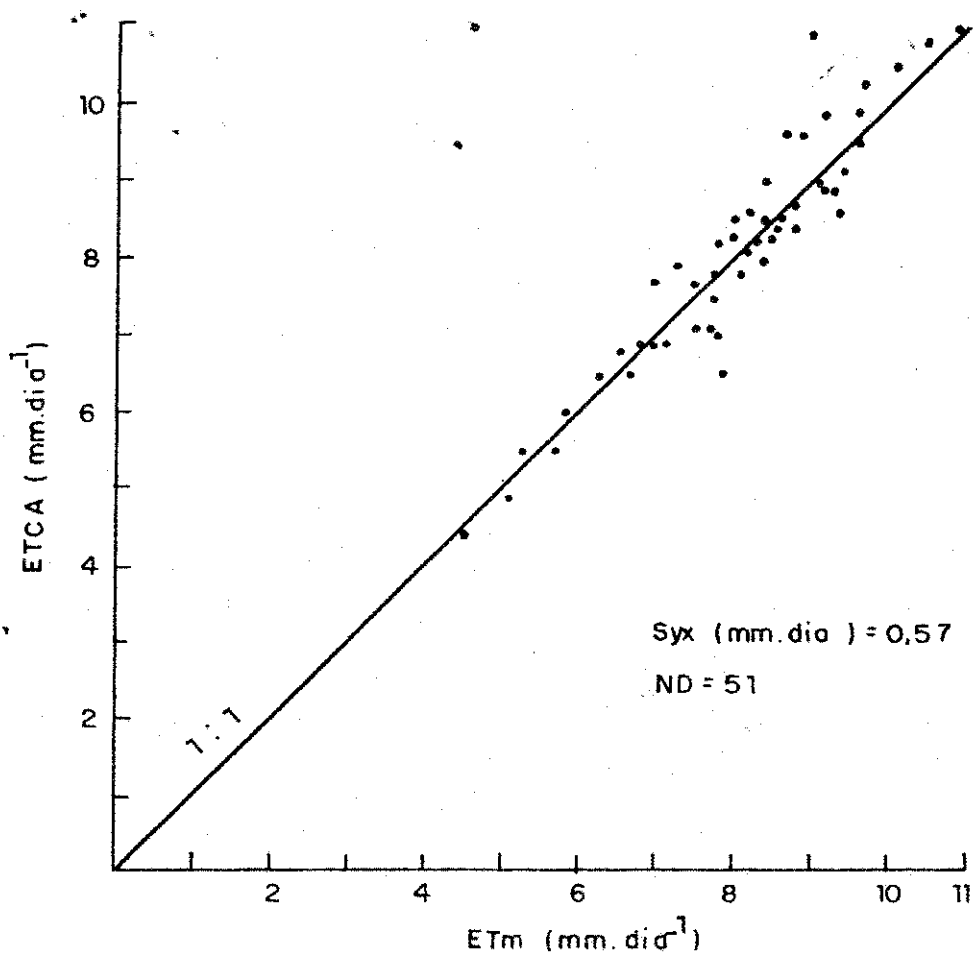


Figura 5.12 - Comparação entre os valores diários da ETm e ETo, estimada pelo método do Tanque "classe A" (ETCA), para o período de completa cobertura do solo.

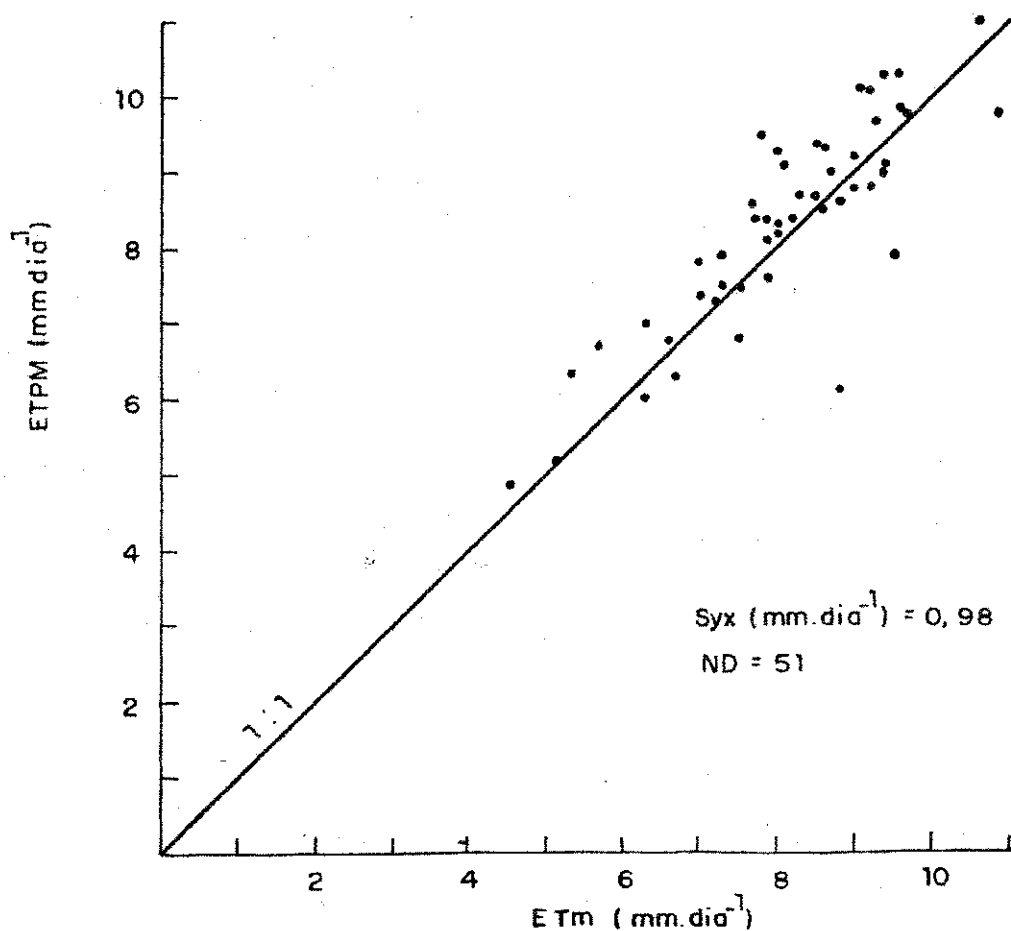


Figura 5.13 - Comparação entre os valores diários da ETm e ETo, estimada pelo método de Penman-Monteith (ETPM), para o período de completa cobertura do solo.

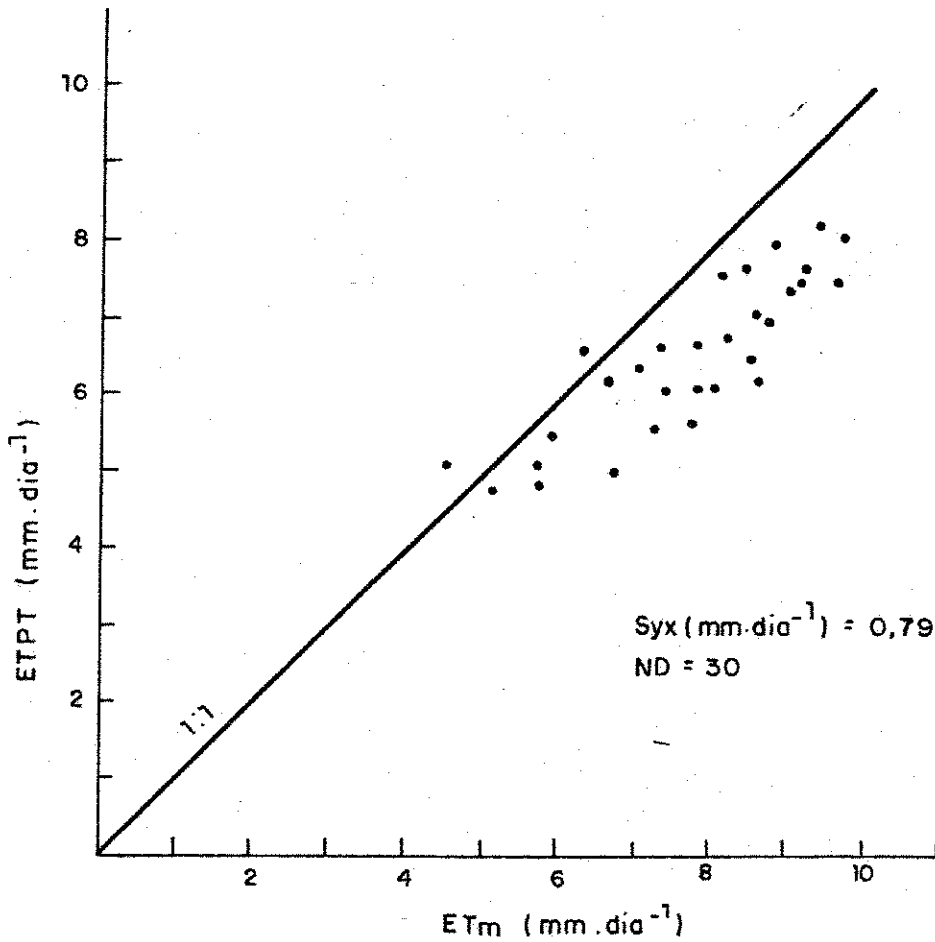


Figura 5.14 - Comparação entre os valores diários da ETm e ETo, estimada pelo método Priestley & Taylor (ETPT), para o período de completa cobertura do solo.

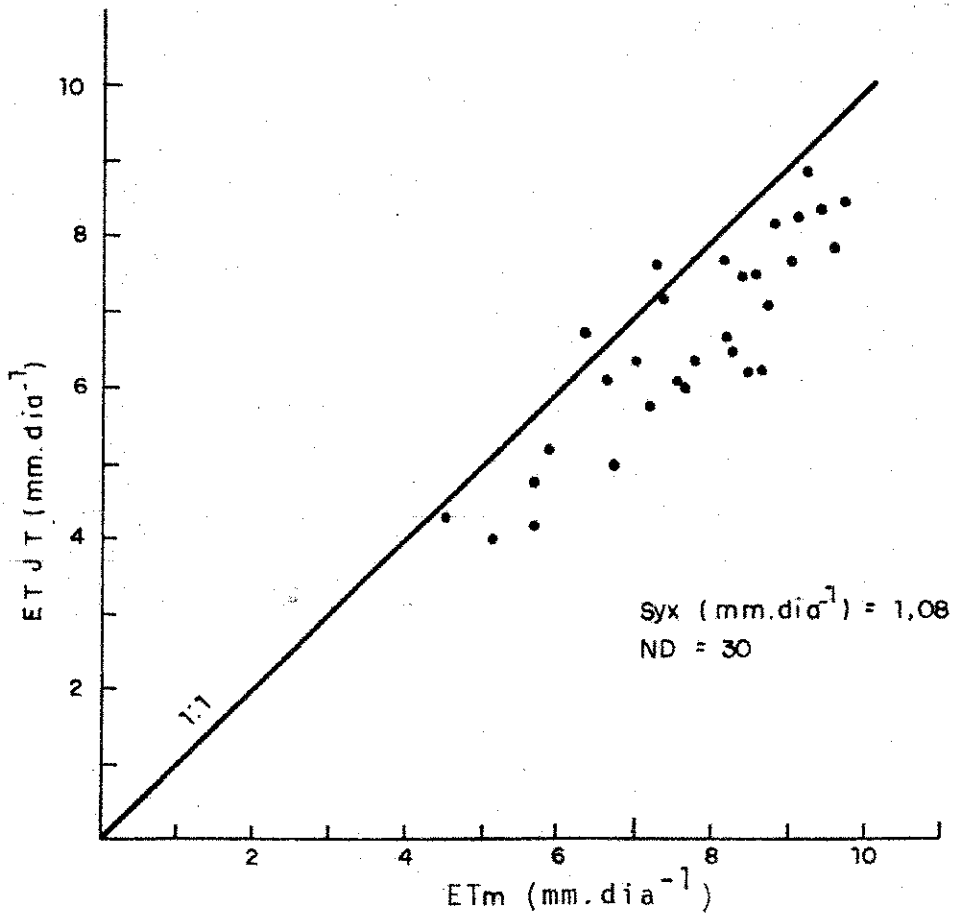


Figura 5.15 - Comparação entre os valores diários da ETm e ETo, estimada pelo método Jury & Tanner (ETJT), para o período de completa cobertura do solo.

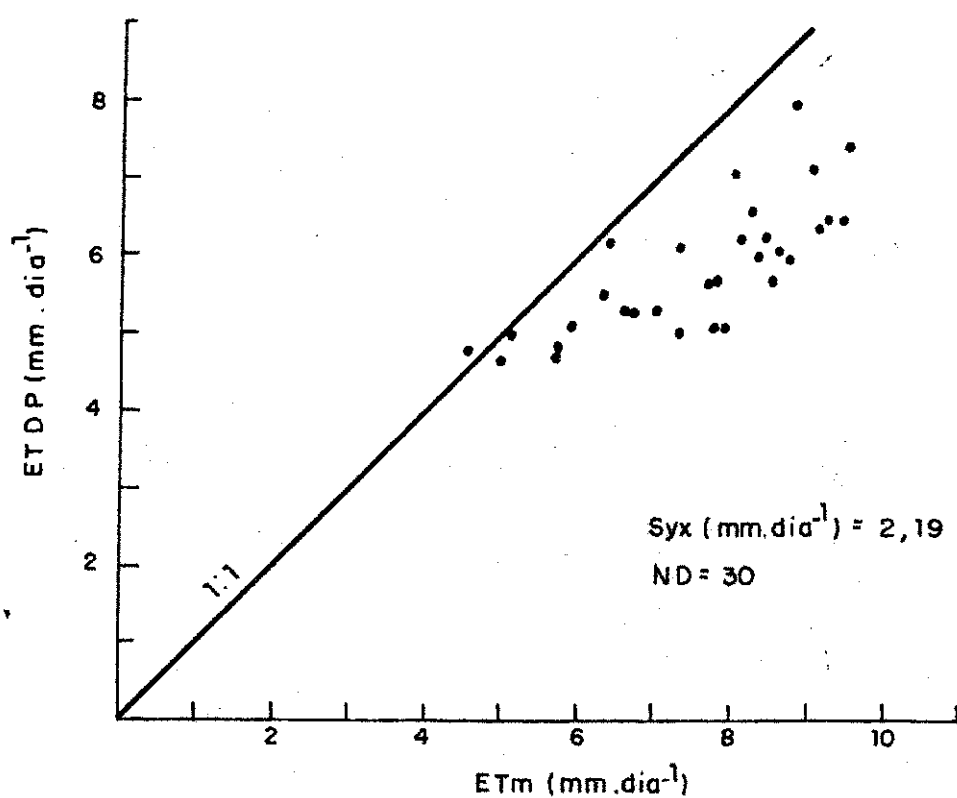


Figura 5.16 - Comparação entre os valores diários da ETm e ETo, estimada pelo método de Doorenbos & Pruitt (ETDP), para o período de completa cobertura do solo.

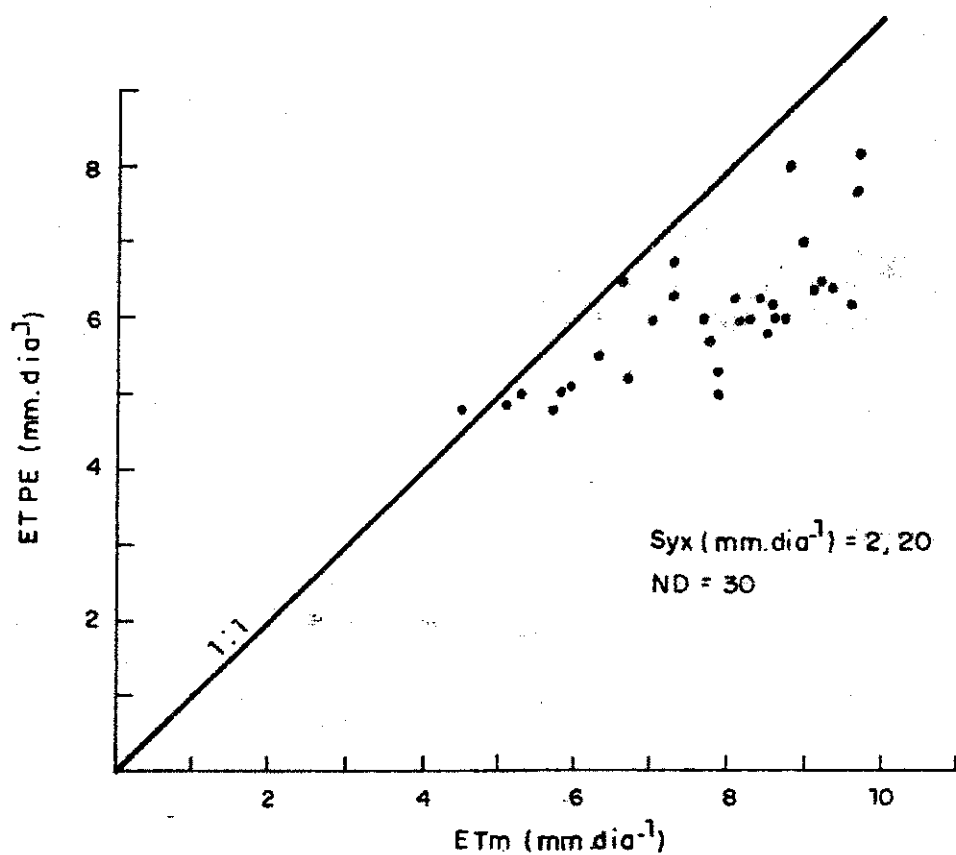


Figura 5.17 - Comparação entre os valores diários da ETm e ETo, estimada pelo método de Penman (ETPE), para o período de completa cobertura do solo.



cerca de 7% em média; o maior erro padrão diário de estimativa de ETm é atribuído ao modelo de Penman, alcançando um valor superior a 10% em relação ao medido. Isto denota que as estimativas do Tanque "classe A" se ajustam melhor aos valores medidos, o que pode ser atribuído ao fato de tanto o Tanque quanto os evapotranspirômetros não sofrerem restrições hídricas e serem mais sensíveis aos fatores climáticos do local onde encontram-se instalados, ao passo que, os métodos empíricos são atrelados aos conceitos físicos envolvidos no processo evapotranspiratório e mostram-se insensíveis aos fatores integrados do clima que determinam a evapotranspiração, principalmente no caso das regiões áridas, onde a advecção de calor sensível e latente está sempre presente.

Nas figuras 5.18, 5.19 e 5.20, são mostrados os comportamentos estacionais da evapotranspiração diária medida e estimada. Os resultados encontrados, confirmam o que anteriormente havia sido considerado, isto é, o método de Penman-Monteith apresentou significativa concordância durante todo o período estudado, e as estimativas pelo Tanque "classe A" foram melhor correlacionadas durante o período de completa cobertura do solo (figura 5.18). Já nas figuras 5.19 e 5.20, observa-se que os valores estimados sobrestimam os medidos antes da aquele período, e posteriormente os valores medidos sobrestimam aqueles determinados por estimativas. Porém, pode ser observado, ainda, que não houve diferenças significativas entre os valores estimados.

Os totais acumulados da evapotranspiração semanal medida e estimada são apresentados nas figuras 5.21, 5.22 e 5.23. Na figura 5.21 observa-se claramente que o total acumulado pelo Tanque "classe A" foi bem superior ao medido e estimado pe

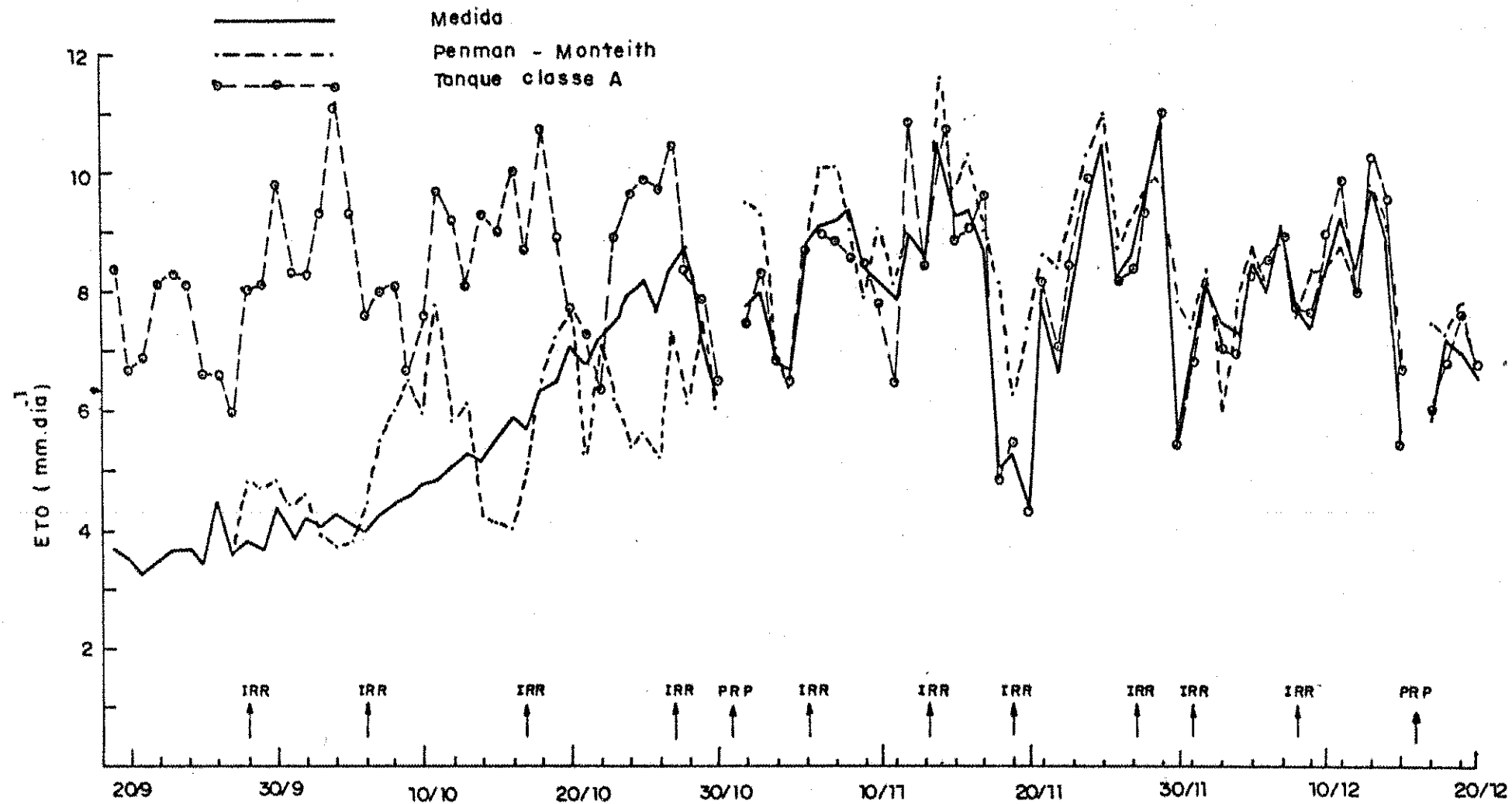


Figura 5.18 - Comportamento estacional da evapotranspiração diária, medida e estimada pelos métodos de Penman & Monteith e Tanque "classe A".

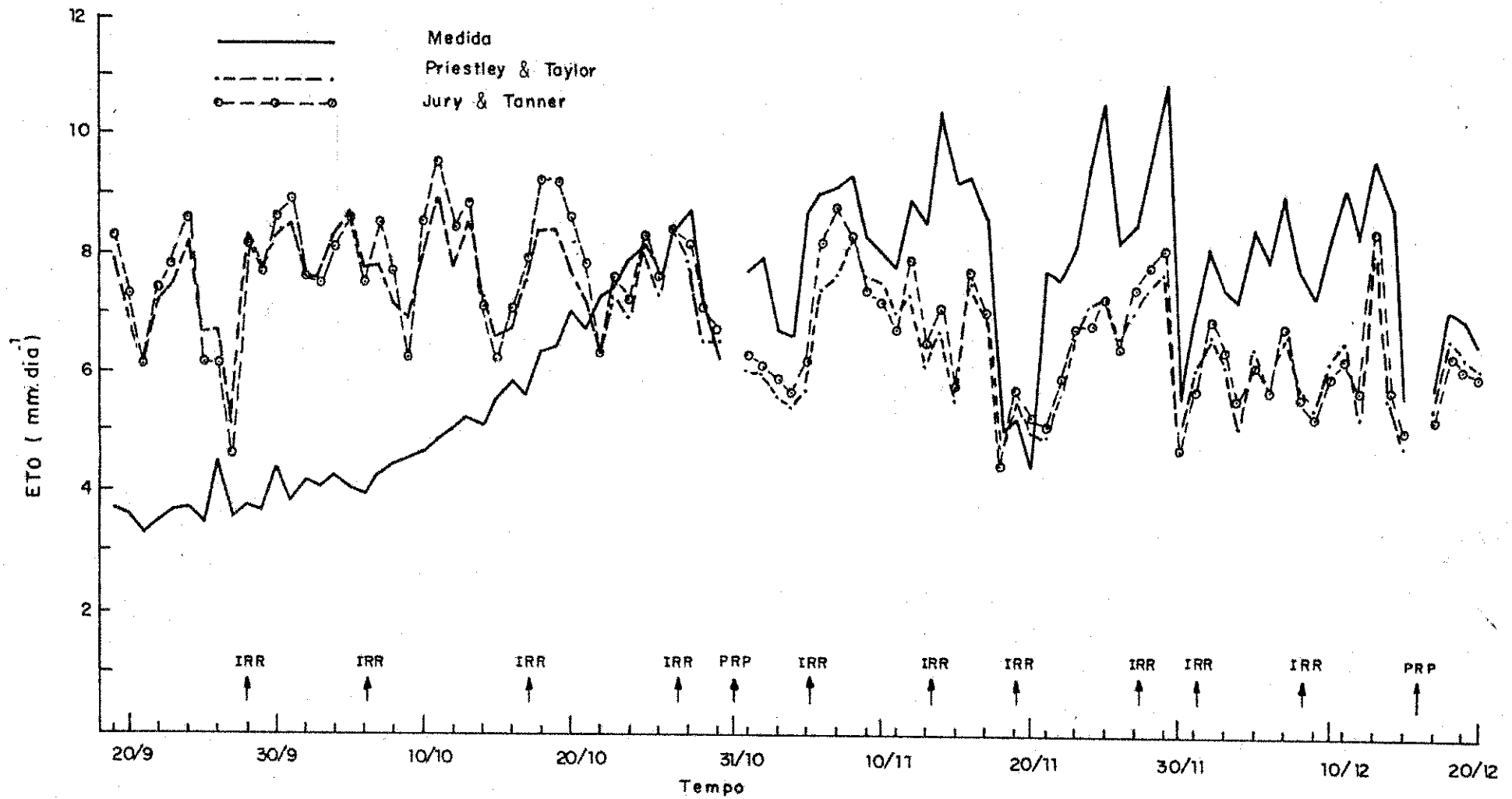


Figura 5.19 - Comportamento estacional da evapotranspiração diária, medida e estimada pelos métodos de Priestley & Taylor e Jury & Tanner.

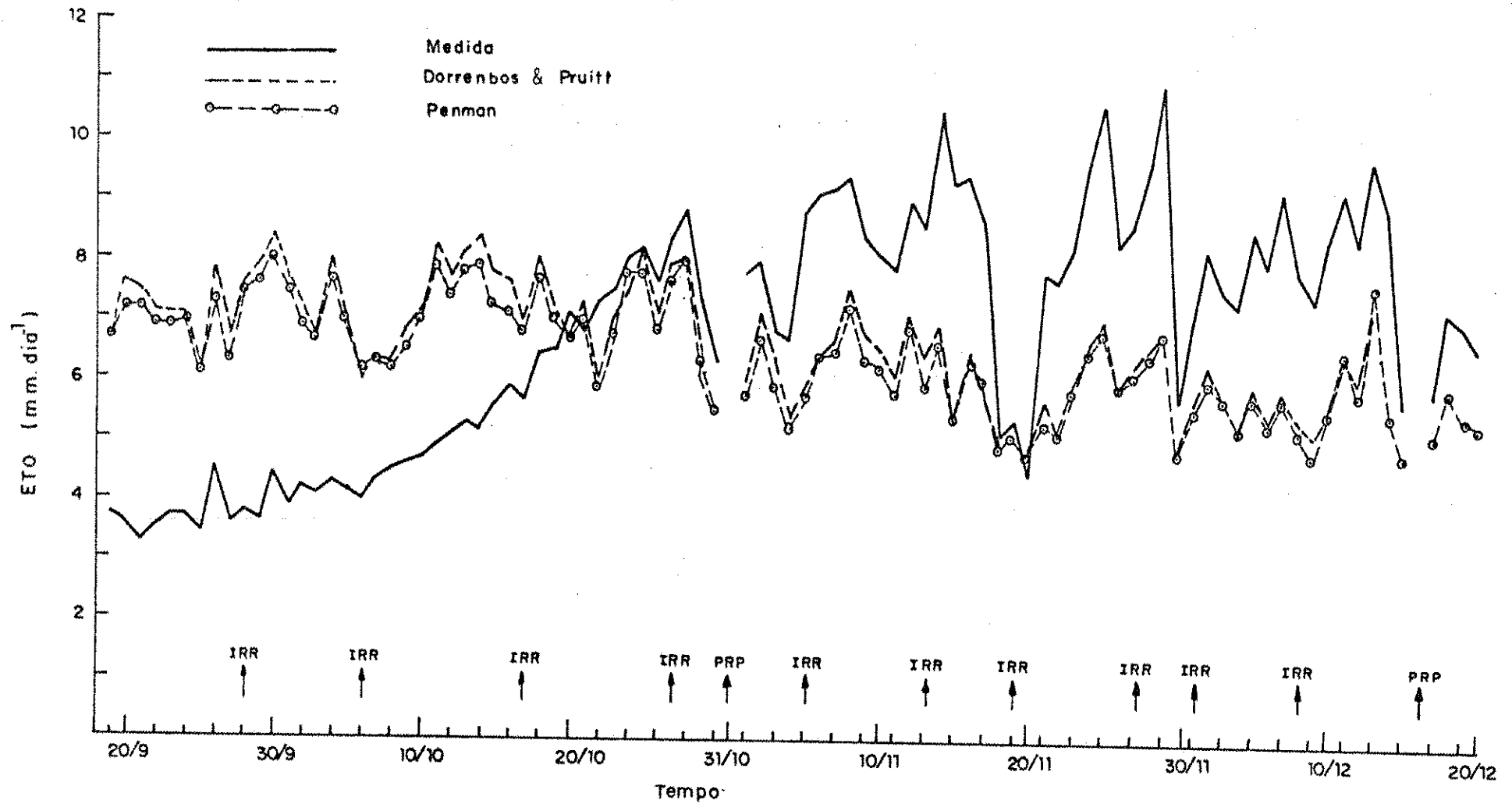


Figura 5.20 - Comportamento estacional da evapotranspiração diária, medida e estimada pelos métodos de Penman e Doorenbos & Pruitt.

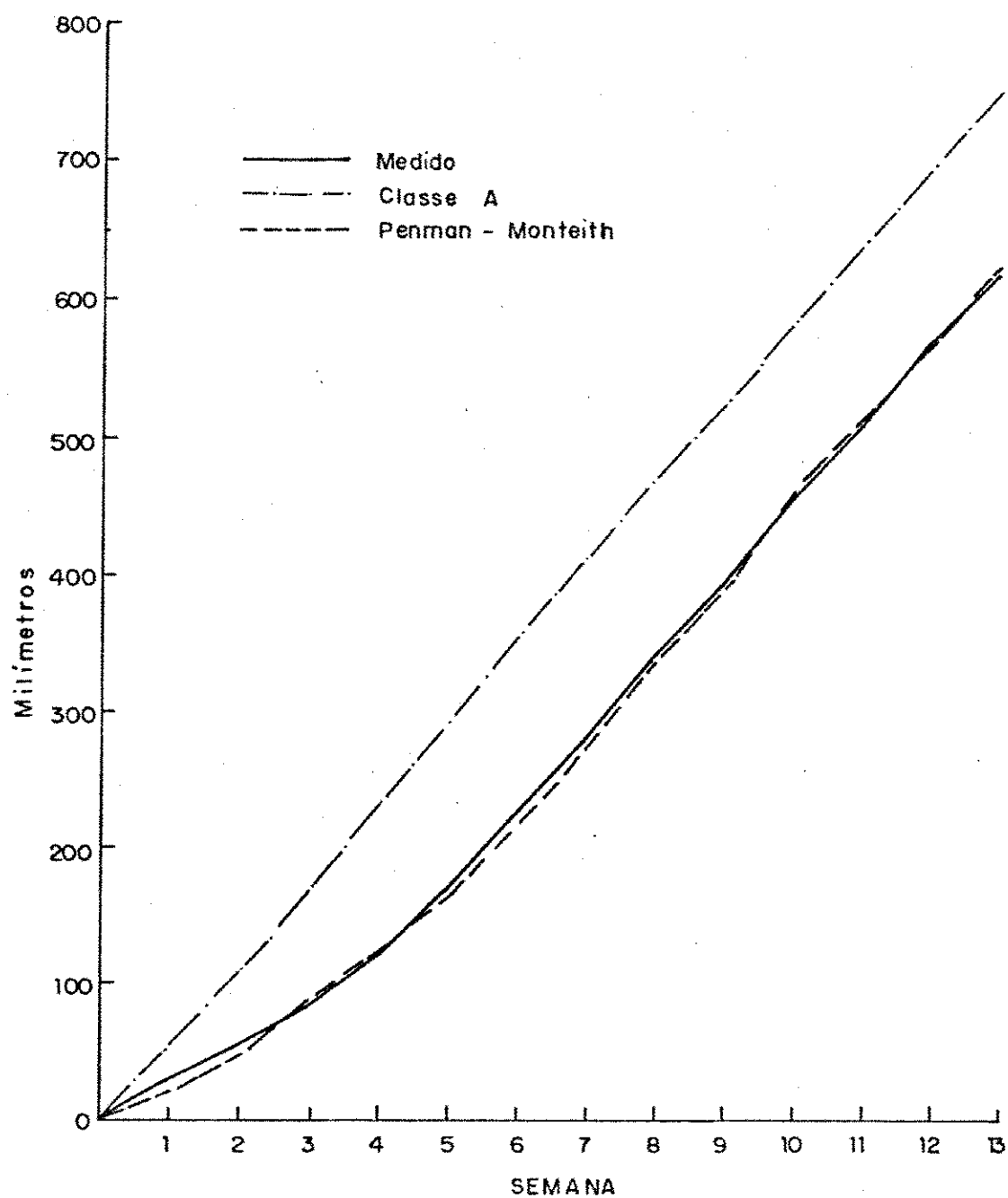


Figura 5.21 - Valores acumulados da evapotranspiração, medida e estimada pelos métodos de Penman & Monteith e Tanque "classe A".

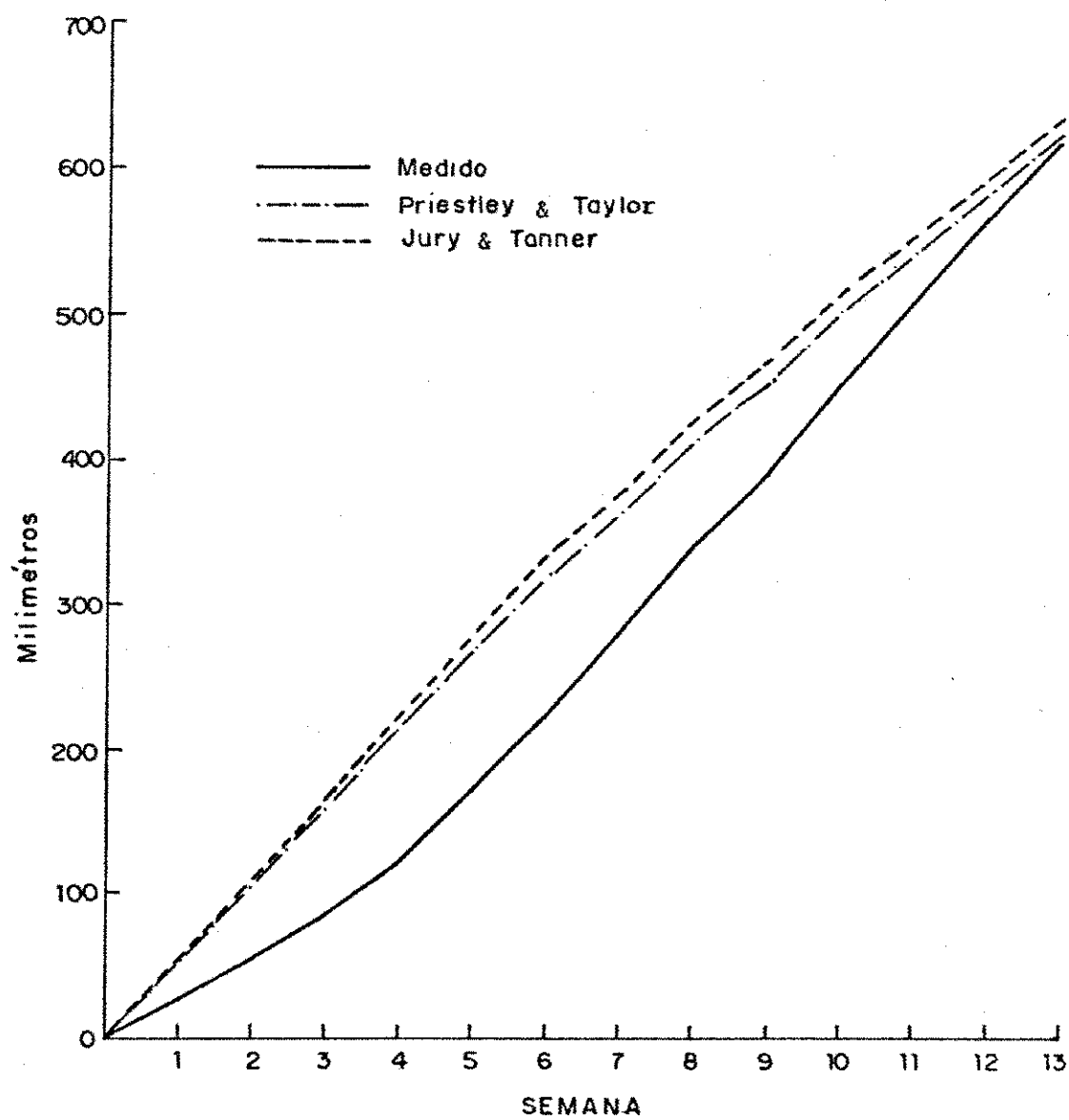


Figura 5.22 - Valores acumulados da evapotranspiração, medida e estimada pelos métodos de Priestley & Taylor e Jury & Tanner.

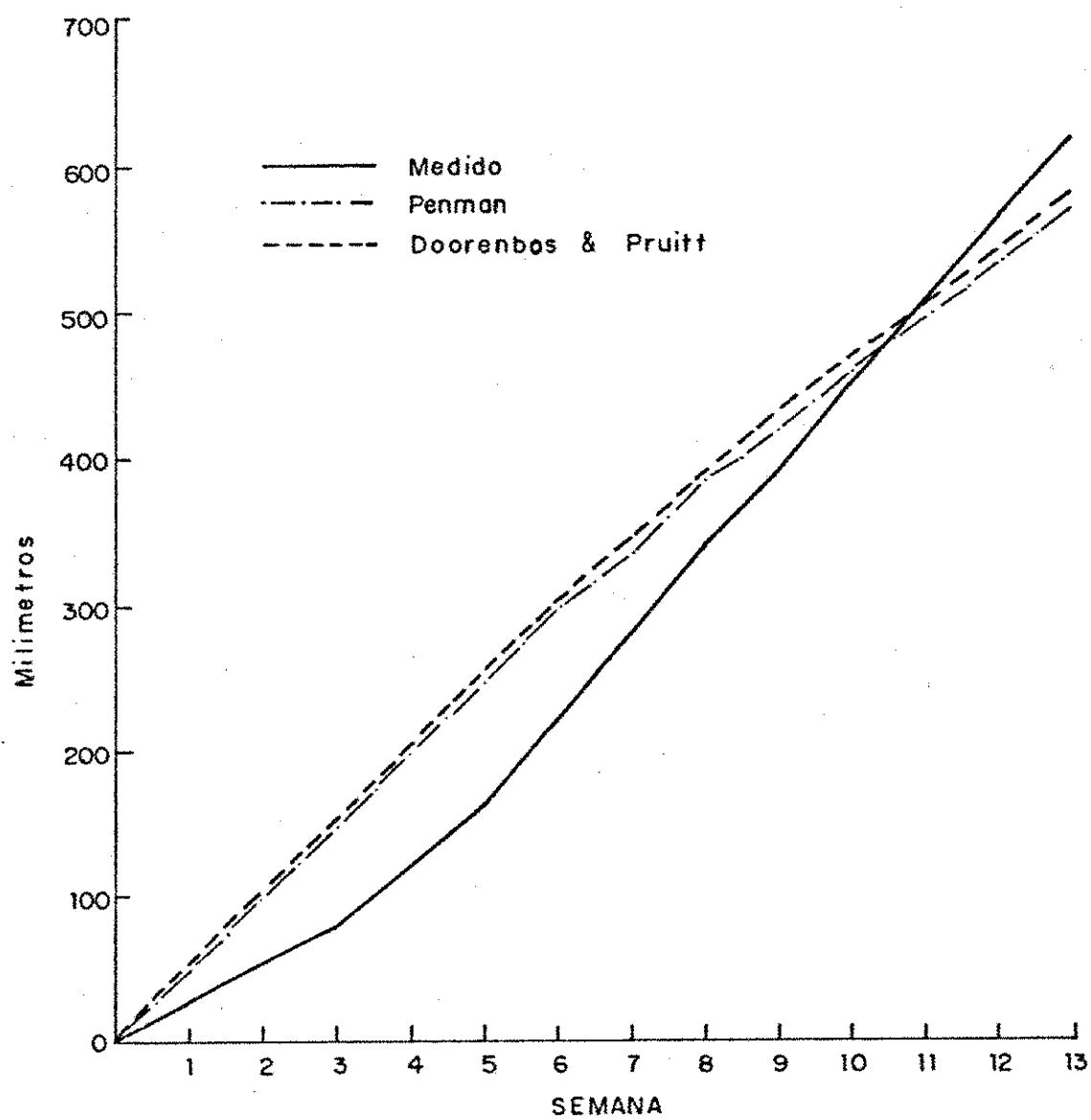


Figura 5.23 - Valores acumulados da evapotranspiração, medida e estimada pelos métodos de Penman e Doorenbos & Pruitt.

lo método Penman-Monteith. Essa diferença pode ser atribuída ao fato da evapotranspiração medida, no período inicial, representar praticamente a evaporação do solo, uma vez que a planta apresentava pequeno desenvolvimento radicular e cobertura foliar. Por outro lado, nas figuras 5.22 e 5.23, os totais acumulados da evapotranspiração diária medida, quase sempre foram inferiores aos estimados. Porém, no cômputo geral da lâmina acumulada, os dados revelaram que não houve grande diferença entre o total acumulado medido e o estimado, exceto para aquele medido pelo Tanque "classe A".

Pelos resultados acima apresentados, fica evidenciada a necessidade de se proceder comparações prévias visando estabelecer correções apropriadas para o local e cultura considerada, antes de adotar-se qualquer método empírico que tenha como objetivo quantificar a demanda hídrica de superfícies vegetadas. Deste modo, o fraco desempenho dos métodos empíricos, em relação a estimativa da evapotranspiração, deve estar associado a falta de uma adaptação destes modelos às condições semi-áridas locais. Muitos pesquisadores têm reportado que o método de Penman subestima a ETm em condições de moderada e forte advecção, verificada em áreas áridas e semi-áridas, como por exemplo SHOUSE et alii (1980) e REDDY & AMORIM NETO (1984). Assim, os resultados encontrados neste estudo estão de acordo com aqueles citados na literatura. A tentativa de estimar a ETo através das equações (4.21) e (4.22) não produziu os resultados esperados. Isto reforça a necessidade de que se busque desenvolver um melhor entendimento da aplicabilidade destes modelos às condições ambientais do semi-árido do nordeste brasileiro, a fim de que se possa estabelecer as correções apropriadas e obter-se desempenho similar àquele encontrado para o local em que foram desenvolvidos e testados.



### 5.5 — Coefficiente de cultivo

O coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) constitui um parâmetro de grande importância no planejamento e controle da irrigação, além de facilitar o estabelecimento das frequências das irrigações de forma mais efetiva.  $K_c$  varia de cultura para cultura e com o estágio de crescimento das plantas, sendo o mesmo, função do método de estimativa da evapotranspiração de referência utilizado na sua definição (VOLPE et alii, 1987). Além das condições hídricas do solo e da energia disponível ao processo evapotranspiratório,  $K_c$  pode ser afetado pelas características aerodinâmicas, altura da cultura, época de plantio, comprimento da estação de cultivo e das condições climáticas reinantes (TAN & FULTON, 1980).

Na tabela 5.2 são apresentados os valores diários médios para períodos semanais do coeficiente de cultivo, determinados pelos métodos propostos e os sugeridos pela FAO (1975). Nesta tabela, observa-se, em todos os casos, uma tendência de crescimento dos valores de  $K_c$  que, após atingir um valor máximo, decrescem. Este comportamento está diretamente relacionado com o crescimento da planta, através do índice de área foliar. O decréscimo brusco no final da estação de cultivo está relacionado com o início da fase de maturação, quando a planta perde rapidamente o seu vigor (ENCARNAÇÃO et alii, 1987).

O valor máximo de  $K_c$  em todos os casos, ocorreu exatamente quando a altura da planta e índice de área foliar foram máximos, conforme pode ser visto na figura 5.1. Observa-se, também, na tabela 5.2, que não houve grandes diferenças entre os valores de  $K_c$  sugeridos pela FAO e aqueles estimados através do Tanque "classe A", com exceção dos obtidos no final do

TABELA 5.2

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

Período	Ordem	MÉTODOS					
		"Classe A" $K_{cCA}$	Penman $K_{cPE}$	Doorenbos- Pruitt $K_{cDP}$	Priestley- Taylor $K_{cPT}$	Jury-Tanner $K_{cJT}$	FAO $K_{cFAO}$
19-25/09	1	0,47	0,52	0,51	0,48	0,48	0,46
26/09-02/10	2	0,51	0,55	0,53	0,54	0,55	0,52
03-09/10	3	0,54	0,65	0,64	0,55	0,56	0,59
10-16/10	4	0,58	0,70	0,68	0,68	0,67	0,69
17-23/10	5	0,83	0,99	0,97	0,90	0,84	0,78
24-30/10	6	0,88	1,16	1,14	1,05	1,02	0,88
01-07/11	7	1,01	1,31	1,28	1,26	1,18	0,97
08-14/11	8	1,03	1,34	1,35	1,18	1,16	1,05
15-21/11	9	0,99	1,22	1,23	1,27	1,25	1,08
22-28/11	10	1,05	1,40	1,40	1,29	1,28	1,13
29/11-05/12	11	1,02	1,34	1,34	1,34	1,36	1,13
06-12/12	12	0,97	1,32	1,31	1,34	1,33	1,12
13-20/12	13	0,94	1,22	1,23	1,15	1,15	1,11

período de observação; contudo, os demais métodos estudados apresentaram valores de  $K_c$  mais elevados.

O fato dos valores de  $K_c$  sugeridos pela FAO estarem mais relacionados com os estimados pelo Tanque "classe A" e subestimarem aqueles calculados pelos modelos, pode ser atribuído ao bom relacionamento que houve entre a evapotranspiração medida com a estimada através do Tanque "classe A", ou ainda com as dimensões da área experimental — que não era suficientemente extensa — deve ter contribuído para um aumento da evapotranspiração medida, devido a influência de energia advectiva, uma situação real e prevalecente em áreas áridas, quando se tem parcelas irrigadas circundadas por meio árido. BRAKKE et alii (1978), pesquisando a magnitude da influência de energia advectiva em áreas áridas, constataram que a advecção de calor sensível contribuiu com 15-50% da energia total diária consumida no processo da evapotranspiração; efetivamente, constatações como esta inviabilizam a utilização de métodos empíricos nestas áreas, sem um conhecimento prévio dos ajustes necessários que visem minimizar estes efeitos. Vale salientar que, no caso da parcela em que se realizou o presente estudo, a mesma era circundada por parcelas mais extensas e igualmente irrigadas.

Nas figuras 5.24, 5.25 e 5.26, são apresentados os diagramas de dispersão e as respectivas curvas de regressão dos valores diários médios para períodos semanais de  $K_c$  obtidos por estimativas e os sugeridos pela FAO (1975). A análise estatística desses valores, revelou alta correlação em todos os casos e boa significância pela análise de variância da regressão linear — tabelas  $B_4$  a  $B_6$  (Apêndice B).

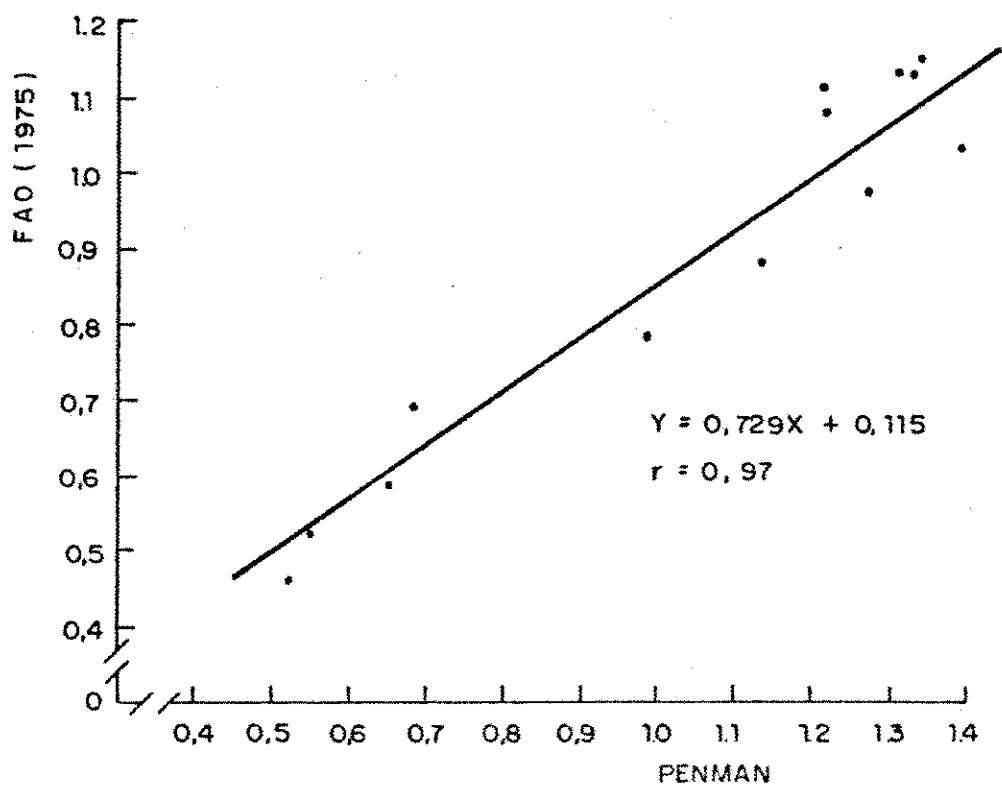
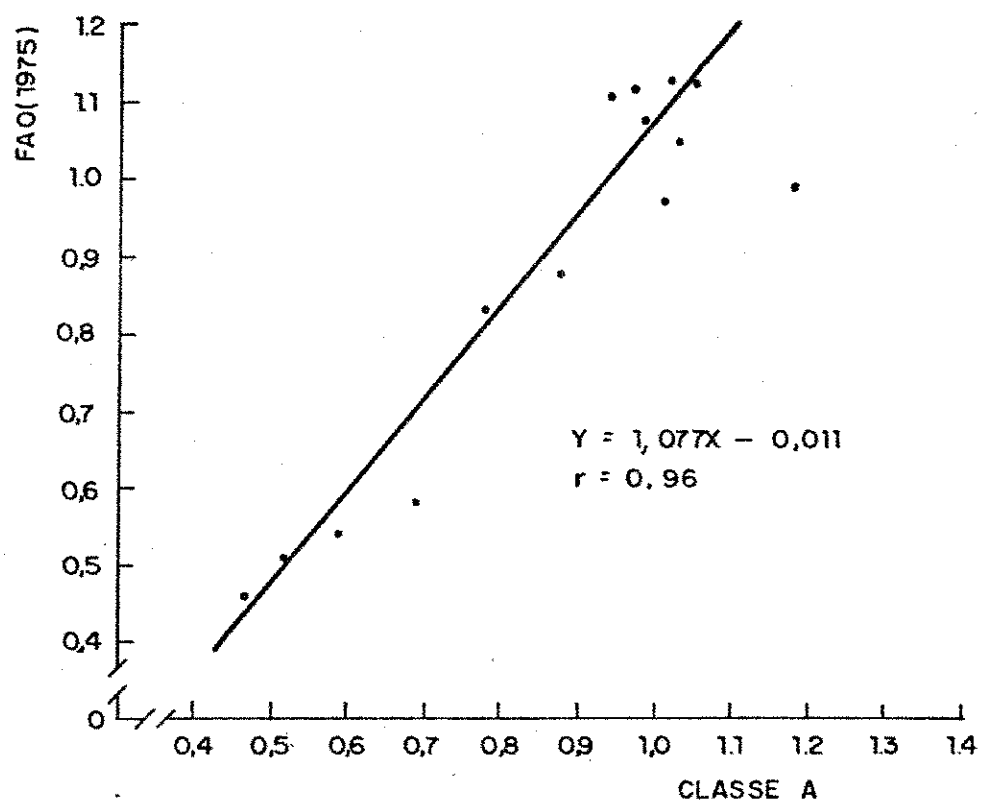


Figura 5.24 - Correlação entre os valores diários médios para períodos semanais de  $K_c$ , obtidos por estimativas e sugeridos pela FAO (1975).

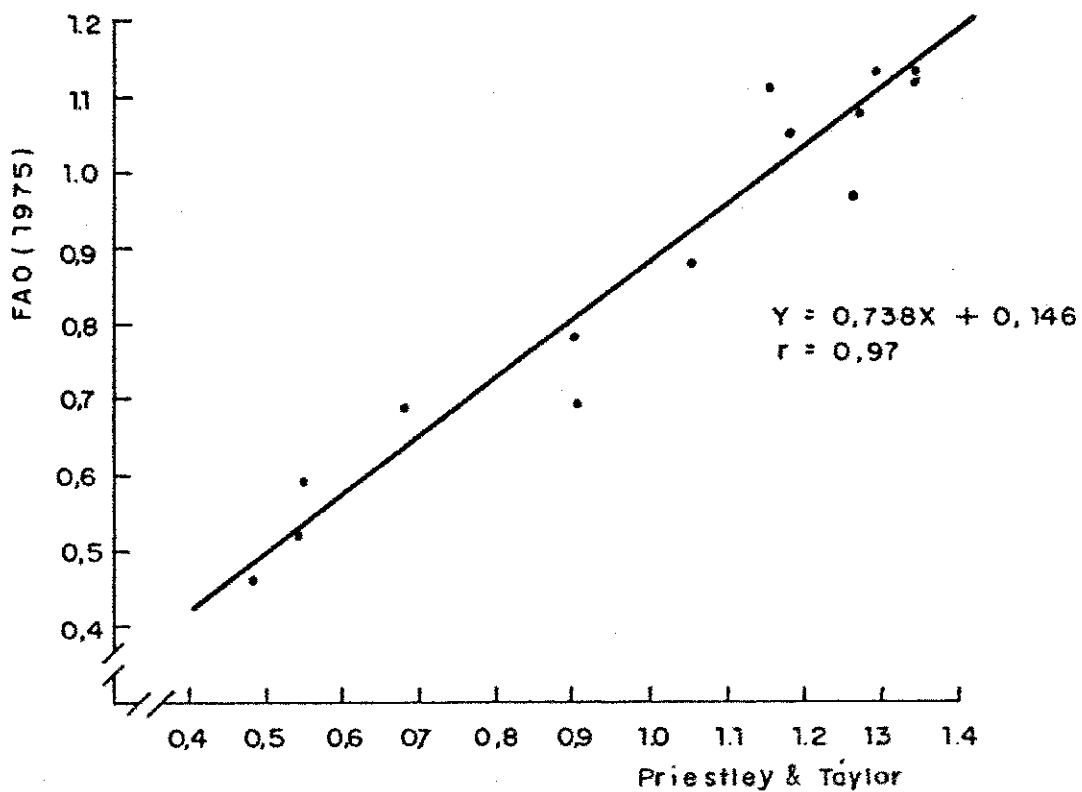
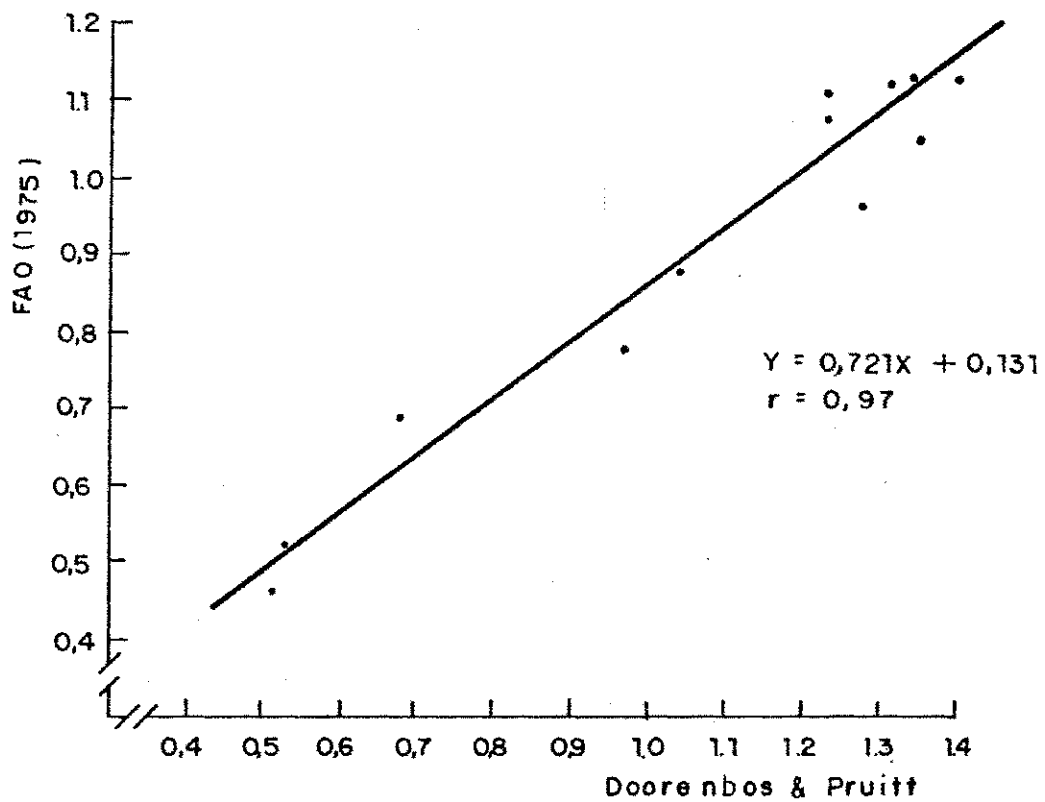


Figura 5.25 - Correlação entre os valores diários médios para períodos semanais de  $K_c$ , obtidos por estimativas e sugeridos pela FAO (1975).

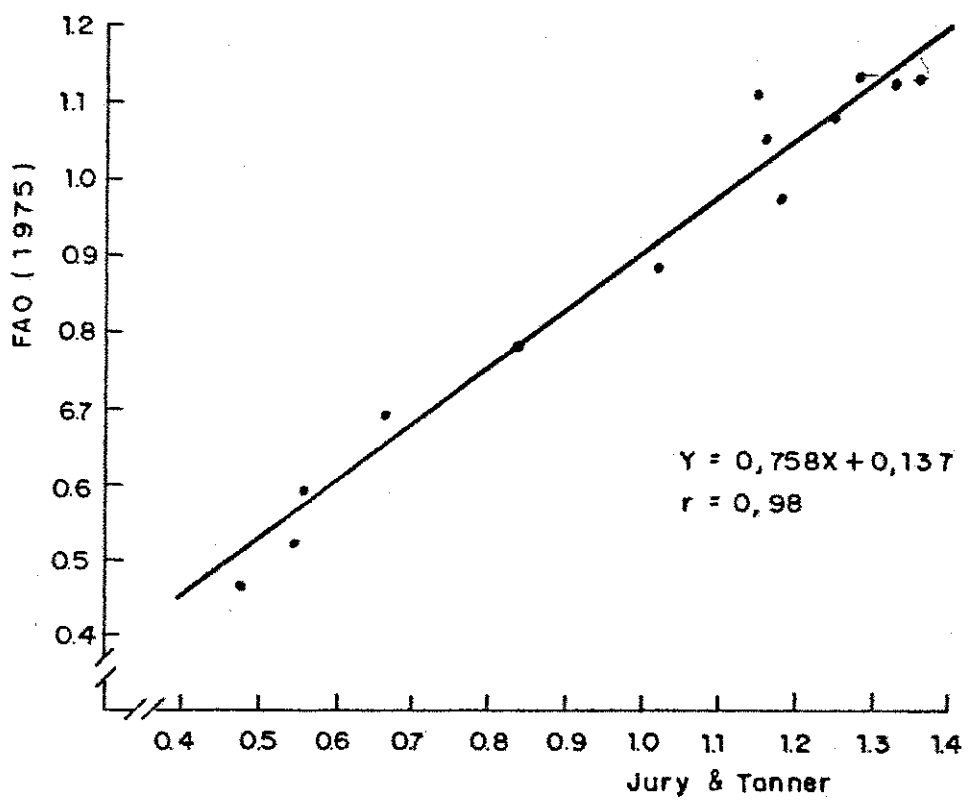


Figura 5.26 - Correlação entre os valores diários médios para períodos semanais de  $K_c$ , obtidos por estimativas e sugeridos pela FAO (1975).

Na figura 5.27 plotou-se os valores diários médios para períodos semanais de Kc estimados pelos métodos estudados e os recomendados pela FAO (1975). Através desses resultados fica demonstrado que, com exceção dos valores de Kc estimados pelo Tanque "classe A", os demais sobrestimaram aqueles sugeridos pela FAO.

Seguindo a metodologia apresentada por DOORENBOS & PRUITT (1975), apresenta-se na figura 5.28, a curva representativa do coeficiente de cultivo para a cultura de soja, nas condições ambientais do experimento. Onde pode-se observar o comportamento de Kc por estágio fenológico e ao longo da estação de cultivo.

Dos resultados de Kc obtidos no presente estudo, os valores estimados através do Tanque "classe A", foram similares aos encontrados por MATZENAUER & BERNATO (1985) para cultura de soja, nas condições climáticas de Taquari - RS. Embora as estimativas de Kc pelos demais métodos aqui estudados tenham se mostrado superiores aos propostos pela FAO (1975) e estimados pelo Tanque "classe A", isso não inviabiliza por completo a utilização destes modelos. Preciso é, porém, que se conheça melhor os ajustes necessários para o local, a fim de obter-se estimativas de Kc confiáveis. Tais ajustes têm necessariamente que levar em conta os efeitos da advecção.

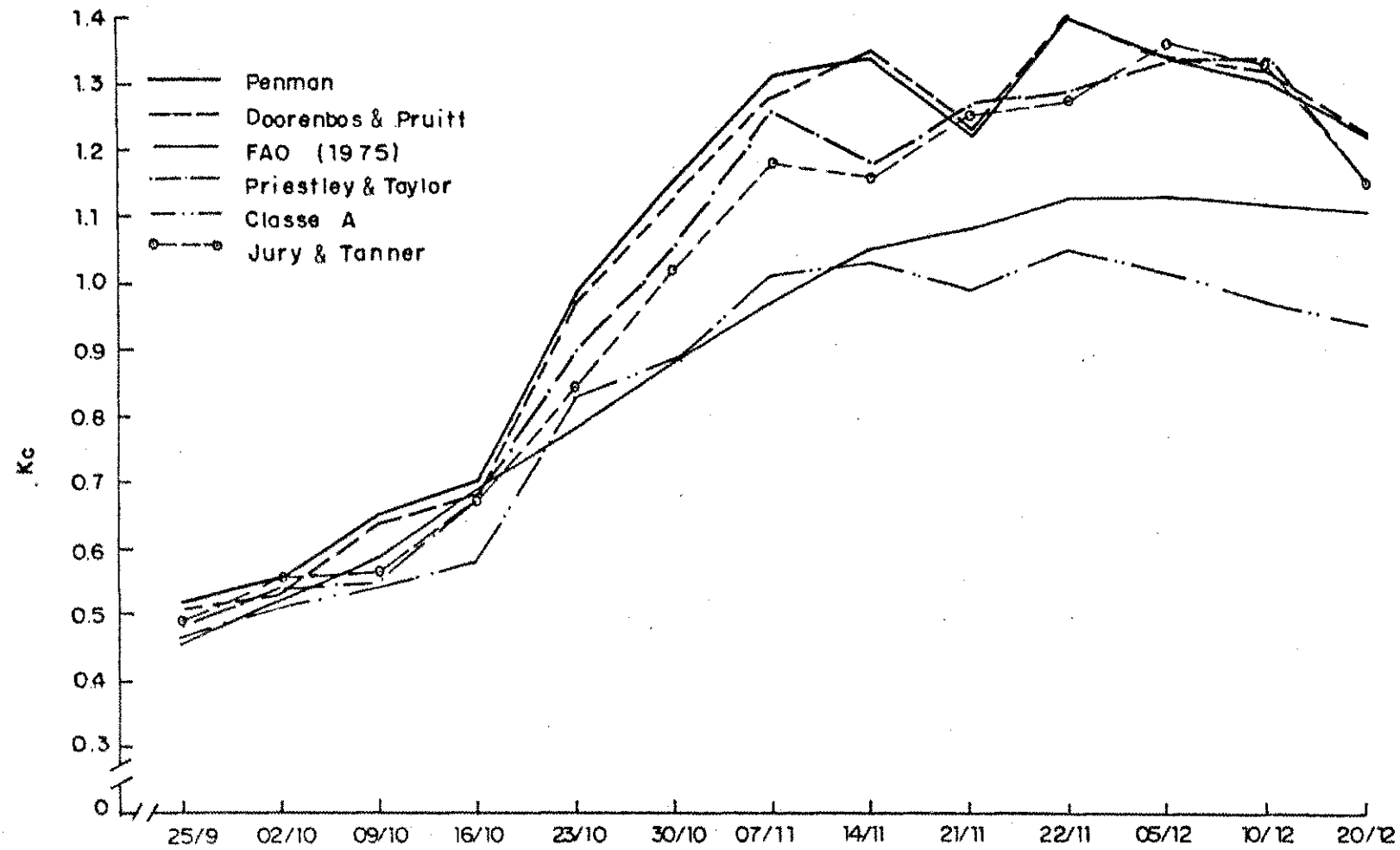


Figura 5.27 - Comparação entre os valores diários médios para períodos semanais de  $K_c$ , sugeridos pela FAO (1975) e estimados por diferentes métodos.



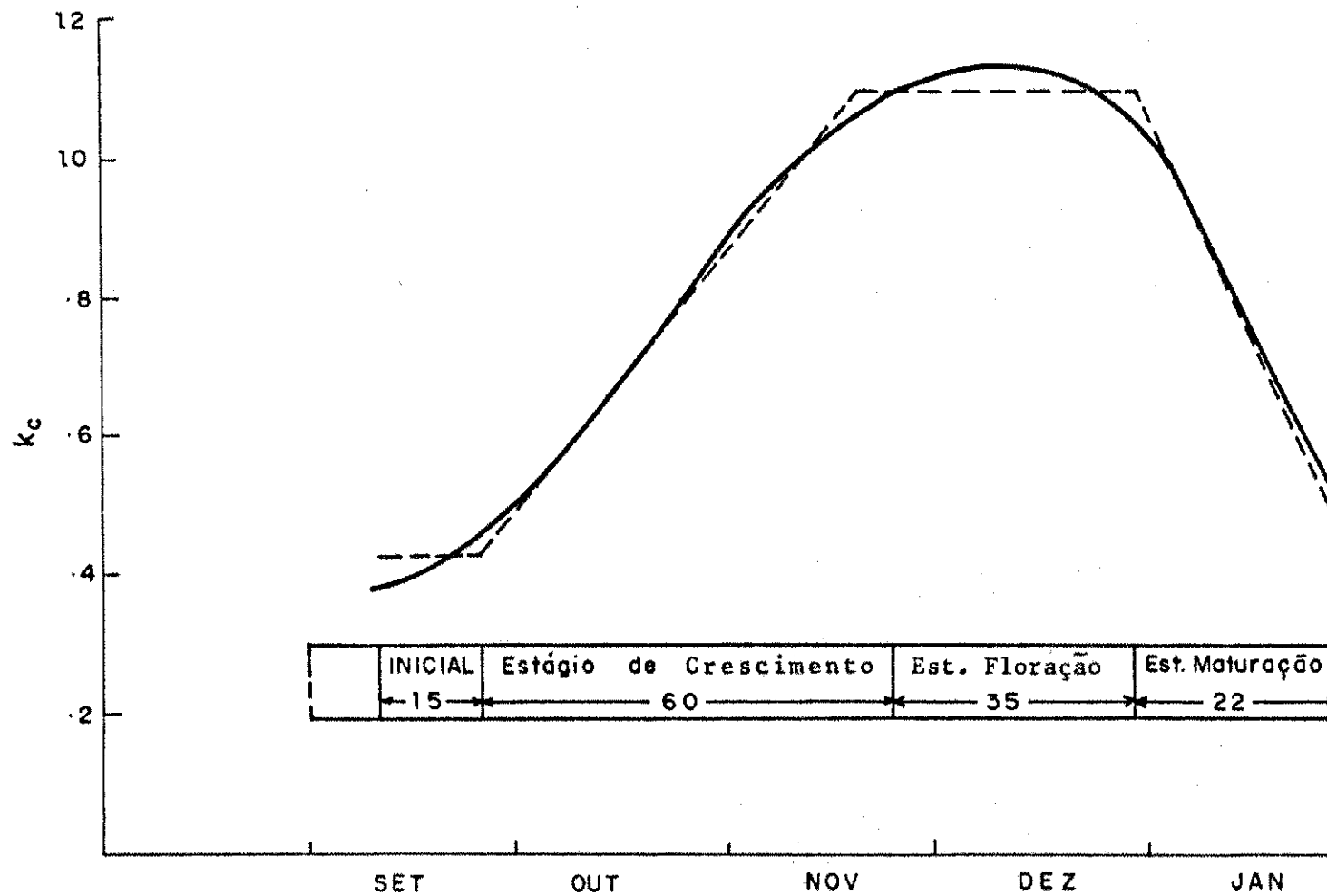


Figura 5.28 - Curva representativa do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) para a cultura de soja, nas condições ambientais do experimento.

Não obstante as limitações das condições físicas e instrumentais normalmente disponíveis a estudos desta natureza, os resultados aqui encontrados, de um modo geral, mostraram-se concordantes com aqueles encontrados em outras pesquisas e sugeridos pela literatura sobre o assunto.

Os valores da produção de matérias seca e verde, índice de área foliar e altura da cultura encontrados, foram de certo modo superiores àqueles característicos da cultura tradicional da soja no sul do Brasil. Pode-se atribuir tal desempenho da cultura da soja na região semi-árida do experimento, ao fotoperiodismo e/ou controle potencial das condições edafohídricas. Tais resultados sugerem, ainda, que esses parâmetros fisiológicos e de produção de matérias verde e seca, podem ser utilizados na parametrização e modelagem do desenvolvimento da soja nas condições semi-áridas do nordeste do Brasil.

Os parâmetros fisiológicos — transpiração, resistência estomática de folhas isoladas e a resistência efetiva da cultura — foram invariavelmente afetadas pelo estado de estresse hídrico da cultura. A resistência estomática da cultura, mostrou-se muito sensível ao grau de exposição das folhas à radiação solar e à hora do dia. Assim, a resistência efetiva da cultura calculada através das equações (2.22) e (2.26) mostrou significativa diferença quando se leva em consideração apenas as resistências estomáticas de folhas ensolaradas, e quando considera-se a média ponderada de folhas ensolaradas e sombreadas. A resistência estomática da cultura estimada pelo

método do gradiente vertical de vapor d'água, equação 5.1, mostrou-se um modelo realístico e simples, por envolver parâmetros facilmente mensuráveis, mas de pouca aplicabilidade nas condições do experimento, uma vez que não envolve todas as componentes do balanço de energia e nem a energia proveniente da advecção.

O comportamento diurno das componentes do balanço de energia — fluxo de calor sensível de aquecimento do ar (H) e calor latente de evaporação ( $\lambda E$ ) — mostraram marcante diferença entre os dias imediatamente anterior e posterior às irrigações. Enquanto que o fluxo de calor para o solo (G) apresentou variação diurna significativa, apenas no período inicial da fase de crescimento vegetativo.

O sistema de evapotranspirômetro empregado no experimento — lençol freático constante — mostrou-se adequado e eficiente, haja visto o bom desenvolvimento das plantas no interior dos tanques evapotranspirométricos. Portanto, pode-se assegurar que, nas condições do experimento, as necessidades hídricas ideais ao desenvolvimento pleno das plantas tenham sido garantidas.

O método combinado Penman-Monteith, foi o que melhor estimou a evapotranspiração medida para todo o período experimental. Para o período de completa cobertura do solo, constatou-se que os valores de ETo estimados pelo método do Tanque "classe A" apresentaram maior correlação ( $r = 0,98$ ) com a evapotranspiração medida. O bom desempenho do método Penman-Monteith, pode ser atribuído ao fato desse modelo levar em consideração, tanto os efeitos climáticos quanto aqueles resultantes dos processos fisiológicos da planta, isto é, a evapotranspiração real. Os métodos de Penman, Priestley Taylor, Jury &

Tanner e Doorenbos & Pruitt, sobrestimaram a evapotranspiração medida antes do período de completa cobertura do solo e subestimaram no período posterior. Assim, sugere-se que os métodos de Penman e Doorenbos & Pruitt, precisam de correções apropriadas para as condições ambientais do experimento. Por outro lado, as tentativas de adequação dos modelos de Priestley & Taylor e Jury & Tanner às condições advectivas do experimento, não proporcionaram os resultados esperados.

Os valores do coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) estimados através do método do Tanque "classe A" apresentaram maior concordância com aqueles recomendados pela FAO (1975). E a sobrestimação de  $K_c$  pelos outros modelos, pode ser atribuída a problemas de advecção que determinou valores mais elevados de  $ET_m$  no período estudado, além do fato de que os modelos não contemplam a situação de evapotranspiração máxima que a cultura atingiu na fase de desenvolvimento máximo.

Finalmente, conclui-se que os modelos aqui pesquisados revelaram-se pouco eficientes na reprodução da realidade física prevalecente, e que o fenômeno da evapotranspiração é bastante complexo para ser representado numa simples equação. Portanto, recomenda-se que estudos semelhantes devem ser realizados em outras áreas semi-áridas do nordeste brasileiro, visando confirmar ou corrigir os resultados aqui apresentados. Recomenda-se, também, o uso de alguns resultados apresentados neste trabalho, na modelagem ou em projetos de irrigação da cultura da soja nas condições climáticas do semi-árido nordestino.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AZEVEDO, P.V. *Characteristics of air flow within and above grain sorghum canopies*. University of Nebraska, Lincoln, 1984, 144p. (Ph.D. Dissertation).

AZEVEDO, P.V. and VERMA, S.H. *Aerodynamic characteristics of grain sorghum*. *Agric. and Forest Meteorol.*, 32: 193-204, 1986.

AZEVEDO, P.V.; SOUZA, J.L. & BASTOS, E.J. de Brito. *Coefficiente de cultivo em cultura de tomate irrigado*. V Congresso Bras. de Agrometeorologia, Anais. Belém - Pará: 123-125, 1987.

BACKHOUSE, J.K. *Mathematical topics statistics: An introduction to tests of significance*. University of Oxford, Longma, 1967, 197p.

BAILEY, W.G. and DAVIES, J.A. *Bulk stomatal resistance control on evapotranspiration*. *Bound. Layer Meteorol.*, 20: 401-415, 1980.

BAILEY, W.G. and DAVIES, J.A. *Evapotranspiration from soybeans*. *Bound. Layer Meteorol.*, 20: 417-428, 1980.

BAILEY, W.G. and DAVIES, J.A. *The effect of uncertainty in aerodynamic resistance on evaporation estimates from combination model*. *Bound. Layer Meteorol.*, 20: 187-189, 1981.

- BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A. & FONTANA, D.C. *Balanço de radiação de soja em região subtropical do Brasil*. V Congresso Bras. de Agrometeorologia, Anais. Belém - Pará: 320-321, 1987.
- BERLATO, M.A. & BERMAGHSCHI, H. *Consumo de água da soja - Evapotranspiração estacional em condições de ótima disponibilidade de água no solo*. I Seminário de Pesquisa da Soja, Anais. Vol. 1, 53-58, 1978.
- BERLATO, M.A. & MOLION, L.C.B. *Evaporação e Evapotranspiração*. Ipagro. Boletim Técnico nº 7, 1981, 95p.
- BLACK, T.A.; TANNER, C.B. and GARDNER, W.R. *Evapotranspiration from a snap bean crop*. Agron. Journal, 62: 66-69, 1970.
- BLACK, T.A. and SPITTLEHOUSE, D.L. *Evaluation of the Bowen ratio/Energy balance method for determining forest evapotranspiration*. Atmosphere-ocean, 18: 98-116, 1980.
- BLAD, B.L. and ROSENBERG, N.T. *Evaluation of resistance and mass transport evapotranspiration models requiring canopy temperature data*. Agron. journal, 68: 764-769, 1976.
- BRAKKE, T.W.; VERMA, S.B. and ROSENBERG, N.J. *Local and regional components of sensible heat advection*. J. appl. meteorol. 17: 187-207, 1978.
- CAMPBELL, G.S. *An introduction to environmental biophysics*. Heidelberg science library. New York, 1977, 159p.
- DANTAS, R.T. *Monitoramento de estresse hídrico no milho irrigado na região semi-árida*. UFPb, Campina Grande, 1987, 84p. (Dissertação de Mestrado).

- DESJARDINS, R.L. and QUELLET, C.E. *Determination of the importance of various phases of wheat growth on final yield.* Agric. meteorol., 22: 129-136, 1980.
- DOORENBOS, S.J. & KASSAM, A.K. *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos.* Roma. FAO, 1979, 213p.
- DOORENBOS, S.J. and PRUITT, W.O. *Guidelines for predicting crop water requirements.* Roma, FAO. 1975, 180p.
- DYER, A.J. and HICKS, B.B. *Flux-gradient relationships in the constant flux layer.* Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 96:715-721, 1970.
- DYLLA, A.S.; TOMMONS, D.R. and SAULL, H. *Estimating water used by irrigated corn in west central.* Soil. Sci. Soc. Am. J. Minnesota, 44: 823-827, 1980.
- ENCARNAÇÃO, C.R.F. *Estudo da demanda de água do feijoeiro.* Piracicaba, ESALQ/USP, 1980. 82p. (Dissertação de Mestrado).
- FERNANDEZ, B. & GONDIM, A.W. de Almeida. *Estimativa da Evapotranspiração em Areia - PB.* Agropecuária Técnica, UFPb, Vol. 1: 69-83, 1980.
- FERREIRA, H. & PEIXOTO, J.P. *Evaporação e Evapotranspiração.* Lisboa. Instituto Geofísico do Infante D. Luiz, 1962. (Publicação nº 4).
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. & BERGAMASCHI, H. *Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada.* V Congresso Bras. de Agrometeorologia, Anais. Belém - Pará: 317-319, 1987.

- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A. & BERGAMASCHI, H. *Estimativa da evapotranspiração da soja a partir do Tanque "classe A", do saldo de radiação e da evapotranspiração calculada segundo Penman*. V Congresso Bras. de Agrometeorologia. Anais. Belém - Pará: 158-159, 1987.
- GANGOPADHYAYA, M.G. *Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration (Comission for instrument and methods of observation)*. WMO. N° 201. Tp. 105, 1971.
- GARDNER, B.R.; BLAD, B.L. and WATTS, D.G. *Relationship between crop temperature and the physiological and phenological development of differentilly irrigated corn*. Agron. Journal, 73: 743-747, 1981.
- GEISER, K.M.; SLACK, D.C. and STANGL, E.W. *Irrigation scheduling using crop canopy-air temperature difference*. Transactions of the ASAE, 25: 689-694, 1982.
- GOMES, F.P. *Curso de estatística experimental*. 11a. ed., Livra<sup>ria</sup> Nobel S.A., ESALQ - SP, 1985, 466p.
- GRANT, D.R. *Comparison of evaporation measurements using different methods*. Quart. J.R. Meteorol. Soc., 101: 543-550, 1975.
- HIPPS, L.E. *Morphological adaptation to water stress and their influence on crop microclimate*. University of California - Davis, 1983, 118p. (Ph.D. Thesis).
- HOEL, P.G. *Estatística elementar*. Editora Atlas S.A., São Paulo, 1981, 430p.



- JACKSON, R.D. *Canopy temperature and crop water stress*. In: D. Hillel (ed.) *Advances in irrigation*, Vol. 1. Academic press, New York. 1982, p. 43-85.
- JACKSON, R.D.; IDSO, S.B.; REGINATO, R.J. and PINTER, P.J. Jr. *Canopy temperature as a crop water stress indicator*. *Water resources*, 17: 1133-1138, 1981.
- JURY, W.H. and TANNER, C.B. *Advection modification of the Priestley and Taylor evapotranspiration formula*. *Agron. Journal*, 67: 840-842, 1975.
- KANEMASU, E.T.; MTUI, T.A. and WASSOM, C. *Canopy temperatures, water use and water use efficiency of corn genotypes*. *Agron. Journal*, 73: 639-643, 1981.
- KLAR, A.B. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. Livraria Nobel S.A. 1984, 408p.
- KNAPP, H.V. *Evaporation and transpiration*. p. 537-554. In: D. D. HOUGHTON (ed.). *Handbook of applied meteorology*. New York. John Wiley & Sons., 1985.
- LEMON, E.R.; GLASSER, A.H. and SATTERWHITE, L.E. *Some aspects of the relationship of soil, plant and meteorological factors to evapotranspiration*. *Soil SC. Soc. Amer. Proc.*, 21: 464-468, 1957.
- LIST, R.J. *Smithsonian meteorological tables*. 6a. ed., Smithsonian Institute, Washington, 1951.
- LYNN, J.B.; KANEMASU, E.T. and POWERS, W.L. *Evapotranspiration from soybean and sorghum field*. *Agron. Journal*, 64: 145-148, 1972.

- ✓ MARQUES FILHO, A.O.; RIBEIRO, M.N.G. & SALAT, E. *Evapotranspiração de florestas da região amazônica*. II Congresso Bras. de Meteorologia. Anais. Pelotas - RS, 66-69, 1982.
- MATZNAEUER, R. & BERLATO, M.A. *Coefficiente de cultura ( $K_c$ ) da soja (*Glycine max* (L.) Merrill)*. IV Congresso Bras. de Agro meteorologia, Resumos. Fundação Gargil: 13-14, 1985.
- MILNE, R. *Water loss and resistance of a young sitka spruce plantation*. Bound. Layer Meteorol., 16: 67-81, 1978.
- MONTEITH, J.L. *Principles of environmental physics*. Edward Arnold Publisher Ltda. London, 1973, 241p.
- \* MONTEITH, J.L. *Evaporation and surface temperature*. Quart. J. R. Meteorol. Soc. 107: 1-27, 1981.
- MÜLLER, L. *Fisiologia*. p. 109-129. In: S. MIYASAKA & J.C. MEDINA (eds.). *A soja no Brasil*. ITAL, 1981.
- NORMAN, J.M. *Simulation of microclimate*. p. 62-99. In: J.L. Hatfield and I.J. Thomason (eds.) *Biometeorology in integrated pest management*. Academic Press. New York, 1982.
- OKE, J.R. *Boundary layer climates*. John Wiley & Sons. New York. 1978, 372p.
- PENMAN, H.L. *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*. Proc. Roy. Soc. London, 193: 120-145, 1948.
- PENMAN, H.L. *Evaporation: An introductory survey*. Neth. J. of Agriculture Science. 4: 9-29, 1956.

- PRATES, J.E. *Análise da variação temporal dos componentes do balanço de radiação em cultura de arroz (Oryza Sativa L.) de Sequeiro*. V Congresso Bras. de Meteorologia, Anais, Rio de Janeiro. I: 29-33, 1988.
- PRIESTLEY, C.H.B. and TAYLOR, R.J. *On the assesement of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters*. Mon. Weather Rev., 100: 81-92, 1972.
- RAMOS, Z.S.; PEQUENO, H.C. & CAMPOS, J.L.D. *Um método empírico para estimativa da evapotranspiração potencial no Ceará*. Ciências Agronômicas, 8: 91-95, 1978.
- REDDY, S.J. and AMORIM NETO, M. da S. *A method for the estimation of potential evapotranspiration and/or open pan evaporation over Brazil*. Pesq. Agropec. Bras., Brasília, 19(3): 247-267, 1984.
- REICOSKY, D.C.; DEATON, D.E. and PARSONS, J.E. *Canopy air temperatures and evapotranspiration from irrigated and stressed soybean*. Agric. Meteorol., 21: 21-35, 1980.
- ROSENBERG, N.J. *Microclimate: The biological environment*. 1a. ed. John Wiley & Sons, Inc. 1974. 315p.
- ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L. and VERMA, S.B. *Microclimate: The biological environment*. 2a. ed. John Wiley & Sons, Inc. 1983, 495p.
- RUSSELL, G. *Crop evaporation, surface resistance and water status*. Agric. Meteorol., 21: 213-226, 1980.
- SELLERS, W.D. *Physical climatology*. Chicago, The University of Chicago Press. 1965, 272p.

- SHAW, E. W. *Hidrology in practice*. Van Nostrand Reinhold (UK). Co. Ltd. 569p., 1983.
- SHAW, R.H. and DECKER, W.L. *The general heat budget of canopies*. p. 141-155. In: B.J. BARFIELD and J.F. GERBER (eds.). *Modification of the areal environment of crops*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan, 1979.
- SHOUSE, P.; JURY, W.A. and STOLZY, L.H. *Use of deterministic and empirical models to predict potential evapotranspiration in advective environment*. *Agron. Journal*, 72: 994-998, 1980.
- SINGH, B. and TAILLEFER, R. *The effect of synoptic-scale advection on the performance of the Priestley-Taylor evaporation formula*. *Bound. Layer Meteorol.*, 36: 267-282, 1986.
- SLATIER, R.C. and McILROY, J.C. *Evaporation and the principles of its measurements*. Austrália, UNESCO, 47-131, 1961.
- SOUZA, J.L. *Estudo da evapotranspiração em cultura de feijoeiro*. UFPb - Campina Grande, 1983. 73p. (Dissertação de Mestrado).
- SOUZA, J.L.; AZEVEDO, P.V. & BASTOS, E.J. de Brito. *Variação estacional do coeficiente de cultivo numa cultura de milho irrigado*. V Congresso Bras. de Agrometeorologia, Anais. Belém - Pará: 126-129, 1987.
- SOUZA, J.L. & VAREJÃO SILVA, M.A. *Evapotranspiração em cultura de feijoeiro*. IV Congresso Bras. de Agrometeorologia, Resumos. Fundação Gargill: 24-32, 1985.
- STENGMAN, E.C. and LEMERT, G.W. *Sunflower yields vs. water deficit in major growth periods*. *ASAE*, 24: 1533-1538, 1981.

- STELL, R.G.D. and TORRIE, J.H. *Principles and procedures of statistics*. McGraw-Hill Book Company, Inc., London, 1960, 479p.
- STEWART, J.B. and GASH, J.H. *The average surface resistance of a pine forest derived from Bowen ratio measurements*. *Bound. Layer Meteorol.*, 8: 453-464, 1975.
- SUMAYAO, C.R.; KANEMASU, E.T. and BRAKKE, T.W. *Using leaf temperature to assess evapotranspiration and advection*. *Agric. Meteorol.*, 22: 153-166, 1980.
- TAJCHAMAN, S.T. *Evapotranspiration and energy balances of forest and field*. *Water Resources Research*, 7: 511-523, 1971.
- TAN, C.S. and FULTON, J.M. *Ratio between evapotranspiration of irrigated crops from floating lysimeters and class A pan evaporation*. *Can. J. Plant Sci.* 60: 197-201, 1980.
- TANNER, C.B. and LEMON, E.R. *Radiant energy utilized in evapotranspiration*. *Agron. Journal*, 54: 207-212, 1962.
- THOM, A.S. *Momentum absorption by vegetation*. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 97: 414-418, 1971.
- THOM, A.S. and OLIVER, H.R. *On Penman's equation for estimating regional evaporation*. *Quart J.R. Meteorol. Soc.*, 103: 345-357, 1977.
- THOMPSON, N. *A comparison of formulas for the calculation of water loss from vegetated surfaces*. *Agric. Meteorol.*, 26: 265-272, 1982.
- VAREJÃO SILVA, M.A. *Evapotranspiração em cultura irrigada no semi-árido do Sub-Médio São Francisco*. São José dos Campos, INPE, 1977. 97p. (Dissertação de Mestrado).

- VILA NOVA, N.A. *Estudos sobre o balanço de energia em cultura de arroz*. Piracicaba, ESALQ/USP, 1967. 78p. (Tese de Doutorado).
- VILA NOVA, N.A.; PEDRO JÚNIOR, M.J. & PEREIRA, A.R. *Balanço de energia numa cultura de arroz em condições de sequeiro*. Campinas, Bragantia, Vol. 34, nº 9: 171-176, 1975.
- VILELA, S.M. & MATOS, A. *Hidrologia aplicada*. McGraw-Hill do Brasil Ltda., São Paulo, 1975, 245p.
- VOLPE, C.A. & MINCHIO, C.A. *Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura da ervilha*. V Congresso Bras. de Agrometeorologia, Anais. Belém - Pará: 132-142, 1987.
- WEBB, E.K. *Profile relationships: The log-linear range, and extension to strong stability*. Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 96: 67-90, 1970.
- WEBB, E.K. *Evaluation of evapotranspiration and canopy resistance: An alternative combination approach*. Agric. Water Management, 8: 151-166, 1984.
- WITHERS, B. & VIPOND, S. *Irrigação: Aplicação e prática*. Livraria Nobel, 1984, 339p.
- WRIGHT, J.L. *New evapotranspiration crop coefficients*. Journal of the Irrigation and Drainage Division. ASAE, Vol. 108, Nº IR2, 57-74, 1982.

APÊNDICE A

TABELA A<sub>1</sub>

Valores do fator de correção do vento, medido em altura diferente de 2 metros (Doorenbos & Pruitt, 1975)

Altura de medida, m	0.5	1.0	1,5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	10.0
Fator de correção	1.35	1.15	1.06	1.00	0.93	0.88	0.05	0.83	0.77



TABELA A<sub>2</sub>

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

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

Transcrito de Crop Water Requeriments - FAO (1975).

TABELA A<sub>3</sub>

Coefficientes do Tanque "classe A" (K<sub>p</sub>) em função da cobertura vegetal e dos valores médios diários da umidade relativa e velocidade do vento.

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

Transcrito de Crop Water Requirements - FAO (1975).

APÊNDICE B

TABELA B<sub>1</sub>

Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais, da evapotranspiração medida e estimada.

## Método de Penman-Monteith

F. de variação	G.L.	S.Q.D.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	10,983	10,983		
Resíduo	11	0,503	0,214	51,32**	16,26
Total	12	11,486	-	-	-

\*\* Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Equação de regressão:  $Y = 0,928 X + 0,45$   $r = 0,97$

## Método do Tanque "classe A"

F. de variação	G.L.	S.Q.M.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	4,634	4,634		
Resíduo	5	0,765	0,153	30,29**	16,26
Total	6	5,399	-	-	-

Equação de regressão:  $Y = 0,996 X + 0,031$   $r = 0,98$

TABELA B<sub>2</sub>

Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais, da evapotranspiração medida e estimada.

## Método de Penman

F. de variação	G.L.	S.Q.D.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	2,829	2,829	8,98*	6,61
Resíduo	5	1,575	0,315		
Total	6	4,404	-	-	-

\* Significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Equação de regressão:  $Y = 0,978 X + 2,537$

$r = 0,67$

## Método de Doorenbos &amp; Pruitt

F. de variação	G.L.	S.Q.D.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	4,908	4,908	6,99*	6,61
Resíduo	5	3,508	0,702		
Total	6	8,416	-	-	-

Equação de regressão:  $Y = 0,743 X + 3,777$

$r = 0,53$

TABELA B<sub>3</sub>

Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais, da evapotranspiração medida e estimada.

## Método de Priestley &amp; Taylor

F. de variação	G.L.	S.Q.D.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	4,324	4,324		
Resíduo	5	2,004	0,401	10,78*	6,61
Total	6	6,328	-	-	-

Equação de regressão:  $Y = 0,792 X + 3,153$

$r = 0,73$

## Método de Jury &amp; Tanner

F. de variância	G.L.	S.Q.D.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	4,576	4,576		
Resíduo	5	2,286	0,457	10,01*	6,61
Total	6	6,862	-	-	-

Equação de regressão:  $Y = 0,771 X + 3,276$

$r = 0,71$

TABELA B<sub>4</sub>

Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais, do coeficiente de cultivo, estimados e sugeridos pela FAO (1975).

## Método do Tanque "classe A"

F. de variação	G.L.	S.Q.D.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	0,644	0,644	58,54**	16,26
Resíduo	11	0,121	0,011		
Total	12	0,765	-	-	-

Equação de regressão:  $Y = 1,077 X - 0,011$

$r = 0,96$

## Método de Penman

F. de variação	G.L.	S.Q.D.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	1,406	1,406	58,58**	16,26
Resíduo	11	0,264	0,024		
Total	12	1,670	-	-	-

Equação de regressão:  $Y = 0,729 X + 0,0115$

$r = 0,97$

TABELA B<sub>5</sub>

Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais, do coeficiente de cultivo, estimados e sugeridos pela FAO (1975).

## Método de Doorenbos &amp; Pruitt

F. de variação	G.L.	S.D.Q.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	1,439	1,439	57,56**	16,26
Resíduo	11	0,275	0,025		
Total	12	1,714	-	-	-

Equação de regressão:  $Y = 0,721 X + 0,131$        $r = 0,97$

## Método de Priestley &amp; Taylor

F. de variação	G.L.	S.D.Q.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. lineae	1	1,374	1,374	59,74**	16,26
Resíduo	11	0,253	0,023		
Total	12	1,627	-	-	-

Equação de regressão:  $Y = 0,738 X + 0,146$        $r = 0,98$



TABELA B<sub>6</sub>

Análise de variância dos valores diários médios para períodos semanais, do coeficiente de cultivo, estimados e sugeridos pela FAO (1975).

## Método de Jury &amp; Tanner

F. de variância	G.L.	S.Q.D.	Q.M.	F <sub>calc.</sub>	F <sub>crit.</sub>
Reg. linear	1	1,302	1,302		
Resíduo	11	0,242	0,022	59,18**	16,26
Total	12	1,544	-	-	-

Equação de regressão:  $Y = 0,758 X + 0,137$

$r = 0,98$