

**TESE DE DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ÁGUA E SOLO**

**TÍTULO: CONSUMO HÍDRICO, PRODUTIVIDADE**

**E QUALIDADE DO FRUTO DA**

**GOIABEIRA IRRIGADA NA REGIÃO DO**

**SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO**

**AUTORA: MAGNA SOELMA BESERRA DE MOURA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS**

**CONSUMO HÍDRICO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DO FRUTO DA  
GOIABEIRA IRRIGADA NA REGIÃO DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO**

**MAGNA SOELMA BESERRA DE MOURA**

**Campina Grande - PB**

**Janeiro, 2005**

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DOUTORADO EM RECURSOS NATURAIS**

**CONSUMO HÍDRICO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DO FRUTO DA  
GOIABEIRA IRRIGADA NA REGIÃO DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO**

**MAGNA SOELMA BESERRA DE MOURA**

Tese apresentada ao Curso de  
Doutorado em Recursos Naturais da  
Universidade Federal de Campina  
Grande, em cumprimento às exigências  
para obtenção do Grau de Doutor.

**Área de Concentração: Recursos Naturais**

**Sub-Área: Água e Solo**

**Orientadores: Dr. Bernardo Barbosa da Silva**

**Dr. Pedro Vieira de Azevedo**

---

**Campina Grande - PB**

**Janeiro, 2005**

---

**DIGITALIZAÇÃO:**  
**SISTEMOTECA - UFCG**

Ficha Catalográfica preparada pelo Setor de Informação – SIN  
Biblioteca – Embrapa Semi-Árido

Moura, Magna Soelma Beserra de

Consumo hídrico, produtividade e qualidade do fruto da goiabeira irrigada na região do Submédio São Francisco / Magna Soelma Beserra de Moura. – Campina Grande, 2005.

122p.: il.

Orientadores: Dr. Bernardo Barbosa da Silva e Dr. Pedro Vieira de Azevedo

Tese (Doutorado). UFCG/CCT/DCA

1. Evapotranspiração 2. Eficiência de uso de água – Goiabeira 3. Balanço de Radiação e de Energia 4. Fenologia e Produtividade – Goiabeira.I. Título

CDD: 630.2515  
M929c



MAGNA SOELMA BESERRA DE MOURA

**CONSUMO HÍDRICO, PRODUTIVIDADE E QUALIDADE DO FRUTO DA GOIABEIRA  
IRRIGADA NA REGIÃO DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO**

APROVADA EM: 06/01/2005

**BANCA EXAMINADORA**



**Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA**

Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA

Centro de Ciências e Tecnologia – CCT

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG



**Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO**

Departamento de Ciências Atmosféricas - DCA

Centro de Ciências e Tecnologia – CCT


Universidade Federal de Campina Grande - UFCG



**Dr. ÁUREO SILVA DE OLIVEIRA**

Departamento de Engenharia Agrícola – DEA

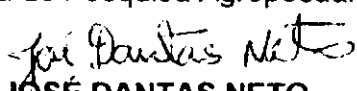
Universidade Federal da Bahia – UFBA/Cruz das Almas



**Dr. JOSÉ MONTEIRO SOARES**

Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semi-Árido - CPATSA

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA



**JOSÉ DANTAS NETO**

Departamento de Engenharia Agrícola - DEAg

Centro de Ciências e Tecnologia – CCT

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG



**Dr. MÁRIO DE MIRANDA VILAS BOAS RAMOS LEITÃO**

Colegiado de Engenharia Agrícola e Ambiental - CEAA

Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF

DEDICO, com amor e carinho, às  
pessoas mais importantes de minha  
vida: meus pais, Antônio Augusto  
de Moura e Rosa Maria Beserra de  
Moura.

OFEREÇO às minhas irmãs  
Mônica e Cidinha, e aos meus  
queridos sobrinhos, Rafael e Júlia.  
Eu amo vocês.

## AGRADECIMENTOS

Aos professores Dr. Bernardo Barbosa da Silva e Dr. Pedro Vieira de Azevedo, pela orientação, confiança, incentivo e ensinamentos transmitidos.

Ao Dr. José Monteiro Soares, por sua valiosa amizade, confiança, incentivo, orientação e incansável ajuda em todas as fases de execução deste trabalho.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos, sem a qual seria impossível a realização deste Curso e pela ajuda financeira concedida através do Projeto de Pesquisa Nº 475337/2001-8 sob o título: "Manejo do uso da água em pomares de goiabeiras irrigados na região do Sub-Médio São Francisco".

À Universidade Federal de Campina Grande, pela oportunidade da realização do doutorado.

A Embrapa Semi-Árido, por ceder suas instalações, funcionários, equipamentos e transporte; e pelo apoio concedido durante a análise de dados e redação final da tese. Em especial aos pesquisadores Antônio Heriberto de Castro Teixeira, José Moacir P. Filho, Tarcízio Nascimento, Luiza Teixeira L. Brito, Menhaz; aos técnicos agrícolas Hélio e Genival Ferreira da Silva; e aos operários João Filho Ferreira da Silva, Roque Antônio Barbosa e Mestrinho.

Ao Eng. Civil Eurico e a sua esposa, Eng. Agrônoma Denise, proprietários do pomar de goiabeiras, por abrir as portas de sua propriedade e ceder suas instalações e funcionários a esta pesquisa.

Ao Dr. José Espínola Sobrinho (Escola Superior de Agricultura de Mossoró - ESAM), pela confiança, dedicação, ajuda, amizade e grande incentivo, durante toda minha vida acadêmica.

Aos colegas de curso, em especial a João Roberto P. Feitosa, José F. da Costa Filho, Josiclêda D. Galvêncio e Inajá Francisco, pela valiosa companhia durante esses anos, principalmente nas horas de lazer. Também não posso esquecer dos colegas e amigos de Upanema, Campina Grande e Petrolina, pela convivência harmoniosa durante essa importante fase de minha vida.

A todos que acreditaram e/ou contribuíram para a realização e conclusão deste curso.

A Deus, pois tudo o que faço em minha vida, sou eternamente grata a Ele.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. A cultura da Goiaba.....	4
2.2. Necessidades hídricas das culturas.....	7
2.2.1. Balanço de energia com base na razão de Bowen - BERB.....	8
2.2.2. Balanço hídrico do solo - BHS.....	18
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1. Localização da área experimental.....	27
3.2. Cultura estudada.....	29
3.3. Delineamento experimental.....	30
3.3.1. Área do produtor – PR.....	30
3.3.2. Área da pesquisa – PE.....	31
3.4. Instalações, instrumentos utilizados e coleta de dados.....	32
3.5. Variáveis analisadas na etapa II.....	37
3.5.1. Consumo de água pelas plantas.....	37
3.5.1.1. Balanço de energia com base na razão de Bowen – BERB.....	37
3.5.1.1.1. Saldo de radiação – Rn .....	38

3.5.1.1.2. Fluxo de calor latente – LE.....	38
3.5.1.1.3. Fluxo de calor sensível – H .....	40
3.5.1.1.4. Fluxo de calor no solo – G .....	40
3.5.1.1.5. Relação entre os componentes do balanço de energia.....	40
3.5.1.1.6. Erros do balanço de energia com base na razão de Bowen.....	40
3.5.1.2. Balanço hídrico no solo – BHS.....	41
3.5.2. Coeficiente de cultura – Kc .....	45
3.5.3. Produtividade e qualidade de frutos.....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1. Primeira etapa.....	48
4.1.1. Fenologia da goiabeira.....	48
4.1.2. Evapotranspiração da cultura obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen - ETc_BERB.....	49
4.1.3. Coeficiente de cultura.....	50
4.2. Segunda etapa.....	53
4.2.1. Fenologia da goiabeira.....	53
4.2.2. Condições micrometeorológicas.....	63
4.2.2.1. Balanço de radiação.....	63
4.2.2.2. Temperatura e umidade relativa do ar.....	73
4.2.2.3. Velocidade do vento.....	82
4.2.3. Balanço de energia baseado na razão de Bowen.....	86
4.2.3.1. Comportamento dos componentes do balanço de energia.....	86
4.2.3.2. Comportamento da razão de Bowen.....	95
4.2.3.3. Análise de erros.....	98
4.2.4. Evapotranspiração da goiabeira.....	101

4.2.4.1. Evapotranspiração da goiabeira pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen – $ETc\_BERB$ .....	101
4.2.4.2. Evapotranspiração da goiabeira pelo método do balanço hídrico no solo – $ETc\_BHS$ .....	103
4.2.5. Eficiência de uso da água.....	106
4.2.6. Coeficiente de cultura – $Kc$ .....	106
4.2.7. Qualidade de frutos.....	108
5. CONCLUSÕES.....	110
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 3.1. Recorte de imagem Landsat, com detalhe do pomar de goiabeira (em verde), localizado no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Núcleo 9. Em vermelho, observam-se as áreas irrigadas; em preto, parte do leito do Rio São Francisco e em rosa/lilás, a cidade de Petrolina - PE.....	28
Figura 3.2. Vista parcial do pomar de goiabeira no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho: visão da parte de sul a oeste do pomar.....	29
Figura 3.3. Croqui do pomar de goiabeira no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, com destaque para as plantas monitoradas e localização da torre micrometeorológica.....	33
Figura 3.4. Torre micrometeorológica instalada no centro do pomar de goiabeira no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE.....	34
Figura 3.5. Baterias de tensiômetros instaladas sob a copa da goiabeira.....	36
Figura 3.6. Tubos de acesso para medida da umidade do solo sob a copa da goiabeira.....	36
Figura 3.7. Amostra de frutos de goiaba, acondicionada em caixa de papelão de 3,5 kg, colhida em dois estádios diferentes de maturação (E3 e E5) nos tratamentos de irrigação na área da pesquisa (PE) e do produtor (PR), no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE.....	48

Figura 4.1.	Evapotranspiração da goiabeira cultivar Paluma (média de cinco dias), determinada pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.. Data da poda: 10/05/2000.....	50
Figura 4.2.	Variação do Kc (média de cinco dias) do pomar de goiabeira, Paluma, para as sete fases de desenvolvimento da cultura, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE. Data da poda: 10/05/2000.....	51
Figura 4.3.	Variação do coeficiente de cultura médio (Kc) por fase fenológica do ciclo produtivo da goiabeira irrigada, cultivar Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE. Data da poda: 10/05/2000.....	52
Figura 4.4.	Ilustrações características das fases fenológicas da goiabeira Paluma correspondentes às fases de brotação (a - F1) e de crescimento vegetativo (b - F2), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	55
Figura 4.5.	Curvas de crescimento dos frutos de goiaba Paluma, determinadas por meio de medidas do comprimento (C) e diâmetro (D), em plantas localizadas no pomar nos tratamentos da pesquisa (PE) e do produtor (PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	61
Figura 4.6.	Curva de colheita dos frutos da goiaba Paluma, para os tratamentos da pesquisa (PE) e do produtor (PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	62



Figura 4.7.	Produtividade média de pomar de goiabeira Paluma, para os tratamentos da pesquisa (PE) e do produtor (PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE.....	62
Figura 4.8.	Curso diurno dos componentes do balanço de radiação ( $R_g$ = radiação solar global incidente, $R_n$ = saldo de radiação à superfície e $R_r$ = radiação solar refletida) sobre a copa da goiabeira, para dias representativos das fases fenológicas da cultura (Fase 1: a e b; Fase 2: c e d; Fase 3: e e f; Fase 4: g e h), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	64
Figura 4.9.	Curso médio diurno dos componentes do balanço de radiação ( $R_g$ = radiação solar global incidente, $R_n$ = saldo de radiação à superfície e $R_r$ = radiação solar refletida) medidos sobre a copa da goiabeira Paluma, nas fases fenológicas da cultura (Fase 1: a; Fase 2: b; Fase 3: c; Fase 4: d; Fase 5: e; Fase 6: f; Fase 7: g), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	68
Figura 4.10.	Comportamento sazonal médio, para o período de saldo de radiação positivo, dos componentes do balanço de radiação de um pomar de goiabeira irrigada, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	70
Figura 4.11.	Comportamento médio diário do albedo da goiabeira Paluma, para cada uma de suas fases fenológicas - F1 (a), F2 (b), F3 (c), F4 (d), F5 (e), F6 (f) e F7 (g), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	71
Figura 4.12.	Comportamento do albedo médio diário da goiabeira Paluma irrigada, durante todo o ciclo de produção, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE.....	72

Figura 4.13.	Comportamento diário da temperatura do ar em bulbo seco (Ts) e em bulbo úmido (Tu) medidas em dois níveis (1 e 2) sobre a copa da goiabeira, para dias representativos das fases fenológicas da cultura (Fase 1: a e b; Fase 2: c e d; Fase 3: e e f; Fase 4: g e h), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	74
Figura 4.14.	Comportamento médio diário da temperatura do ar em bulbo seco (Ts) e em bulbo úmido (Tu) medidas em dois níveis (1 e 2) sobre a copa da goiabeira, nas fases fenológicas da cultura (F1, F2, ..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	76
Figura 4.15.	Comportamento médio diário da temperatura do ar em bulbo seco (Ts) e em bulbo úmido (Tu) medidas em dois níveis (1 e 2) sobre a copa da goiabeira Paluma, durante um ciclo fenológico, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	77
Figura 4.16.	Comportamento diário da umidade relativa do ar determinada em dois níveis (1 e 2) sobre a copa da goiabeira Paluma, para dias representativos das suas fases fenológicas (Fase 1: a e b; Fase 2: c e d; Fase 3: e e f; Fase 4: g e h), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	79
Figura 4.17.	Comportamento médio diário da umidade relativa do ar medida em dois níveis (2 e 3) sobre a copa da goiabeira Paluma, nas suas fases fenológicas (F1, F2, ..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	81

Figura 4.18.	Comportamento sazonal da umidade relativa do ar medida em dois níveis (2 e 3) sobre a copa da goiabeira Paluma e do total diário da precipitação, durante um ciclo fenológico, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	82
Figura 4.19.	Comportamento diário da velocidade do vento sobre o pomar de goiabeira Paluma, para dias representativos das suas fases fenológicas (Fase 3: a e b; Fase 4: c e d; Fase 5: e e f; Fase 5: g e h; Fase 7: i e j), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	84
Figura 4.20.	Comportamento médio diário velocidade do vento sobre o pomar de goiabeira Paluma, nas suas fases fenológicas (F1, F2,..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	85
Figura 4.21.	Comportamento sazonal da velocidade do vento sobre o pomar de goiabeira Paluma, durante um ciclo fenológico, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	86
Figura 4.22.	Comportamento diurno dos componentes do balanço de energia ( $R_n$ = saldo de radiação, $LE$ = fluxo de calor latente, $H$ = fluxo de calor sensível, $G$ = fluxo de calor no solo) sobre o pomar de goiabeira Paluma, para dias representativos das suas fases fenológicas (Fase 1: a e b; Fase 2: c e d; Fase 3: e e f; Fase 4: g e h) , Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	89

Figura 4.23.	Comportamento médio diurno para o período de saldo de radiação positivo, dos componentes do balanço de energia com base na razão de Bowen, sobre um pomar de goiabeira Paluma, nas suas fases fenológicas (F1, F2,..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	93
Figura 4.24.	Comportamento médio estacional dos componentes do balanço de energia para o período de saldo de radiação positivo, sobre a goiabeira Paluma, durante as sete fases de desenvolvimento fenológico, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE.....	94
Figura 4.25.	Comportamento diário da razão de Bowen sobre o pomar de goiabeira Paluma, durante dias representativos de alta nebulosidade (linha azul) e de céu limpo (linha vermelha) das fases fenológicas da cultura (F1, F2, F3, F4, F5, F6 e F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	97
Figura 4.26.	Comportamento diurno do erro relativo da razão de Bowen para dias representativos de céu com nebulosidade e céu limpo, referente as sete fases fenológicas da goiabeira (F1, ..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	99
Figura 4.27.	Comportamento diurno do erro relativo do fluxo de calor latente para dias representativos de céu com nebulosidade e céu limpo, referente as sete fases fenológicas da goiabeira (F1,..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	100

	Pág.
Figura 4.28. Comportamento diário da evapotranspiração do pomar de goiabeiras Paluma obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	102
Figura 4.29. Comportamento médio diário para cada fase fenológica da evapotranspiração do pomar de goiabeiras Paluma obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen (ETc_BERB); e pelo método do balanço hídrico no solo para a área de pesquisa (ETc_BHS_PE) e para área do produtor (ETc_BHS_PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	105
Figura 4.30. Comportamento médio diário para cada fase fenológica do coeficiente de cultura da goiabeira Paluma obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen (Kc_BERB); e pelo método do balanço hídrico no solo para a área de pesquisa (Kc_BHS_PE) e para área do produtor (Kc_BHS_PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	107

## LISTA DE TABELAS

	Pág.	
Tabela 3.1.	Textura e umidade do solo à base de peso, na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, da área experimental no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE.....	28
Tabela 3.2.	Descrição dos elementos micrometeorológicos e instrumentos usados em suas medidas no interior do pomar de goiabeira no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	35
Tabela 4.1.	Fases fenológicas da goiabeira ( <i>Psidium guajava</i> L.), cultivar Paluma, para poda de frutificação realizada no dia 10/05/2000, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	49
Tabela 4.2.	Valores da evapotranspiração da cultura (ETc_BERB), evapotranspiração de referência ETo (FAO-PM) e do coeficiente de cultura (Kc), durante um ciclo produtivo, para a goiabeira, cultivar Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE. Data da poda: 10/05/2000.....	52
Tabela 4.3.	Fases fenológicas da goiabeira Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE. Data da poda: 27/10/2002.....	54
Tabela 4.4.	Valores médios diurnos dos componentes do balanço de radiação, sobre a cultura da goiabeira Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	70

---

	Pág.
Tabela 4.5. Valores médios instantâneos diurnos dos componentes do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB) e partição do saldo de radiação ( $R_n$ ) em fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G), nas fases fenológicas do ciclo produtivo da goiabeira, cultivar Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	94
Tabela 4.6. Valores médios diurnos dos erros relativos da razão de Bowen ( $\epsilon_r(\beta)$ ) e do fluxo de calor latente ( $\epsilon_r(LE)$ ), nas fases fenológicas do ciclo produtivo da goiabeira, cultivar Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	101
Tabela 4.7. Características físico-químicas de frutos de goiabeira Paluma colhidos em dois diferentes estágios de maturação (E3 e E5), nos tratamentos da pesquisa (PE) e do produtor (PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.....	109

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta W$	- Variação da água disponível no solo
$\theta$	- Umidade do solo
$\beta$	- Razão de Bowen
$\rho$	- Densidade do ar
$\lambda$	- Calor latente de vaporização da água
$\gamma$	- Fator psicrométrico
$\psi$	- potencial hidráulico total
$\theta$	- Umidade volumétrica do solo
$\alpha$	- Constante empírica
$\Delta$	- Inclinação da curva de pressão de vapor
$\delta\beta$	- Erro absoluto da razão de Bowen
$\delta\psi$	- Variação do potencial total de água no solo
$\delta\psi/\delta Z$	- Gradiente do potencial total de água no solo
$\delta\Delta T_s$	- Erro relativo à medida da temperatura do bulbo seco
$\delta\Delta T_u$	- Erro relativo à medida da temperatura do bulbo úmido
$\beta_c$	- Razão de Bowen corrigida para efeitos advectivos
$\Delta e/\Delta Z$	- Gradiente vertical pressão parcial do vapor d'água
$\delta G$	- Erro instrumental na determinação do fluxo de calor no solo
$\psi_g$	- potencial gravitacional
$\psi_m$	- Potencial matricial do solo
$\theta_r$	- Umidade volumétrica residual a 1500 kPa
$\epsilon_r(\text{LE})$	- Erro relativo associado ao cálculo do fluxo de calor latente
$\delta R_n$	- Erro do instrumento usado para determinar o saldo de radiação
$\theta_s$	- Umidade volumétrica no momento da saturação
$\Delta T/\Delta Z$	- Gradiente vertical de temperatura do ar
$\Delta W$	- Variação do armazenamento de água no solo
$\delta Z$	- Espessura da camada do solo estudada
$A_c$	- Ascensão capilar



ATT	- Acidez total titulável
BHS	- Balanço hídrico do solo
$C_p$	- Calor específico do ar à pressão constante
DAF	- Dias após a floração
DAP	- Dias após a poda
$D_g$	- Densidade global do solo
$D_p$	- Drenagem profunda
$D_p$	- Densidade de partículas do solo
$e$	- Pressão parcial do vapor d'água
$E_a$	- Eficiência de aplicação
$e_s$	- Pressão de saturação de vapor
$ET_c$	- Evapotranspiração real da cultura
$ET_o$	- Evapotranspiração de referência
F1	- Fase 1: período de brotação
F2	- Fase 2: crescimento vegetativo
F3	- Fase 3: floração
F4	- Fase 4: queda fisiológica de frutos imaturos
F5	- Fase 5: primeira fase de crescimento de frutos
F6	- Fase 6: segunda fase de crescimento de frutos
F7	- Fase 7: terceira fase de crescimento de frutos, maturação e colheita
G	- Fluxo de calor no solo
H	- Fluxo de calor sensível
$h_c$	- Altura do nível do mercúrio na cuba em relação à superfície do solo
$h_{Hg}$	- Altura da coluna de mercúrio a partir do nível da cuba
$h_p$	- Profundidade da cápsula porosa
I	- irrigação
$K(\theta)$	- Condutividade hidráulica do solo não saturado
$K_c$	- Coeficiente de cultura
$K_h$	- Coeficiente de difusão turbulenta de calor sensível
$K_o$	- Condutividade hidráulica do solo saturado
$K_w$	- Coeficiente de difusão turbulenta de vapor d'água
L	- profundidade
l	- parâmetro empírico

LE	- Fluxo de calor latente
m	- Constante empírica
n	- Constante empírica
N9	- Núcleo 9
NIB	- Necessidade de irrigação bruta
NIL	- Necessidade de irrigação líquida
P	- Energia utilizada no processo fotossintético
PE	- Tratamento da pesquisa
P <sub>e</sub>	- Precipitação pluviométrica efetiva
pH	- Potencial hidrogeniônico
PISNC	- Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho
P <sub>o</sub>	- Pressão atmosférica
PR	- Tratamento do produtor
P <sub>r</sub>	- Profundidade da camada de solo
q	- Umidade específica
R	- Escoamento superficial
R <sub>g</sub>	- Radiação solar de onda curta incidente
R <sub>la</sub>	- Radiação de onda longa incidente
R <sub>ls</sub>	- Radiação de onda longa emitida pela superfície
R <sub>n</sub>	- Saldo de radiação
R <sub>r</sub>	- Radiação solar de onda curta refletida
S	- Energia armazenada na copa das plantas
Sc	- Saturação efetiva
SST	- Sólidos solúveis totais
T	- Temperatura do ar
t	- Intervalo de tempo
TDR	- Time Domain Reflectometry
T <sub>s</sub>	- Temperatura do ar em bulbo seco
T <sub>u</sub>	- Temperatura do ar em bulbo úmido
u	- Velocidade do vento
u <sub>2</sub>	- Velocidade do vento a 2 m de altura
W	- Armazenamento de água no solo

## RESUMO

O presente trabalho objetivou determinar as necessidades hídricas de um pomar de goiabeira Paluma, com cinco anos de idade, plantada no espaçamento de 6 m x 6 m e irrigada por microaspersão, em área de produtor no Submédio São Francisco, com base na determinação da evapotranspiração da cultura (ETc) usando as metodologias do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB) e do balanço hídrico no solo (BHS). Para determinação da ETc\_BERB foi instalada uma torre micrometeorológica localizada no centro do pomar, com sensores de saldo de radiação, radiação solar global, radiação refletida, temperatura de termojunções seca e úmida e velocidade do vento, estes últimos em dois níveis acima da copa da planta; e no solo, sob a copa da planta, foi instalada placa de medida do fluxo de calor no solo. Enquanto para determinação da ETc\_BHS, instalou-se um pluviômetro, um painel eletrônico para monitorar a irrigação e tensiômetros e sondas de perfil de umidade para determinação da umidade do solo. A ETc foi relacionada com a evapotranspiração de referência (ETo) obtida pelo método da FAO-Penman-Monteith para determinar o coeficiente de cultura (Kc) da goiabeira. Ademais, foram realizadas observações da fenologia e da produtividade da cultura. A área experimental era composta por dois tratamentos de irrigação: 1) PR – área do produtor e 2) PE – área da pesquisa. No tratamento PR, a aplicação de água foi realizada em conformidade com as indicações contidas no projeto de irrigação; já no tratamento PE, a lâmina de irrigação foi obtida em função do coeficiente de cultura (Kc) determinado em uma etapa anterior (Etapa 1), da eficiência de aplicação de água (Ea) determinada em campo e da evapotranspiração de referência (ETo) determinada em uma estação agrometeorológica convencional. Os resultados apontaram o ciclo produtivo com duração de 179 dias, divididos em 7 fases fenológicas. A curva de crescimento dos frutos apresentou comportamento de dupla sigmóide, com concentração de colheita em torno dos 135 dias após a floração. O índice de pegamento de frutos foi maior nas plantas do tratamento PR (38,3%) do que as plantas do PE (19,7%), resultando em maior produtividade naquele tratamento. O saldo de radiação (Rn) representou 65% da radiação solar incidente (Rg) e pode ser estimado por meio da seguinte equação:  $Rn = 0,6803 \cdot Rg - 8,4489$ ,  $R^2 = 0,9939$ . Constatou-se ainda, que o albedo médio do pomar de goiabeira durante o ciclo produtivo foi igual a 17,2%. Quanto aos componentes do balanço de energia, o fluxo de calor latente (LE) representou 90,7% de Rn, enquanto os fluxos de calor sensível e de calor do solo representaram 12,3 e 3,63%, respectivamente. O valor médio de ETc\_BERB para o ciclo da goiabeira foi 5,3 mm dia<sup>-1</sup>, condicionando a obtenção de um valor de Kc\_BERB a 1,1, mostrando-se bastante superior ao valor determinado na Etapa 1, que foi 0,77. Essa variação foi atribuída ao aumento da área foliar e idade do pomar. Os valores médios da ETc obtida por meio do balanço hídrico no solo para os tratamentos do produtor (ETc\_BHS\_PR) e da pesquisa (ETc\_BHS\_PE) foram iguais a 6,3 mm dia<sup>-1</sup> e 5,6 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente. A quantidade de água aplicada nos dois tratamentos não apresentou grande diferença na quantidade e qualidade dos frutos; no entanto, o uso eficiente de água (EUA) foi maior no tratamento PE (2,91 kg mm<sup>-1</sup>) em comparação com o tratamento PR (2,66 kg mm<sup>-1</sup>).

Palavras-chave: necessidades hídricas, evapotranspiração, produtividade e qualidade de frutos.

## ABSTRACT

This work aimed to determine water needs of a guava orchard, Paluma variety, five-year-old in 6 m x 6 m grid spacing and irrigated by micro sprinkler, in a producer area located at the sub-medium river São Francisco, on the basis of the determination of evapotranspiration of the culture (ET<sub>c</sub>) using the Bowen ratio energy balance (BERB) and the soil water balance (BHS) methods. In order to determine the ET<sub>c</sub>\_BERB it was installed a micrometeorological tower into the orchard, with sensors of net radiation, global solar radiation, reflected solar radiation, dry and wet temperature and wind speed, these last ones in two levels above the plant canopy; on the ground, under the plant canopy, it was installed a flux plate to measure the soil heat flux. For the determination of the ET<sub>c</sub>\_BHS, were installed a rain gauge, a panel electronic to monitor the irrigation and tensiometers and profile probe of soil moisture. The ET<sub>c</sub> was related to reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), obtained according to the FAO-Penman-Monteith, to determine the crop coefficient (K<sub>c</sub>) of the guava orchard. Furthermore, it was carried experiments on phenology and productivity of the culture. The experimental area was composed of two treatments of irrigation: 1) PR - area of producer and 2) PE - area of the research. In treatment PR, a water application test was carried in compliance with the indications contained in the irrigation project; no longer treatment PE, the blade of irrigation was gotten in function of the crop coefficient (K<sub>c</sub>) determined in a previous stage (Stage 1), of the efficiency of application of water (E<sub>a</sub>) determined in field and of the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) determined in a conventional agrometeorological station. The results indicated that the productive cycle lasted 179 days, divided in 7 phenological phases. The curve of fruit growth presented a double sigmoid behavior, with crop harvest concentrated around 135 days after the flowering. The index of fruit-loosening was bigger in the plants of treatment PR (38,3%) rather than in the plants of the PE (19,7%), resulting in bigger productivity with that one treatment. The net radiation (R<sub>n</sub>) represented 65% of the solar global radiation (R<sub>g</sub>) and can be assessed by means of the following equation:  $R_n = 0,6803.R_g - 8,4489$ ,  $R^2 = 0,9939$ . The average albedo of the orchard during the productive cycle was equal to 17,2%. The latent heat flux (LE) represented 90.7% of R<sub>n</sub>, while the sensible heat flux and soil heat flux had represented 12,3 e 3,63% of R<sub>n</sub>, respectively. The average value of ET<sub>c</sub>\_BERB for the productive cycle of guava was 5,3 mm day<sup>-1</sup>, conditioning the attainment of a value of K<sub>c</sub>\_BERB 1,1, revealing sufficiently superior to that value determined in Stage 1 (equal to 0,77). This variation was attributed to the increase of the foliar area and age of the orchard. The average values of the ET<sub>c</sub> gotten by means of the soil water balance for treatments of the producer (ET<sub>c</sub>\_BHS\_PR) and the research (ET<sub>c</sub>\_BHS\_PE) had been equal the 6.3 mm day<sup>-1</sup> e 5.6 mm day<sup>-1</sup>, respectively. The amount of water applied in the two treatments did not present great difference in the productivity and quality of fruits; however, the efficient water use (EUA) was bigger in treatment PE (2.91 kg mm<sup>-1</sup>) in comparison with the treatment PR (2.66 kg mm<sup>-1</sup>).

Key words: water needs, evapotranspiration, fruit productivity and quality.

## Capítulo 1 | INTRODUÇÃO

No Nordeste brasileiro, a agricultura desempenha um importante papel na economia regional, seja a nível familiar ou empresarial, contribuindo para a sustentabilidade familiar e do agronegócio. Em grande parte dessa região, as adversidades climáticas, aliadas a práticas agrícolas ultrapassadas, tornaram a atividade agrícola primordialmente de subsistência. No entanto, existem áreas em que a disponibilidade hídrica resultante do armazenamento da água de chuva em grandes reservatórios ou de alguns rios perenes propicia o surgimento e o desenvolvimento de importantes pólos agrícolas, nos quais a agricultura irrigada apresenta-se como uma grande alternativa para o desenvolvimento econômico e social da região. Para tanto, necessário se faz que os recursos hídricos disponíveis sejam utilizados de maneira racional, sustentável e, nesse sentido, o uso de técnicas de manejo da água, do solo e do sistema de cultivo é imprescindível para o sucesso da atividade agrícola.

O manejo das culturas, principalmente de fruteiras, é substancialmente afetado pelas condições climáticas locais, ensejando a realização de estudos e pesquisas que propiciem a otimização do uso da água e outros recursos naturais das áreas irrigadas. O clima do semi-árido nordestino apresenta aspectos muito favoráveis ao cultivo de diversas culturas, devido principalmente à elevada disponibilidade de energia solar, alta temperatura e baixa umidade relativa do ar, que resultam na redução da incidência de pragas e doenças. Por outro lado, impõe restrições quanto à disponibilidade hídrica de origem pluvial, em função de sua grande variabilidade espacial e temporal.

A região do Submédio São Francisco, mais especificamente o pólo Petrolina-PE/Juazeiro-BA, caracteriza-se por apresentar condições climáticas favoráveis à exploração de culturas irrigadas, destacando-se nos cenários nacional e internacional pela produção de frutas de alta qualidade, a exemplo da manga, uva, banana, goiaba e coco.

Na região do Submédio São Francisco são extensas as áreas irrigadas com diferentes espécies frutíferas. No tocante ao cultivo da goiabeira, o Brasil destaca-se como o terceiro maior produtor, atrás apenas da Índia e Paquistão. As plantações comerciais no Brasil são encontradas, principalmente, nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Pernambuco, que respondem por cerca de 80% da produção nacional (Brasil, 2001). Além de ser consumida *in natura*, a goiaba é matéria-prima na indústria de doces, geléias, pastas, frutas em calda, purê, bebidas, refrescos, sucos, xaropes, vinhos, polpa congelada, etc. O valor nutricional desta fruta é significativo, representado pelo baixo teor calórico (60 kcal/100 g de polpa) e elevado teor de vitamina C (200-300 mg/100 g de polpa).

Devido à sua importância econômica, social e nutricional o cultivo da goiabeira integra importantes projetos comerciais de fruticultura irrigada no Nordeste brasileiro (Gonzaga Neto, 1990). Atualmente, no vale do rio São Francisco, expressiva área vem sendo cultivada com a goiabeira irrigada, constituindo numa ótima opção para a diversificação da fruticultura regional. O cultivo da goiabeira irrigada no Nordeste brasileiro, além de apresentar produtividades médias superiores à de outras regiões do país, possibilita até a produção de duas safras por ano, permitindo ao produtor comercializar o produto na entressafra, seja no mercado interno ou no externo.

A necessidade de estudos sobre o consumo hídrico da goiabeira, nas suas diferentes fases do ciclo produtivo, torna-se evidente quando se percebe que a quase totalidade dos agricultores irrigantes da região do Submédio São Francisco utilizam observações imprecisas para a decisão de quando e quanto irrigar. A utilização do coeficiente de cultura ( $K_c$ ) na agricultura irrigada vem sendo estudada por diversos pesquisadores e, apesar desse coeficiente variar de cultura para cultura, varia também, ao longo dos seus ciclos fenológicos. Recentemente sua utilização parece estar tornando-se mais acessível, em função de diversos fatores, tais como: maior conscientização do produtor da necessidade do uso da água de forma mais eficiente e maior acessibilidade aos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, por meio do uso de softwares e estações

meteorológicas automáticas. Nesse sentido, a região do pólo frutícola Petrolina-PE/Juazeiro-BA dispõe de sete estações agrometeorológicas automáticas, cujos dados, inclusive da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), são disponibilizados diariamente na internet ([www.cpatsa.embrapa.br](http://www.cpatsa.embrapa.br)) para uso pelos produtores na quantificação da lâmina de irrigação, que também necessita de informações sobre o coeficiente de cultura.

Em virtude da importância e carência de informações a respeito do consumo hídrico da goiabeira nas condições edafo-climáticas do Nordeste, esta pesquisa objetivou determinar as necessidades hídricas dessa importante frutífera durante seu ciclo produtivo no Submédio São Francisco. Nesse sentido, foram utilizados dois métodos de determinação da evapotranspiração da cultura: balanço hídrico no solo e balanço de energia com base na razão de Bowen. A presente pesquisa objetivou, ainda, determinar o comportamento dos componentes do balanço de energia sobre o pomar, assim como dos componentes do balanço hídrico no solo, produtividade e qualidade das frutas obtidas sob a aplicação de duas diferentes lâminas de irrigação: PE - utilizando-se dados do coeficiente de cultura e, PR – segundo o manejo realizado por produtores da região.

## Capítulo 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A cultura da goiaba

A goiabeira é uma planta da família das Mirtáceas, sendo a espécie *Psidium guajava* L. a mais conhecida e importante no Brasil. A planta é um arbusto ou árvore de pequeno porte, perene, com copa arredondada. A altura de plantas não podadas varia entre 3 e 8 m. O sistema radicular apresenta raízes adventícias primárias, que se concentram na profundidade de 30 cm. O tronco apresenta diâmetro médio de 15 a 25 cm, caracteristicamente liso, com cascas que se destacam com facilidade. As folhas são opostas, oblongas ou elípticas, coriáceas e consistentes, apresentando nervuras salientes na face dorsal, de cor verde intensa, com comprimento variável entre 5 e 15 cm e largura entre 3 e 6 cm; caem após a maturação, uma característica de plantas com folhas decíduas. As flores são brancas, hermafroditas; eclodem em botões isolados ou em grupo de dois ou três, localizadas na axila das folhas e nas brotações surgidas em ramos maduros; há predominância da autopolinização. O fruto é do tipo baga, com formato ovalado, piriforme ou arredondado, com diâmetro médio de 5 a 7 cm e coloração variável do branco ao vermelho. A polpa é succulenta e doce, com numerosas sementes reniformes (Zambão & Bellintani Neto, 1998).

O Vale do São Francisco concentra em torno de 90% da área cultivada com a goiabeira Paluma do país (Brasil, 2001). Essa variedade apresenta frutos de dupla aptidão: mesa e indústria, sendo a variedade mais amplamente difundida e cultivada no Submédio São Francisco. Seus frutos apresentam peso entre 140 e 250 g, forma ovóide com pescoço



curto, diâmetros longitudinal de 8 a 10 cm e transversal de 7 a 9 cm; com peso médio de 140,2 g, polpa com coloração vermelha intensa, espessura de 1,2 a 1,3 cm, pequena porcentagem de sementes (4,96%) e bom rendimento de polpa (93,76%). Apresenta, ainda, consistência firme, sabor muito bom e boa capacidade de conservação pós-colheita (Medina, 1991). Para a região do Submédio São Francisco, Lima *et al.* (2002) verificaram que a goiaba Paluma apresentou peso médio igual a 104,8 g, com diâmetro longitudinal e transversal igual a 6,29 cm e 5,57 cm, respectivamente. Segundo Gonzaga Neto *et al.* (1987) a massa média da fruta é uma característica importante, uma vez que, em geral, massa tem relação direta com o tamanho das frutas e, as frutas maiores são as mais atrativas ao consumidor.

Os atributos químicos, também são muito importantes na caracterização das frutas, uma vez que têm relação com seu sabor e qualidade. Lima *et al.* (2002) observaram que a goiaba Paluma cultivada no Submédio São Francisco apresentou teor de sólidos solúveis totais (SST) igual a 10,4°Brix. Altos valores de SST são desejáveis tanto para frutas destinadas ao consumo *in natura* quanto para a indústria, pois proporciona redução no custo do processamento. Com relação à acidez total titulável (ATT), foi encontrado 0,63% de ácido cítrico na goiaba Paluma plantada no Submédio São Francisco. Uma acidez elevada é importante quando a fruta é destinada ao processamento industrial, por proporcionar redução na adição de acidificantes artificiais; ao contrário, baixos teores de ácidos são desejáveis quando o objetivo é o consumo *in natura* (Paiva *et al.*, 1997).

Também é importante que se conheça a relação SST/ATT, como um índice indicativo do sabor das frutas, uma vez que o conhecimento isolado das características de SST e ATT pode representar um falso indicativo do sabor, especialmente quando a fruta é destinada ao consumo *in natura*. No Submédio São Francisco, Lima *et al.* (2002) encontraram uma relação SST/ATT igual a 17,63. Estes mesmos autores verificaram que seu pH foi de 3,88. Segundo Manica *et al.* (1998) quando as frutas são destinadas ao processamento industrial, são desejáveis valores de pH inferiores a 3,5, pois, ao contrário é necessária a adição de ácidos orgânicos comestíveis durante o processamento. Uma outra característica muito importante é o teor de vitamina C nas frutas. Lima *et al.* (2002) encontraram na goiaba Paluma 89,78 mg de ácido ascórbico/100 g.

A goiabeira, apesar de ser uma planta nativa da região tropical, vegeta e produz bem, desde o nível do mar até altitudes de 1700 m, sendo, por essa razão, amplamente difundida em várias regiões do país (Gonzaga Neto & Soares, 1994). Os limites de difusão da cultura estão condicionados, particularmente, pela temperatura, radiação solar, umidade do ar e disponibilidade de água no solo. Em regiões de clima tropical, a goiabeira pode florescer e frutificar continuamente durante o ano todo, desde que haja disponibilidade hídrica no solo (Medina, 1991). Para o desenvolvimento de cultivos comerciais, a condição climática favorável compreende a temperatura média anual entre 23 e 28°C. Para o seu cultivo em condições de sequeiro, necessita de uma precipitação pluviométrica anual entre 800 e 1000 mm, bem distribuídos. Para seu cultivo em locais onde ocorre baixa precipitação e elevada demanda evapotranspirométrica, deve-se utilizar irrigação suplementar. Caso ocorra deficiência hídrica prolongada, pode haver atraso no florescimento e aumento da queda de frutos (Souza, 1997).

Diversos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de se determinar a duração de cada estágio fenológico da goiabeira (Silva *et al.*, 1998; Feldberg *et al.*, 1998). Outros estudos apresentam a curva de crescimento do fruto (Pereira & José, 1987; Feldberg *et al.*, 1998; Silva *et al.*, 1998; Singh & Sehgal, 1968 e Rathore, 1976). A produção das plantas está relacionada com o florescimento e a frutificação, podendo variar em função de fatores genéticos, ambientais e de manejo dos pomares. Informações sobre o índice de pegamento de frutos são importantes na caracterização biológica, estudos comparativos de cultivares e predição de safras (Corrêa *et al.*, 2002).

Nos pomares comerciais, o abortamento de frutos pode representar um sério problema, existindo cultivares com índices de frutificação inicial em torno de 54%, sendo que apenas 65% desses frutos alcançam a maturação, segundo Singh & Sehgal (1968). Corrêa *et al.* (2002) desenvolveram um estudo para avaliar o índice de pegamento em goiabeira Paluma, podada em meados do inverno, no município de Taquaritinga – SP e observaram que o índice de pegamento oscilou em torno de 18,7% (81,3% de abortamento). A queda de frutos em pomares comerciais pode significar redução da receita ou mesmo prejuízo econômico para o produtor. Diante da perspectiva ou constatação de queda acentuada de flores e frutinhas, em função da ocorrência de pragas, moléstias ou temperaturas extremas, estresse hídrico, há a possibilidade de adequação do manejo do pomar.

Existem diversos estudos realizados no Vale do Submédio do Rio São Francisco com a goiaba, incluindo adaptações de cultivares, qualidade de frutos e/ou sua conservação pós-colheita. No entanto, são poucos os relacionados à determinação das necessidades hídricas e ao manejo de irrigação da goiabeira (Moura, 2001; Teixeira *et al.*, 2003; Ferreira, 2004).

## 2.2. Necessidades hídricas das culturas

A região do Submédio do Vale do Rio São Francisco destaca-se como um oásis em meio à paisagem semi-árida do Nordeste Brasileiro, com elevado nível tecnológico empregado na produção irrigada de frutas de alta qualidade, destinadas ao mercado nacional e internacional. A água utilizada na irrigação é suprida pelo rio São Francisco e, diante da imprevisibilidade climática associada aos prognósticos de aumento da demanda hídrica ocasionada pelo incremento das áreas irrigadas, torna-se necessária uma melhoria na determinação da quantidade de água utilizada na irrigação. Com isso, é possível suprir mais adequadamente às necessidades hídricas das culturas e contribuir para a sustentabilidade da produção agrícola e do meio ambiente.

Em climas áridos e semi-áridos onde se desenvolve uma agricultura irrigada com alta rentabilidade é de fundamental importância o conhecimento preciso da demanda hídrica das culturas, seja medindo seja estimando. Rana & Katerji (2000) apresentaram uma revisão dos mais importantes métodos de medida e estimativa da evapotranspiração das culturas, onde apontaram os problemas, as limitações e as vantagens de cada método.

A evapotranspiração de uma área cultivada pode ser determinada por meio do balanço de massa tanto quanto do de energia, desde que a evapotranspiração é componente comum em ambos os balanços. No caso da goiabeira, propõe-se determinar a evapotranspiração por duas metodologias: 1) balanço de energia com base na razão de Bowen (método micrometeorológico) e 2) balanço hídrico no solo. Em virtude da reduzida aplicação destas metodologias na goiabeira, esta revisão se deterá no entendimento dos métodos de determinação da evapotranspiração citados acima, desde sua teoria, vantagens, desvantagens, limitações e problemas verificados em suas aplicações em outras culturas, principalmente em fruteiras.

### 2.2.1. Balanço de energia com base na razão de Bowen - BERB

A evapotranspiração, sob o ponto de vista energético, pode ser considerada como a energia utilizada para transferir água da superfície do solo úmida e do interior das plantas para a atmosfera, sob a forma de vapor. Neste caso, é chamada de calor latente e é medida como densidade de fluxo de energia ( $W.m^{-2}$ ).

O saldo de radiação ( $R_n$ ) à superfície representa a contabilização entre a radiação de onda curta incidente ( $R_g$ ) e refletida ( $R_r$ ) e, da radiação de onda longa incidente ( $R_{la}$ ) e emitida pela superfície ( $R_{ls}$ ). O  $R_n$  num dossel vegetal representa a quantidade de energia disponível repartida entre os fluxos de energia necessários aos processos de evapotranspiração, aquecimento do ar e do solo e para fotossíntese (Tubelis & Nascimento, 1980), ou seja, o saldo de radiação é o resultado das trocas de energia radiativa que se estabelecem na interface solo-planta-atmosfera. Segundo Arya (1988), há, essencialmente, quatro tipos de fluxo de energia em uma superfície: saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G). Há, ainda, a energia armazenada na copa das plantas (S) e a utilizada no processo fotossintético (P), as quais são negligenciadas devido à pequena representatividade do saldo de radiação e difícil contabilização.

O fluxo de calor latente (LE) envolve transferência de massa da superfície do sistema solo-planta para a atmosfera, sendo o resultado da evaporação ou condensação do vapor d'água e é obtido pelo produto do calor latente de evaporação ou condensação pela massa de água evaporada ou condensada. A evaporação ocorre tanto em superfícies livres de água como em solo úmido e em superfícies vegetadas, quando o ar encontra-se com déficit de saturação de vapor d'água na atmosfera.

O fluxo de calor sensível (H) de uma dada superfície é o resultado da diferença entre as temperaturas do ar e da superfície. Certamente, a temperatura na camada limite varia continuamente com a altura. Próximo à interface, a transferência de calor ocorre por condução. O fluxo de calor sensível geralmente é dirigido para fora da superfície no período diurno quando a superfície está mais aquecida que o ar, e o contrário ocorre durante o período noturno.

A razão entre os fluxos de calor sensível e latente foi proposta por Bowen (1926), como forma de estudar a partição de energia disponível e ficou conhecida como razão de Bowen ( $\beta$ ). A partir daí, os componentes do balanço de energia vêm sendo determinados com base na razão de Bowen.

O BERB estima o fluxo de calor latente (LE) usando medidas à superfície dos gradientes de temperatura e umidade, saldo de radiação e fluxo de calor no solo. Segundo Todd *et al.* (2000) o BERB é um método indireto de determinação da evapotranspiração das culturas (ETc) quando comparado com lisímetros de pesagem e o método dos fluxos turbulentos. O BERB é um método prático e simples, capaz de fornecer determinações precisas e contínuas da ETc para diversas culturas e ambientes (Daamen *et al.*, 1999; Casa *et al.*, 2000; Todd *et al.*, 2000; Rana & Katerji, 2000; Lopes *et al.*, 2001; Teixeira *et al.*, 2003).

A aplicabilidade do BERB baseia-se nas seguintes suposições (Perez *et al.*, 1999; Fristchen & Simpson, 1989, citados por Todd *et al.*, 2000): 1) o transporte de massa é unidimensional, sem gradientes horizontais e os sensores que medem os gradientes devem estar localizados dentro de uma subcamada de equilíbrio, na qual os fluxos não variam com a altura; 2) a superfície é considerada homogênea com relação às fontes e drenos de calor, vapor d'água e momentum; 3) a razão entre os coeficientes de troca turbulenta de calor e de vapor d'água ( $K_h/K_w$ ) é igual a 1, o que é verdade sob condições atmosféricas neutras ou instáveis. Quanto as duas primeiras suposições, as mesmas podem ser obtidas na presença de um extenso “*fetch*” ou bordadura, que segundo Rosenberg *et al.* (1983) deve ser de 100:1. No entanto, Heilman *et al.* (1989) promoveram um experimento onde múltiplos sistemas da razão de Bowen foram localizados a diferentes distâncias e alturas em uma área vegetada, verde e em plena transpiração, na direção do vento proveniente de um campo com algodão seco, e demonstraram que a relação distância-altura do sensor mais alto utilizado para medida da razão de Bowen pode obedecer à razão de 20:1 e mesmo assim fornecer resultados com precisão aceitável quando  $\beta$  é pequeno e positivo.

Segundo Todd *et al.* (2000) as vantagens do método do BERB incluem a possibilidade de medidas simples e contínuas; a não necessidade de informações sobre as características aerodinâmicas da superfície de interesse; a possibilidade de integrar o fluxo de calor latente sobre extensas áreas; o fornecimento de medidas em pequena escala de

tempo (menor que uma hora). Suas desvantagens incluem a influência da sensibilidade dos instrumentos que medem os gradientes e os termos do balanço de energia; a descontinuidade dos dados quando  $\beta$  aproxima-se de  $-1$  e, a necessidade de um “fetch” adequado.

A utilização do método do balanço de energia com base na razão de Bowen para determinação da evapotranspiração fornece bons resultados sob condições de clima úmido. No entanto, pode não ser tão preciso sob condições muito seca ( $\beta$  elevado e positivo) e de relativa advecção de energia ( $\beta$  negativo) (Angus & Watts, 1984). Mesmo assim, o método do BERB tem sido muito utilizado para determinação da evapotranspiração de culturas em ambientes semi-áridos, onde os resultados dos fluxos são considerados de boa precisão (Soares *et al.*, 2003; Todd *et al.*, 2000; Rana & Keterji, 2000; Unland *et al.*, 1996).

Segundo Angus & Watts (1984) em regiões áridas, onde as plantas são submetidas a estresse hídrico, é muito importante que as medidas dos gradientes de temperatura e umidade sejam realizadas com elevada precisão, pois nesses ambientes o gradiente de temperatura ( $\Delta T$ ) pode mostrar-se muito alto e o gradiente de pressão de vapor ( $\Delta e$ ) muito baixo. Quando não se dispõe do sistema comercial de determinação da razão de Bowen, pode-se obter os gradientes  $\Delta T$  e  $\Delta e$  por meio da utilização de psicrômetros diferenciais, com medições contínuas da temperatura em bulbo úmido e seco. Os sensores podem ser termopares bem calibrados, capazes de detectar diferenças de temperatura da ordem de  $0,05$  °C a  $0,2$  °C, que devem ser mantidos sempre limpos, com garantia da ascensão de água ao bulbo úmido, ventilação adequada e constante alternância entre os psicrômetros dos dois níveis de medida. Nesse sentido, Steduto & Hsiao (1998) e Aseng & Hsiao (2000) realizaram medidas de temperatura (bulbo seco e úmido) em psicrômetros triplicamente protegidos contra a penetração da radiação solar e cuidadosamente ventilados. Nesta ocasião, os sensores de temperatura foram feitos de resistência de platina e calibrados em laboratório para uma faixa de temperatura entre  $5$  °C e  $40$  °C. Isso é muito importante, uma vez que as medidas do razão de Bowen dependem das medidas dos gradientes. Ainda com relação às medidas dos gradientes de temperatura, os erros podem ser reduzidos quando se promove a freqüente inversão dos sensores entre os dois níveis de medidas. Para isso existem sistemas que realizam esta troca automaticamente a intervalos regulares, como feito por Barradas *et al.* (1999) e Todd *et al.* (2000) a cada cinco minutos.

Mokate *et al.* (1995) utilizaram o método do BERB para determinação da evapotranspiração do trigo e os gradientes de temperatura foram obtidos por meio de medidas em sensores de cromo-constantan, instalados protegidos da radiação solar em psicrômetros artificialmente aspirados e com suas posições automaticamente invertidas para reduzir qualquer tendência instrumental das medidas. Estes pesquisadores realizaram a calibração psicrométrica no próprio campo, por estágio de desenvolvimento da cultura, submetendo os psicrômetros às mesmas condições térmicas, em um mesmo nível de altura. Durante a execução das medidas, as junções úmidas dos dois psicrômetros foram conectadas a um reservatório contendo água destilada, o que garantia o umedecimento continuamente.

Dentre os componentes do balanço de energia, o saldo de radiação é aquele cuja medida é, provavelmente, a mais precisa (erro de apenas 5% a 7%), especialmente sobre superfícies homogêneas (Twine *et al.*, 2000). No entanto, para uma mesma superfície, o  $R_n$  pode variar em função do instrumento de medida. Haldin & Lindroth (1992), citados por Twine *et al.* (2000), compararam instrumentos de seis fabricantes e notaram diferenças variando de 5% a 20%. Quando fizeram a calibração no campo, verificaram que as diferenças podem atingir até 30% da calibração de fábrica. Assim, deve-se ter cuidado com a escolha e calibração do saldo radiômetro utilizado. Além disso, é importante que se disponha de pelo menos dois instrumentos para medida de  $R_n$ . Sua localização, tanto espacial como em termos de altura deve retratar bem a área estudada. Com esse objetivo, muitos pesquisadores utilizam dois ou mais saldo radiômetros para medir o fluxo do saldo de radiação da superfície vegetada homogênea. Esse cuidado é particularmente importante em se tratando de pomares que cobrem de forma descontínua a superfície do solo, como fruteiras. Nesses pomares, deve-se instalar um saldo radiômetro sobre a copa das plantas e outro entre fileiras, a fim de representar as duas condições extremas que ocorrem no pomar (Silva, 2000; Lopes, 1999). No cômputo do balanço de energia utiliza-se o valor médio do saldo radiação. Unland *et al.* (1996) sugere que nessas ocasiões deve-se, de imediato, realizar um estudo de correlação entre os sensores a fim de obter uma equação que os represente diante da falta de um deles. O saldo de radiação é muito bem representado pela radiação solar incidente, e por essa razão diversos pesquisadores têm proposto equações de estimativa do  $R_n$  em função da radiação solar incidente para diversas superfícies.

O fluxo de calor no solo é um componente necessário no cômputo do balanço de energia à superfície, pois contabiliza o armazenamento e a transferência de calor no solo e suas trocas entre o solo e a atmosfera. Ainda mais variável do que o saldo de radiação, o fluxo de calor no solo ( $G$ ) também deve ser representativo da superfície da área em estudo e, para isso, devem ser instaladas diversas placas de medida do fluxo de calor no solo (fluxímetros), a fim de contemplar a grande variabilidade das condições de cobertura e umidade do solo. Para se determinar o fluxo de calor armazenado na camada de solo acima das placas, instala-se sensores de temperatura do solo, que proporcionam boas estimativas do calor armazenado na referida camada de solo. A profundidade de instalação das placas de fluxos também é bastante variável, sendo que alguns pesquisadores a colocam a 0,02 m de profundidade, outros a 0,05 m, 0,08 m ou 0,10 m. Segundo Kustas *et al.* (2000), sobre superfícies uniformes, onde a vegetação cobre totalmente o solo,  $G$  representa de 5% a 10% do  $R_n$  e pode ser mais representativo quando medido usando-se de três a cinco fluxímetros. Entretanto, em se tratando de um solo parcialmente coberto pela vegetação, a variação de  $G$  pode ser bastante significativa, em torno de 20% a 40% do  $R_n$  (Choudhury *et al.*, 1987, citados por Kustas *et al.*, 2000).

Kustas *et al.* (2000) utilizaram 20 fluxímetros para avaliar o fluxo de calor no solo em uma duna com cobertura parcial de vegetação e concluíram que existe grande variabilidade entre as observações ( $\sim 300,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Mesmo considerando os sensores instalados sob uma mesma condição de cobertura do solo, a variabilidade horária é enorme, e os autores não conseguiram definir um número de fluxímetros ideal para representar as condições de armazenamento de calor no solo para aquela superfície. Entretanto, Stannard *et al.* (1994), citados por Kustas *et al.* (2000), recomendaram que sejam utilizados pelo menos três sensores e que a instalação dos mesmos contemple área exposta, área coberta e área intermediária entre o solo exposto e a cobertura vegetal.

De acordo com Silans *et al.* (1997) o fluxo de calor no solo não pode ser medido na superfície do solo, uma vez que os fluxímetros não podem ser expostos diretamente à radiação solar e podem provocar modificações no movimento de água no solo. Estes autores realizaram medidas de  $G$  à superfície e a 0,025 m de profundidade e não constataram diferenças significativas entre as medidas, fato atribuído às características do solo, uma vez que se tratava de um solo arenoso, com alta difusividade térmica. Na realidade, a localização de fluxímetros a 0,05 m de profundidade ou mais deve ser feita



com medidas paralelas da umidade do solo e dos gradientes de temperatura do solo para ajuste dos dados de G, uma vez que quanto maior a espessura da camada sobre o sensor, menor é a quantidade de energia que atinge a placa. Com o intuito de observar a influência da profundidade da medida do fluxo de calor no solo e suas variações na estimativa da medida da evapotranspiração, Malek (1993) realizou medidas de G na superfície e a 0,08 m de profundidade. Este pesquisador observou que, para médias de 20 minutos, a radiação solar, o saldo de radiação, a cobertura de nuvens, a direção e a velocidade do vento foram responsáveis por rápidas variações nos dados de G medidos à superfície; o que não ocorreu com o sensor localizado à maior profundidade. No entanto, em se tratando da determinação diária da evapotranspiração da cultura, a localização do fluxímetro não resultou em erros significativos. Detalhes sobre a profundidade de instalação dos sensores e o uso de medidas de temperatura para estimativa de G podem ser obtidos em Helsinkveld *et al.* (2004) e Silans *et al.* (1997).

Os erros associados às medidas do fluxo de calor no solo aceitáveis são mais elevados do que para o saldo de radiação, devido à grande variabilidade das observações e da heterogeneidade do terreno. Angus & Watts (1984) consideraram erros em torno de 20% nas medidas de G. Segundo Twine *et al.* (2000), sob culturas que cobrem totalmente o solo, o valor máximo de G é menor do que  $100,0 \text{ W.m}^{-2}$ , enquanto que a incerteza das medidas de dois locais corresponde a  $15,0 \text{ W.m}^{-2}$ , sendo que grande parte dessa incerteza deve-se a amostragem espacial. Estes autores sugeriram que o erro máximo devido a G seja igual a 10% para superfícies homogêneas. Sobre superfícies de solo com cobertura descontínua, deve-se procurar representar bem o terreno, com suas variações de cobertura e conteúdo de umidade do solo. Em se tratando de superfícies sombreadas e constantemente irrigadas, o fluxo de calor no solo torna-se muito pequeno durante quase todo dia, uma vez que o solo permanece sempre molhado.

Lopes *et al.* (2001) estudaram os componentes do balanço de energia em um pomar de mangueira irrigada no semi-árido nordestino. Nesta ocasião, foram utilizados três fluxímetros instalados a 0,05 m de profundidade, sendo que cada um foi localizado sob diferentes condições de cobertura e de umidade do solo (um entre plantas, um entre fileiras e outro próximo ao caule da planta). Quando comparados com as medidas do saldo de radiação do pomar, os resultados representaram, em média, 5%, variando entre 1,0% e 10,7% em algumas fases do experimento. De acordo com FRITSCHEN & FRITSCHEN

(sem data), o fluxo de calor no solo pode representar 33% do saldo de radiação em um campo de trigo úmido, 17% em trigo seco e 1% em um denso gramado.

Os componentes do balanço de energia foram analisados por Soares (2003) em dois ciclos fenológicos (primeiro ciclo no período seco e segundo ciclo no período chuvoso) da videira irrigada por gotejamento no Vale do Submédio do Rio São Francisco. Segundo este autor, o fluxo de calor no solo representou  $7,39 \pm 4,24\%$  do saldo de radiação medido no primeiro ciclo e  $4,43 \pm 4,17\%$  no segundo ciclo. Ainda para videira, na mesma região, Teixeira *et al.* (1997) constataram que o G representou 5% de Rn.

O método do BERB tem sido utilizado por diversos pesquisadores para determinação da evapotranspiração de culturas, principalmente devido a sua praticidade. Sua aplicabilidade é maior quando a superfície analisada compreende culturas de pequeno porte, que cobrem praticamente toda superfície do solo, como alfafa (Todd *et al.*, 2000; Asseng & Hsiao, 2000); sorgo e milho (Mastrorilli *et al.*, 1998); trigo (Mokate *et al.*, 1995); grama (Twine *et al.*, 2000); dentre outras. O método do BERB com culturas esparsas, de porte médio a alto, que não cobrem totalmente a superfície, como em pomares de fruteiras, tem mostrado bons resultados, apesar de ainda pouco utilizado devido às exigências do próprio método, principalmente em se tratando da existência de um “fetch” adequado.

Daamen *et al.* (1999) estudaram as relações hídricas e energéticas em um pomar de limoeiro irrigado. A evapotranspiração foi determinada em duas alturas do pomar com o objetivo de se obter a contribuição da entrelinha e das plantas na evapotranspiração total da área. Estes autores verificaram que os fluxos medidos sobre o pomar, a oito metros de altura, apresentaram boa correlação com a transpiração das plantas determinada pelo fluxo de seiva e os fluxos obtidos com a aplicação do método da razão de Bowen abaixo da copa das plantas, referentes a evapotranspiração da entrelinha. Segundo Wallace *et al.* (1993), em se tratando de vegetação esparsa, a evaporação do solo pode ser tão importante quanto a transpiração da planta, desde que haja umidade no solo. Alguns pesquisadores têm optado por medidas separadas da evaporação do solo e da transpiração das culturas, por meio de métodos não evasivos, como o balanço de calor no caule (Trambouzé *et al.* (1998); Gutiérrez & Meinzer, 1994; Marin, 2003).

Todd *et al.* (2000) compararam medições do fluxo de calor latente pelo BERB com lisímetros e observaram que a melhor performance do BERB ocorreu nos dias em que  $\beta$  foi pequeno e positivo, e quando a cultura cobria totalmente o solo. Nesse mesmo estudo, foi observado que as maiores diferenças entre as duas metodologias ocorreram nos dias mais quentes, secos e ventilados, quando  $\beta$  foi menor que zero ou quando o fluxo de calor latente foi maior que a energia disponível ( $R_n - G$ ).

O valor de  $\beta$  depende fundamentalmente das condições hídricas da superfície evaporante. Se a superfície estiver umedecida, a maior parte de  $R_n$  será utilizada para evapotranspiração, resultando em pequenos valores de  $\beta$ . Porém, se a superfície apresentar restrição hídrica, a maior parte de  $R_n$  será utilizada para o aquecimento do ar, resultando em elevado valor de  $\beta$  (Pereira *et al.*, 1997).

Diversos estudos têm aplicado a metodologia do BERB para pomares de fruteiras no Submédio do Vale do Rio São Francisco mostrando que, apesar da região apresentar clima semi-árido, os pomares são bem irrigados e, grande parte da energia disponível é utilizada para evapotranspiração das culturas. Soares (2003) observaram que a partição do  $R_n$  entre os componentes do balanço de energia foi superior a 100%, em dois ciclos consecutivos da videira, sendo que aproximadamente 81% do  $R_n$  foi utilizado como LE, 14,7% como H e 5,9% como G. Já Teixeira (2000) observaram que as relações LE/ $R_n$ , H/ $R_n$  e G/ $R_n$  para um pomar de bananeira irrigada, às margens do Rio São Francisco, foram respectivamente iguais a 87%, 2 % e 11%, demonstrando um excelente fechamento do balanço. Segundo o autor, a reduzida taxa de H foi devido a advecção de umidade trazida pelos ventos à sudeste do Rio São Francisco.

Lopes *et al.* (2001) observaram que a partição dos fluxos em um pomar variaram de um ciclo para outro, e encontraram relações de LE/ $R_n$  iguais a 77,68% em um ciclo de produção no ano de 1998 e 83,36% em outro ciclo de produção em 1999. Com isso, a relação H/ $R_n$  foi 11,4% e 18,01% para os mesmos períodos citados. Sobre um pomar de lima ácida "Tahiti", Marin *et al.* (2000) observaram diferenças entre as partições dos componentes do balanço de energia em um período onde a entrelinha da cultura foi mantida seca e quando a mesma permaneceu úmida. No período em que o solo da entrelinha estava seco, a razão LE/ $R_n$  foi em média igual a 53%, enquanto que no período úmido a mesma foi de 80%. Verificaram ainda que a transpiração média do pomar (1,85

mm.dia<sup>-1</sup>) foi igual a 41% da evapotranspiração determinada pelo BERB (4,49 mm.dia<sup>-1</sup>), durante o período úmido, refletindo, com isso, a elevada taxa de evaporação da entrelinha em pomares com cobertura descontínua do solo. As necessidades hídricas de um pomar de mangueira irrigada foram determinadas para as condições do Submédio do Vale do Rio São Francisco por Azevedo *et al.* (2003). Utilizando o método do BERB estes autores observaram que a evapotranspiração média do pomar foi igual a 4,4 mm.dia<sup>-1</sup>.

Soares (2003) realizou um estudo detalhado sobre a partição do balanço de energia em um parreiral irrigado por gotejamento no Submédio do Vale do Rio São Francisco. Para isso, subdividiu o sistema formado pela “copa-solo” em dois subsistemas distintos – “copa” e “superfície do solo”, como feito por Heilman *et al.* (1994). O autor observou que os coeficientes de cultura obtidos foram praticamente iguais aos determinados pelo BERB, no entanto, bem mais elevados que aqueles observados com a metodologia do balanço hídrico no solo.

Na determinação da evapotranspiração de culturas através do método do balanço de energia baseado na razão de Bowen devem ser considerados os erros, como sugerem Angus & Watts (1984). Além da obtenção dos erros, associados às determinações da razão de Bowen ( $\beta$ ) e do fluxo de calor latente (LE), os dados de  $\beta$  devem ser cuidadosamente analisados para evitar resultados duvidosos de LE. Perez *et al.* (1999) analisaram os erros associados ao método do balanço de energia baseado na razão de Bowen, para determinar analiticamente, a confiabilidade nos valores de  $\beta$  e dos fluxos de calor latente e sensível. Verificaram que se a advecção é negligenciada, o método é capaz de determinar, corretamente, a partição dos fluxos na superfície quando certas condições consistentes com gradiente-fluxo são satisfeitas. Estes autores propuseram um método analítico para encontrar o limite de  $\beta$  ao redor de  $-1$ , que resulta em cálculos de fluxos de calor latente e sensível inaceitáveis.

Unland *et al.* (1996) utilizaram um procedimento de análise e controle de qualidade dos dados duvidosos. Nesta pesquisa, somente 30% dos dados dos gradientes de pressão de vapor d'água e temperatura foram considerados confiáveis. Nesse estudo, foi aplicado um difícil critério para selecionar, entre os dados da razão de Bowen, aqueles que apresentavam credibilidade. Inicialmente, foram excluídos todos aqueles cujo valor estava além da precisão instrumental. Foram excluídos os valores da razão de Bowen ( $\beta$ )

encontrados quando a diferença de pressão de vapor foi menor que 0,005 kPa, como também aqueles em que  $\beta$  foi próximo a -1, mais especificamente, aqueles situados na faixa entre  $|1+\beta| < 0,3$ . Esse último caso, geralmente ocorre quando os fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) têm aproximadamente o mesmo valor e direções opostas, o que ocorre rotineiramente em curtos períodos de tempo, próximo ao nascer e pôr-do-sol. Nesse caso, para períodos menores que uma hora, os dados perdidos dos fluxos de energia foram substituídos pela interpolação dos valores anterior e posterior ao dado faltoso. Além disso, também foram considerados inválidos os dados de fluxo de calor latente maiores do que  $400,0 \text{ W m}^{-2}$ , como também aqueles negativos para condições de umidade relativa do ar maior ou igual a 80%.

Casa *et al.* (2000) descartaram os valores do gradiente de temperatura e de pressão de vapor que estavam fora do limite de resolução dos sensores de medida desses parâmetros, bem como os valores de  $\beta$  calculados quando o *fetch* (bordadura) foi menor do que vinte vezes a altura dos sensores. Estes pesquisadores utilizaram dois sistemas de razão de Bowen, e após análise e rejeição dos dados de  $\beta$ , ficaram disponíveis somente 44% e 82% em cada um dos sistemas de medida.

Os erros associados ao cálculo do fluxo de calor latente foram calculados para um pomar de mangueira irrigada no Vale do Submédio do Rio São Francisco por Azevedo *et al.* (2003), onde verificaram que os erros aumentaram de 17%, sob condições de baixa demanda energética, para 38% sob condição de alta demanda atmosférica. Segundo estes pesquisadores, os maiores erros de LE foram influenciados pelo maior gradiente de temperatura e maior erro relativo da razão de Bowen. Para essa mesma região, mas em um parreiral, Soares (2003) observou que os maiores erros relativos de LE ocorreram no início do ciclo produtivo, logo após a poda, quando havia mais solo exposto. Verificou ainda grandes diferenças entre os erros determinados em dois ciclos de produção consecutivos, sendo que o valor obtido no primeiro ciclo foi apenas 20,27% daquele obtido para o segundo ciclo, cujo valor médio foi de  $11\% \pm 12\%$ .

### 2.2.2. Balanço hídrico do solo - BHS

O balanço hídrico do solo resulta da aplicação do princípio de conservação de massa para a água num volume de solo controlado, monitorando-se a água que entra e que sai do referido volume de controle de solo, desde a superfície até uma profundidade arbitrária  $L$ . Pela superfície do solo tem-se a adição de chuva efetiva ( $P_e$ ) e irrigação ( $I$ ), e as perdas por evapotranspiração ( $ET_c$ ) e escoamento superficial ( $R$ ). No plano da profundidade  $L$ , que deve estar situado abaixo da zona radicular, tem-se as perdas de água por drenagem profunda ( $D_p$ ) e os ganhos por ascensão capilar ( $A_c$ ). A contabilidade de todos estes componentes do balanço, afeta o armazenamento de água ( $W$ ) na camada de  $0 - L$  de solo. Quando as perdas são maiores que os ganhos,  $W$  diminui e, em caso contrário,  $W$  aumenta. O balanço hídrico é, portanto, importante para o acompanhamento da quantidade de água armazenada no perfil do solo explorado pelas raízes das plantas. Esta quantidade deve ser mantida em níveis ótimos, para maximizar a produtividade agrícola. Assim, por meio do balanço hídrico pode-se estabelecer critérios para drenagem do solo (em caso de excesso de água) ou para irrigação (em caso de falta) (Reichardt, 1990). Segundo Rana & Katerji (2000), o BHS é um método de determinação indireta da evapotranspiração das culturas, uma vez que a mesma é obtida como termo residual da equação do balanço.

Em aplicações do BHS é muito importante o conhecimento da profundidade efetiva do sistema radicular. O volume de controle é determinado pelo sistema solo-planta-atmosfera. Se o solo for profundo e a demanda atmosférica for alta, as raízes tendem a se aprofundar a procura de mais água para atender a demanda. Mas, se a demanda for baixa, um menor volume explorado será suficiente. Em solos argilosos, com maior capacidade de retenção de água, as raízes não necessitam aprofundar-se tanto como ocorre em solos arenosos, cuja capacidade de retenção de água é menor. Há uma compensação natural devido ao crescimento do sistema radicular, para manter uma certa quantidade de água disponível às plantas (Pereira *et al.*, 1997).

Ferreira (2004) estudou a distribuição radicular da goiabeira plantada no espaçamento de 6 m x 5 m, em um Latossolo Vermelho amarelo de textura média, irrigada por microaspersão no Vale do Submédio do Rio São Francisco. Segundo o autor, 80% das raízes da goiabeira estavam distribuídas até a profundidade de 0,94 m e a uma distância de 1,23 m do tronco da planta. A distribuição do sistema radicular é função de muitos fatores,

desde o tipo de muda, tipo de solo, manejo cultural e sistema de irrigação, distribuição de nutrientes, dentre outros.

A atmosfera é o agente ativo no processo de uso da água pela vegetação e o solo exerce as funções de armazenador e moderador da utilização da água. Portanto, é preciso conhecer as funções físico-hídricas do perfil do solo em uso. Se o solo for profundo, sem impedimentos à infiltração da água e ao desenvolvimento natural das raízes, a quantidade de água aplicada poderá ser maior em cada irrigação, em decorrência de sua maior capacidade de armazenamento de água. No entanto, se o solo for raso ou apresentar impedimentos físico-químicos, em certa profundidade, a quantidade de água disponível será menor, determinando regas menores e mais freqüentes para melhor atender a demanda atmosférica (Pereira *et al.*, 1997).

A infiltração, redistribuição, evaporação e absorção de água pelas plantas envolvem o fluxo de água no solo, cujos processos são interdependentes e na maioria das vezes ocorrem simultaneamente. Para o conhecimento da dinâmica da água no solo, é de fundamental importância, o conhecimento da umidade e dos potenciais da água no solo. A umidade é apenas um índice que quantifica a água que o solo retém, enquanto que seus potenciais, dizem respeito aos diferentes tipos de energia potencial que atuam no sistema, e indicam o estado da água no solo (Libardi, 1995).

A precisão do método do BHS na determinação da evapotranspiração da cultura é altamente dependente da precisão das medidas de todos os componentes do balanço. Considerando-se que a irrigação aplicada ( $I$ ) é conhecida, a precipitação ( $P_e$ ) é medida por meio de pluviômetro e o escoamento superficial ( $R$ ) considerado nulo, os outros termos, também, precisam ser medidos ou estimados. Uma das grandes vantagens do uso dos lisímetros é que eles controlam a entrada e saída de água do volume de controle. Quando estes fluxos não são determinados por lisímetros, precisam ser estimados.

Considerando-se apenas os fluxos verticais, os mesmos podem ser estimados por meio de medidas (preferencialmente múltiplas) do potencial hídrico do solo, em diferentes profundidades, e do conhecimento da dependência da condutividade hidráulica do potencial hídrico do solo. O fluxo de água que sai do volume de controle por drenagem profunda ( $D_p$ ) e/ou entra por ascensão capilar ( $A_c$ ) é estimado pela equação de Darcy, que possibilita a determinação do movimento de água no solo e dificulta a medida exata da

evapotranspiração da cultura. Uma vez que este termo é o mais desconhecido na equação do BHS, alguns pesquisadores sugerem que ele seja negligenciado em regiões secas, mas ele depende da profundidade, inclinação, permeabilidade e capacidade de armazenamento do solo (Jensen *et al.*, 1990) e precisa ser checado para cada caso particular, pois em algumas situações pode ser muito importante na estimativa da evapotranspiração.

Segundo Holmes (1984), citado por Rana & Katerji (2000), a nível diário, a drenagem pode ser negligenciada quando o fornecimento de água pela precipitação e pela irrigação for inferior à capacidade de armazenamento de água do solo. No entanto, em algumas situações a drenagem é tão importante que sua medida pode ser utilizada para estimativa semanal da ETc. Nesse sentido, em áreas irrigadas, em geral, deve-se quantificá-la. Assim, a variação do armazenamento de água ( $\Delta W$ ) passa a ser o único termo desconhecido e pode ser facilmente obtido por meio de medidas da umidade do solo (Rana & Katerji, 2000).

De acordo com Reichardt & Timm (2004), as limitações no cálculo da drenagem são enormes, em especial para grandes intervalos de tempo (10, 15 ou 30 dias). Nesses intervalos de tempo, em geral, não se têm informações completas de como a umidade do solo ( $\theta$ ) variou nas camadas e não se sabe se as estimativas do gradiente  $c$  e da condutividade hidráulica são aceitáveis. Para curtos intervalos de tempo (3, 5 ou 7 dias), o cálculo da drenagem é bem melhor, no entanto, como a dinâmica da água é relativamente lenta, períodos de um dia ou menos não são viáveis. De qualquer forma, a determinação do fluxo de drenagem é muito difícil e requer muita atenção, estando, este problema, ainda, em fase de pesquisa.

Na prática, os termos mais procurados pelo BHS são a evapotranspiração (ETc) e a variação no armazenamento ( $\Delta W$ ). A ETc para o conhecimento de quanto o sistema solo-planta perdeu por evapotranspiração no intervalo de tempo considerado e a  $\Delta W$  para se saber a disponibilidade de água no solo para as plantas em um determinado instante (Reichardt & Timm, 2004). A bibliografia sobre o uso da metodologia do BHS é extensa e inclui a determinação da evapotranspiração de várias espécies vegetais nos mais variados ambientes.



A medida da umidade do solo deve ser realizada da maneira mais representativa e confiável possível. Para isso, deve-se optar entre as diversas metodologias disponíveis e instalar os instrumentos em locais que melhor representem a variabilidade horizontal e vertical da umidade do solo. Os instrumentos (e seus princípios de funcionamento) de determinação da umidade do solo são vários, dentre os quais destacam-se: tensiômetros, sondas de nêutrons, TDR (“Time Domain Reflectometry”) e a gravimetria. Entre os diferentes métodos para determinação do conteúdo de água do solo, todos apresentam algumas vantagens e limitações; maior ou menor nível de precisão; ou são dispendiosos, ou morosos, ou trabalhosos. A opção por um determinado método varia de acordo com a finalidade e objetivos do estudo e com a disponibilidade instrumental (Klar, 1991).

Os tensiômetros medem o potencial matricial da água no solo e, indiretamente, a umidade do solo por meio da curva de retenção, que relaciona o potencial matricial e o conteúdo de água no solo. O tensiômetro consiste de uma cápsula de cerâmica porosa em contato com o solo, ligada a um manômetro por meio de um tubo de PVC completamente cheio de água. No solo, a água do tensiômetro entra em contato com a água do solo por meio dos poros da cápsula e o equilíbrio tende a se estabelecer e, com isso, o potencial da água dentro do tensiômetro é igual ao potencial da água do solo em torno da cápsula. A leitura do potencial é feita no manômetro, que pode ser de mercúrio. Atualmente existem os tensímetros, que usam o próprio rebaixamento da água no tubo para medir o potencial e, ainda, os tensiômetros digitais, que podem ser conectados a sistemas automáticos de aquisição de dados. Na prática, o intervalo de uso do tensiômetro varia da saturação, quando o potencial matricial é igual a zero até um potencial matricial de aproximadamente 80 kPa. Segundo Reichardt & Timm (2004), esse intervalo de potencial limitado não é tão limitado como parece. Ele é uma parte pequena do intervalo total de potenciais, mas no campo, cobre o principal intervalo de umidade do solo de importância em práticas agrícolas.

O TDR tem sido amplamente utilizado para determinação da umidade, uma vez que produz medidas exatas e com boa representatividade no tempo e no espaço, tanto em laboratório como em condições de campo (Topp & Davis, 1985). Souza & Matsura (1995), também, destacam a boa aplicabilidade do TDR em laboratório e no campo, cujas vantagens de uso são atribuídas, principalmente à precisão, possibilidade de multiplicação das medidas, repetição sem destruição da amostra de solo e pela segurança do ambiente e

do operador. Destacam, ainda, que o elevado custo do TDR tem limitado seu uso, principalmente em aplicações no campo.

A técnica do TDR tem sido amplamente utilizada em estudos de manejo da irrigação, determinação da evapotranspiração de culturas, nos padrões de distribuição de água no volume molhado sob irrigação localizada, absorção de água e nutrientes pelo sistema radicular, avaliação de água e nutrientes no solo, além do monitoramento do estado da água no solo para definição do momento e do total da água de irrigação (Coelho & Arruda, 2001; citados por Ferreira, 2004). Atualmente, o mercado dispõe de diversas sondas de perfil de umidade que se baseiam nas propriedades dielétricas do solo, como a sonda de perfil de umidade do solo comercializada pela Delta T® e sensores de capacitância, como a sonda de perfil EnviScan, da Sentek®, dentre outras.

A medida do potencial matricial ( $\psi_m$ ) é feita por tensiômetros ou instrumentos de sucção ou pressão. No solo,  $\psi_m$  está relacionado com a umidade do solo ( $\theta$ ), de maneira que quanto maior  $\theta$  (mais úmido) maior  $\psi_m$  (ou menos negativo). Então, para cada amostra de solo tem-se um valor característico de  $\psi_m$  para cada valor de  $\theta$ . O conhecimento dessas relações para as diversas camadas do solo constitui a curva característica do solo ou curva de retenção de umidade do solo. De posse da curva de retenção de um solo, pode-se estimar  $\psi_m$  conhecendo-se  $\theta$  ou vice-versa. Como na prática a determinação de  $\theta$  é bem mais simples,  $\psi_m$  é estimado pela curva de retenção. Nesse sentido, o conhecimento da curva de retenção de água no perfil do solo é muito importante.

Existem muitos modelos propostos para modelagem da retenção de água e da condutividade hidráulica do solo, os quais são comentados por Soares (2003). Dentre os mais variados modelos, destaca-se o de van Genuchten (1980), que segundo Felton & Nieber (1991), citados por Soares (2003), foi o que apresentou menor erro médio, resultando em 2% de subestimativa dos valores de umidade; sendo o modelo que apresentou menores valores da saturação efetiva, resultando em um melhor ajuste da curva de retenção para um intervalo de potencial matricial entre 0 e 200 cm de coluna de água ou de 0 a 1,94 kPa.

A habilidade do sistema solo-planta em suprir as necessidades potenciais de evapotranspiração é dependente, inclusive, da condutividade hidráulica do solo. O solo

precisa estar apto a fornecer água às raízes das plantas com velocidade suficiente para manter o turgor da planta. Por outro lado, a condutividade hidráulica, que é uma propriedade hidrodinâmica do solo, depende da complexidade da estrutura do solo, que, por sua vez, exerce influência na geometria do espaço poroso do solo, tais como a distribuição e forma do tamanho dos poros, tortuosidade dos capilares, porosidade e superfície específica das partículas. Mas, também, depende das características do fluido, como massa específica e viscosidade dinâmica (Libardi, 1995 e Martinez, 1989; citado por Costa, 1998).

A diferença mais importante na descrição do movimento de água no solo, em condições saturadas ou não, está na condutividade hidráulica. Quando o solo encontra-se saturado, seu conteúdo de água aproxima-se da porosidade total, condicionando a obtenção de um valor máximo de condutividade hidráulica ( $K_s$ ); mas, à medida que a umidade do solo diminui, os poros de maior tamanho se esvaziam, ocasionando um decréscimo acentuado da condutividade hidráulica, que geralmente é de forma exponencial (Libardi, 1995 e Reichardt & Timm, 2004). A condutividade do solo não saturado ( $K(\theta)$ ) é difícil de ser medida, porém uma vez estabelecida sua relação com a curva de retenção de água no solo,  $K(\theta)$  pode ser obtido por meio de equações matemáticas.

Em estudos relacionados com as interações solo-planta, o conhecimento do movimento de água no perfil do solo, drenagem profunda, movimentos de poluentes e o ajuste da curva de retenção para determinar a função condutividade hidráulica são parâmetros essenciais na elaboração do BHS (Vieira & Castro, 1987; Pauletto *et al.*, 1988). Nesse contexto, Villagra *et al.* (1995), analisando os efeitos da variabilidade da água armazenada no solo, gradiente hidráulico, condutividade hidráulica e densidade de fluxos de água no solo, no cálculo da evapotranspiração, verificaram que a variabilidade desses parâmetros confere um coeficiente de variação na ordem de 40% no cálculo da ETc. Estes autores observaram, ainda, que os métodos aerodinâmicos e empíricos mostraram-se mais eficientes nas estimativas da evapotranspiração em áreas com grande variabilidade das características hidráulicas do solo. Quanto às estimativas da condutividade hidráulica do solo, segundo os mesmos, as medições tensiométricas são melhores que as da sonda de nêutrons.

Plessis (1985) estudou a influência da deficiência hídrica sobre a evapotranspiração de citros, monitorando o potencial mátrico do solo por meio de tensiômetros. O autor concluiu que os diferentes tratamentos irrigados (alta, média e baixa frequência de irrigação) afetaram o potencial mátrico do solo e que houve redução na evapotranspiração da cultura, quando o potencial total de água no solo foi reduzido nos tratamentos de alta e baixa frequências de irrigação.

Silva *et al.* (2004) realizaram um experimento de campo para estimar a evapotranspiração do coqueiro cultivado sob irrigação nos tabuleiros costeiros, no norte do Estado de Sergipe. A evapotranspiração foi obtida com base no método do BHS e a umidade monitorada semanalmente por meio de TDR no período de janeiro a dezembro de 2003. Os sensores foram instalados nas profundidades de 0,15; 0,30; 0,60; 0,90 e 1,20 m e foram utilizados três tratamentos de irrigação: 50, 100 e 150 litros de água por planta. Os resultados deste trabalho indicaram que as taxas de evapotranspiração média do coqueiro mediante os tratamentos de irrigação foram de 2,5; 2,9 e 3,2 mm.dia<sup>-1</sup>, respectivamente.

O BHS foi aplicado por Azevedo *et al.* (2003) em um pomar de mangueira irrigada no semi-árido do Vale do Submédio do São Francisco com o objetivo de obter a ETc. Os resultados mostraram que a ETc aumentou de 3,1 mm.dia<sup>-1</sup> para 6,7 mm.dia<sup>-1</sup> no final do estágio de formação dos frutos e, posteriormente, reduziu para 3,5 mm.dia<sup>-1</sup> na última semana de maturação do fruto. Estes autores constataram elevados valores de drenagem, que chegaram a atingir 17,4 mm por semana, o qual foi atribuída a irrigação aplicada para manter o pomar sem déficit hídrico. Com relação ao ciclo produtivo da mangueira, o consumo hídrico foi aproximadamente igual a 555,0 mm, com evapotranspiração média diária de 4,4 mm.dia<sup>-1</sup>. Estes resultados foram comparados com a evapotranspiração determinada pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB) para o mesmo período, quando foi observada grande similaridade entre os resultados. Estes autores sugerem que o BHS deve ser aplicado em escala de tempo de sete dias para as condições do Submédio do Rio São Francisco.

Soares (2003) aplicou o balanço hídrico em um parreiral irrigado por gotejamento no Projeto de Irrigação de Bebedouro, em Petrolina – PE. Nessa ocasião, a drenagem foi medida por meio de tele-pluviômetros, uma vez que o estudo foi realizado em evapotranspirômetros, não havendo, por tanto, a aplicação da equação de Darcy para

estimar o fluxo vertical da água. Com os resultados, foram obtidos os valores dos coeficientes de cultura ( $K_c$ ) para as diversas fases fenológicas da videira, os quais foram comparados com determinações realizadas por meio do balanço de energia. Soares (2003) constatou que os valores do  $K_c$  obtidos pelo balanço de energia com base na razão de Bowen apresentaram-se bem mais elevados que aqueles determinados pelo BHS apenas nos estágios fenológicos com menor cobertura do solo e foram praticamente iguais em quase todos os demais estágios.

Quanto às necessidades hídricas da goiabeira para as condições semi-áridas do Vale do São Francisco, existem poucos estudos. Bassoi *et al.* (2002), definiram parâmetros para o manejo da água em goiabeira. De acordo com os mesmos, quando cultivadas no espaçamento de 6 m x 5 m e irrigada por microaspersão, com 42% de área molhada, as plantas apresentaram consumo de água variando de 17,1 a 49,3 L/planta/dia para o primeiro ciclo de produção e de 39,6 a 60,2 L/planta/dia para o segundo ciclo. Ferreira (2004) utilizou medidas da umidade do solo obtidas com sonda de nêutrons e TDR para determinar o consumo de água em um pomar de goiabeiras instalado num Latossolo Vermelho amarelo de textura média, sob irrigação por microaspersão no Submédio São Francisco. De acordo com os resultados obtidos, o consumo total de água pela cultura foi igual a 679,17 mm e 691,38 mm, determinados pelo BHS com a umidade do solo determinada, respectivamente, pela sonda de nêutrons e pelo TDR, o que resultou em um consumo médio diário de 3,63 mm e 3,70 mm, respectivamente.

Palomo *et al.* (2002) determinaram o consumo hídrico de um plantio de oliveiras em Sevilha, no sudeste da Espanha, utilizando o método do BHS. Esses autores realizaram um experimento bem detalhado com o objetivo de otimizar o uso de água do pomar e obtiveram resultados bastante satisfatórios. No entanto, concluíram que a aplicação do BHS no pomar de oliveiras é muito trabalhosa e requer demasiado tempo, além de medidas detalhadas das propriedades hidráulicas do solo na profundidade explorada pelo sistema radicular. Segundo os autores, as variabilidades espacial e temporal destas características devem ser consideradas para que os resultados obtidos sejam referentes a todo pomar. Concluíram, ainda, que o BHS permite a obtenção da evapotranspiração, da drenagem profunda e dos outros componentes da equação do BHS.

Como mostrado nesta revisão sobre o BHS, nas medidas e estimativas dos diferentes componentes do balanço hídrico sempre se trata o problema das variabilidades espacial e temporal, amostragem, número de repetições, etc. A chuva, por exemplo, é medida com facilidade por pluviômetros, mas devido a sua grande variabilidade espacial, para fins de uso no BHS, a mesma deve ser medida no próprio local. A medida da irrigação, também, apresenta dificuldades, pois sua distribuição nunca é homogênea. A variabilidade da drenagem profunda acompanha as variabilidades das propriedades hídricas do perfil do solo. É, portanto, necessário que o pesquisador esteja atento a estes problemas, já que não há uma regra geral para amostragem ou repetições. Cada caso é um caso especial e precisa ser abordado com critério, conforme opinião de Reichardt & Timm (2004).

Com relação ao coeficiente de cultura da goiabeira, Teixeira *et al.* (2003), o obtiveram por meio da relação entre a ETC determinada pelo BERB e a ETo, obtida com dados de estação meteorológica convencional e automática utilizando o método FAO-Penman-Monteith. Os autores verificaram, para goiabeira plantada em Latossolo Vermelho amarelo, textura média, no espaçamento de 5 m x 6 m, consumo hídrico variando de 2,8 mm.dia<sup>-1</sup> a aproximadamente 5,5 mm.dia<sup>-1</sup>. Com relação ao Kc, foram observados valores diferentes para as duas estações meteorológicas, sendo que o Kc calculado com os dados da estação automática (variando de 0,61 a 0,84, com média de 0,73) foi menor que aquele usando dados da estação convencional (de 0,75 a 0,93, com média de 0,84), devido ao maior valor de ETo determinado pela estação meteorológica automática. Valores semelhantes de Kc foram obtidos por Ferreira (2004), que empregou a metodologia do balanço hídrico, onde a umidade do solo foi determinada por meio de duas metodologias: sonda de nêutrons e TDR. O mesmo obteve valores de coeficiente de cultura semelhantes para ambas as metodologias de determinação da umidade do solo, iguais, em média, a 0,71 para ETo determinada pelo tanque Classe A e 0,79 quando se determinou a ETo por meio da equação FAO-Penman-Monteith.

## Capítulo 3 | MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1. Localização da área experimental

O experimento de campo foi conduzido em um pomar cultivado com goiabeira, variedade Paluma, localizado no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho (PISNC), Núcleo 9 (N9), lote número 1194, cujas coordenadas centrais são S 09°20'07.19'' de latitude e O 40°30'45,10'' de longitude; a aproximadamente 8,5 km do centro da cidade de Petrolina – PE (Figura 3.1).

O clima da região é do tipo BSW<sub>h</sub>' (Reddy & Amorim Neto, 1983). Os dados climáticos obtidos em uma estação meteorológica localizada no Campo Experimental de Bebedouro, pertencente a Embrapa Semi-Árido, revelam que nos últimos 30 anos, a temperatura média anual foi de 26,2°C, sendo julho e novembro os meses mais frio e quente, respectivamente; a umidade relativa do ar média foi igual a 65,9%; a velocidade do vento média foi 2,3 m s<sup>-1</sup>; precipitação anual média igual a 541,1 mm e evaporação do tanque Classe A anual média superior a 2500 mm. A precipitação é irregularmente distribuída no espaço e no tempo, concentrando-se nos meses de dezembro a abril.

A análise de solo da área experimental indicou tratar-se de um solo de textura arenosa, com média de 90,07 % de areia, 5,07 % de argila e 3,07 % de silte, no perfil de 0 a 1,2 m de profundidade. A umidade do solo (média do perfil) na capacidade de campo (6 kPa) é de 0,088 g g<sup>-1</sup> e no ponto de murcha permanente (1500 kPa) é da ordem de 0,030 g g<sup>-1</sup> (Tabela 3.1).

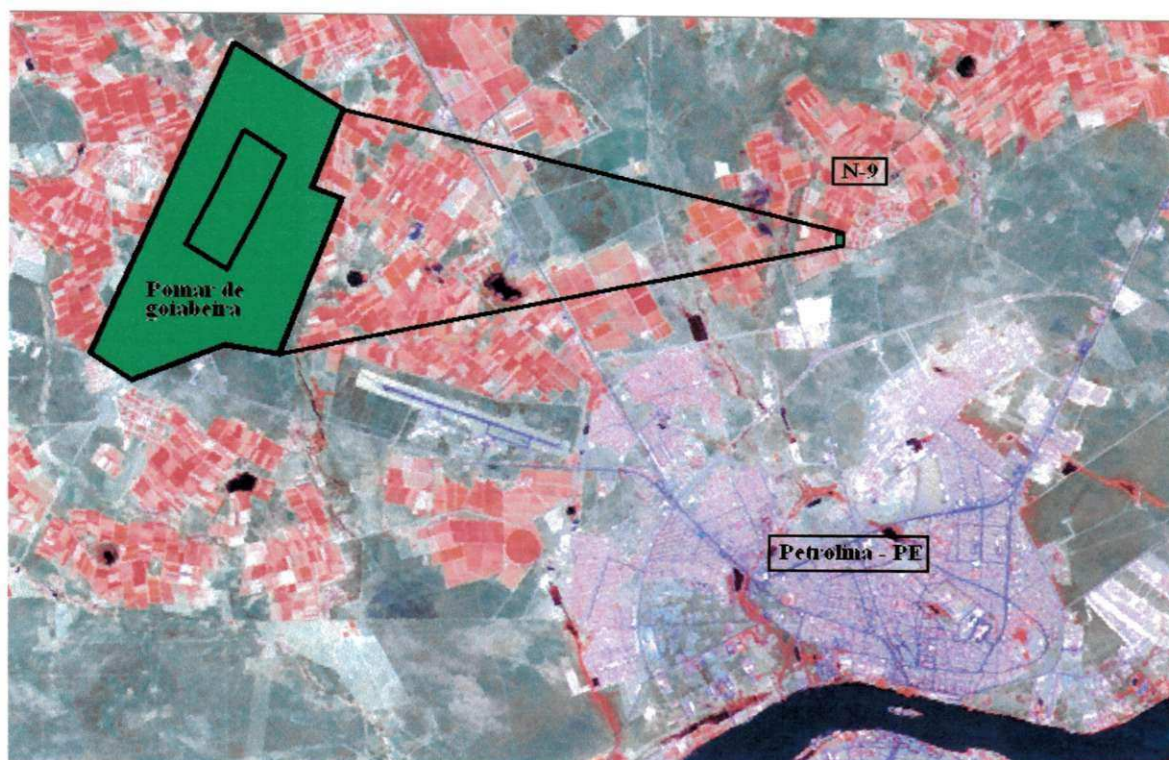


Figura 3.1. Recorte de imagem Landsat, com detalhe do pomar de goiabeira (em verde), localizado no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Núcleo 9. Em vermelho, observam-se as áreas irrigadas; em preto, parte do leito do Rio São Francisco e em rosa/lilás, a cidade de Petrolina - PE.

Tabela 3.1. Textura e umidade do solo à base de peso, na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente, da área experimental no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE

Profundidade da camada (cm)	Granulometria ( $\text{g.kg}^{-1}$ )			Umidade do solo ( $\text{g.g}^{-1}$ )	
	Areia	Silte	Argila	6 kPa	1500 kPa
0-20	940	30	30	0,0767	0,0300
20-40	930	40	30	0,0867	0,0267
40-60	910	40	50	0,0800	0,0333
60-80	900	30	70	0,0900	0,0300
80-100	890	30	80	0,0967	0,0300
100-120	870	50	80	0,1000	0,0300
Média	900,67	30,67	50,67	0,0884	0,0300



### 3.2. Cultura estudada

O experimento foi instalado em um pomar cultivado com goiabeira variedade Paluma, implantado em setembro de 1997, no espaçamento de 6 m x 6 m, totalizando 532 plantas em 1,92 ha. Este pomar era limitado ao norte e a oeste por pomares de coco intercalado com goiabeira; a leste pela vila de moradores e ao sul, por uma estrada e outros pomares (Figura 3.2).



Figura 3.2. Vista parcial do pomar de goiabeira no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho: visão da parte de sul a oeste do pomar.

A primeira etapa desta pesquisa ocorreu no período de maio a novembro de 2000, quando foram determinados a evapotranspiração da cultura ( $ET_c$ ), utilizando-se o método do balanço de energia baseado na razão de Bowen, e o coeficiente de cultura ( $K_c$ ), com base na  $ET_o$  determinada pelo método FAO-Penman-Monteith. Na seqüência, duas outras etapas de pesquisa foram realizadas, com duração de um ciclo de produção (da poda à colheita) cada, buscando a validação e os ajustes desses dados para posterior divulgação e utilização pelos produtores dessa região. No presente estudo serão apresentados apenas os

resultados de  $ET_c$  e  $K_c$  obtidos na primeira etapa de pesquisa e uma análise mais detalhada de todas as observações realizadas na segunda etapa, descrita a seguir.

A segunda etapa de pesquisa, com duração de 178 dias, teve início com a poda de frutificação, realizada entre os dias 21 e 27 de outubro de 2002, terminando com a última colheita aos 23 de abril de 2003. A duração de cada fase fenológica foi determinada por meio de observações visuais do desenvolvimento das plantas do pomar. Para isso, em quatro ramos de oito plantas selecionadas da área experimental do pomar, os seguintes indicadores foram observados: floração, queda fisiológica, crescimento de frutos e colheita. O acompanhamento foi realizado a cada dois dias, o que possibilitou, além da delimitação dos estádios fenológicos, a obtenção do índice de pegamento/abortamento e a curva de crescimento dos frutos. A curva de colheita e a produtividade foram acompanhadas em toda área da pesquisa, não se restringindo às plantas selecionadas.

Durante todo o experimento, foram mantidas as práticas culturais comumente realizadas pelo proprietário do pomar, a exemplo da roçagem, capinas e combate a pragas e doenças. A adubação foi realizada em cobertura e via fertirrigação, de acordo com os resultados das análises de solo e de folhas, a partir de recomendações de técnicos da Embrapa/Semi-Árido, visando otimizar o crescimento e desenvolvimento da planta.

### **3.3. Delineamento experimental**

Durante a segunda etapa da pesquisa, o pomar foi dividido em duas parcelas de 30 plantas cada: área do produtor (PR) e área da pesquisa (PE) (Figura 3.3). Os tratos culturais realizados foram os mesmos para ambas, à exceção da irrigação.

#### **3.3.1. Área do Produtor – PR**

A PR compreendeu uma parcela composta de cinco fileiras com seis plantas cada, totalizando 30 plantas. Nesta parcela, o manejo de água foi realizado pelo produtor, segundo orientações da empresa responsável pelo projeto de irrigação. Normalmente, um projeto é dimensionado para aplicação de uma lâmina máxima de evapotranspiração determinada por meio de um  $K_c$  fixo e igual a 0,75, independente da fase fenológica. Assim, com base em valores máximos médios de  $ET_o$  para a região, determinou-se a

lâmina de água a ser aplicada ou necessidade de irrigação bruta (NIB) e com base na vazão dos microaspersores determinou-se o tempo diário de irrigação. Ou seja, teoricamente, aplicou-se uma quantidade de água fixa durante todo o ciclo produtivo da cultura. Na prática isso não se verificou, uma vez que o sistema de irrigação apresentou grandes oscilações na vazão, que tenderam a aumentar na segunda fase da pesquisa, em decorrência do plantio de uma nova área com manga nas proximidades do pomar de goiabeira. Esta condição resultou na redução do tempo de irrigação do pomar de goiabeira quando comparado ao tempo de irrigação adotado durante a primeira etapa desta pesquisa. Foram observadas muitas dificuldades inerentes à condução de pesquisa em áreas de produtores. Diante disso, não foi possível obter o volume de água aplicado multiplicando-se a vazão do microaspersor pelo tempo de irrigação. Verificaram-se, em muitas ocasiões, grandes variações na vazão do sistema, ora vazões elevadas ora vazões baixas. Ademais, em alguns dias o sistema de irrigação ficou aberto durante toda a madrugada, resultando na aplicação de grandes quantidades de água.

A fim de contabilizar a água aplicada pelo sistema de irrigação foram instalados hidrômetros em três fileiras de plantas, tendo o volume de água aplicado por planta sido obtido pela média entre as leituras dos hidrômetros.

### 3.3.2. Área da pesquisa – PE

Ao lado da PR foram selecionadas 30 plantas (cinco fileiras com seis plantas) para compor a área da pesquisa - PE. Nesta parcela, a determinação da necessidade de irrigação líquida (NIL) foi adquirida com base no coeficiente de cultura ( $K_c$ ) de cada estágio fenológico, determinado na primeira etapa da pesquisa, e na  $E_{To}$  obtida a partir de dados de uma estação agrometeorológica convencional localizada a cerca de 30 km do pomar de goiabeira. Vale salientar, ainda, que a NIB foi calculada com base nos parâmetros hidráulicos do sistema de irrigação determinados em condições de campo, tais como: vazão ( $47 \text{ L.h}^{-1}$ ) e eficiência de aplicação ( $E_a = 94\%$ ). Utilizou-se, também, um emissor por planta cujo raio molhado era de 2,4m, inferior ao usado na área do produtor, que era de 2,8 m.

### 3.4. Instalações, instrumentos utilizados e coleta de dados

Na Figura 3.3 destacam-se as plantas que foram monitoradas durante esta segunda etapa (plantas A, B, C e D na área PE e plantas E, F, G e H na área do PR). Na Figura 3.3, observa-se também a localização da torre micrometeorológica (T), mostrada em detalhes na Figura 3.4, onde foram coletados os dados micrometeorológicos de superfície, descritos na Tabela 3.2. No solo, um fluxímetro foi instalado para medir o fluxo de calor no solo (G) a 0,02 m de profundidade na projeção da copa. Os sinais analógicos de todos os sensores foram medidos e armazenados em *datalogger* modelo CR23X, programado para realizar leituras a cada dez segundos e armazenar médias a cada 15 minutos.

Nas plantas D e G foram instaladas duas baterias de tensiômetros (Figura 3.5), distantes 0,70 m e 1,5 m em relação ao microaspersor, ao longo de seu raio de molhamento. Cada bateria tensiométrica foi constituída por cinco tensiômetros de mercúrio alinhados nas profundidades de 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,00 m, cujas leituras foram realizadas diariamente às 08:00h. Os tubos de acesso para os sensores de determinação da umidade do solo (*Profile Probe – PR1/6*, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, UK) foram instalados nas plantas C e H, alinhados. Em cada uma dessas plantas foram instalados sete tubos de acesso, sendo o primeiro localizado a 0,50 m do microaspersor e os outros distantes entre si de 0,20 m ao longo do raio molhado (Figura 3.6).

As medidas de umidade do solo foram realizadas por meio da sonda de perfil de umidade do solo PR1/6 da Delta T<sup>®</sup>, que mede a umidade volumétrica em diferentes profundidades no perfil do solo (Figura 3.6). Ela consiste de um instrumento de 25 mm de diâmetro, composto por seis pares de sensores eletrônicos, fixados nas profundidades de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,60 e 1,00 m ao longo do comprimento da sonda. No instante da leitura, o instrumento era inserido no tubo de acesso em fibra de vidro especialmente construído com paredes finas que maximizam a penetração do campo eletromagnético no solo. As leituras foram realizadas no mesmo horário e frequência das leituras tensiométricas, utilizando-se o medidor HH2, do mesmo fabricante da sonda. O sinal de saída das leituras da sonda era uma voltagem analógica ( $V_{out}$ ), que foi facilmente convertido em umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) por meio da equação de calibração generalizada para solo mineral, fornecida no manual do fabricante, mostrada a seguir:



$$\theta = -0,086 + 0,505V_{out} + 7,81V_{out}^2 - 32,46V_{out}^3 + 47,96V_{out}^4 \quad (1)$$

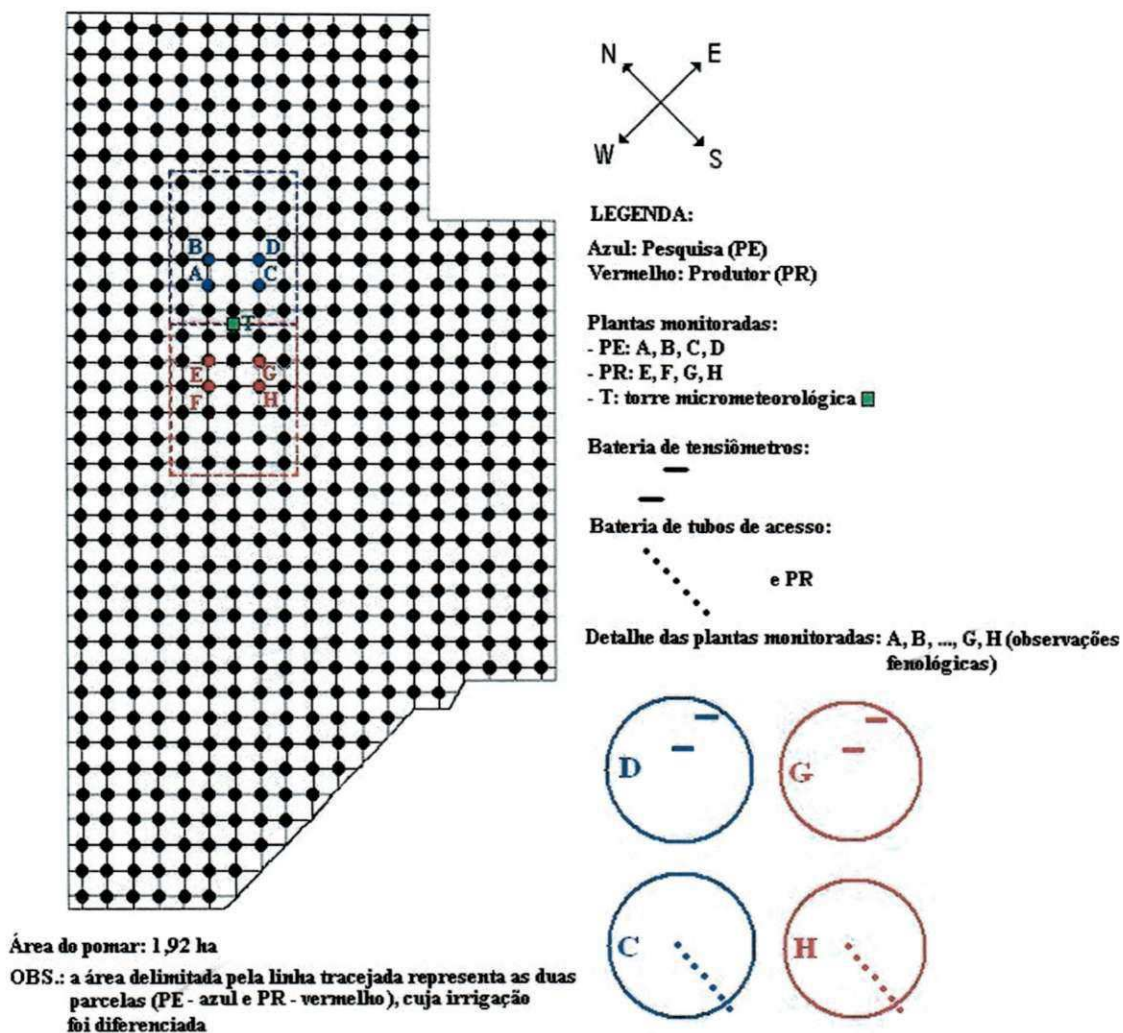


Figura 3.3. Croqui do pomar de goiabeira no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, com destaque para as plantas monitoradas e localização da torre micrometeorológica.

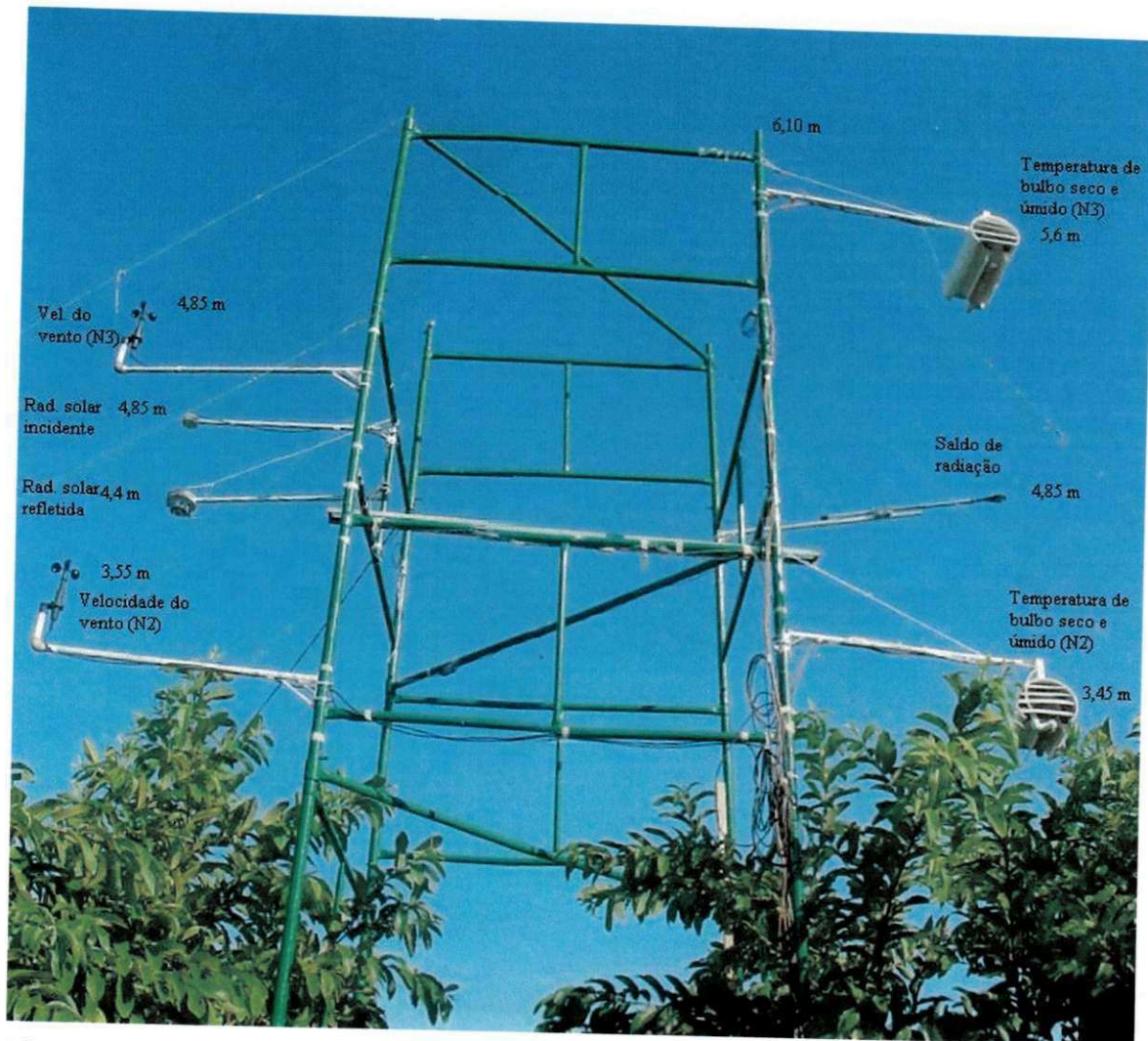


Figura 3.4. Torre micrometeorológica instalada no centro do pomar de goiabeira no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE.

Tabela 3.2. Descrição dos elementos micrometeorológicos e instrumentos usados em suas medidas no interior do pomar de goiabeira no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Sensor	Localização do sensor
Radiação solar incidente	$R_g$	$W.m^{-2}$	Piranômetro LI-200	Sobre o dossel
Radiação solar refletida	$R_r$	$W.m^{-2}$	Piranômetro Eppley	Sobre o dossel
Saldo de radiação	$R_n$	$W.m^{-2}$	Saldo radiômetro Rebs Q7	Sobre o dossel
Fluxo de calor no solo	$G$	$W.m^{-2}$	Micromet Instruments	No solo, 0,02 m
Temperatura do ar em bulbo seco	$T_s$	$^{\circ}C$	Termopares de cobre-constantan	Em 2 níveis Sobre o dossel
Temperatura do ar em bulbo úmido	$T_u$	$^{\circ}C$	Termopares de cobre-constantan	Em 2 níveis Sobre o dossel
Pressão atual de vapor	$e$	MPa	Psicrômetros com termopares de cobre-constantan	Em 2 níveis Sobre o dossel
Velocidade do vento	$V$	$m.s^{-1}$	Anemômetro de conchas Young	Em 2 níveis Sobre o dossel
Umidade do solo	$\theta$	$cm^3.cm^{-3}$	Soil moisture probe, PR1/6 (sonda de umidade do solo)	Perfil no solo
Potencial matricial do solo	$\psi_m$	cm de $H_2O$	Tensiômetros	Perfil no solo





Figura 3.5. Baterias de tensiômetros instaladas sob a copa da goiabeira.



Figura 3.6. Tubos de acesso para medida da umidade do solo sob a copa da goiabeira.



### 3.5. Variáveis analisadas na etapa II

A análise de ambas as parcelas experimentais (PR e PE) foi realizada em duas categorias distintas: consumo de água pelas plantas (evapotranspiração da cultura) e produção (produtividade e qualidade dos frutos).

O consumo hídrico da goiabeira foi determinado por meio de duas metodologias distintas:

- Balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB)
- Balanço hídrico no solo (BHS)

#### 3.5.1. Consumo de água pelas plantas

O balanço hídrico no solo (BHS) foi realizado para as duas parcelas experimentais (PR e PE), enquanto que o balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB) foi realizado para o pomar como um todo, uma vez que a torre micrometeorológica foi instalada no centro do pomar.

##### 3.5.1.1. Balanço de energia com base na razão de Bowen – BERB

O balanço de energia no sistema solo-planta-atmosfera é constituído dos fluxos verticais de calor latente (LE), calor sensível (H), calor no solo (G) e saldo de radiação (Rn), além de fluxos associados à absorção de calor no volume ocupado pela copa da planta (S) e da energia utilizada na fotossíntese (P), todos em  $W m^{-2}$ . Estes dois últimos termos têm sido negligenciados no cômputo do balanço de energia, bem como as advecções de calor sensível e de calor latente. Com isso, o balanço de energia reduz-se a:

$$Rn + LE + H + G = 0 \quad (2)$$

A determinação de cada um dos parâmetros dessa equação 2 foi realizada como descrita a seguir.

##### 3.5.1.1.1. Saldo de radiação – Rn

O saldo de radiação (Rn) foi medido por meio de um saldo radiômetro Rebs, modelo Q7, instalado a 4,85 m da superfície do solo, sobre a copa da goiabeira. Os valores

obtidos do saldo de radiação foram corrigidos com base na velocidade do vento ( $u$ ) medida com um anemômetro de conchas, instalado à mesma altura do saldo radiômetro. A correção foi realizada conforme recomendação do fabricante do saldo radiômetro, para valores positivos de  $Rn$  ( $Rn_c = Rn(1 + (0,066 \times 0,2 \times u)/(0,066 \times 0,2 \times u))$ ) e valores negativos ( $Rn_c = Rn(0,00174 \times u + 0,9975)$ ).

### 3.5.1.1.2. Fluxo de calor latente – $LE$

O fluxo de calor latente foi determinado por meio da seguinte equação, usando a razão de Bowen (1926) (Rosemberg *et al.*, 1983):

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (3)$$

onde,  $\beta$  é a razão de Bowen (adimensional) e  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ).

A razão de Bowen representa a partição de energia entre os fluxos de calor sensível ( $H$ ) e de calor latente ( $LE$ ). Para sua obtenção, foram realizadas medições dos gradientes verticais de temperatura do ar ( $\Delta T/\Delta Z$ ) e da pressão parcial do vapor d'água ( $\Delta e/\Delta Z$ ). Assim, a razão de Bowen ( $\beta$ ) pode ser obtida por:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{-\rho c_p K_h \frac{dT}{dZ}}{-\rho \lambda K_w \frac{dq}{dZ}} = \frac{P_o c_p K_h \Delta T}{\lambda 0,622 K_w \Delta e} = \gamma \frac{K_h \Delta T}{K_w \Delta e} \quad (4)$$

onde  $H$  e  $LE$  são os fluxos de calor sensível e latente ( $W m^{-2}$ ), respectivamente;  $\rho$  é a densidade do ar;  $C_p$  é o calor específico do ar à pressão constante ( $J.kg^{-1} ^\circ C^{-1}$ );  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água ( $J kg^{-1}$ ) à temperatura do ar ( $T, ^\circ C$ );  $\gamma$  é o fator psicrométrico ( $k Pa^\circ C^{-1}$ );  $q$  é a umidade específica;  $P_o$  a pressão atmosférica (kPa);  $e$  é a pressão parcial do vapor d'água (kPa) e  $K_h$  e  $K_w$  são os coeficientes de difusão turbulenta de calor sensível e de vapor d'água, respectivamente.

Na ausência de advecção de calor sensível (regional ou local) e em condições de neutralidade atmosférica,  $K_h = K_w$ , o que resulta numa simplificação da equação (4), como segue:

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (5)$$

Visando corrigir efeitos advectivos de calor sensível e de calor latente em relação ao volume de controle, Verma *et al.* (1978) observaram que  $K_h$  e  $K_w$  eram diferentes e obtiveram uma expressão que os relacionasse sempre que  $-0,8 > \Delta T/\Delta e > -0,1$ , resultando em:

$$\frac{K_h}{K_w} = 2,95 + 3,72 \left( \frac{\Delta T}{\Delta e} \right) + 1,72 \left( \frac{\Delta T}{\Delta e} \right)^2 \quad (6)$$

A obtenção do valor da razão de Bowen corrigida para efeitos advectivos ( $\beta_c$ ) acontece substituindo-se a equação (6) na equação (5), resultando em:

$$\beta_c = \gamma \left[ 2,95 + 3,72 \left( \frac{\Delta T}{\Delta e} \right) + 1,72 \left( \frac{\Delta T}{\Delta e} \right)^2 \right] \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (7)$$

Além da correção dos valores de  $\beta$  utilizando a proposta de Verma *et al.* (1978), foram eliminados e/ou substituídos os valores duvidosos de  $\beta_c$  segundo recomendações de Unland *et al.* (1996). Isto, em geral, aconteceu quando  $\beta_c$  aproximou-se de  $-1$ , resultando em valores incorretos de  $LE$ . Nestes casos, o valor eliminado foi substituído pela média entre o valor correto imediatamente anterior e posterior.

Finalmente, com os valores corretos da razão de Bowen, foram encontrados os valores do fluxo de calor latente à superfície ( $LE$ ), que representa a energia por unidade de área e por unidade de tempo. Para transformar  $LE$  em unidade de lâmina evaporada ou evapotranspirada em um dado intervalo de tempo, ou seja, em evapotranspiração da cultura (ETc), dividiu-se  $LE$  pelo calor latente de vaporização ( $L$ ) e multiplicou-se o resultado pelo intervalo de tempo em que foram realizadas as medições correspondentes ao saldo de radiação, gradientes de temperatura e de vapor d'água e do fluxo de calor no solo.

#### 3.5.1.1.3. Fluxo de calor sensível – H

O fluxo de calor sensível corresponde à energia disponível à superfície envolvida no aquecimento e resfriamento da superfície e da atmosfera. Na utilização do balanço de energia com base na razão de Bowen,  $H$  foi obtido pela seguinte equação:

$$Rn + LE + H + G = 0 \Rightarrow H = -(Rn + LE + G) \quad (8)$$

#### 3.5.1.1.4. Fluxo de calor no solo – G

O fluxo de calor no solo corresponde à quantidade de energia utilizada para o armazenamento de calor no solo foi medido por meio de um fluxímetro da marca Rebs, instalado sob a copa da goiabeira, na área molhada, a 0,02 m de profundidade.

#### 3.5.1.1.5. Relação entre os componentes do balanço de energia

Foram determinadas as relações entre o saldo de radiação disponível ( $Rn$ ) e os outros componentes do balanço de energia ( $LE$ ,  $H$  e  $G$ ). Para a relação  $LE/Rn$ , foi utilizada a proposta de Field *et al.* (1992), citados por Crago & Brutsaert (1996), na qual são utilizados os valores de  $Rn$ ,  $LE$  e  $H$  maiores ou iguais a  $9 \text{ W.m}^{-2}$ .

#### 3.5.1.1.6. Erros do balanço de energia com base na razão de Bowen

Para se quantificar os erros instrumentais associados a tal método, utilizou-se a proposta de Fuchs & Tanner (1970), aprimorada por Angus & Watts (1984), em que o erro relativo associado ao cálculo de  $LE$  ( $\varepsilon_r(LE)$ ) é obtido segundo a expressão:

$$\varepsilon_r(LE) = \frac{\delta LE}{LE} = \frac{\delta Rn + \delta G}{Rn - G} + \frac{\delta \beta}{1 + \beta + \delta \beta} \quad (9)$$

onde  $\varepsilon_r(LE) = \delta LE/LE$  é o erro relativo associado ao cálculo do fluxo de calor latente.  $\delta Rn$  corresponde ao erro do instrumento usado para determinar o saldo de radiação, igual a 0,04 (4%) e  $\delta G$ , é o erro instrumental na determinação de  $G$ , igual a 0,20 (20%) em virtude da variabilidade das observações e da heterogeneidade do terreno (Angus & Watts, 1984);  $\delta \beta$  corresponde ao erro absoluto da razão de Bowen, obtido multiplicando-se o valor da razão de Bowen pelo erro relativo ao cálculo da mesma, que foi obtido segundo a equação:

$$\varepsilon_r(\beta) = \frac{\delta \beta}{\beta} = (1 + \beta) \left| \frac{\delta \Delta T_u}{\Delta T_u} + \frac{\delta \Delta T_s}{\Delta T_s} \right| \quad (10)$$

em que  $\delta \Delta T_u$  e  $\delta \Delta T_s$  são os erros prováveis relativos às medidas das temperaturas dos bulbos úmido e seco, respectivamente, considerados iguais a  $0,05^\circ\text{C}$  e  $0,02^\circ\text{C}$  (Angus & Watts, 1984).

### 3.5.1.2. Balanço hídrico no solo – BHS

O método do balanço hídrico no solo baseia-se no princípio de conservação da massa. De acordo com Libardi (1995), este método avalia, em determinado período de tempo, a variação no armazenamento de água no solo por meio da contabilização da precipitação pluviométrica, irrigação, drenagem, escoamento superficial e evapotranspiração.

A equação geral do balanço de água no solo é dada por:

$$ET_c = P_e + I + A_c - D_p \pm \Delta W - R \quad (11)$$

onde  $ET_c$  é a evapotranspiração real da cultura;  $P_e$  é a precipitação pluviométrica efetiva;  $I$  é a irrigação;  $A_c$  é a ascensão capilar (positiva) e  $D_p$  é a drenagem profunda (negativa);  $\Delta W$  é a variação da água disponível no solo e  $R$  é o escoamento superficial. Todos os componentes desta equação foram expressos em mm.

O balanço hídrico foi realizado para um volume de solo delimitado pela área de molhamento da planta, igual a 22,9 m<sup>2</sup> na área do produtor (PR) e 18,1 m<sup>2</sup> na área da pesquisa (PE) e, pela profundidade efetiva do sistema radicular da goiabeira, considerada igual a 1,0 m (Ferreira, 2004).

A precipitação pluviométrica ( $P$ ) foi medida por meio de um tele-pluviômetro instalado na área em estudo, sendo corrigida para precipitação pluviométrica efetiva ( $P_e$ ) por meio da metodologia proposta por Jensen *et al.* (1990). A irrigação ( $I$ ) foi determinada para cada um dos tratamentos (PR e PE) por meio de observações realizadas em hidrômetros. Foram utilizadas médias de três hidrômetros para cada um dos tratamentos. O escoamento superficial ( $R$ ) foi considerado nulo, por tratar-se de um solo com textura arenosa e área com declive mínimo.

A drenagem profunda ( $D_p$ ) e/ou ascensão capilar ( $A_c$ ) têm sido determinadas por diversos pesquisadores, dentre eles, Reichardt & Timm (2004), com base na equação de Darcy, que possibilita a determinação do movimento de água no solo, segundo a expressão:

$$D_p / A_c = - \left[ K(\theta) \frac{\delta\psi}{\delta Z} \right] \quad (12)$$

onde  $D_p/A_c$  é a drenagem profunda (fluxo descendente)/ascensão capilar (fluxo ascendente) de água no perfil do solo;  $K(\theta)$  a condutividade hidráulica do solo;  $\delta\psi$  é a variação do potencial total de água no solo;  $\delta Z$  é a espessura da camada do solo estudada e  $\delta\psi/\delta Z$  é o gradiente de potencial.

O fluxo de água  $D_p/A_c$  representa a quantidade de água que passa por unidade de área de solo na unidade de tempo, expressa em  $\text{cm h}^{-1}$ . O gradiente  $\delta\psi/\delta Z$  representa a variação de energia da água do solo em relação à distância  $Z$  (adimensional). Esse gradiente é responsável pelo movimento de água no solo.  $K(\theta)$  é um coeficiente de proporcionalidade entre o fluxo e o gradiente, ou seja, a condutividade hidráulica do solo (propriedade do solo que descreve sua capacidade em transmitir água). Portanto,  $K(\theta)$  é função da umidade do solo e seu valor máximo é constante, alcançado quando o solo está saturado (Reichardt & Timm, 2004), denominado condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ).

Pela equação (12), considerando apenas o fluxo vertical, o gradiente  $\delta\psi/\delta Z$  pode ser aproximado por uma diferença finita  $\Delta\psi/\Delta Z$  entre o nível inicial (i) e final (f) da camada de solo considerada, isto é,  $(\psi_f - \psi_i)/(Z_f - Z_i)$ . Assim, rearranjando-se a equação (12) tem-se:

$$D_p / A_c = -K(\theta) \left[ \frac{\psi_f - \psi_i}{L} \right] \quad (13)$$

onde  $L = Z_f - Z_i$  e  $\psi_f - \psi_i$  são os potenciais hidráulicos nos níveis  $Z_f$  e  $Z_i$ , respectivamente.

Os procedimentos para a determinação do potencial hidráulico do solo dependem do tipo de equipamento utilizado no monitoramento do conteúdo de água no solo. Assim, como foram utilizados dois tipos de equipamentos, tensiômetro e sonda de TDR, procedeu-se como segue.

- Tensiometria de mercúrio: o potencial hidráulico foi calculado pela soma do potencial gravitacional e do potencial matricial, ou seja:

$$\psi = \psi_m + \psi_g \quad (14)$$

onde  $\psi$  é o potencial total;  $\psi_m$  é o potencial matricial e  $\psi_g$  é o potencial gravitacional, todos em kPa. O potencial matricial foi determinado por meio da equação a seguir:

$$\psi_m = (-12,6h_{Hg} + h_c + h_p).0,098088 \quad (15)$$

em que  $h_{Hg}$  corresponde à altura da coluna de mercúrio, a partir do nível da cuba;  $h_c$  é a altura do nível do mercúrio na cuba em relação à superfície do solo;  $h_p$  é a profundidade da cápsula porosa, todos medidos em cm; e o resultado  $\psi_m$  é dado em kPa.

- Sonda de TDR: considerando que este tipo de sonda fornece a leitura da umidade do solo, deve-se usar a equação de retenção de água do solo.

As curvas de retenção de água no solo foram determinadas no Laboratório de Análise de Solos da Embrapa Semi-Árido conforme metodologia proposta por Centurion *et al.* (1997). Com os resultados obtidos, utilizou-se o modelo proposto por Van Genuchten (1980) para obtenção dos coeficientes de ajuste da curva de retenção de umidade correspondente a cada camada de solo, pode-se obter o potencial hidráulico, como segue:

$$\psi_m = \frac{\left[ \left( \frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad (16)$$

em que  $\theta$  é a umidade volumétrica;  $\theta_s$  é a umidade volumétrica no momento da saturação;  $\theta_r$  é a umidade volumétrica residual à 1500 kPa, expressas em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $\psi_m$  corresponde ao potencial matricial do solo (kPa); e  $\alpha$ ,  $n$  e  $m$  são constantes empíricas que afetam a forma da curva de retenção.

Considerando que  $\theta_s \cong 1 - (Dg/Dp)$ , sendo  $Dg$  a densidade global, em  $\text{g.cm}^{-3}$  e  $Dp$  a densidade de partículas, em  $\text{g.cm}^{-3}$  e  $\theta_r$  a umidade volumétrica à tensão de 1500 kPa, de maneira que, determinados os outros parâmetros da curva de retenção, utilizou-se o método dos mínimos quadrados para obtenção da menor soma do quadrado do resíduo.

A condutividade hidráulica do solo  $K(\theta)$  foi obtida por meio da equação proposta por van Genuchten (1980):

$$K(\theta) = K_o Se^l \left[ 1 - \left( 1 - Se^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (17)$$

onde  $K_o$  é a condutividade hidráulica saturada,  $l$  é um parâmetro empírico, igual a 0,5 (Mualen, 1976);  $m = 1 - \frac{1}{n}$ ;  $Se$  é a saturação efetiva;  $\theta$  é a umidade volumétrica;  $\theta_s$  é a umidade volumétrica no momento da saturação;  $\theta_r$  é a umidade volumétrica residual à 1500 kPa, todas expressas em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (18)$$

O armazenamento de água no solo ( $W_t$ ), em mm, durante um dado intervalo de tempo foi calculado usando-se a seguinte equação:

$$W_t = \sum_{i=0}^t \left[ \sum_{i=1}^5 W_i \right] = 10 \sum (\theta_i \cdot P_i) \quad (19)$$

onde  $W_t$  é a lâmina total de água armazenada no perfil do solo, em mm;  $W_i$  é a lâmina de água armazenada na camada de solo  $i$ ;  $\theta_i$  é a umidade na camada de solo  $i$ , em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $P_i$  é a profundidade da camada de solo (cm). Durante o intervalo de tempo considerado, a variação do armazenamento ( $\Delta W$ ) no perfil do solo molhado foi obtida por meio da seguinte expressão:

$$\Delta W_t = W_{t(t)} - W_{t(t-1)} \quad (20)$$

em que  $\Delta W_t$  é a variação do armazenamento de água no solo, no período de tempo considerado, em mm;  $t$  é o intervalo de tempo, em dia;  $W_{t(t)}$  e  $W_{t(t-1)}$  são as lâminas totais de água remanescentes no perfil do solo nos instantes  $t$  e  $t-1$ , em mm, respectivamente.

Assim, após a determinação de todos os componentes da equação do balanço hídrico no solo (BHS), utilizando-se apenas os dados de umidade volumétrica do solo determinada pela sonda de umidade PR1/6 e a curva de retenção de água no solo, obteve-se por diferença, a evapotranspiração da cultura da goiabeira, conforme equação 11, para a área da pesquisa (ETc\_BHS\_PE) e para a área do produtor (ETc\_BHS\_PR).



## 3.5.2. Coeficiente de cultura – Kc

O coeficiente de cultura (Kc) foi determinado segundo recomendação de Doonrembos & Kassam (1979), em que:

$$Kc = \frac{ETc}{ETo} \quad (21)$$

onde ETc é a evapotranspiração da goiabeira (mm.dia<sup>-1</sup>) e a ETo é evapotranspiração de referência (mm.dia<sup>-1</sup>).

A evapotranspiração de referência (ETo), necessária ao cômputo do Kc, foi estimada pelo método FAO-Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), segundo a equação 22, com base em dados de uma estação meteorológica convencional:

$$ETo = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (22)$$

onde Rn é o saldo de radiação (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), estimado segundo Pereira *et al.* (1997), em função da radiação solar global, G é o fluxo de calor no solo (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>), admitido igual a zero para 24 horas, T corresponde a temperatura média diária do ar a 2 m de altura (°C), u<sub>2</sub> é a velocidade do vento a 2 m de altura (ms<sup>-1</sup>), e<sub>s</sub> é a pressão de saturação de vapor (kPa), e é a pressão atual de vapor (kPa), (e<sub>s</sub> - e) é o déficit de pressão de vapor (kPa), Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor (kPa °C<sup>-1</sup>), obtida segundo a equação 23 e γ é a constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>), conforme expressão 24.

$$\Delta = \frac{(4098e_s)}{(T + 237,3)^2} \quad (23)$$

$$\gamma = 0,0016286 \frac{P_o}{L} \quad (24)$$

na qual L é o calor latente de vaporização da água à temperatura ambiente (2,45 MJ kg<sup>-1</sup>) e P<sub>o</sub> é a pressão atmosférica.

### 3.5.3. Produtividade e qualidade de frutos

Nas duas parcelas estudadas (PR e PE) foi realizada a avaliação da produção, no que se refere à produtividade e qualidade de frutos. Neste sentido, por ocasião da colheita, toda produção de ambos os tratamentos foi quantificada, por meio da contabilidade da massa do total de frutos colhidos por planta.

A análise da qualidade mercadológica dos frutos colhidos foi realizada por meio da análise dos frutos derivados da segunda colheita ocorrida em cada tratamento (PR e PE). Nesta ocasião, foram colhidos frutos em dois estádios diferentes de maturação segundo a escala de cores (Brasil, 2001): 3 – verde-amarelo e 5 – amarelo. Após a colheita, os frutos foram acondicionados em caixas de papelão de 3,5 kg, em camada única (Figura 3.7) e posteriormente conduzidos ao Laboratório de Pós-colheita da Embrapa/Semi-Árido, onde foram analisados a fim de se determinar os indicadores de qualidade para a goiaba Paluma. Assim, foram determinados os atributos químicos: teor de sólidos solúveis totais (SST), acidez total titulável (ATT), relação SST/ATT e pH; peso médio do fruto (Peso e físicos: cor (1-totalmente verde, 2-verde claro, 3-verde amarelo, 4-mate, 5-amarela), classe ou calibre (de 5 a 6 cm, de 6 a 7 cm, de 7 a 8 cm, de 8 a 9 cm, de 9 a 10 cm e maior que 10 cm), defeitos leves (lesão cicatrizada, dano superficial, umbigo mal-formado, deformação, amassado e mancha), defeitos graves (imaturo, dano profundo, podridão e alteração fisiológica). As caixas foram divididas em dois tratamentos (PR e PE), sendo quatro blocos para cada. Após a determinação dos descritores em laboratório, procedeu-se a análise estatística, aplicando-se o teste F.



Figura 3.7. Amostra de frutos de goiaba, acondicionada em caixa de papelão de 3,5 kg, colhida em dois estádios diferentes de maturação (E3 e E5) nos tratamentos de irrigação na área da pesquisa (PE) e do produtor (PR), no Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina – PE.

## **4.1. Primeira etapa**

### **4.1.1. Fenologia da goiabeira**

O ciclo de produção da goiabeira foi dividido em sete estádios fenológicos distintos: F1 – período de brotação; F2 – crescimento vegetativo; F3 – floração; F4 – queda fisiológica de frutos imaturos; F5 – primeira fase de crescimento de frutos; F6 – segunda fase de crescimento de frutos; F7 – terceira fase de crescimento de frutos, maturação e colheita. Durante a primeira etapa da pesquisa, as observações foram iniciadas na poda de frutificação, que ocorreu no dia 10/05/2000, quando a planta ainda estava na fase de maturação dos frutos da safra anterior, ou seja, no pomar de goiabeira aconteceu o que se chama de poda sobre poda. As fases fenológicas da cultura foram definidas de acordo com observações feitas nas plantas do pomar. Deste modo, foram caracterizadas as sete fases fenológicas (F1, F2,..., F7) descritas acima, cujos períodos e durações são mostrados na Tabela 4.1. O ciclo de produção da goiabeira foi dividido em sete estágios fenológicos distintos: F1 – período de brotação; F2 – crescimento vegetativo; F3 – floração; F4 – queda fisiológica de frutos imaturos; F5 – primeira fase de crescimento de frutos; F6 – segunda fase de crescimento de frutos; F7 – terceira fase de crescimento de frutos, maturação e colheita.

Tabela 4.1. Fases fenológicas da goiabeira (*Psidium guajava* L.), cultivar Paluma, para poda de frutificação realizada no dia 10/05/2000, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Fase	Estádio fenológico	Período	Número de dias
F1	Brotação	10 – 23/05/2000	14
F2	Crescimento vegetativo	24/05 – 04/07/2000	42
F3	Floração	05 – 27/07/2000	23
F4	Queda fisiológica de frutos imaturos	28/07 - 06/08/2000	10
F5	Primeira fase do crescimento dos frutos	07/08 – 07/09/2000	32
F6	Segunda fase do crescimento dos frutos	08/09 – 20/10/2000	43
F7	Terceira fase do crescimento dos frutos, maturação e colheita	21/10 – 30/11/2000	41
Total			205

O período entre a poda de frutificação e a colheita foi de 205 dias, superior à média dos pomares da região, que varia entre 180 e 190 dias (Gonzaga Neto & Soares, 1994). Esse resultado deveu-se, possivelmente, à condição em que foi realizada a poda, pois como a cultura ainda tinha frutos da safra anterior, pode ter ocorrido um atraso na brotação, ou às baixas temperaturas observadas durante o período, principalmente nos meses de junho e julho, fase em que a cultura estava em pleno crescimento vegetativo. Segundo Gonzaga Neto & Soares (1994), apesar da goiabeira ser uma cultura tipicamente tropical, pode apresentar falhas na brotação nos meses de temperatura mais amena. Maiores detalhes sobre a caracterização de cada fase fenológica são mostrados a seguir, nas análises dos dados referentes à segunda etapa desta pesquisa.

#### 4.1.2. Evapotranspiração da cultura obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen - $ET_c_{BERB}$

Na Figura 4.1 é apresentado o comportamento estacional da evapotranspiração diária ao longo do ciclo produtivo da cultura, obtida pelo método do BERB, para períodos

de cinco dias. Pode-se perceber que a evapotranspiração foi bastante variável ao longo de todo ciclo fenológico, de um valor mínimo de  $2,90 \text{ mm.dia}^{-1}$  na fase de crescimento vegetativo até um máximo de  $6,33 \text{ mm dia}^{-1}$  ao final da terceira fase de crescimento de frutos, maturação e colheita. Percebe-se, inicialmente, significativa variabilidade da evapotranspiração da cultura ( $ETc\_BERB$ ); mas que posteriormente, verifica-se uma tendência de aumento da  $ETc\_BERB$  com o tempo, decorrente da elevação da demanda evaporativa da atmosfera, condicionada, dentre outros fatores, pelo aumento da radiação solar global (dados não mostrados).

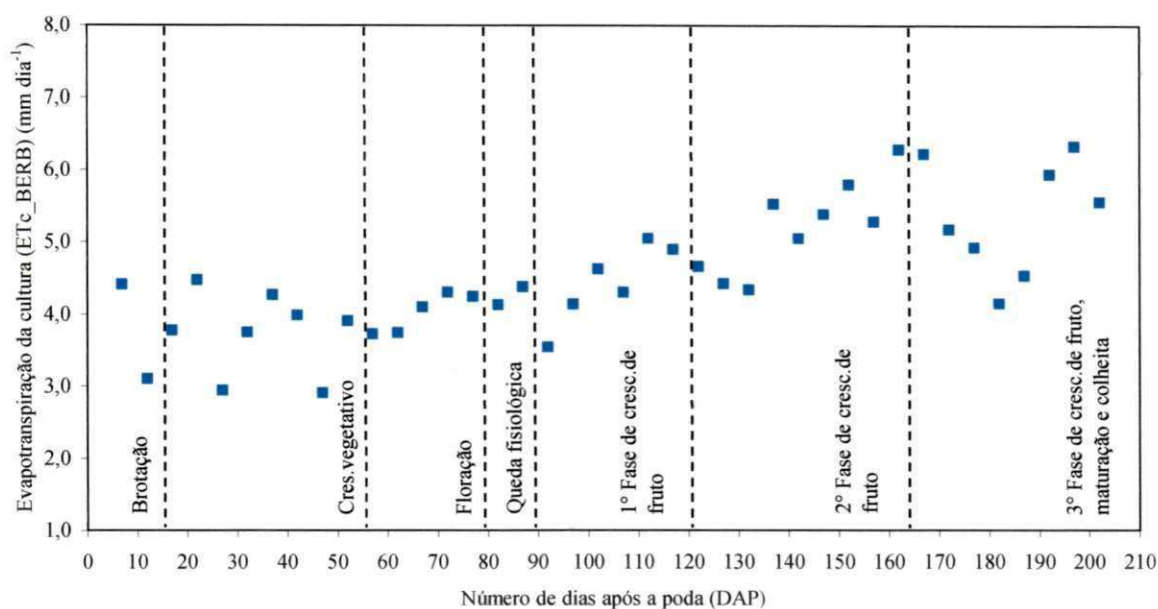


Figura 4.1. Evapotranspiração da goiabeira cultivar Paluma (média de cinco dias), determinada pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE. Data da poda: 10/05/2000.

#### 4.1.3. Coeficiente de Cultura

Os valores do coeficiente de cultura ( $Kc\_BERB$ ) da goiabeira irrigada foram calculados a partir de médias de cada cinco dias dos valores da evapotranspiração de referência ( $ETo$ ), determinados por meio do método FAO-Penman-Monteith e



ETc\_BERB. Esses valores são apresentados na Figura 4.2, onde se verifica grande variabilidade dos dados de Kc.

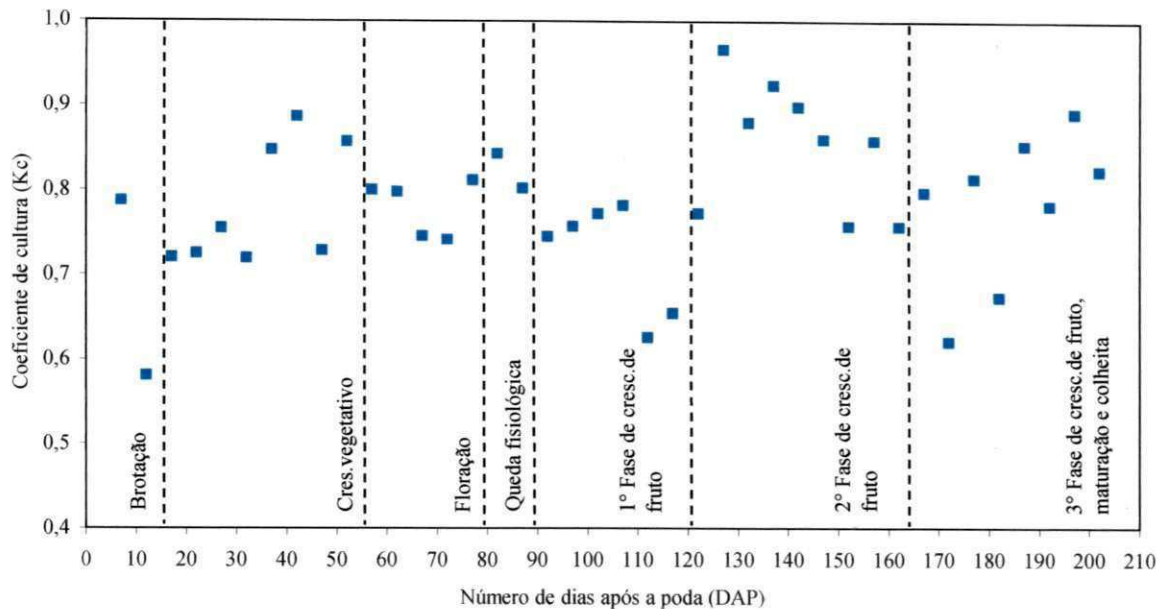


Figura 4.2. Variação do Kc (média de cinco dias) do pomar de goiabeira, Paluma, para as sete fases de desenvolvimento da cultura, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE. Data da poda: 10/05/2000.

Na Tabela 4.2 e Figura 4.3 é apresentado o comportamento médio do coeficiente de cultura (Kc\_BERB), para cada fase fenológica da cultura. Observa-se um comportamento crescente do Kc da Fase 1 para a Fase 4, com o Kc passando de 0,69 para 0,82. Na fase seguinte, verificou-se uma redução no valor do Kc, que atingiu um valor médio de 0,71, mas que aumentou para 0,84 na fase 6, reduzindo-se novamente para 0,78 durante a fase 7. O valor médio de Kc\_BERB observado durante todo o ciclo produtivo foi de 0,77, valor este um pouco superior que o utilizado pela grande maioria das empresas responsáveis pela elaboração de projetos de irrigação na região do Submédio São Francisco, que, em geral, usam Kc constante e igual a 0,75.

Tabela 4.2. Valores da evapotranspiração da cultura (ETc\_BERB), evapotranspiração de referência ETo (FAO-PM) e do coeficiente de cultura (Kc), durante um ciclo produtivo, para a goiabeira, cultivar Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE. Data da poda: 10/05/2000.

Fases fenológicas	ETc_BERB	ETo (FAO-PM)	Kc_BERB
F1	3,76	5,47	0,69
F2	3,75	4,83	0,78
F3	4,03	5,18	0,78
F4	4,26	5,19	0,82
F5	4,43	6,21	0,71
F6	5,19	6,17	0,84
F7	5,35	6,89	0,78
Média	4,39	5,70	0,77

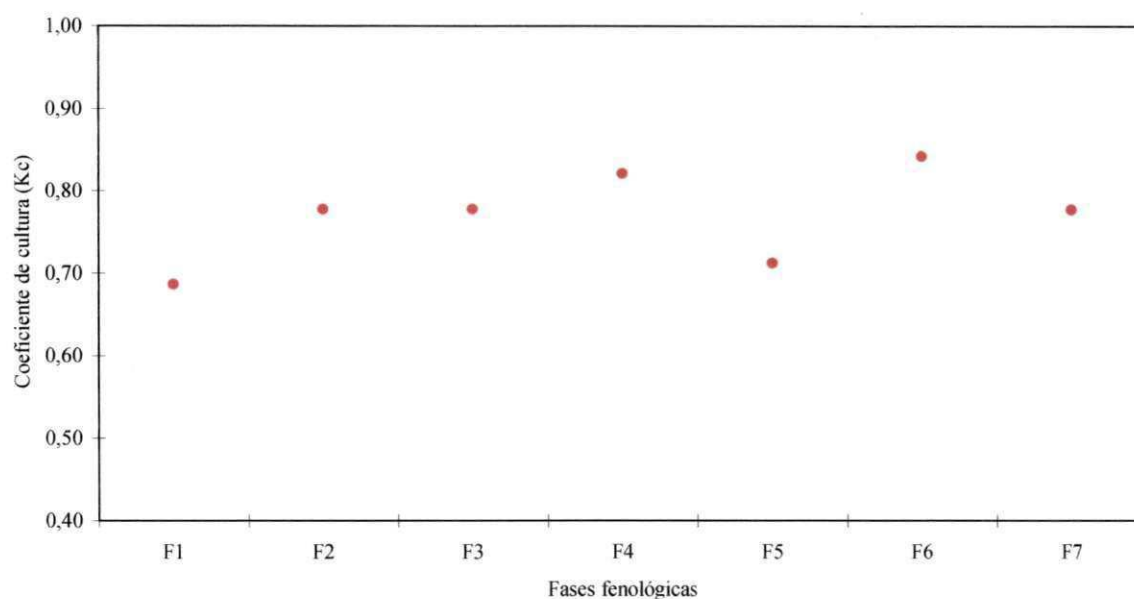


Figura 4.3. Variação do coeficiente de cultura médio (Kc) por fase fenológica do ciclo produtivo da goiabeira irrigada, cultivar Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE. Data da poda: 10/05/2000.



## 4.2. Segunda etapa

### 4.2.1. Fenologia da goiabeira

A poda de frutificação referente à segunda etapa da pesquisa ocorreu durante sete dias, entre 21 e 27 de outubro de 2002. As fases fenológicas do ciclo produtivo da goiabeira Paluma foram definidas de acordo com observações feitas nas plantas do pomar. As sete fases fenológicas principais foram caracterizadas de modo similar ao da primeira etapa desta pesquisa. O ciclo produtivo teve duração de 179 dias, período em torno da média dos pomares da região, que segundo Gonzaga Neto & Soares (1994), oscila de 180 a 190 dias. Esse número de dias, bem inferior ao ocorrido na primeira etapa da pesquisa, que foi de 205 dias, é devido principalmente, à época em que foi realizada a poda de frutificação (final de outubro), quando se iniciam os meses mais quentes da região. Assim, com condições mais favoráveis em função da elevada quantidade de energia solar e disponibilidade de água no solo suprida pela irrigação, as plantas cresceram mais rápida e abundantemente, que quando podadas nos meses mais frios.

Na Tabela 4.3 são mostradas as fases fenológicas do ciclo de produção da goiaba, com suas respectivas durações. Pode-se verificar, durante a segunda etapa da pesquisa, que as fases apresentaram-se mais curtas, exceto as fases de queda fisiológica (F4) e a terceira fase de crescimento de frutos, maturação e colheita (F7) que, se mostraram mais longas. Estes períodos maiores devem-se ao fato de que os meses de março e abril foram mais chuvosos e, como conseqüência, a maior nebulosidade pode ter contribuído para o aumento no número de dias para que os frutos alcançassem a maturação, condicionando um período de colheita bastante extenso (58 dias). Na Figura 4.4 (a, b, ..., h) estão ilustradas as distintas fases fenológicas da goiabeira Paluma. O número médio de dias decorridos entre a poda de frutificação e a brotação das gemas vegetativas (Figura 4.4a) foi de 15 dias; seguido por um período de 17 dias quando teve início a fase de crescimento vegetativo (Figura 4.4b). Esta fase de crescimento vegetativo continuou intensa durante todo período produtivo. Na seqüência, ocorreu o estágio de floração (Figura 4.4c), com duração de oito dias, totalizando 40 dias após a poda (DAP). A goiabeira apresentou, caracteristicamente, uma fase de queda fisiológica de frutos imaturos (Figura 4.4d), que durou 17 dias, implicando em um índice de abortamento da ordem de 86%. Após essa fase, os frutos que “pegaram”, iniciaram sua primeira fase de crescimento (Figura 4.4e), entre 58 e 75 DAP; na seqüência,

os frutos continuaram a crescer, caracterizando a segunda fase de crescimento (Figura 4.4f), que durou 34 dias e, por fim, a fase final de crescimento dos frutos, maturação (Figura 4.4g) e colheita (Figura 4.4h), transcorrida num período de 69 dias, totalizando 179 DAP ao final da colheita.

Tabela 4.3. Fases fenológicas da goiabeira Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE. Data da poda: 27/10/2002.

Fase	Estádio fenológico	Período	No. de dias
F1	Brotação	28/10 – 10/11/2002	15
F2	Crescimento vegetativo	11 – 27/11/2002	17
F3	Floração	28/11 – 05/12/2002	8
F4	Queda fisiológica de frutos imaturos	06 – 22/12/2002	17
F5	Primeira fase de crescimento de frutos	23/12/2002 – 10/01/2003	19
F6	Segunda fase de crescimento de frutos	11/01 – 13/02/2003	34
F7	Terceira fase de crescimento de frutos, maturação e colheita	14/02 – 23/04/2003	69
Total			179

a)



b)



Figura 4.4. Ilustrações características das fases fenológicas da goiabeira Paluma correspondentes às fases de brotação (a - F1) e de crescimento vegetativo (b - F2), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



c)



d)



Figura 4.4. (continuação) Ilustrações características das fases fenológicas da goiabeira Paluma correspondentes às fases de floração (c - F3) e de queda fisiológica dos frutos imaturos (d - F4), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



e)



f)



Figura 4.4. (continuação) Ilustrações características das fases fenológicas da goiabeira Paluma correspondentes à primeira fase de crescimento do fruto (e - F5) e segunda fase de crescimento dos frutos (f - F6), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



g)



h)



Figura 4.4. (continuação) Ilustrações características das fases fenológicas da goiabeira Paluma correspondentes à fase sete (F7): terceira fase de crescimento do fruto e maturação (g) e colheita (h), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

A produção das plantas está relacionada aos índices de florescimento e de frutificação, sendo estes função da densidade de plantio, densidade de flores, índice de pegamento dos frutos e tamanho dos frutos. De um modo geral, para todas as espécies, variedades e condições climáticas, a porcentagem de flores que vingam numa planta, diminui com a densidade de flores; e o tamanho do fruto é inversamente relacionado à densidade de frutos (Forshey & Elfving, 1977; citados por Corrêa *et al.*, 2002). O índice de pegamento de frutos pode ser usado como um indicativo precoce da produção e tem sido incorporado a modelos matemáticos para predição da produtividade e tamanho de frutos, com o objetivo de gerar, com antecedência, informações úteis para a cotação de preços, preparativos logísticos para comercialização da safra (Bustan *et al.*, 1999; citados por Corrêa *et al.*, 2002). Assim, como já verificado em outras fruteiras, durante o período de 06 a 22/12/2002 (F4), verificou-se intensa queda de frutos imaturos em todo pomar de goiabeira (Figura 4.4d). Essa queda é uma característica da própria cultura, que por si só, realiza uma seleção natural dos frutos para que estes possam atingir a maturação, já que o número de botões florais é muito grande e a planta não suportaria o peso dos frutos, podendo implicar na quebra de galhos e como consequência uma porcentagem elevada de frutos com tamanho pequeno.

O índice de abortamento elevado foi observado nas plantas dos dois tratamentos: pesquisa (PE) e produtor (PR). Em cada um dos tratamentos foram observados quatro ramos, nas posições norte, sul, leste e oeste, em quatro plantas, cujos resultados mostraram que para as quatro posições de ramos, as plantas do tratamento PE apresentaram índices médios de abortamento superiores aos das plantas do tratamento PR, que em média foram iguais a 80,3% (índice de pegamento 19,7%) e 61,7% (índice de pegamento 38,3%), respectivamente.

Singh & Sehgal (1968) encontraram valores de índice de abortamento igual a 88,8% para a cultivar de goiaba 'Seedless'. Corrêa *et al.* (2002) estudando o índice de pegamento em frutos de três cultivares de goiabeira no município de Taquaritinga – SP, obtiveram valores de 32,3% para a cultivar Pedro Sato; 12,2% para a Rica e 18,7% para a Paluma. Assim, os índices de pegamento encontrados nesta pesquisa para goiabeira estão dentro de limites reportados na literatura, sendo que no tratamento PR, verificou-se um elevado índice de pegamento, propiciando, a princípio, a obtenção de produtividade mais elevada em comparação ao tratamento PE.

Nas mesmas plantas em que foram realizadas as observações do índice de abortamento/pegamento, também se acompanhou o crescimento dos frutos. A Figura 4.5 apresenta dados médios referentes às medidas de crescimento dos frutos da goiaba, Paluma, a partir do estabelecimento do pegamento. Foram realizadas medidas de comprimento (C) e diâmetro (D) dos frutos. Pode-se observar que, inicialmente, ocorreu um rápido incremento do comprimento e diâmetro (1ª Fase de Crescimento de Fruto - 1ª FCF, F5); seguido por um período de mudanças lentas no comprimento e diâmetro (2ª FCF, F6) e, finalmente, um novo período de rápido crescimento, que termina com a completa maturação dos frutos (3ª FCF, F7), evidenciando-se a ocorrência de curvas de dupla sigmóide, caracterizando três períodos de crescimento (Figura 4.9). Este tipo de comportamento foi observado para frutos de goiabeira por Mercado-Silva *et al.* (1998), Feldberg *et al.* (1998), Rathore (1976) e Srivastava & Narasimhan (1967), dentre outros.

O número de dias de cada fase de crescimento do fruto foi igual para os tratamentos da pesquisa (PE) e do produtor (PR). O primeiro estágio de crescimento teve duração de 22 dias, a partir do pegamento do fruto. É importante ressaltar que as observações tiveram início 17 dias após a floração. Durante esse estágio, na área de pesquisa, o diâmetro dos frutos aumentou de 16,02 para 29,58 mm e na área do produtor, essa variação foi igual a 10,04 mm e os frutos atingiram 34,87 mm ao final da 1ª FCF. A duração do segundo estágio de crescimento de frutos foi de 33 dias, com incremento no diâmetro de 4,82 mm no tratamento da PE e 2,57 mm no do PR, quando os frutos atingiram, respectivamente, diâmetros de 34,92 e 37,44 mm, ao final desta fase. A terceira fase de crescimento do fruto foi a que apresentou maior incremento no diâmetro, 24,99 mm na PE e 28,01 mm no PR, em 24 dias. Ao final desta fase, os frutos foram colhidos com diâmetro médio de 61,3 mm e 67,52 mm, respectivamente, nos tratamentos da PE e do PR.

O primeiro estágio de crescimento é caracterizado pelo desenvolvimento das sementes e início do endurecimento dos frutos. No segundo estágio ocorre o endurecimento das sementes e dos frutos, que alcançam sua máxima rigidez; e o terceiro estágio é caracterizado pelo amolecimento da polpa e mudança na coloração do fruto (Mercado-Silva *et al.*, 1998).

Esses resultados estão de acordo com Pereira & José (1987), que determinaram para frutos de goiaba, cultivares Paluma e Rica, três períodos de crescimento. Estes autores



verificaram, ainda, para a cultivar Paluma, que o primeiro período de desenvolvimento correspondeu a 65 dias, a partir da fecundação, em que o crescimento em diâmetro variou de 5 a 34 mm; o segundo período durou 48 dias, sendo que o diâmetro variou de 34 a 45 mm; e, o último período durou 20 dias, com rápido crescimento do diâmetro dos frutos, variando de 45 a 66 mm. Como se pode verificar na Figura 4.5, os frutos do tratamento PR atingiram a colheita com o maior comprimento e diâmetro que os frutos do tratamento PE, destacando-se como mais um fator a contribuir para uma maior produtividade naquele tratamento que neste.

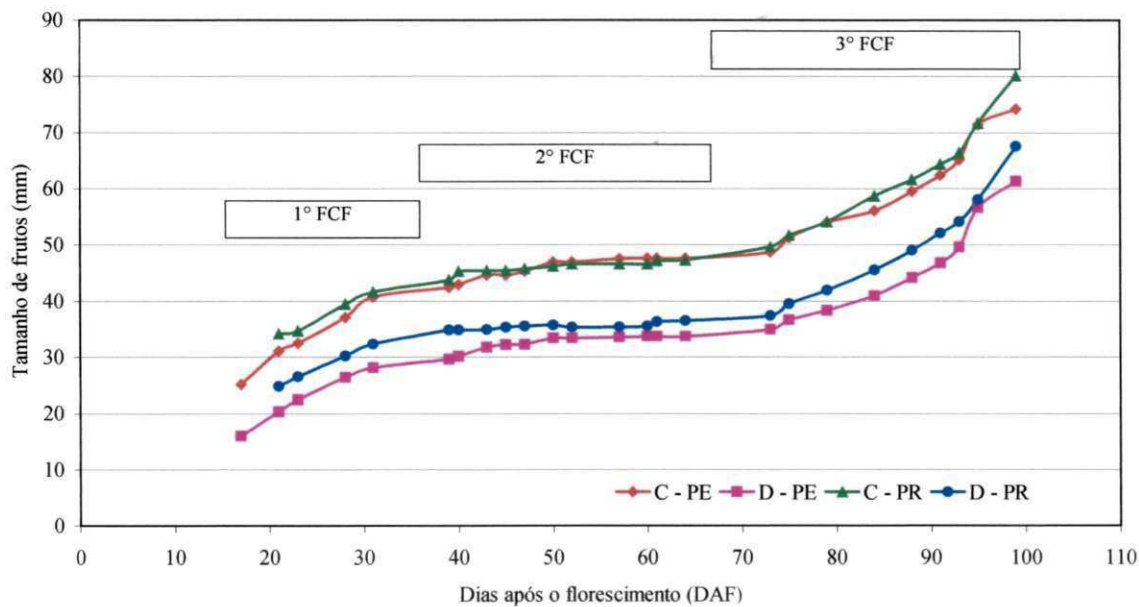


Figura 4.5. Curvas de crescimento dos frutos de goiaba Paluma, determinadas por meio de medidas do comprimento (C) e diâmetro (D), em plantas localizadas no pomar nos tratamentos da pesquisa (PE) e do produtor (PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

A colheita foi acompanhada em todas as plantas de ambos os tratamentos da área de pesquisa (PE) e do produtor (PR) e sua evolução é mostrada na Figura 4.6. A colheita concentrou-se entre os dias 165 DAP e 178 DAP. A produtividade média das plantas do tratamento da PE foi igual a  $96,25 \text{ kg planta}^{-1}$ , enquanto que no tratamento do PR foi  $98,75 \text{ kg planta}^{-1}$  (Figura 4.7).

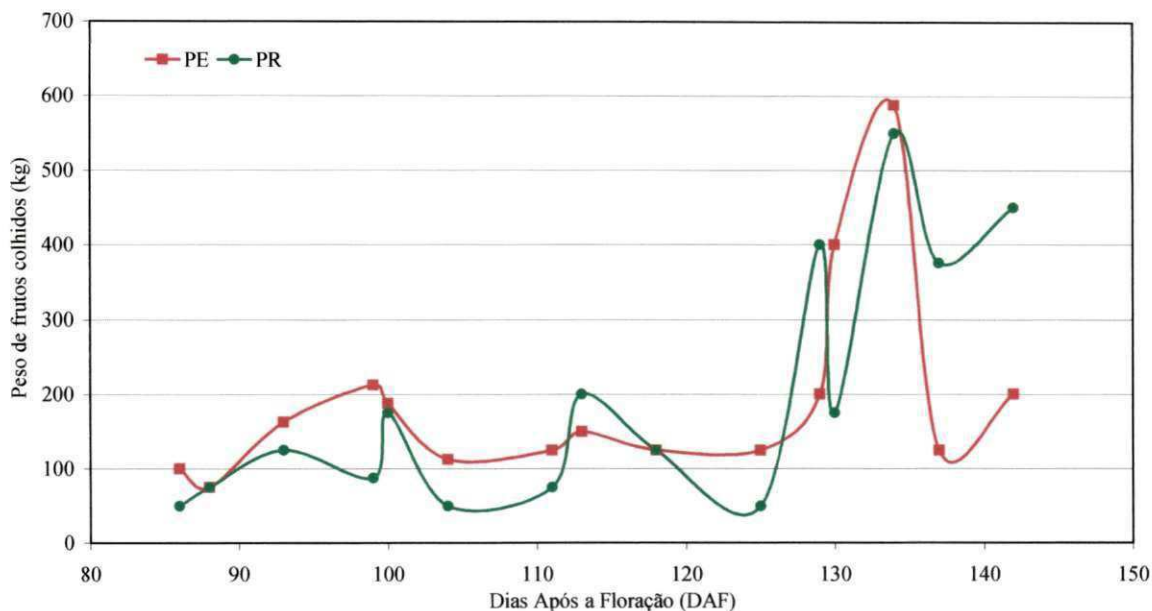


Figura 4.6. Curva de colheita dos frutos da goiaba Paluma, para os tratamentos da pesquisa (PE) e do produtor (PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

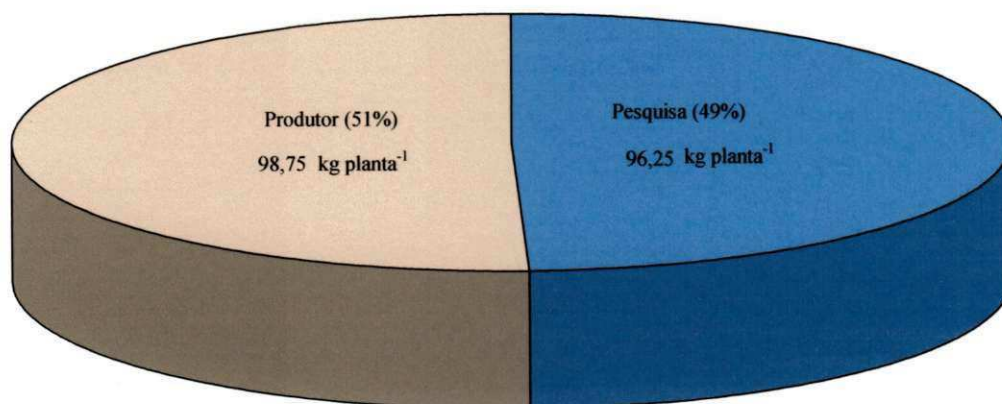


Figura 4.7. Produtividade média de pomar de goiabeira Paluma, para os tratamentos da pesquisa (PE) e do produtor (PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

#### 4.2.2. Condições micrometeorológicas

As principais variáveis micrometeorológicas monitoradas durante esta segunda etapa experimental foram analisadas com o objetivo principal de descrever e caracterizar o microclima no pomar de goiabeira. Nesse sentido, foram selecionados dois dias, sendo um com bastante nebulosidade e o outro de céu limpo ou com pouca nebulosidade, representativos de cada fase fenológica (F1, F2,..., F7) (Tabela 4.3).

##### 4.2.2.1. Balanço de radiação

Para cada uma das fases (estádios) estudadas (F1, F2, F3, F4, F5, F6 e F7) foram analisadas as variações diurnas dos componentes do balanço de radiação sobre a copa da goiabeira, para dias representativos com alta nebulosidade e pouca ou nenhuma nebulosidade. Foram, ainda, calculadas as médias de cada componente do balanço de radiação para cada fase. Por fim, analisou-se o comportamento sazonal do balanço de radiação para todo o ciclo da cultura.

Na Figura 4.8 é apresentada a variação da radiação solar global incidente ( $R_g$ ), saldo de radiação ( $R_n$ ) e da radiação solar refletida ( $R_r$ ) sobre o pomar em dias típicos com nebulosidade (a, c, e, g, i, k, m) e sem nebulosidade (b, d, f, h, j, l, n), de cada fase fenológica. Analisando-se os dias representativos da Fase 1, observa-se na Figura 4.8a, presença de nebulosidade durante todo o dia (304/2004), resultando em redução na densidade do fluxo de radiação solar global incidente ( $R_g$ ) e conseqüentemente, nos outros componentes do balanço de radiação ( $R_n$  e  $R_r$ ), que permaneceram, na maior parte do dia, abaixo de 400, 300 e 100  $W m^{-2}$ , respectivamente. Já na Figura 4.8b, observa-se que o dia 314/2002 apresentou-se com céu limpo, exceto no período compreendido entre o nascer-do-sol e 08:30h, em que se observou a ocorrência de poucas nuvens. Neste dia, a  $R_g$ ,  $R_n$  e  $R_r$  apresentaram valores máximos próximos ao meio-dia e iguais, respectivamente, a 1000, 600 e 190  $W m^{-2}$ . Durante a segunda fase fenológica da pesquisa, que compreendeu o período de crescimento vegetativo, observou-se comportamento semelhante à Fase 1, até mesmo em termos de valores dos fluxos de radiação, como pode ser verificado na Figura 4.8d para dia de céu limpo. Este dia destacou-se por apresentar céu limpo durante todo período diurno, quando  $R_g$  atingiu 1000  $W m^{-2}$  às 12:00h e, nesse mesmo horário, também, ocorreram os valores máximos de  $R_n$  (710  $W m^{-2}$ ) e  $R_r$  (180  $W m^{-2}$ ).

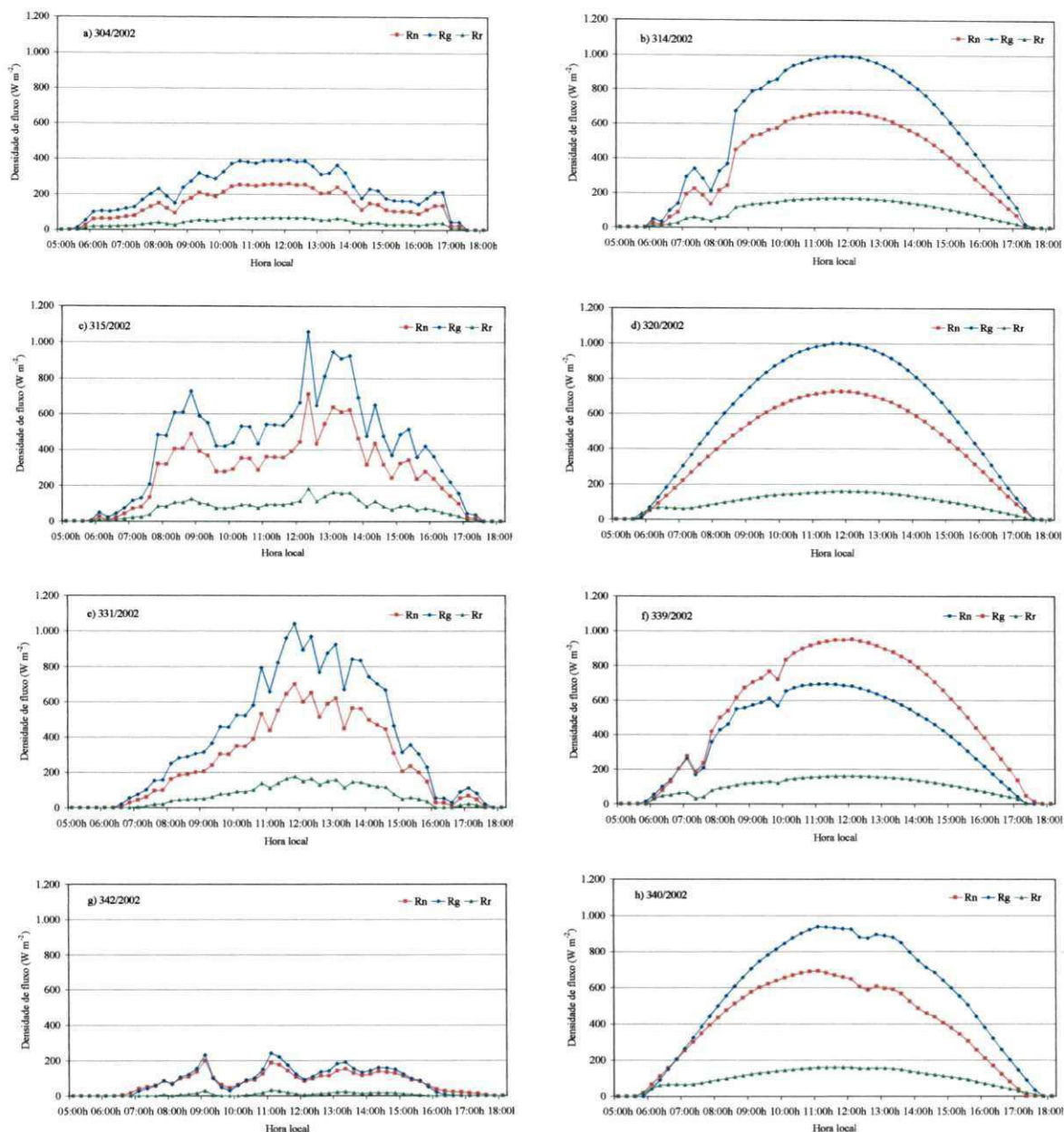


Figura 4.8. Curso diurno dos componentes do balanço de radiação (Rg = radiação solar global incidente, Rn = saldo de radiação à superfície e Rr = radiação solar refletida) sobre a copa da goiabeira, para dias representativos das fases fenológicas da cultura (Fase 1: a e b; Fase 2: c e d; Fase 3: e e f; Fase 4: g e h), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



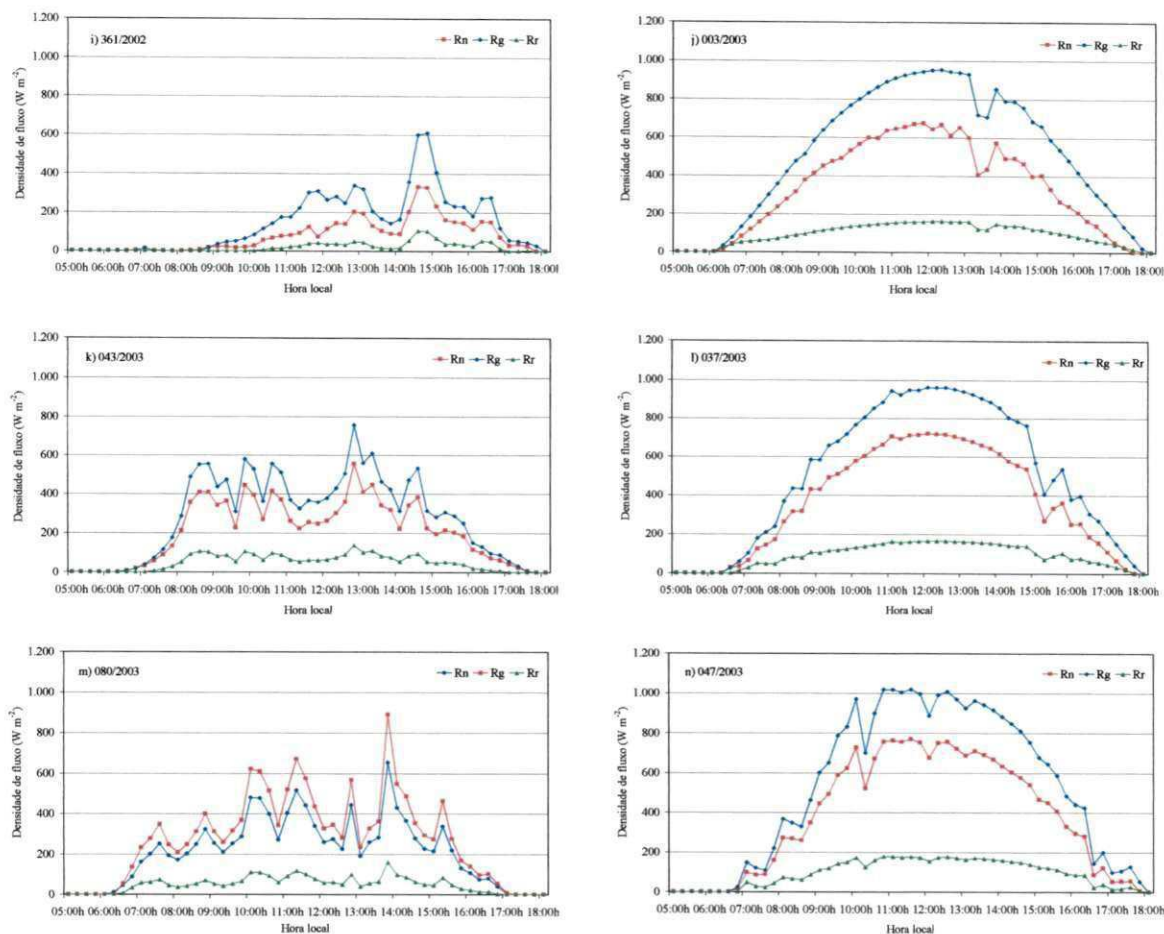


Figura 4.8. (continuação) Curso diurno dos componentes do balanço de radiação ( $R_g$  = radiação solar global incidente,  $R_n$  = saldo de radiação à superfície e  $R_r$  = radiação solar refletida) sobre a copa da goiabeira, para dias representativos das fases fenológicas da cultura (Fase 5: i e j; Fase 6: k e l; Fase 7: m e n), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Nesse dia (Figura 4.8d), que apresentou-se com céu limpo, pôde-se observar a excelente simetria das curvas de  $R_g$ ,  $R_n$  e  $R_r$  em torno do meio-dia (hora local), excetuando-se os instantes imediatamente posteriores ao nascer-do-sol, quando o  $R_n$  aproxima-se bastante da  $R_g$  do que no final do período diurno. Este fato não é isolado, e volta a ocorrer nas figuras representativas das outras fases fenológicas. Uma possível causa para isso é o posicionamento dos sensores, pode ser que o radiômetro e/ou o saldo radiômetro não estivessem apropriadamente nivelados. Com isso, percebe-se a partir desta fase e, principalmente nos dias de céu limpo, que houve um aumento relativo de  $R_n$  em

relação a  $R_g$ , quando comparado com os dias da Fase 1. Comportamento semelhante foi observado para os dias representativos das outras fases estudadas.

Entre os dias com elevada nebulosidade, destaca-se o dia 342/2002 da Fase 4 (Figura 4.12g), cujos valores do balanço de radiação foram os menores encontrados no experimento, quando os valores instantâneos da  $R_g$  permaneceram sempre abaixo de  $200 \text{ W m}^{-2}$  ao longo do dia. Observa-se, ainda, que nos dias com elevada nebulosidade, os valores de  $R_g$  atingem picos de 900 a  $1000 \text{ W m}^{-2}$ , mas que permaneceram abaixo de  $600 \text{ W m}^{-2}$ , durante a maior parte do dia. Uma outra característica dos dias nublados é o fato de que  $R_n$  aproxima-se mais da  $R_g$ , possivelmente devido à reduzida sensibilidade do radiômetro que mede a radiação solar global incidente em captar radiação abaixo de  $1 \mu\text{m}$ .

Considerando que, a partir do mês de dezembro inicia-se o período chuvoso na região de Petrolina, os dias tendem a se apresentar com nebulosidade mais intensa, sendo mais difícil encontrar dias caracteristicamente, de céu limpo. Mesmo em dias de céu claro, percebe-se que o maior índice de nebulosidade ocorreu, principalmente, no início da manhã e no final da tarde (Figura 4.8l e Figura 4.8n).

Para uma melhor caracterização do curso diurno dos componentes do balanço de radiação, foram calculadas médias para o período diurno de cada fase fenológica estudada. Vale ressaltar, que o número de dias considerados nos cálculos das médias não é o mesmo correspondente a cada fase, como descrito na Tabela 4.3, devido a problemas com os sensores ou a erros cometidos na coleta de dados. Na Figura 4.9 são apresentados os gráficos representativos do comportamento médio diurno dos componentes do balanço de radiação solar para as sete fases fenológicas (F1, F2,..., F7) descritas anteriormente. Observa-se um comportamento bastante similar de todos os componentes do balanço da radiação para todas as fases fenológicas, evidenciando uma pequena variabilidade temporal da radiação solar, uma vez que esta região está situada próxima ao equador (baixa latitude). Os valores máximos de  $R_g$  ao longo das sete fases estudadas ocorreram próximos ao meio-dia e foram iguais a 837,7, 939,2, 866,6, 787,5, 788,6, 829,5 e  $804,2 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente, correspondentes às fases F1, F2, F3, F4, F5, F6 e F7. Com isso, verifica-se que os valores médios obtidos na fase 2 (Figura 4.9b) mostraram-se como os mais elevados, em função da época do ano e da menor nebulosidade. Verifica-se, ainda, na Figura de 4.9 que a radiação refletida pela cultura apresentou valores máximos também em

torno do meio-dia, atingindo 144,2, 154,1, 144,8, 132,4, 133,6, 142,2 e 140,1 W m<sup>-2</sup>, relativo às Fases de 1 a 7, respectivamente.

Os valores diurnos médios dos componentes do balanço de radiação, de cada fase fenológica, são apresentados na Figura 4.10 e Tabela 4.4. O curso do saldo de radiação foi semelhante ao da radiação solar global para todos os dias e fases analisadas, diferindo apenas em magnitude. O componente Rn representou valores sempre superiores a 65% do valor da Rg, chegando a atingir até 74% na fase 4 (F4). Durante as fases de F1 a F7, os valores médios do saldo de radiação diurno foram, respectivamente, iguais a 294,38, 368,11, 334,90, 314,25, 297,55, 328,81 e 327,64 W.m<sup>-2</sup> (Tabela 4.4). Comportamentos semelhantes, para todos os componentes do balanço de radiação, foram verificados por Moura (1998) e Leitão *et al.* (2000), para uma superfície de solo descoberto e por André *et al.* (1988), sobre floresta.

A estimativa dos valores do saldo de radiação a partir de medidas mais simples, como da radiação solar global incidente é possível quando se conhece a relação entre estas variáveis para a superfície de interesse. No sentido de gerar uma informação de grande utilidade para pomares de goiabeira, com características semelhantes ao aqui estudado, obteve-se a seguinte relação entre Rg e Rn, com R<sup>2</sup> = 0,9939:

$$Rn = 0,6803Rg - 8,4489 \quad (25)$$

Na Figura 10 é apresentado o comportamento médio dos componentes do balanço de radiação, para o período de saldo de radiação positivo, ao longo das sete fases fenológicas estudadas. Verifica-se que há uma tendência de redução da radiação solar global (Rg) e, conseqüentemente, dos outros componentes do balanço de radiação, a partir da F1 até a F7. Observa-se, ainda, que durante todo o período de estudo, houve dias com acentuada nebulosidade, o que contribuiu para grande redução nos valores médios dos componentes do balanço de radiação, principalmente de Rg e de Rn, cujas curvas apresentaram maior variabilidade ao longo do ciclo analisado.

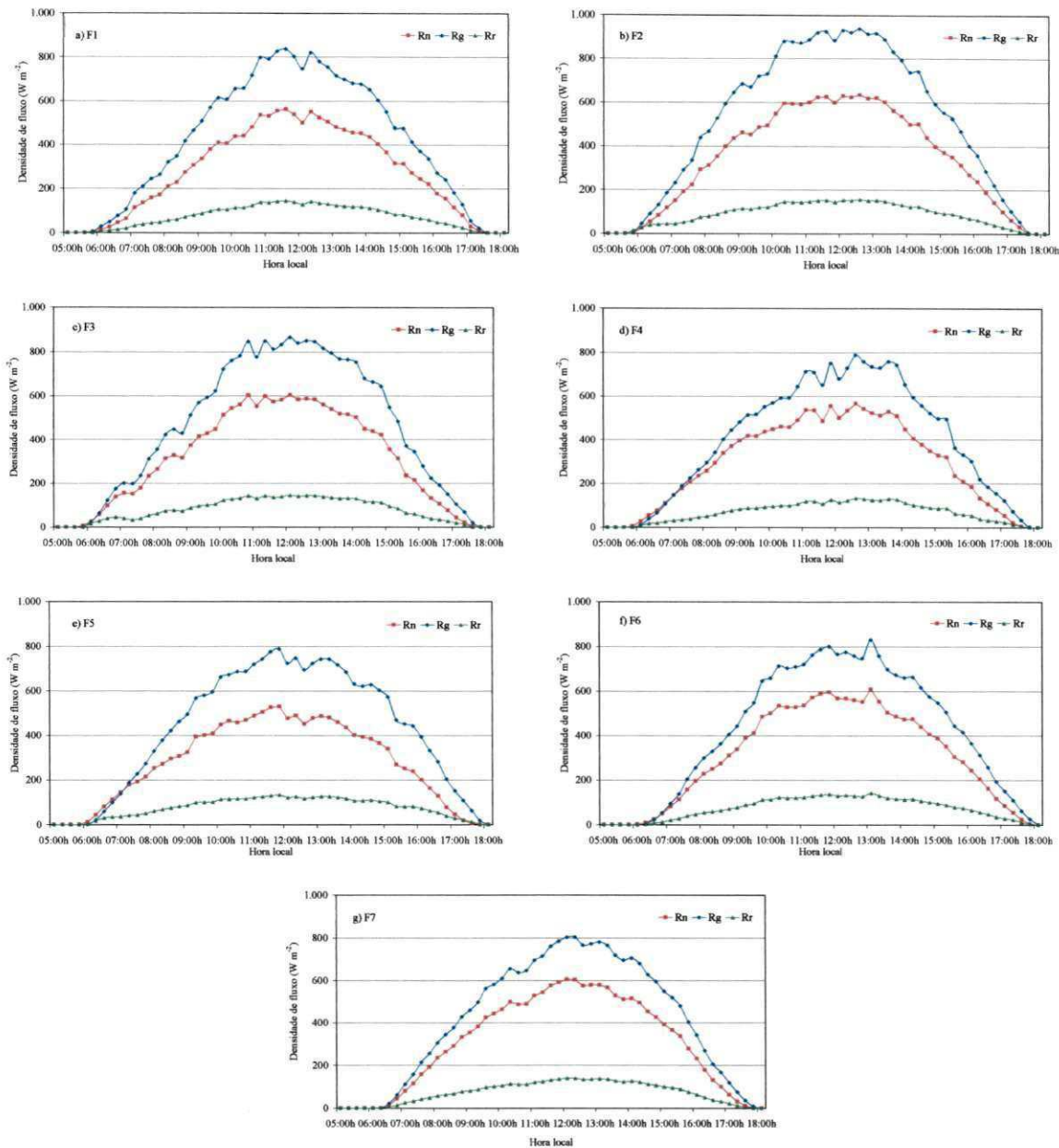


Figura 4.9. Curso médio diurno dos componentes do balanço de radiação ( $R_g$  = radiação solar global incidente,  $R_n$  = saldo de radiação à superfície e  $R_r$  = radiação solar refletida) medidos sobre a copa da goiabeira Paluma, nas fases fenológicas da cultura (Fase 1: a; Fase 2: b; Fase 3: c; Fase 4: d; Fase 5: e; Fase 6: f; Fase 7: g), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



A relação entre a radiação solar refletida e incidente resulta no albedo ou poder refletor da superfície para a radiação de ondas curtas. Assim, foi obtido o albedo médio da superfície para cada fase fenológica da goiabeira, mostrado na Figura 4.11. Observa-se uma tendência da curva do albedo de assumir o formato de “U”, com valores máximos ocorrendo próximo ao nascer e por-do-sol e mínimos próximos ao meio-dia em todas as fases fenológicas da goiabeira. Esse comportamento é devido ao ângulo de elevação solar. No entanto, não se verificou, em nenhuma delas, uma perfeita simetria em torno do meio-dia; e, apesar da Fase 3 ter sido a fase de floração, não se percebeu a influência da cor branca das flores elevando a  $R_r$ , como observado por Moura (2001). Os valores médios diurnos do albedo foram obtidos considerando apenas os horários entre 10:00h e 14:00h, a fim de eliminar a influência dos valores extremos. Assim, os valores do albedo ( $R_r/R_g$ ) para cada fase fenológica são mostrados na Tabela 4.4, os quais foram inferiores aos obtidos por Moura (2001) para goiabeira.

Analisando a Figura 4.11, pode-se perceber que a fase F3 não apresentou valores de albedo ligeiramente maiores do que os das outras fases, como se esperava, tendo em vista que durante esta fase a cultura estava florando e, como as flores são brancas, deveria ocorrer um aumento na radiação refletida e, conseqüentemente, com albedo maior. Percebe-se, ainda, que não foi observada simetria em relação ao meio dia nos valores do albedo para nenhuma das fases estudadas (Figura 4.11). Para todas as fases, os maiores valores do albedo foram verificados no início da manhã e final da tarde. Os valores mínimos ocorreram por volta do meio-dia.

Leitão & Oliveira (2000) verificaram queda brusca do albedo da cultura do amendoim irrigado por aspersão, em Rodelas – BA, entre 10:00h e 12:00h, em cerca de 9%, para dias em que houve irrigação. Alves (1997), também fez uma análise do albedo, para a cultura do melão irrigado por gotejamento, em Mossoró – RN, obtendo comportamento semelhante, com valores máximos no início da manhã e final da tarde e mínimos em torno do meio-dia. Este autor verificou, ainda, que após a irrigação houve redução no albedo, em proporções diferentes para cada uma das fases de desenvolvimento da cultura do melão, provavelmente em função da porcentagem de cobertura do solo.

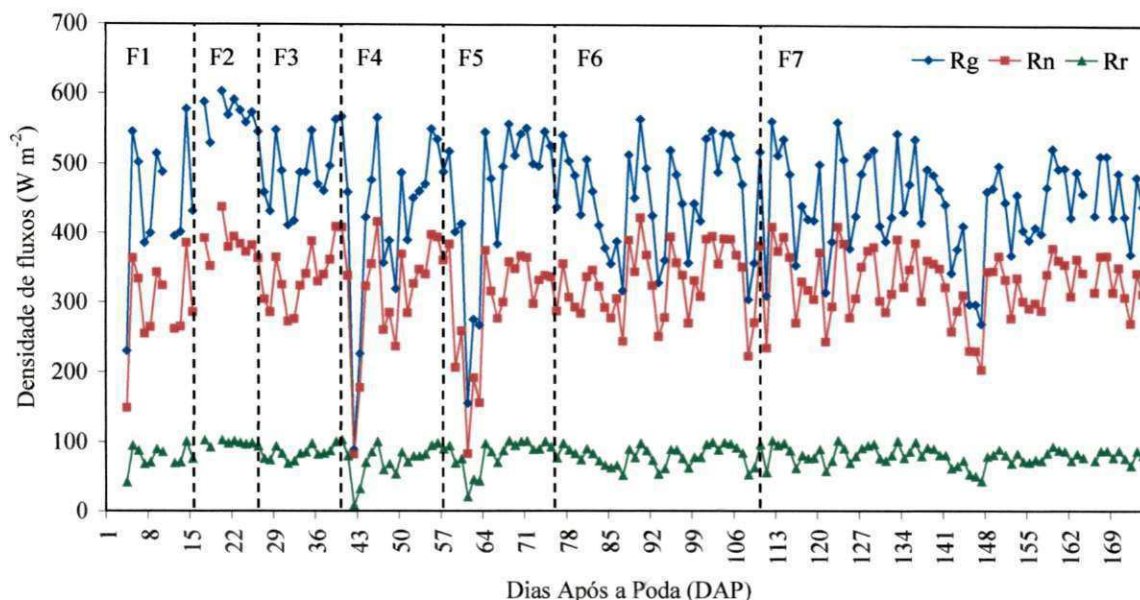


Figura 4.10. Comportamento sazonal médio, para o período de saldo de radiação positivo, dos componentes do balanço de radiação de um pomar de goiabeira irrigada, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Tabela 4.4. Valores médios diurnos dos componentes do balanço de radiação, sobre a cultura da goiabeira Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Componentes do balanço de radiação	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
Rg (W m <sup>-2</sup> )	444,09	548,13	484,60	424,67	455,81	450,69	444,56
Rn (W m <sup>-2</sup> )	294,38	368,11	334,90	314,25	297,55	328,81	327,64
Rr (W m <sup>-2</sup> )	77,44	93,68	83,72	72,96	80,94	78,52	79,18
Rn/Rg (%)	66,29	67,16	69,11	74,00	65,28	72,96	73,70
Rr/Rg (%)	17,44	17,09	17,28	17,18	17,76	17,42	17,81

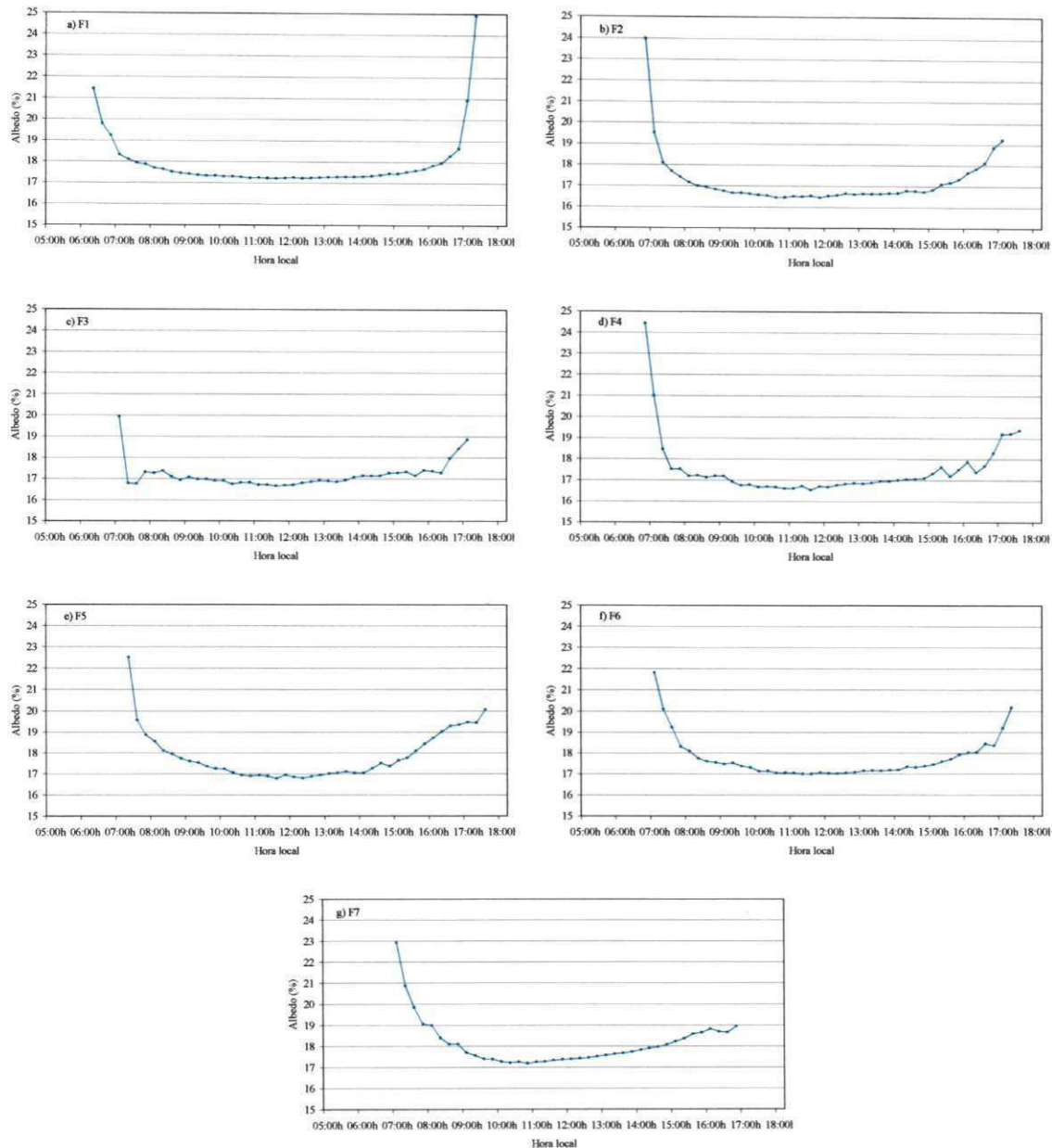


Figura 4.11. Comportamento médio diário do albedo da goiabeira Paluma, para cada uma de suas fases fenológicas - F1 (a), F2 (b), F3 (c), F4 (d), F5 (e), F6 (f) e F7 (g), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

A variação estacional do albedo ao longo do ciclo de produção da cultura é apresentada na Figura 4.12. Nesta Figura são plotados pontos com duas cores diferentes, relatando diferentes valores de albedo: 1) pontos azuis - albedo médio do período de 10:00h às 14:00h e 2) pontos vermelhos – albedo médio do período diurno. Observa-se que

a maioria dos valores do albedo esteve entre 17 e 18%, não sendo correlacionados com as fases fenológicas da cultura, quando na F3 (floração) eram esperados os maiores valores. Os menores valores de albedo estão associados a dias com precipitação e/ou intensa nebulosidade. Os valores mais elevados foram verificados até metade da fase F7, quando as plantas tinham maior quantidade de fruto, proporcionando maior cobertura do solo. Posteriormente, começa a decrescer até final desta fase, sendo que por volta do DAP 148 e 162 verificaram-se bruscas reduções, provocadas por precipitações ocorridas durante o período, já que o molhamento do solo provoca redução no valor do albedo. Oliveira (1998) observou que para a cultura do amendoim irrigado, em um solo arenoso, o albedo foi maior (29,8%) no início do ciclo de desenvolvimento da cultura, quando o solo estava totalmente descoberto e à medida que a cultura desenvolvia-se, cobrindo o solo, o albedo diminuía, alcançando valor mínimo de 18,6%, no final da fase de desenvolvimento da vagem. Por outro lado, Alves (1997), analisando a variação do albedo ao longo das distintas fases de desenvolvimento da cultura do melão irrigado, observou valores máximos de albedo quando a cultura alcançou o máximo de desenvolvimento, com a máxima proporção de solo coberto pela cultura, decrescendo em seguida na fase de maturação com a queda das folhas.

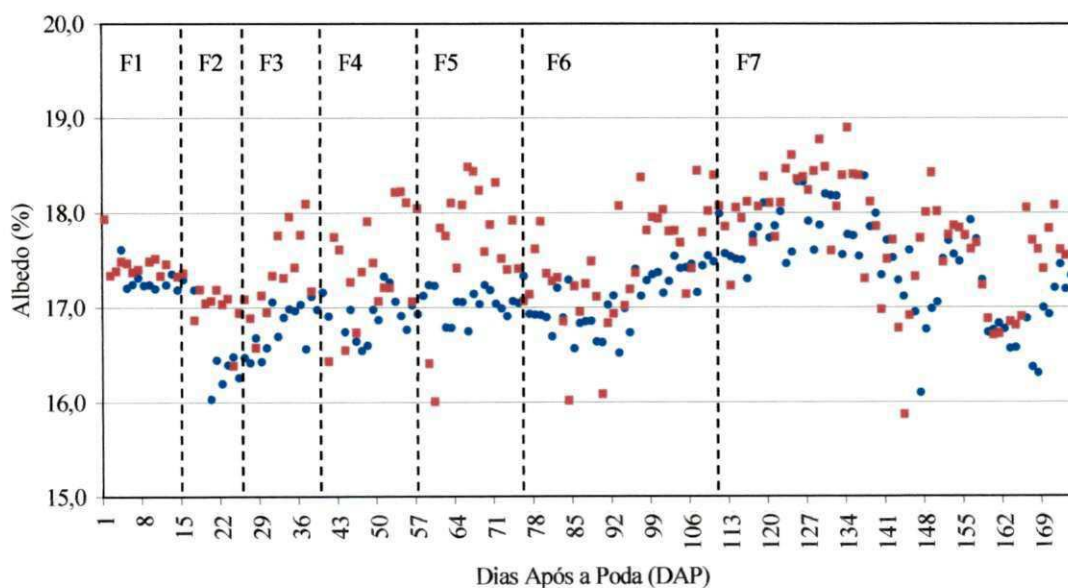


Figura 4.12. Comportamento do albedo médio diário da goiabeira Paluma irrigada, durante todo o ciclo de produção, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

#### 4.2.2.2. Temperatura e umidade relativa do ar

A temperatura do ar foi medida em dois níveis acima da copa das plantas por meio de psicrômetros aspirados naturalmente, em que o elemento sensor constituía-se de termopares de cobre-constantan. O nível 1 foi localizado imediatamente acima da copa, enquanto que o nível 2 a 2,15 m acima do nível 1, sendo que ambos estavam a 3,45 e a 5,6 m acima da superfície do solo, respectivamente. Os comportamentos diários da temperatura do ar nas fases fenológicas, para os dias representativos com muita nebulosidade e céu claro, são mostrados na Figura 4.13. Percebe-se que os valores de temperatura do ar medidos no nível mais próximo às folhas mostraram-se ligeiramente superiores à temperatura medida no nível 2, durante o período da manhã e início da tarde, quando então tenderam a se igualar. Mas, a partir das 15:00h constatou-se uma inversão térmica, ou seja, a temperatura medida no nível 1 foi inferior à medida no nível 2 e, assim permanecendo durante toda a noite e madrugada. Esse padrão térmico foi observado tanto em dias com muitas nuvens como em dias de céu limpo, principalmente, a partir da fase 3.

Um fato a ser considerado é que devido a um erro de programação do “*datalogger*”, nas fases 1 e 2, as medidas de temperatura foram obtidas com menor precisão. Observa-se nos dias de céu limpo (Figura 4.13b, d, f, h, j, l e n) que o valor máximo da temperatura ocorreu por volta das 15:45h, sempre atingindo valores próximo a 35°C, estando deslocado, pelo menos 3:45h depois da máxima da radiação solar global incidente.

A inversão térmica verificada sobre a goiabeira no período da tarde, também, foi observada em diversas outras culturas irrigadas espaçadas. Em geral, este fato vem sendo atribuído ao aquecimento da superfície, que poderia ser mais bem embasado por meio de medidas da radiação de ondas longas da superfície.

O comportamento médio diário da temperatura do ar em cada fase fenológica é mostrado na Figura 4.14, na qual verifica-se o mesmo comportamento descrito anteriormente para os dias com pouco ou nenhuma nebulosidade, o que vem fortalecer a idéia de se tratar de observações consistentes ao longo do período do experimento. A fim de assegurar isso, sugere-se a freqüente inversão do posicionamento dos sensores, o que não foi realizado na presente pesquisa. Na Figura 4.15 é mostrado o comportamento sazonal da temperatura psicrométrica.



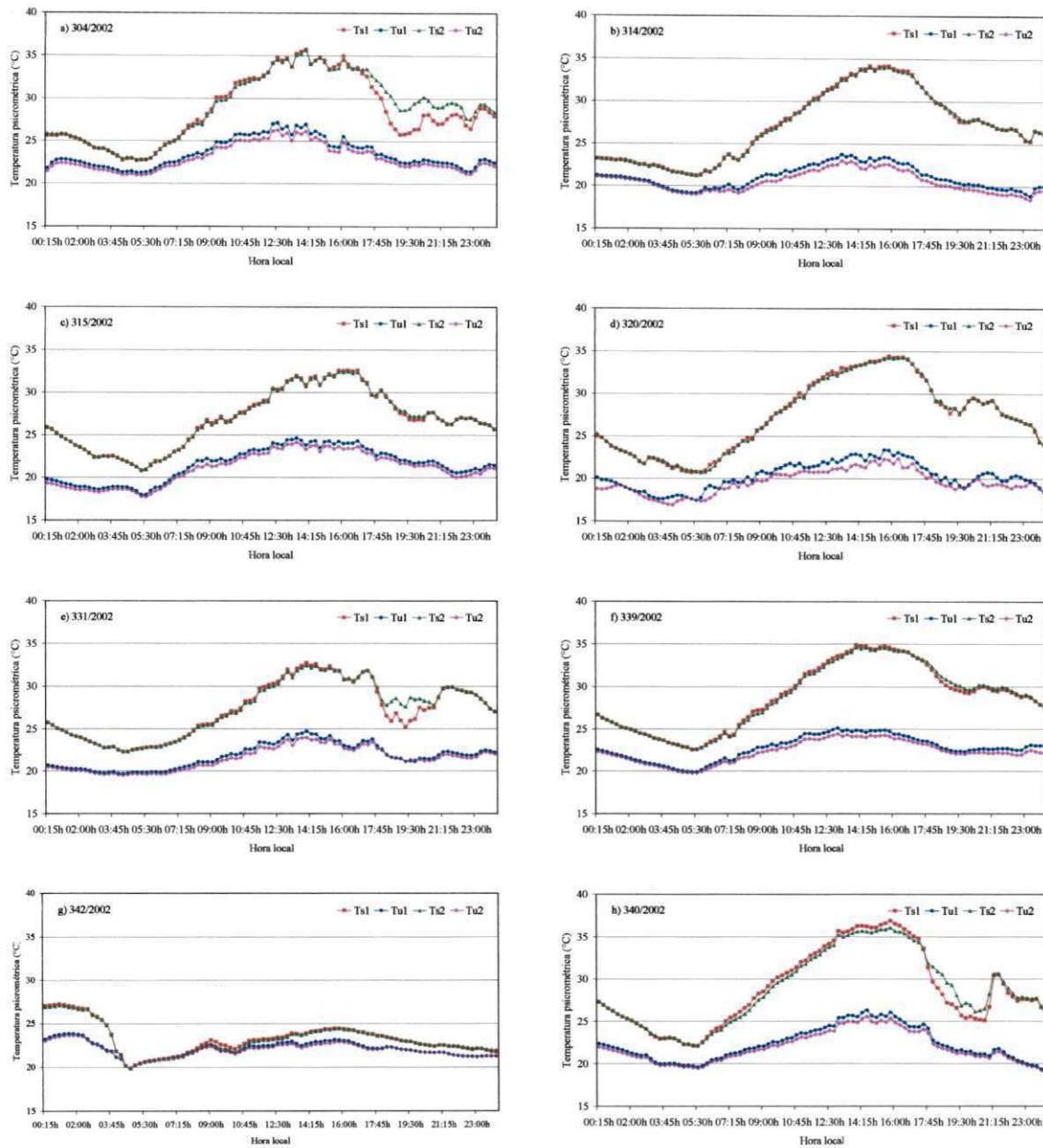


Figura 4.13. Comportamento diário da temperatura do ar em bulbo seco (Ts) e em bulbo úmido (Tu) medidas em dois níveis (1 e 2) sobre a copa da goiabeira, para dias representativos das fases fenológicas da cultura (Fase 1: a e b; Fase 2: c e d; Fase 3: e e f; Fase 4: g e h), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

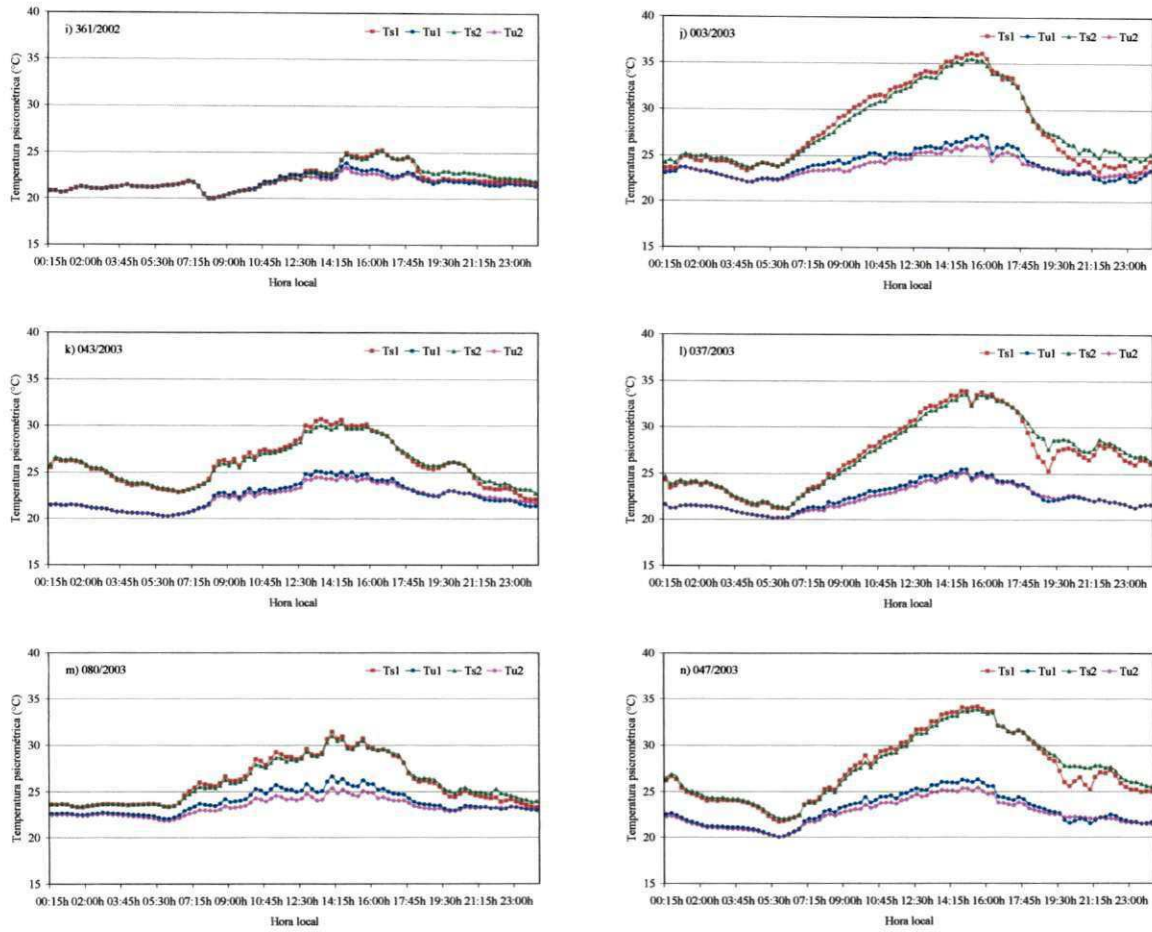


Figura 4.13. (continuação) Comportamento diário da temperatura do ar em bulbo seco (Ts) e em bulbo úmido (Tu) medidas em dois níveis (1 e 2) sobre a copa da goiabeira, para dias representativos das fases fenológicas da cultura (Fase 5: i e j; Fase 6: k e l; Fase 7: m e n), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

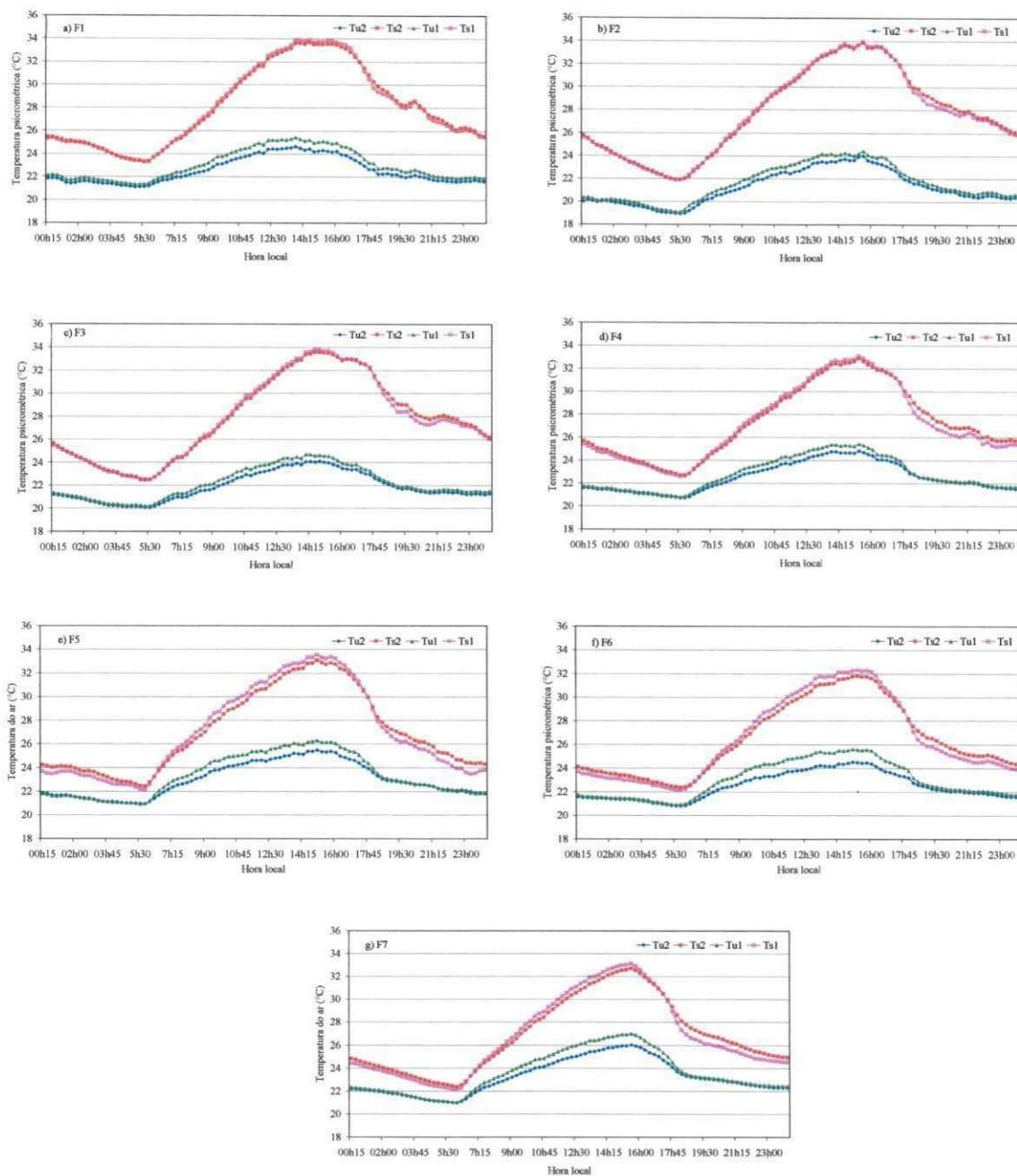


Figura 4.14. Comportamento médio diário da temperatura do ar em bulbo seco (Ts) e em bulbo úmido (Tu) medidas em dois níveis (1 e 2) sobre a copa da goiabeira, nas fases fenológicas da cultura (F1, F2,..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



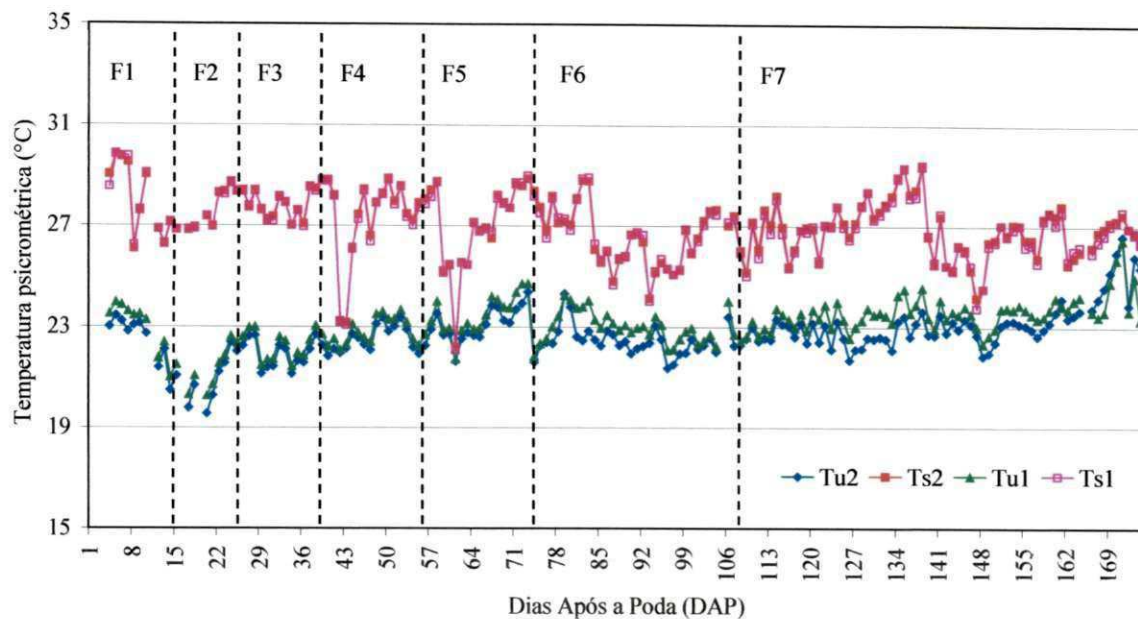


Figura 4.15. Comportamento médio diário da temperatura do ar em bulbo seco (Ts) e em bulbo úmido (Tu) medidas em dois níveis (1 e 2) sobre a copa da goiabeira Paluma, durante um ciclo fenológico, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

A umidade relativa do ar (UR) foi determinada em dois níveis sobre a copa das plantas: nível 1 (UR1), onde as medidas foram imediatamente acima da copa e nível 2 (UR2) no qual as medidas foram realizadas 2,15 m acima do nível 1. Os resultados destas medidas são apresentados na Figura 4.16 para os mesmos dias utilizados anteriormente na análise da temperatura do ar. Constatou-se que os valores de umidade no nível 1 mostraram-se superiores aos do nível 2 na maioria dos dias analisados ao longo do ciclo produtivo da goiabeira. Isto se deve à proximidade do primeiro nível às fontes de vapor d'água, folhas e solo úmido. Nas Figuras 4.16g e 4.16i, observa-se que a umidade relativa do ar, em ambos os níveis, permaneceu bastante elevada durante a maior parte do dia, chegando à saturação em alguns horários. Percebe-se, ainda, que em alguns dos dias analisados, independentemente da quantidade de radiação solar incidente à superfície, que as curvas de UR1 e UR2 ficaram mais distantes entre si, devido a um aumento do valor da UR1, em geral, próximo às 18:00h. Isto se deveu a redução da temperatura do bulbo seco do nível 1 (Ts1), que nesses horários ficou mais próxima da temperatura em bulbo úmido do nível 1 (Tu1), fato este, resultante da falta de ventilação adequada nos psicrômetros, que possivelmente gerou um microclima no interior dos mesmos. Mesmo quando se calculou a

umidade relativa do ar média para cada fase fenológica, observou-se que o aumento na URI por volta das 18:00h não se tratou de um fato ocorrido em dias isolados, uma vez que na Figura 4.17, isto é facilmente observado, em todos as fases fenológicas da cultura. A fim de se evitar a influência da falta de ventilação nos psicrômetros, deve utilizar psicrômetros aspirados artificialmente, como utilizado sobre lima-ácida e café por Marin (2000 e 2003).

O comportamento sazonal da umidade relativa do ar é mostrado na Figura 4.18. Observa-se uma tendência de aumento da umidade relativa do início ao final do ciclo, em função, principalmente, do período do ano em que se promoveu a poda, que ocorreu no final da época seca e início das chuvas na região. Na mesma figura, observam-se os totais diários de precipitação, cujo valor máximo diário foi 40,0mm, totalizando 383,7mm durante todo ciclo produtivo.

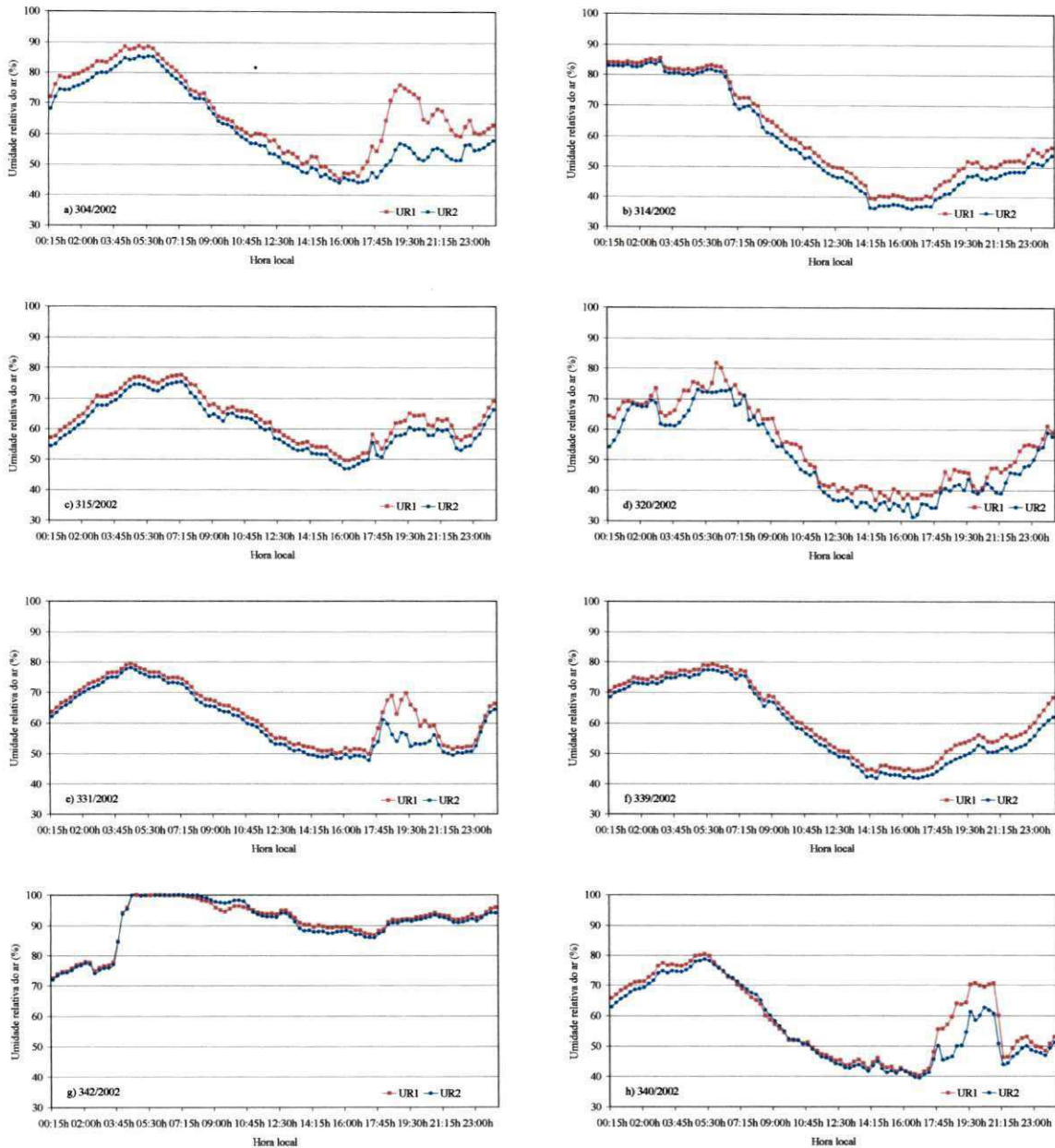


Figura 4.16. Comportamento diário da umidade relativa do ar determinada em dois níveis (1 e 2) sobre a copa da goiabeira Paluma, para dias representativos das suas fases fenológicas (Fase 1: a e b; Fase 2: c e d; Fase 3: e e f; Fase 4: g e h), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

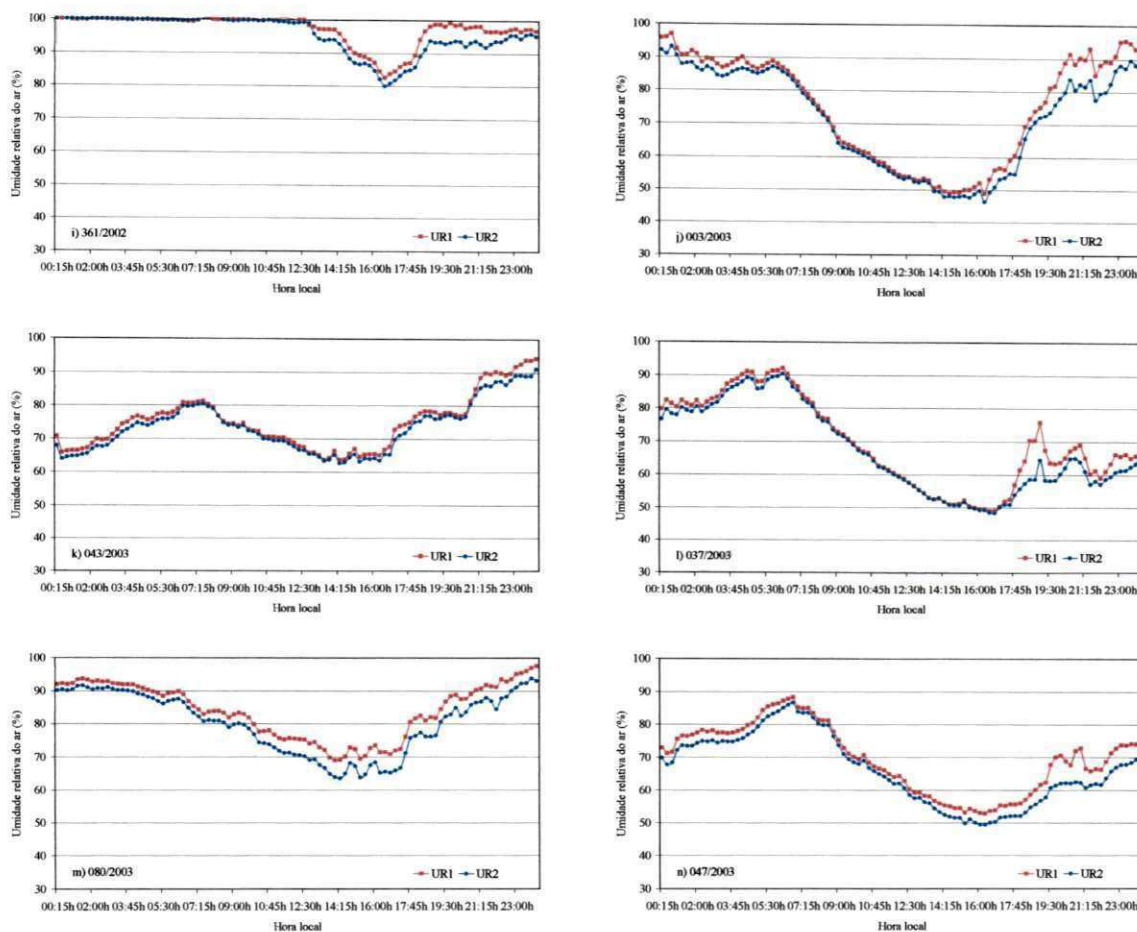


Figura 4.16. (continuação) Comportamento diário da umidade relativa do ar determinada em dois níveis (2 e 3) sobre a copa da goiabeira Paluma, para dias representativos das suas fases fenológicas (Fase 5: i e j; Fase 6: k e l; Fase 7: m e n), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



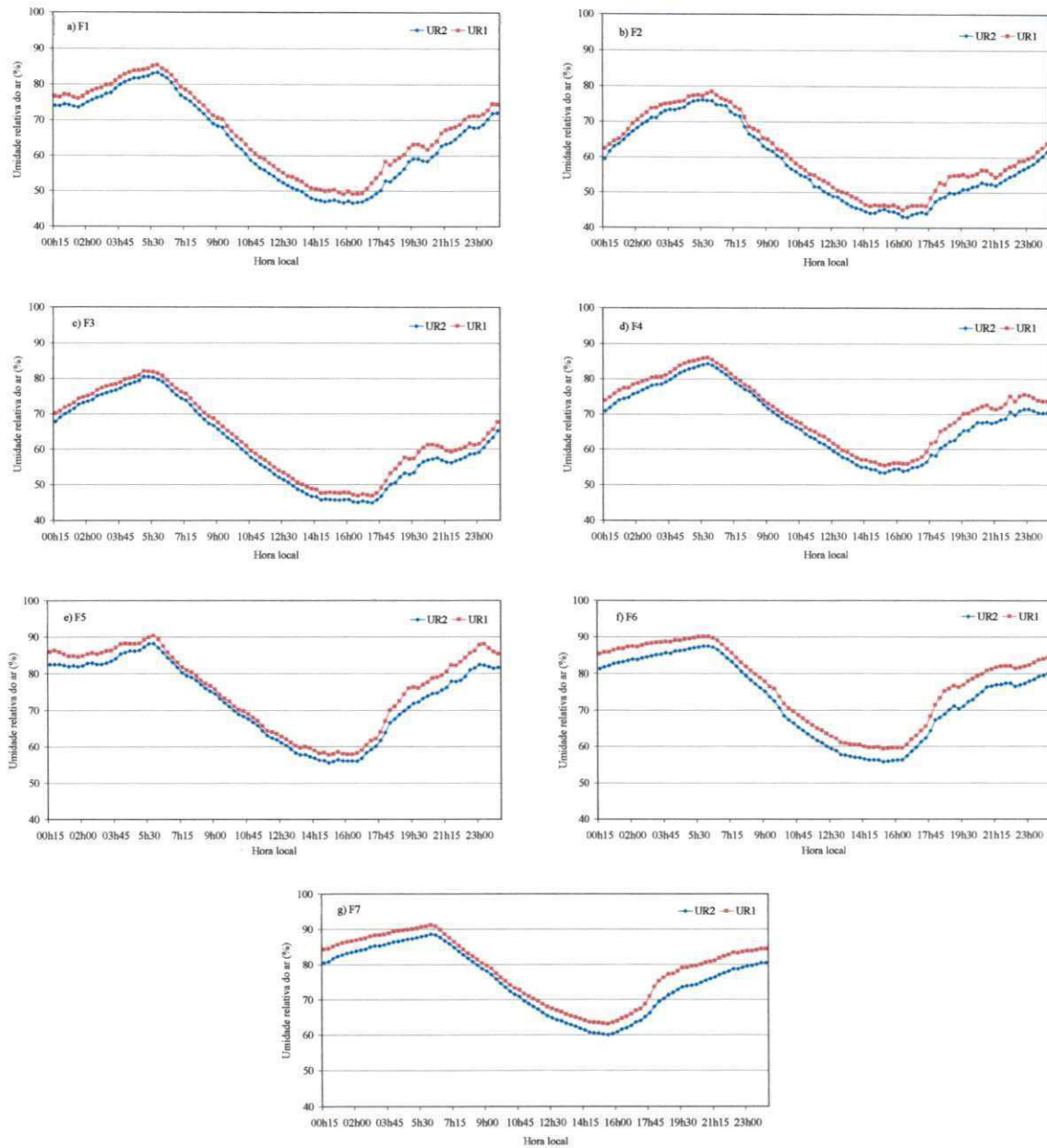


Figura 4.17. Comportamento médio diário da umidade relativa do ar medida em dois níveis (2 e 3) sobre a copa da goiabeira Paluma, nas suas fases fenológicas (F1, F2,..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

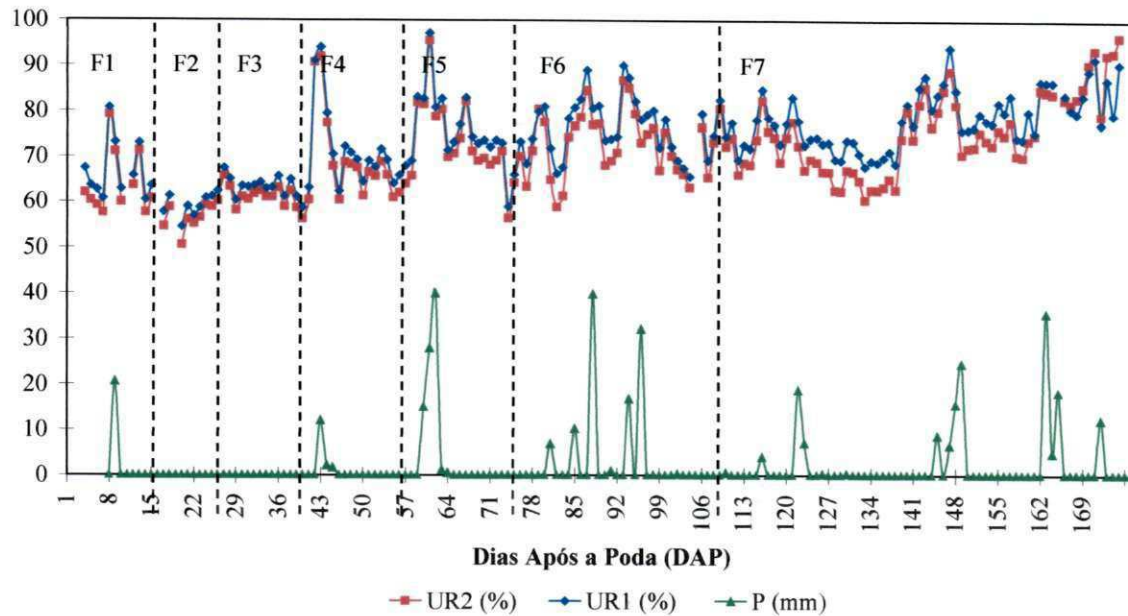


Figura 4.18. Comportamento sazonal da umidade relativa do ar medida em dois níveis (2 e 3) sobre a copa da goiabeira Paluma e do total diário da precipitação, durante um ciclo fenológico, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

#### 4.2.2.3. Velocidade do vento

A velocidade do vento medida sobre o pomar de goiabeira (1,8 m sobre a copa das plantas) é ilustrada na Figura 4.19, para os dias representativos das fases 3, 4, 5, 6 e 7. A velocidade do vento não foi medida na Fase 1 e nem durante metade da Fase 2. Em alguns períodos do ciclo fenológico, a velocidade do vento foi medida em dois níveis sobre o pomar: nível 1 = 0,50 m sobre o dossel e nível 2 = 1,8 m sobre o dossel. No entanto, com o intuito de padronizar as análises, são mostradas apenas as medidas realizadas no nível 2.

Na Figura 4.19, observa-se que a velocidade do vento comportou-se de forma aleatória ao longo do período diário, no entanto, percebe-se que seus valores permaneceram mais elevados nos dias de céu limpo (Figura 4.19 b, d, f e h) do que em dias com elevada nebulosidade (Figura 4.19 a, c, e e g). Observa-se, ainda, que a partir de mais ou menos 18:00h houve uma redução na velocidade do vento em praticamente todos os dias observados, o que gerou um microclima no interior dos psicrômetros, especialmente naquele do nível 1, onde a velocidade do vento foi, em média,  $0,42 \text{ m s}^{-1}$  (dados não

apresentados) inferior à do nível 2. Essa redução de velocidade do vento ficou evidente no cálculo da velocidade média de cada fase fenológica, como observado na Figura 4.20.

Na Figura 4.21 é apresentado o comportamento sazonal da velocidade do vento média diária durante o ciclo produtivo da goiaba. A poda foi realizada em um período no qual a velocidade do vento atinge seus valores mais elevados na região. No pomar de goiabeira, foi observada velocidade do vento média de  $2,7 \text{ m s}^{-1}$ , posteriormente houve redução nesse valor, que atingiu até  $0,5 \text{ m s}^{-1}$ .



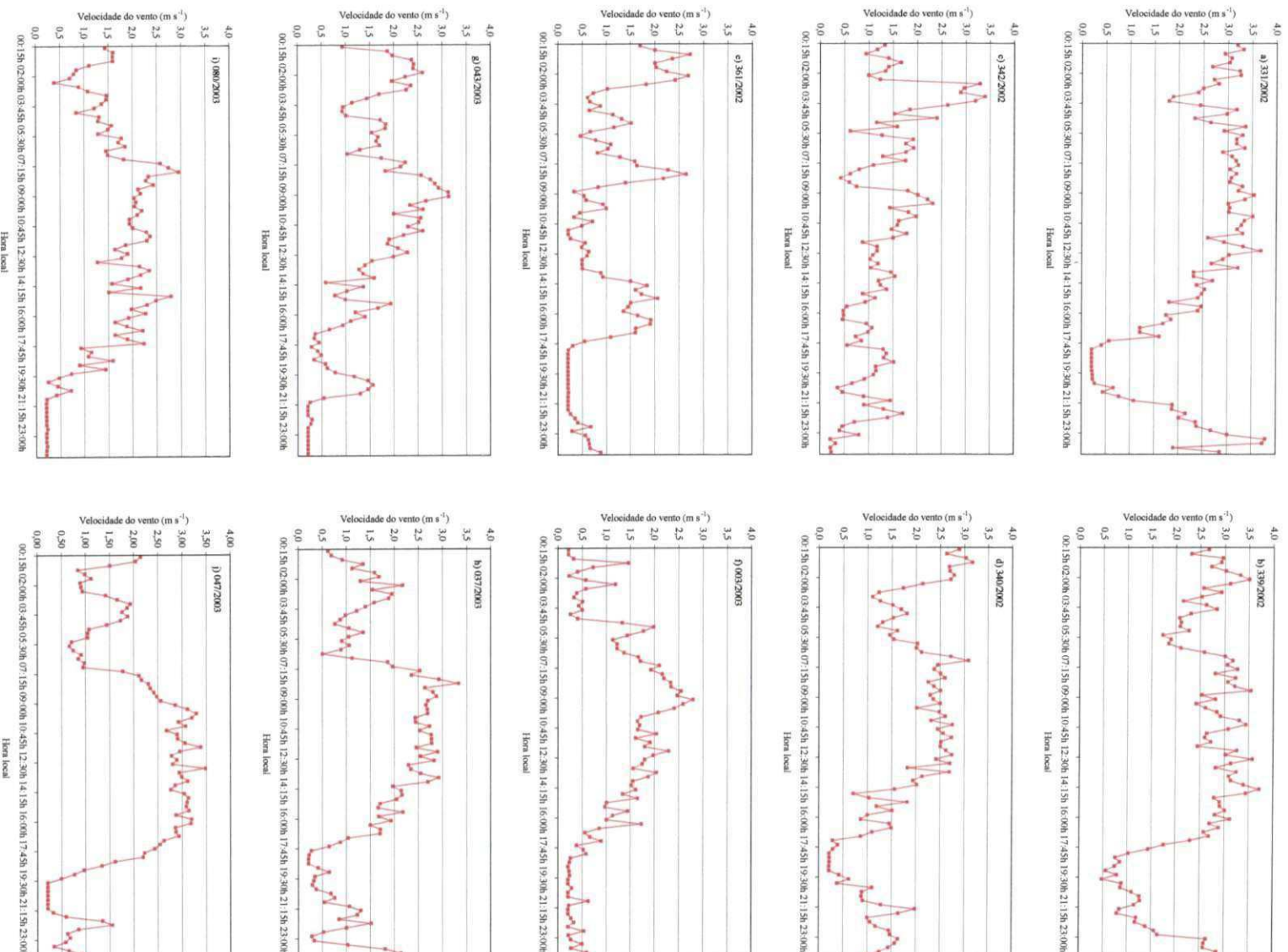


Figura 4.19. Comportamento diário da velocidade do vento sobre o pomar de goiabeira Paluma, para dias representativos das suas fases fenológicas (Fase 3: a e b; Fase 4: c e d; Fase 5: e e f; Fase 5: g e h; Fase 7: i e j), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

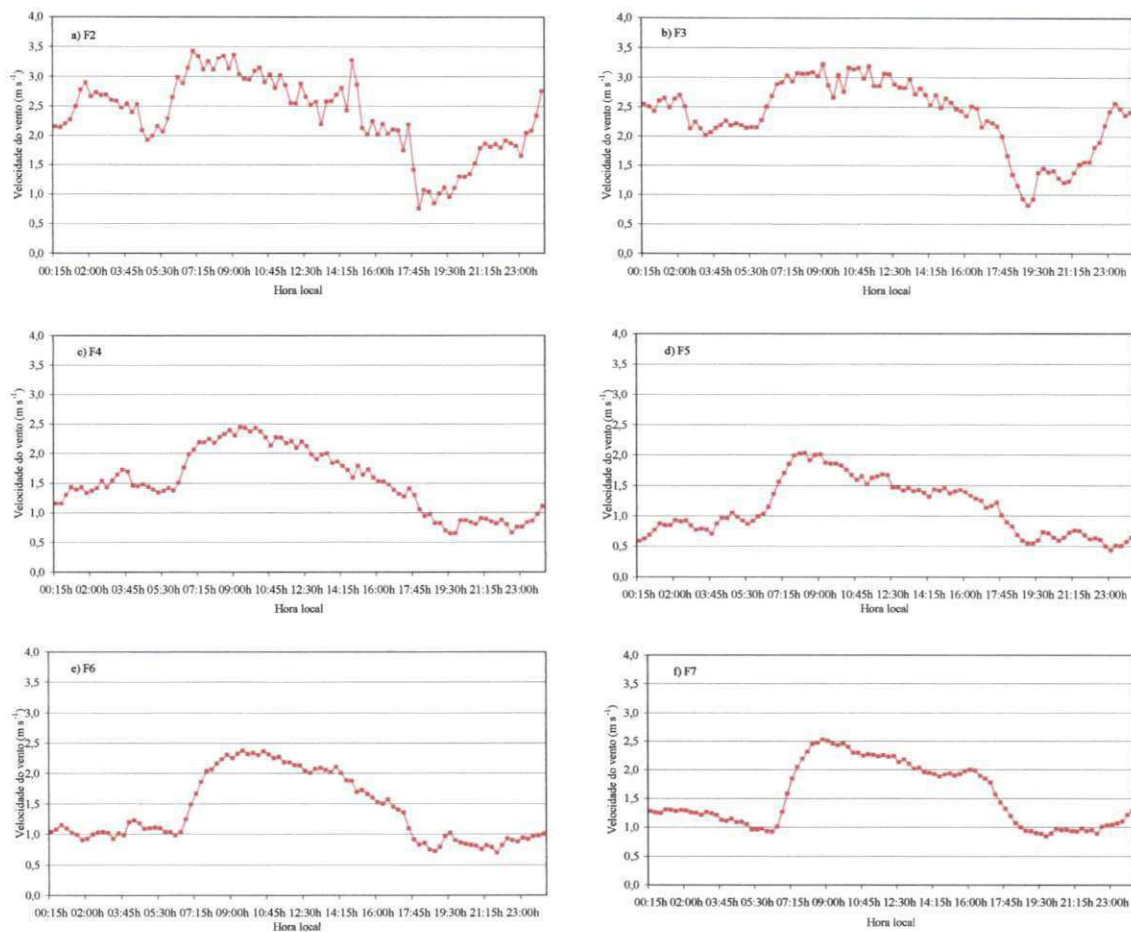


Figura 4.20. Comportamento médio diário velocidade do vento sobre o pomar de goiabeira Paluma, nas suas fases fenológicas (F1, F2,..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

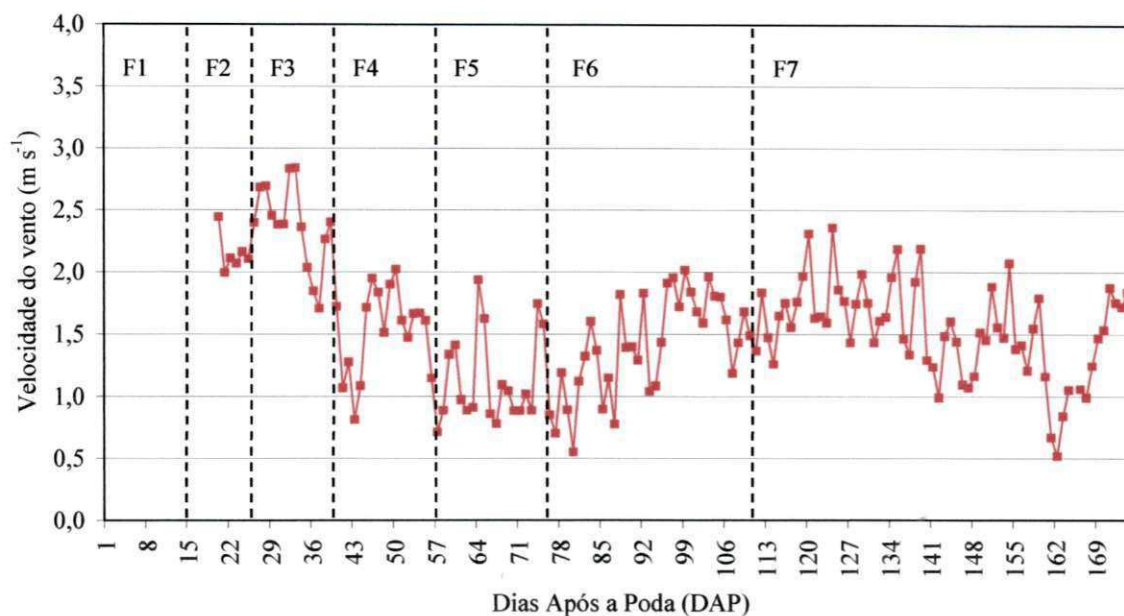


Figura 4.21. Comportamento sazonal da velocidade do vento sobre o pomar de goiabeira Paluma, durante um ciclo fenológico, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

### 4.2.3. Balanço de energia com base na razão de Bowen

#### 4.2.3.1. Comportamento dos componentes do balanço de energia

O comportamento diurno do saldo de radiação ( $R_n$ ), fluxo de calor latente ( $LE$ ), fluxo de calor sensível ( $H$ ) e fluxo de calor no solo ( $G$ ), para dias representativos de cada fase estudada é mostrado na Figura 4.22. Foram selecionados dias com bastante nebulosidade e dias com céu claro, quase sem nuvens, para cada fase fenológica. As densidades de fluxo de energia foram apresentadas para o período de 5:00h às 18:00h. O fluxo de calor latente utilizado para o cálculo da evapotranspiração da cultura foi obtido por meio da Equação 3, usando a razão de Bowen segundo a Equação 7, que correspondeu à integração do  $LE$  para o período em que  $R_n$  foi positivo, critério, também, adotado por Heilman *et al.*, (1989), Lopes (1999) e Silva (2000), dentre outros.

Observa-se na Figura 4.22 (a, c, e, g, i, k e m) que a presença de nebulosidade contribuiu para a grande variabilidade no saldo de radiação ( $R_n$ ) e, conseqüentemente, do fluxo de calor latente (LE). Nos dias representativos da Fase 1, mostrados nas Figura 4.22a e 4.22b, observa-se que os valores de LE foram superior aos de  $R_n$ , durante praticamente todo período diurno, possivelmente devido à penetração de calor nas entrelinhas, que logo após a poda expunha uma maior porcentagem do solo desnudo. Na Fase 2, esse efeito foi reduzindo-se (Figura 4.22c e 4.22d) e praticamente não voltou a ocorrer nas demais fases. Também, se verificam elevados valores de G nos dias representativos da Fase 1 e, como conseqüência, para o fechamento do balanço, os valores de H situaram-se próximos a zero. Durante o início da pesquisa, alguns sensores foram instalados com “*range*” de medida diferente daquele necessário para seu bom funcionamento. A partir da Fase 2, ocorreu uma inversão nesses valores e H tornou-se maior do que G, permanecendo assim, nas demais fases fenológicas, mas que continuou representando uma pequena porção do saldo de radiação.

Nos dias com nebulosidade mais acentuada, os valores dos fluxos de  $R_n$  e de LE tornaram-se bastante próximos entre si, assim como H e G. Sob estas condições, os valores de  $R_n$  e LE são bastante variáveis e atingem valores mais baixos, especialmente quando durante todo período diurno apresentava grande presença de nuvens.

Segundo Zhang & Lemeur (1995), LE tende a comportar-se de maneira semelhante à radiação solar incidente e o déficit de pressão de vapor pode ser desprezado sob condições atmosféricas estáveis e com baixa nebulosidade. A ausência de nebulosidade no dia 339/2002 (Figura 4.22f), representativo da fase de floração (F3), definiu os cursos diurnos de  $R_n$  e LE com pouca variabilidade, exceto no início da manhã e da tarde, quando estes fluxos apresentaram pequena variação. Durante esse período do dia, praticamente todo  $R_n$  é convertido em fluxo de calor latente, verificado quando ambas as curvas quase se sobrepõem. A diferença entre estes dois fluxos foi maior entre 11:00h e 14:00h, ou seja, nos horários de maior demanda atmosférica, em que foram verificados, também, os maiores valores de H. Nas condições de céu claro, os valores máximos de  $R_n$  e LE ocorreram às 11:00h, com  $R_n$  igual a  $692,8 \text{ W m}^{-2}$  e LE igual a  $646,1 \text{ W m}^{-2}$ . Com relação a H, percebe-se que o mesmo apresentou menores valores a partir das 14:00h, logo após o término da irrigação. Para um dia representativo da ausência de nebulosidade durante a Fase 4, percebe-se no dia 340/2002 (Figura 4.22h), durante o período compreendido entre

07:00 h e 09:00 h, que o valor do fluxo de calor sensível foi maior que o de LE, uma vez que a umidade relativa do ar no nível 1 (logo acima do dossel) foi menor que no nível 2. Exceto por este período, os fluxos apresentaram valores considerados normais, com máximos de Rn e LE iguais a 691,7 e 537,0 W m<sup>-2</sup>, respectivamente, ocorrido próximo às 11:00 h. Os valores de G permaneceram quase sempre próximos a zero, em virtude do constante sombreamento e molhamento do solo. Silva (2000), trabalhando com a cultura da mangueira, também obteve baixos valores de G.

O período de maior precipitação na região compreende os meses de janeiro a abril e, conseqüentemente, de maior nebulosidade. Com isso, observaram-se dias com intensa presença de nuvens (Figura 4.22i, k e m), onde os valores de LE são praticamente iguais aos de Rn, levando a quase nulidade os valores dos fluxos H e G, como mostrado para os dias representativos das Fases 5, 6 e 7. Mesmo na seleção de dias com céu limpo, observou-se a presença de nuvens, durante o início da manhã e final da tarde (Figura 4.22j, l e n). Durante os outros horários, verificaram-se fluxos de Rn e LE com valores máximos ocorrendo entre 11:00h e 12:00h e, diferenças desprezíveis entre ambos em alguns períodos do dia tanto no início da manhã quanto no final da tarde. Proporcionalmente, percebeu-se, nas Fases 5, 6 e 7, que o Rn foi menos consumido na forma de LE que nas Fases 1, 2, 3, e 4. Particularmente, para o dia 37/2003 (Figura 4.22l), representativo da segunda fase de crescimento de frutos, caracterizado por um crescimento mais lento e endurecimento das sementes, verificou-se que Rn foi mais bem repartido entre LE e H, ou seja, aparentemente houve um menor consumo hídrico durante esta fase fenológica da goiabeira, em detrimento de um maior aquecimento do ambiente.



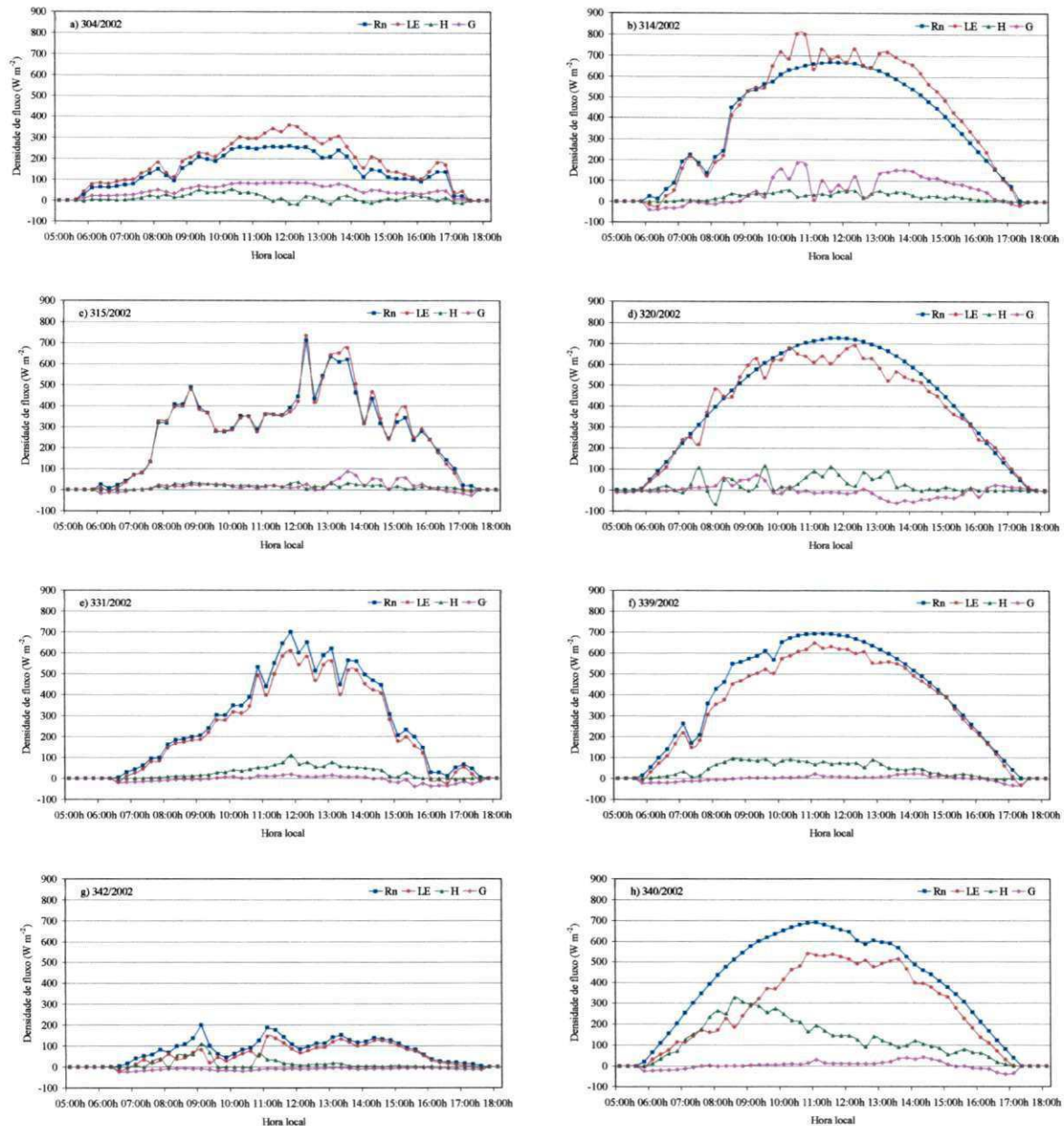


Figura 4.22. Comportamento diurno dos componentes do balanço de energia (Rn = saldo de radiação, LE = fluxo de calor latente, H = fluxo de calor sensível, G = fluxo de calor no solo) sobre o pomar de goiabeira Paluma, para dias representativos das suas fases fenológicas (Fase 1: a e b; Fase 2: c e d; Fase 3: e e f; Fase 4: g e h), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

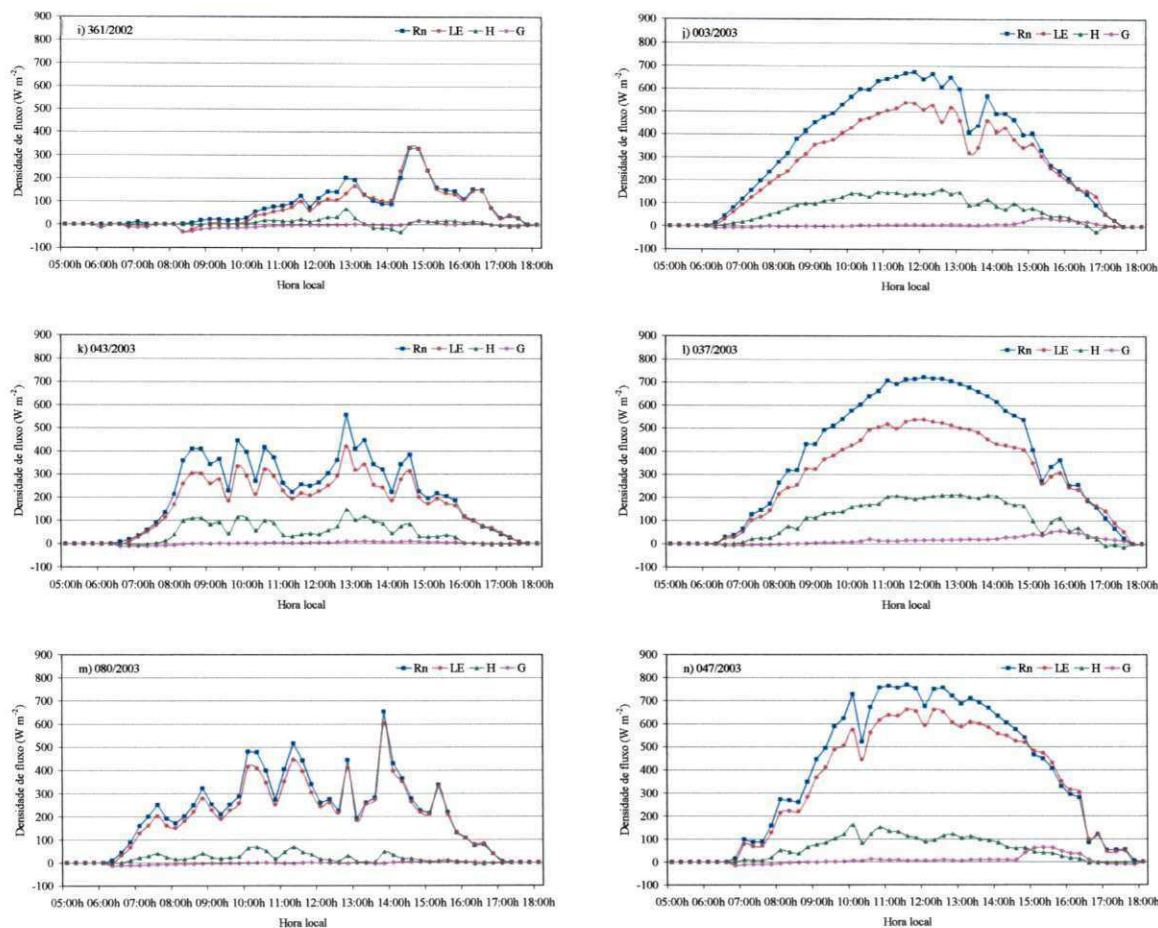


Figura 4.22. (continuação) Comportamento diurno dos componentes do balanço de energia (Rn = saldo de radiação, LE = fluxo de calor latente, H = fluxo de calor sensível, G = fluxo de calor no solo) sobre o pomar de goiabeira Paluma, para dias representativos das suas fases fenológicas (Fase 5: i e j; Fase 6: k e l; Fase 7: m e n), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



Ao analisar o comportamento médio diurno dos componentes do balanço de energia, para cada fase estudada do ciclo produtivo da goiabeira (Figura 4.23), percebe-se que ocorreu uma suavização das curvas dos mesmos quando comparadas com as curvas dos dias selecionados, mesmo tendo-se trabalhado com as mais variadas condições de nebulosidade durante cada fase do estudo. Com isso, verifica-se que houve predominância de dias com ocorrência de nebulosidade, pois o processamento dos valores médios diurnos, implicou na obtenção de curvas com flutuações durante as sete fases estudadas, principalmente, entre 10:00h e 13:00h.

Observa-se na Figura 4.23 que as curvas dos componentes do balanço de energia ( $R_n$ , LE, H e G) apresentaram curso semelhante nas fases fenológicas compreendidas entre a floração e a colheita (F3, F4, F5, F6 e F7), sendo que o fluxo de LE respondeu bem às variações de  $R_n$  e atingiu valores máximos em torno do meio-dia, em cerca de 541,0, 500,7, 449,9, 508,4 e 582,4  $W m^{-2}$ , respectivamente, enquanto que aquele atingiu máximo de aproximadamente 602,7, 565,3, 530,9, 596,2 e 605,1  $W m^{-2}$ , correspondentes às fases de 3 a 7, entre 11:45h e 12:00h. É bastante evidente que os valores dos fluxos ( $R_n$  e LE) inicialmente foram mais elevados, em função da quantidade de radiação solar à superfície, que posteriormente foi reduzindo-se nos meses mais chuvosos, devido à presença de nebulosidade, mas que voltaram a aumentar, nos meses de março e abril, quando as chuvas diminuíram. Verifica-se, ainda, que os valores máximos de G acompanharam essa tendência, sendo que os maiores valores ocorreram na Fase 3 (33,33  $W m^{-2}$ ) e Fase 7 (37,0  $W m^{-2}$ ), entre 14:00h e 16:30h. De um modo geral, o fluxo de G permaneceu próximo a zero durante todo período diurno, em virtude da frequência de irrigação diária, especialmente entre 8:00h e 14:00h. Com relação ao fluxo de H, que na metodologia do BERB é obtido como resíduo da equação, ocorreu exatamente o oposto ao observado com o fluxo de LE, de modo que os valores máximos de H variaram entre 70,0 e 100,0  $W m^{-2}$  nas fases 3 e 5 (Figura 4.23). Nesta mesma Figura, excetuando-se F1 e F2, observa-se que os valores de LE tenderam a igualar-se e eventualmente, superando  $R_n$  no final da tarde, principalmente na F7. Nos outros períodos do dia,  $R_n$  foi superior a LE.

Na Figura 4.23 é apresentado o comportamento médio diurno dos componentes do balanço de energia para cada fase fenológica. O que se percebe é algo semelhante ao discutido anteriormente para os dias representativos de cada fase fenológica, evidenciando um comportamento mais ou menos semelhante ao longo da duração de todas as fases

fenológicas. Nas Fases 1 e 2, constata-se a existência de algum problema na obtenção dos dados, normalizado a partir da Fase 3, quando os fluxos de calor assumiram valores reais e característicos de fruteiras irrigadas em nível diário, em condições de alta demanda atmosférica.

Os valores médios para o período de saldo de radiação positivo, correspondentes a cada uma das fases fenológicas da goiabeira são mostrados na Figura 4.24. Observa-se que tanto no início quanto no final do ciclo, os valores de LE superam os de Rn e ocorreram valores negativos de H. Durante todo ciclo, foram verificados baixos valores de G, em virtude da quantidade e localização do fluxímetro, além da irrigação realizada numa frequência diária. Como se tratam de medidas a nível diário, observa-se uma grande variação dos valores de Rn, LE e H, enquanto que os de G permaneceram baixos e constantes durante, praticamente, todo ciclo produtivo da goiabeira. Os fluxos do saldo de radiação (Rn) e de calor latente (LE) apresentaram comportamentos semelhantes, com valores médios diurnos para todo experimento iguais a 323,6 e - 293,5 W m<sup>-2</sup> (Tabela 4.5). Quanto aos valores de H e G, os mesmos foram iguais a - 39,7 e 11,8 W m<sup>-2</sup>, respectivamente.

Na Tabela 4.5, também é apresentada a partição do saldo de radiação entre os outros componentes do balanço de energia. A partição de Rn em LE apresentou os maiores valores nas fases 1 (107,6%), 2 (93,9%) e 7 (91,4%) enquanto que o menor ocorreu na fase 6 (82,9%). A maior porção do saldo de radiação utilizada como calor sensível ocorreu durante a primeira fase de crescimento de frutos (F5), quando atingiu 17,8% enquanto a menor nas fases iniciais de brotação (F1) e de crescimento vegetativo (F2) e ao final, durante a terceira fase de crescimento de fruto, maturação e colheita (F7), quando a razão H/Rn foi de 9,2, 9,5 e 9,9%, respectivamente.

Silva (2000), trabalhando com a mangueira irrigada no Submédio São Francisco, obteve os valores de LE/Rn iguais a 91,3% durante fase fenológica da queda de frutos, tendo observado menor valor (75,3%) na fase de floração da mangueira. Quando considerou a relação H/Rn, este autor obteve valores máximos de 20% na fase de floração.

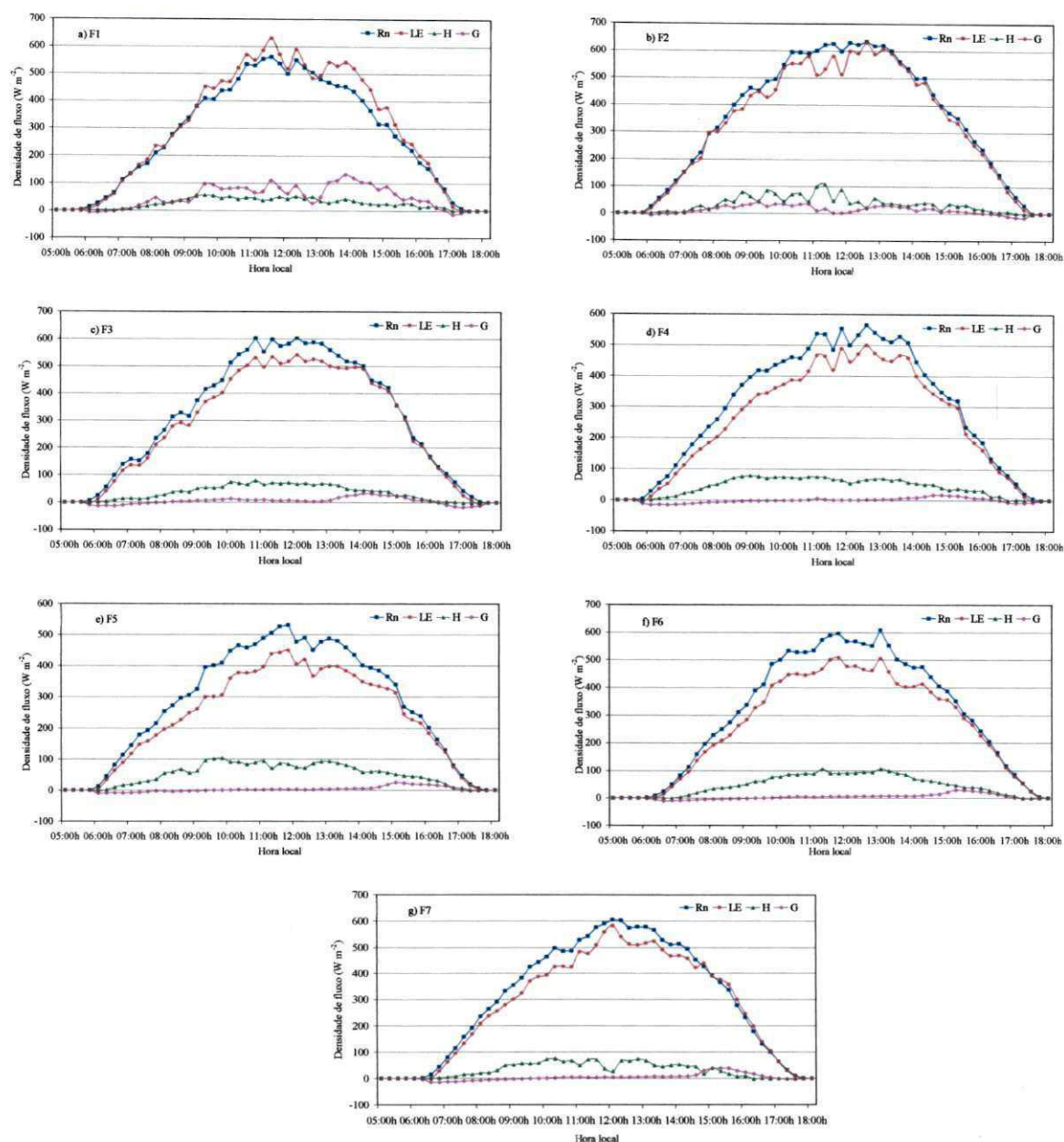


Figura 4.23. Comportamento médio diurno para o período de saldo de radiação positivo, dos componentes do balanço de energia com base na razão de Bowen, sobre um pomar de goiabeira Paluma, nas suas fases fenológicas (F1, F2,..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

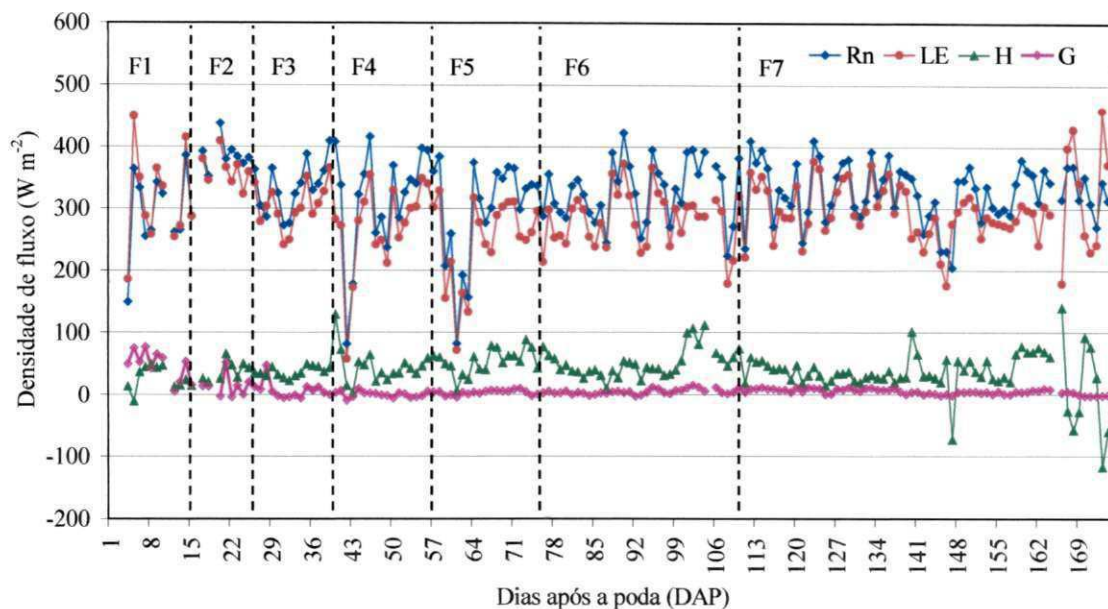


Figura 4.24. Comportamento médio estacional dos componentes do balanço de energia para o período de saldo de radiação positivo, sobre a goiabeira Paluma, durante as sete fases de desenvolvimento fenológico, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Tabela 4.5. Valores médios instantâneos diurnos dos componentes do balanço de energia com base na razão de Bowen (BERB) e partição do saldo de radiação (Rn) em fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G), nas fases fenológicas do ciclo produtivo da goiabeira, cultivar Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Componentes do BERB	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	Média
Rn ( $W m^{-2}$ )	294,3	368,1	334,9	314,2	297,5	328,8	327,6	323,6
LE ( $W m^{-2}$ )	- 316,9	- 345,6	- 303,6	- 269,2	- 247,2	- 272,6	- 299,4	- 293,5
H ( $W m^{-2}$ )	27,2	35,2	36,5	44,6	53,0	48,5	32,5	39,7
G ( $W m^{-2}$ )	49,8	12,8	5,31	-0,33	2,7	4,1	4,4	11,8
LE/Rn (%)	107,6	93,9	90,6	85,68	83,1	82,9	91,4	90,7
H/Rn (%)	9,2	9,5	10,9	14,21	17,8	14,7	9,9	12,3
G/Rn (%)	16,92	3,48	1,59	-0,10	0,93	1,27	1,34	3,63

#### 4.2.3.2. Comportamento da razão de Bowen

Os valores da razão de Bowen corrigida por meio da Equação 7 não foram diferentes daqueles obtidos pela Equação 5. Na Figura 4.25 é apresentado o curso diurno da razão de Bowen, para o período de 05:00h às 18:00h, para dias representativos com nebulosidade e sem nebulosidade, de cada fase fenológica estudada. Exceto nas fases 1 e 2, percebe-se nos dias com nebulosidade, que a razão de Bowen apresentou maior variabilidade com valores inferiores aos obtidos em dias de céu claro, quando seu curso diurno apresentou menor variação e valores mais elevados, principalmente no início da manhã e no final da tarde. Neste mesmo período, a razão de Bowen apresentou valores negativos, indicando que o fluxo de H, também, foram negativos nesses horários. Quando o valor da razão de Bowen aproxima-se de zero, significa que quase toda energia disponível foi utilizada pela cultura no processo de evapotranspiração, ou seja, quase todo  $R_n$  foi convertido em LE.

Analisando-se o dia 340/2002, representativo de condições de céu claro da Fase 4, observa-se uma grande variabilidade da razão de Bowen entre 6:00h e 11:00h, ocorrida em função da inversão térmica, registrada pelo conjunto psicrométrico, mostrada na Figura 4.13h. Para o dia 342/2002, referente à Fase 4, observou-se que  $\beta$  também variou bastante no início da manhã, atingindo valores acima de 1. Quando isto ocorreu, o valor do fluxo H começou a elevar-se, igualando e superando o valor de LE, especialmente entre 07:00h e 09:00h. Uma outra característica da razão de Bowen é que ela torna-se negativa pouco antes das 07:00h e logo após as 17:00h, resultando em valores negativos de H, nestes mesmos períodos. Em geral, nos dias de céu claro, os valores de  $\beta$  apresentaram-se positivos e pequenos, na faixa de 0,2 a 0,4. Souza (2003) obteve valores de  $\beta$  inferiores a 0,3 para o período diurno. Este autor, também, registrou a importância de se manter a musselina limpa e com boa ascensão capilar para garantir a qualidade dos dados da razão de Bowen e, conseqüentemente, dos fluxos de LE e de H. Este relato, também, foi feito por Soares (2003).

Analisando-se as curvas da razão de Bowen ( $\beta$ ) para os dias selecionados, constatou-se que são raras as ocasiões em que  $\beta$  atinge valores superiores a 1 e inferiores a -1, o que segundo Lopes (1999) é um indicativo de que a umidade nos níveis mais próximos à copa apresenta-se mais elevada. Os valores mais elevados de  $\beta$  ocorreram nos

dias 340 e 342/2002, da Fase 4, quando ocorreu deficiência de ascensão de água nos psicrômetros. O sinal do valor da razão de Bowen determina o sinal do fluxo de H, evidenciado quando se compara a Figura 4.22 com a Figura 4.25.

Moura (2001) comparando as curvas do fluxo de calor latente obtido pelo método original do balanço de energia (LE) e  $LE_c$  (fluxo de calor latente obtido pela razão de Bowen corrigida pela equação 7), verificou que os valores de LE eram quase iguais aos de  $LE_c$ , em todas as fases de desenvolvimento da cultura. Segundo Moura (2001) os valores de  $LE_c$  foram um pouco superiores aos de LE, no entanto as diferenças foram tão pequenas que ambas as curvas de LE quase se sobrepuseram. Desta forma, a utilização da Equação 7 proposta por Verma *et al.* (1978), com a finalidade de corrigir efeitos advectivos não produziu resultados diferentes daqueles obtidos pelo método original do balanço de energia com base na razão de Bowen para as condições da pesquisa. Mesmo assim, os resultados aqui apresentados foram obtidos por meio da proposição de Verma *et al.* (1978) para cálculo da razão de Bowen. No entanto, esta correção não permite verificar, para as condições do experimento, a presença de advecção. Oliveira (1998), visando analisar os efeitos advectivos sobre um campo cultivado com a cultura do amendoim, calculou a correção de LE com a razão de Bowen corrigida e, concluiu que corrigindo apenas os efeitos da razão de Bowen não foi possível detectar advecção, já que as curvas de LE obtidas pelo método original do balanço de energia sobrepuseram-se às obtidas utilizando a razão de Bowen corrigida.



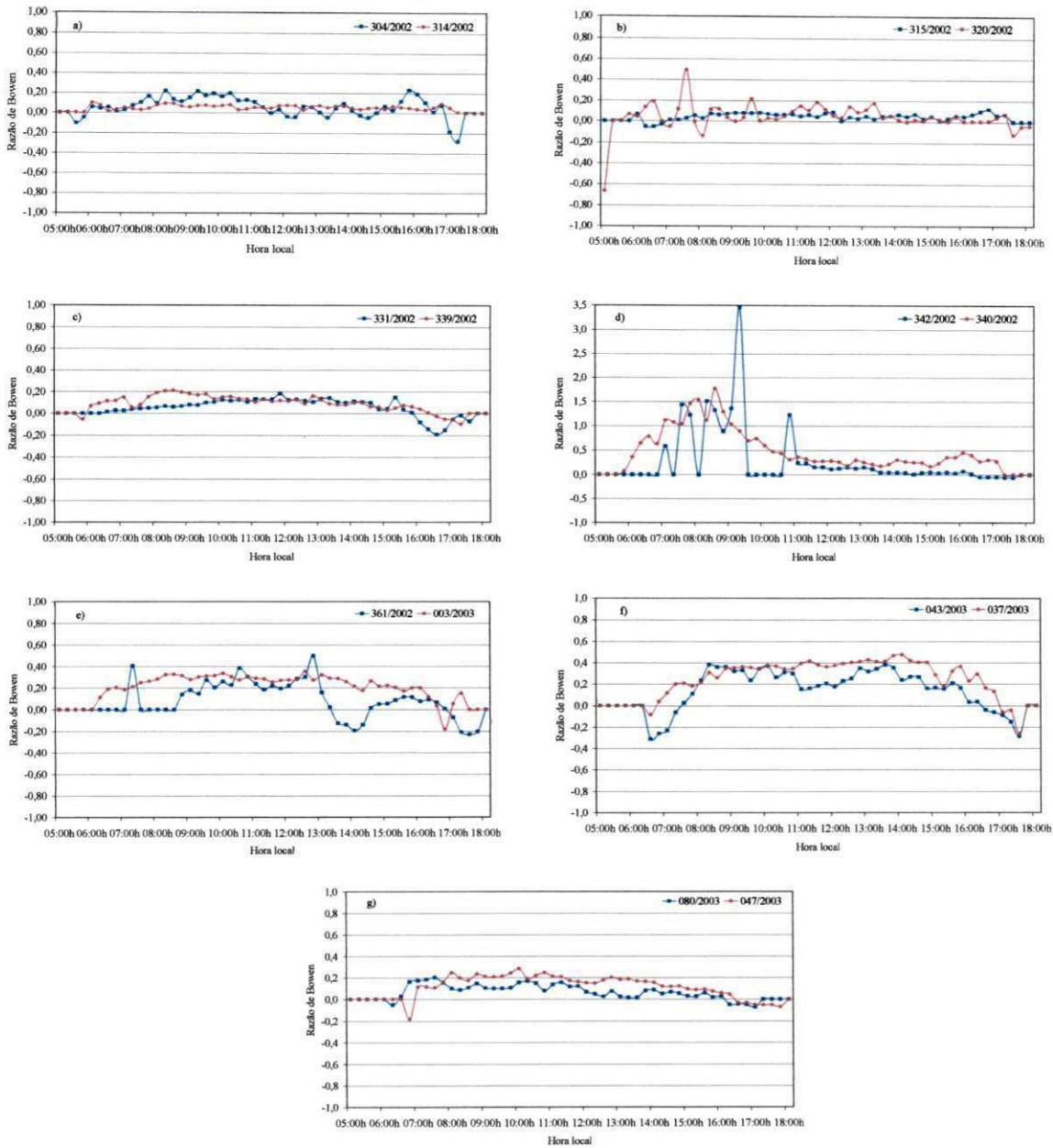


Figura 4.25. Comportamento diário da razão de Bowen sobre o pomar de goiabeira Paluma, durante dias representativos de alta nebulosidade (linha azul) e de céu limpo (linha vermelha) das fases fenológicas da cultura (F1, F2, F3, F4, F5, F6 e F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



#### 4.2.3.3. Análise de erros

As análises de erros no cálculo da razão de Bowen ( $\beta$ ) e do fluxo de calor latente (LE) obtido pelo método do balanço de energia sobre o pomar de goiabeira para os dias representativos de cada uma das sete fases fenológicas estudadas são apresentada nas Figuras de 4.26 e 4.27.

Na Figura 4.26 estão apresentados os comportamentos dos erros relativos diurnos da razão de Bowen ( $\varepsilon_r(\beta)$ ) para dias representativos de cada fase fenológica. De um modo geral, pode-se verificar que  $\varepsilon_r(\beta)$  apresentou maiores valores e grande variabilidade nos dias com maior presença de nuvens, principalmente no início da manhã, até 08:00h, e final da tarde, a partir das 16:00h. Isto também foi observado por Soares (2003) e Silva (2000), respectivamente, para as culturas da videira e da mangueira na região do Submédio do São Francisco. Excetuando-se esses períodos, na maioria dos dias, pode-se encontrar valores em torno de 0,5 (50%) como no dia 342/2002 e próximos a 0,2 (20%) como verificado em dias das fases 1, 3, 6 e 7.

Com relação aos dias de céu claro, com pouca ou nenhuma nebulosidade, pode-se verificar que as flutuações no erro relativo da razão de Bowen ( $\varepsilon_r(\beta)$ ), foram menores, inclusive nos horários do início e final do dia. Nessas oportunidades, foram observados valores extremos na ordem de 1,2 nas fases 4 e 6. Em geral,  $\varepsilon_r(\beta)$  para os dias com pouca nebulosidade foram, aproximadamente, iguais a 0,20 (20%) durante maior parte do dia. Valores entre 0,20 e 0,30 foram observados sobre um pomar de mangueira por Lopes (1999).

Na Figura 4.27 estão ilustrados os comportamentos do erro relativo do fluxo de calor latente ( $\varepsilon_r(LE\beta)$ ) obtidos com base no balanço de energia, referentes às sete fases fenológicas da goiabeira. Constatou-se que os maiores valores ocorreram no início da manhã, mas que tenderam a decrescer até o final da tarde, tanto nos dias com presença de grande nebulosidade como nos de baixa. Excetuando-se os dias com muitas nuvens, ocorridos nas fases 4 e 5, observou-se uma pequena flutuação dos erros de LE. Verificou-se, ainda, no dia 340/2002 da fase 4 que os valores de  $\varepsilon_r(LE)$  situaram-se na faixa de 0,20 (20%), entre 06:00h e 08:30h, em virtude da inversão do gradiente de temperatura, descrito no item 4.2.2.2. Constatou-se para a maioria dos dias, que os valores do erro relativo do

fluxo de calor latente, situaram-se próximo a 0,02 (2%). Em algumas fases de desenvolvimento da videira, Soares (2003) observou comportamentos e valores semelhantes aos obtidos neste estudo.

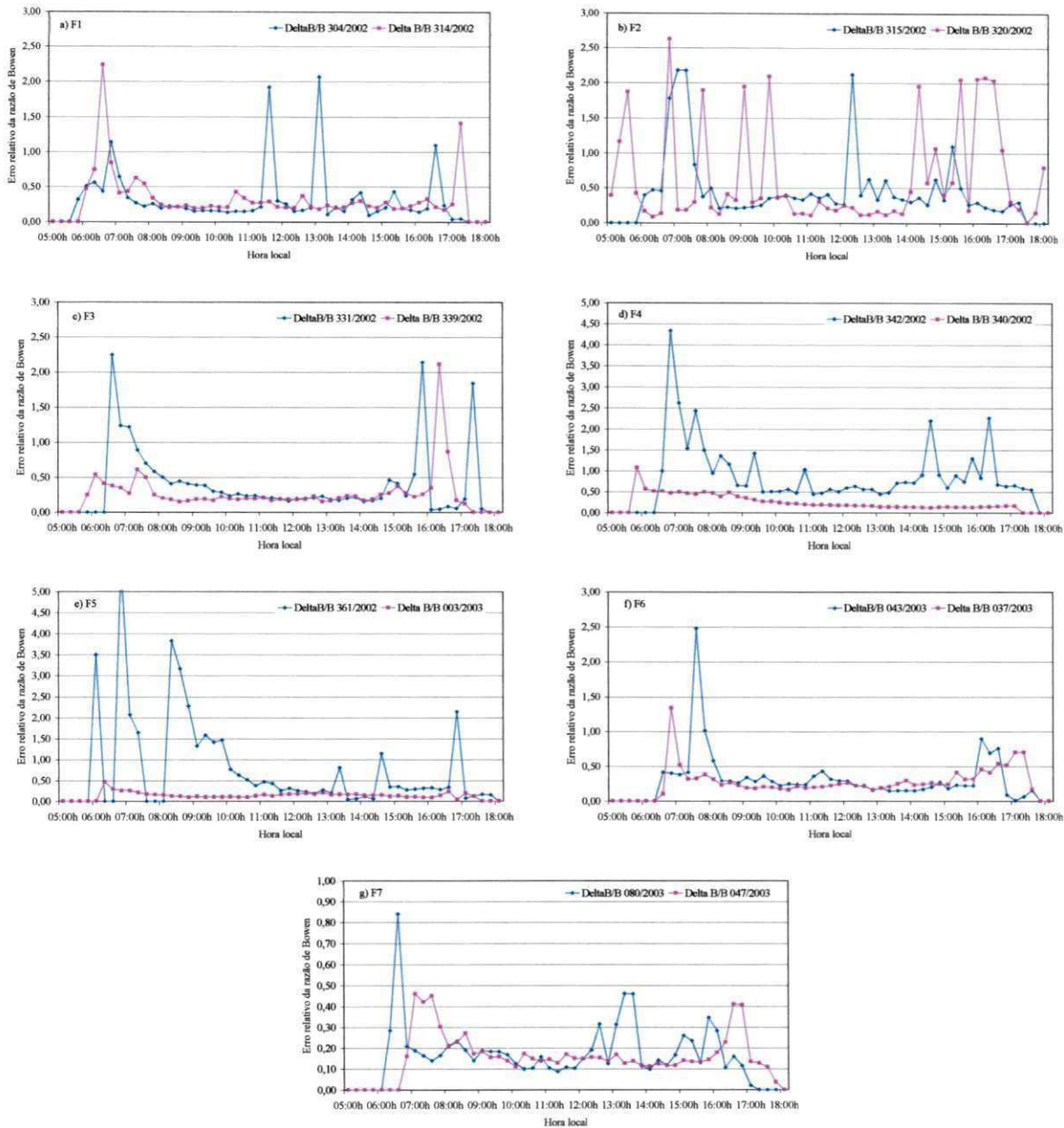


Figura 4.26. Comportamento diurno do erro relativo da razão de Bowen para dias representativos de céu com nebulosidade e céu limpo, referente as sete fases fenológicas da goiabeira (F1,..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.



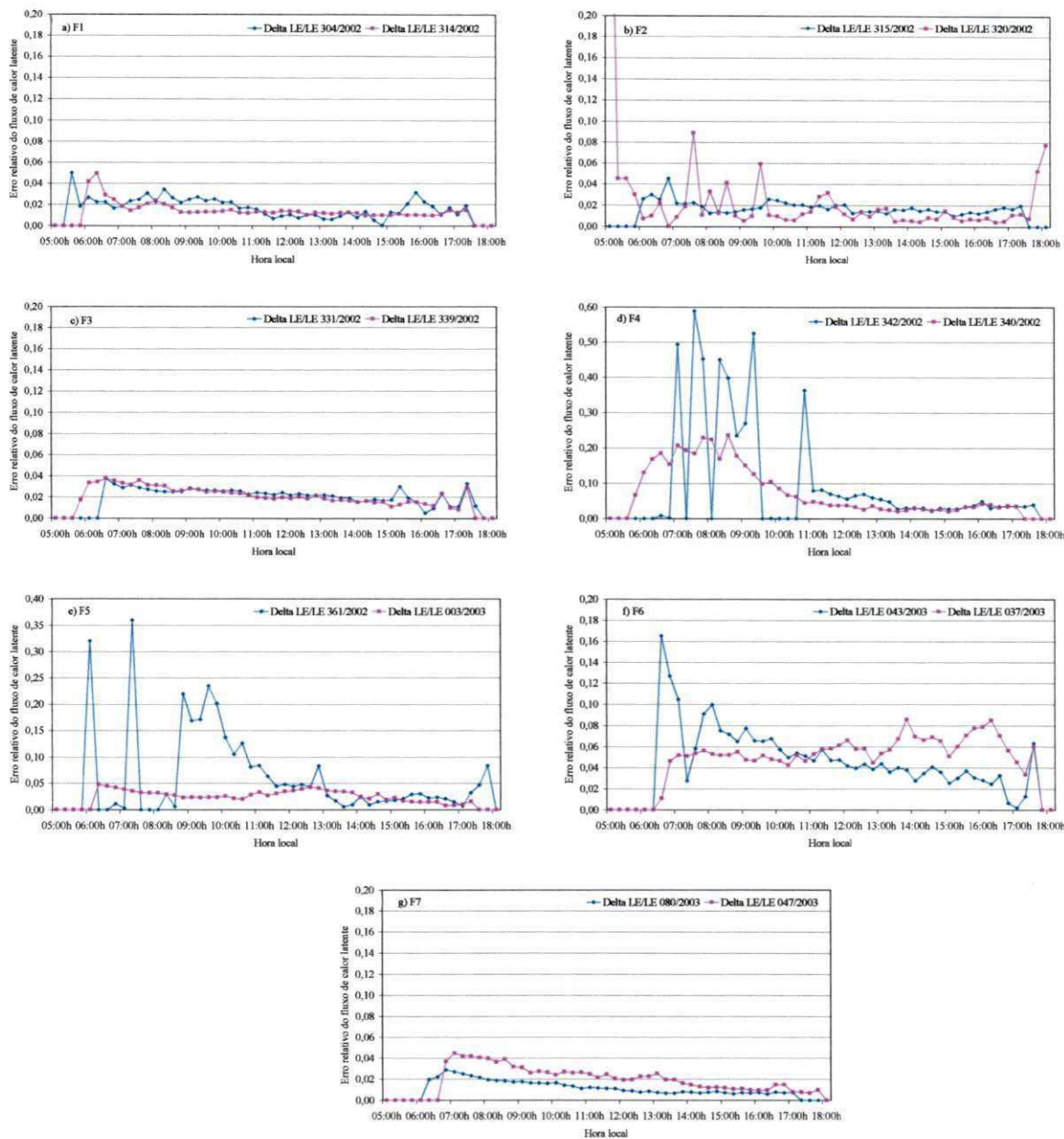


Figura 4.27. Comportamento diurno do erro relativo do fluxo de calor latente para dias representativos de céu com nebulosidade e céu limpo, referente as sete fases fenológicas da goiabeira (F1,..., F7), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

A Tabela 4.6 mostra resumo dos valores médio diurnos da diferença de temperatura do bulbo seco ( $\Delta T_s$ , °C) e do bulbo úmido ( $\Delta T_u$ , °C), do erro relativo da razão de Bowen

( $\varepsilon_r(\beta)$ ) e do erro relativo do fluxo de calor latente ( $\varepsilon_r(LE)$ ), para cada fase fenológica da goiabeira. Pode-se observar que os valores de  $\varepsilon_r(\beta)$ , nas fases 6 e 2, variaram de 0,104 a 0,521, respectivamente, resultando na obtenção de baixos erros relativos do fluxo de calor latente ( $\varepsilon_r(LE)$ ), que foram iguais a 0,018 e 0,043, correspondentes às fases 6 e 4, respectivamente.

Tabela 4.6. Valores médios diurnos dos erros relativos da razão de Bowen ( $\varepsilon_r(\beta)$ ) e do fluxo de calor latente ( $\varepsilon_r(LE)$ ), nas fases fenológicas do ciclo produtivo da goiabeira, cultivar Paluma, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Fases fenológicas	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
$\Delta T_s$ (°C)	-0,011	0,027	0,041	0,094	0,024	0,004	0,086
$\Delta T_u$ (°C)	-0,494	-0,401	-0,333	-0,313	-0,360	-0,525	-0,412
$\varepsilon_r(\beta)$	0,365	0,521	0,326	0,412	0,138	0,104	0,122
$\varepsilon_r(LE)$	0,019	0,036	0,023	0,043	0,023	0,018	0,055

#### 4.2.4. Evapotranspiração da goiabeira

##### 4.2.4.1. Evapotranspiração da goiabeira pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen – ETc\_BERB

A evapotranspiração diária ao longo do ciclo produtivo do pomar de goiabeiras determinada pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen (ETc\_BERB) é apresentada na Figura 4.28. Verifica-se que os valores da evapotranspiração diária apresentaram grandes flutuações, em decorrência de sua dependência direta do saldo de radiação à superfície, por sua vez altamente relacionado com a radiação solar incidente. Observa-se nas fases F1 e F2, que os valores de ETc\_BERB foram bastante elevados, durante alguns dias representativos destas fases fenológicas, em decorrência de problemas ocorridos com os sensores de temperatura e do saldo radiômetro. Problemas esses que foram solucionados a partir da fase F3.

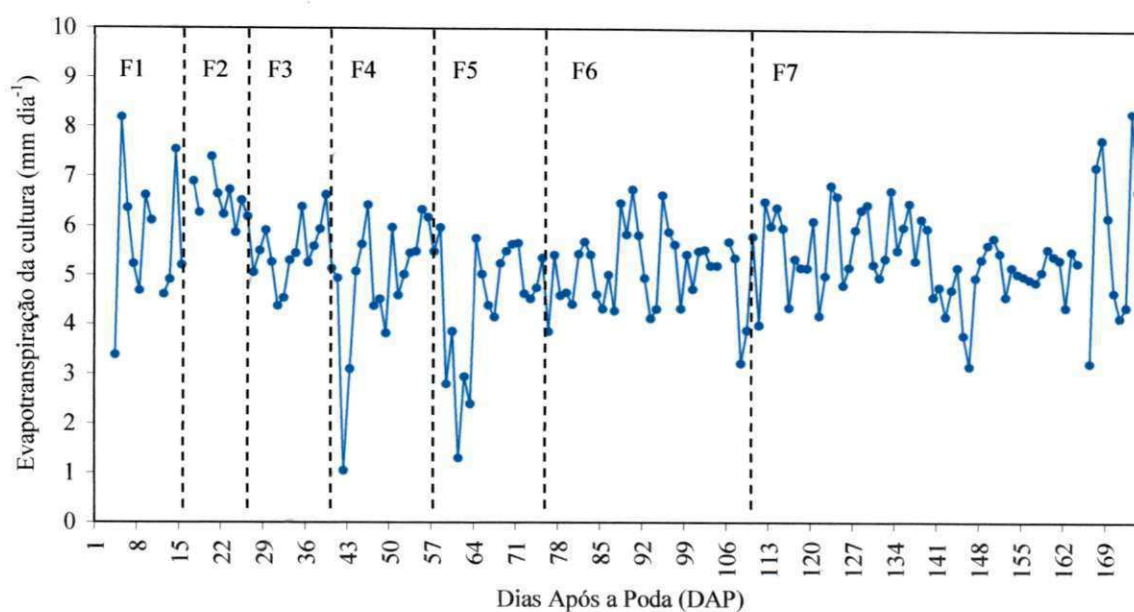


Figura 4.28. Comportamento diário da evapotranspiração do pomar de goiabeiras Paluma obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen, Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Na fase 3, correspondente à floração, a evapotranspiração do pomar variou entre 4,4 e 6,6 mm dia<sup>-1</sup>. A fase seguinte que compreende a queda fisiológica dos frutos imaturos, na qual houve indícios de falta de água, encontrou-se um baixo valor da ETC\_BERB (1,0 mm dia<sup>-1</sup>), uma vez que sob condições de precipitação os psicrômetros não são capazes de detectar as pequenas variações da temperatura entre os dois níveis de medida. Após esse dia (42 DAP), a ETC\_BERB começou a aumentar, atingindo o valor de 6,4 mm dia<sup>-1</sup>. Na primeira fase de crescimento de frutos (F5) também foi observada precipitação na área, o que, mais uma vez, contribuiu para a obtenção de baixos valores da evapotranspiração do pomar, que oscilou em torno de 1,3 mm dia<sup>-1</sup>. A partir desta fase houve um contínuo aumento nos valores da ETC até metade da fase 7, que compreende a terceira fase de crescimento de frutos, maturação e colheita. Na segunda fase de crescimento de frutos (F6) a evapotranspiração da cultura alcançou um mínimo de 3,2 mm dia<sup>-1</sup> e um máximo de 6,7 mm dia<sup>-1</sup>. Até metade da F7 (139 DAP) os valores de ETC\_BERB permaneceram elevados, variando entre 4,0 e 6,8 mm.dia<sup>-1</sup>. Na segunda metade da fase 7, a ETC\_BERB variou entre 3,2 e 8,3 mm dia<sup>-1</sup>.



O comportamento da evapotranspiração média diária da goiabeira para cada fase fenológica é apresentado na Figura 4.29. Quando se analisam as médias para cada fase, observa-se uma menor flutuação entre os valores da evapotranspiração do ciclo produtivo, que ficaram entre 4,5 e 6,1 mm dia<sup>-1</sup>. A fase F2, cuja característica é o início do crescimento vegetativo, foi a que apresentou maior valor médio de ETc\_BERB (6,1 mm dia<sup>-1</sup>), enquanto que a primeira fase de crescimento de frutos (F5) foi a que apresentou menor evapotranspiração (4,5 mm dia<sup>-1</sup>). A partir desta fase até a colheita dos frutos ocorreu um aumento da ETc\_BERB, que passou de 5,1 mm dia<sup>-1</sup> na F6 para 5,4 mm dia<sup>-1</sup> na F7. A média da evapotranspiração diária do pomar de goiabeira para todo ciclo fenológico foi de 5,3 mm dia<sup>-1</sup>.

Em culturas que não cobrem totalmente o solo, como fruteiras de médio e grande porte, há de se ter muito cuidado com a altura dos psicrômetros em relação à copa da planta, a fim de que os mesmos sejam capazes de registrar as pequenas variações dos gradientes de temperatura e umidade. Neste sentido, Silva (2000) observou que a altura ideal para instalação dos mesmos é de 3,0 acima da copa de mangueiras. No entanto, deve-se ter o cuidado de obedecer às restrições e limitações do método do balanço de energia para que o mesmo possa ser aplicado.

#### 4.2.4.2. Evapotranspiração da goiabeira pelo método do balanço hídrico no solo – ETc\_BHS

A determinação da evapotranspiração da goiabeira pelo método do balanço hídrico no solo foi realizada para duas áreas distintas do pomar: 1) área da pesquisa (ETc\_BHS\_PE) e 2) área do produtor (ETc\_BHS\_PR). A única diferença entre ambas é que na área da pesquisa utilizaram-se as seguintes informações para determinação da lâmina de irrigação: a) Kc da goiabeira previamente determinado, b) dados da evapotranspiração de referência (ETo), c) eficiência de aplicação do sistema de irrigação e, d) vazão do emissor. Vale relatar, que na área do produtor a lâmina de água era um valor fixo, proveniente da lâmina máxima de irrigação determinada pelo projetista. Além disso, foram verificadas algumas ocorrências relacionadas à substituição de dois pomares vizinhos ao de goiabeira, por uma área nova de mangueira e a implantação de um parreiral, cujo suprimento de água foi obtido reduzindo-se o tempo de aplicação de água dos outros

pomares já existentes, resultando na redução da lâmina de água aplicada no tratamento do produtor. Mesmo assim, o total de água de irrigação aplicado no tratamento da pesquisa foi 38mm inferior ao aplicado no tratamento do produtor (1141mm).

Apesar da coleta de dados no campo ter sido realizada quase que diariamente, são apresentados apenas os resultados da evapotranspiração da cultura média por cada fase fenológica, tanto para o tratamento da pesquisa quanto para o do produtor (Figura 4.29). Apesar dos dados do ciclo produtivo da goiabeira mostrarem que a quantidade de água aplicada no tratamento da pesquisa (PE) foi menor do que no tratamento do produtor (PR), em algumas fases fenológicas, como no início do crescimento vegetativo, procurou-se umedecer bem o solo da área – PE. Assim, verificou-se que o valor da  $ETC_{BHS\_PE}$  (7,5 mm dia<sup>-1</sup>) foi bem superior ao observado no PR, quando a  $ETc_{BHS\_PR}$  foi praticamente igual à determinada pelo método do balanço de energia (6,2 mm dia<sup>-1</sup>). Verifica-se que da F2 até a F4, houve uma tendência de redução dos valores da evapotranspiração da cultura, tanto pelo BERB como pelo BHS no tratamento da PE, sendo que no tratamento do PR, essa redução teve início na fase F3. Na fase de queda fisiológica dos frutos imaturos a evapotranspiração no tratamento PE apresentou valor menor do que a  $ETc_{BHS\_PR}$ , o que pode estar associado ao elevado índice de queda de frutos imaturos no tratamento PE. Após o pegamento dos frutos, os mesmos começam a se desenvolver, implicando no aumento da necessidade de água, de modo que nas fases seguintes (fases 5, 6 e 7), os valores de  $ETc$  aumentaram até 6,9 mm dia<sup>-1</sup> no tratamento da pesquisa e 7,4 mm dia<sup>-1</sup> no do produtor, por ocasião da maturação dos frutos.

Soares (2003), trabalhando com a videira, verificou que o BERB pode tanto superestimar como subestimar os valores da  $ETc$  quando comparado com o BHS. Segundo o autor, a superestimativa pode estar associada a eventos de microadvecção oriunda de áreas de solo entre as fileiras de plantas, enquanto que a subestimativa pode ter relação com a deficiência hídrica do solo. Nos meses de baixa demanda evaporativa, os dois métodos resultaram em valores semelhantes de  $ETc$  para a videira. Provavelmente isto também ocorreu com o pomar de goiabeiras utilizado neste estudo.

O método do balanço de energia com base na razão de Bowen tem sido muito utilizado em ambientes semi-áridos. Nesses locais há necessidade de se considerar a influência do estado da vegetação ou a área circundante ao pomar, principalmente na



direção predominante do vento, em decorrência dos processos de transferência de vapor e/ou de calor para a área em estudo. Nesse sentido, além de conhecer a vegetação é importante, também, conhecer o estado da umidade do solo que rodeia a área de estudo, pois esta área adjacente ao pomar pode, em dias de maior ventilação, estar contribuindo com advecção de calor para a área de interesse, que é irrigada diariamente.

A evapotranspiração média diária do pomar para todo ciclo produtivo da goiabeira irrigada foi igual a  $5,3 \text{ mm dia}^{-1}$ , quando determinada pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen;  $5,6 \text{ mm dia}^{-1}$  determinada para o tratamento da pesquisa e  $6,3 \text{ mm dia}^{-1}$  obtida para o tratamento do produtor, pelo método do balanço hídrico no solo.

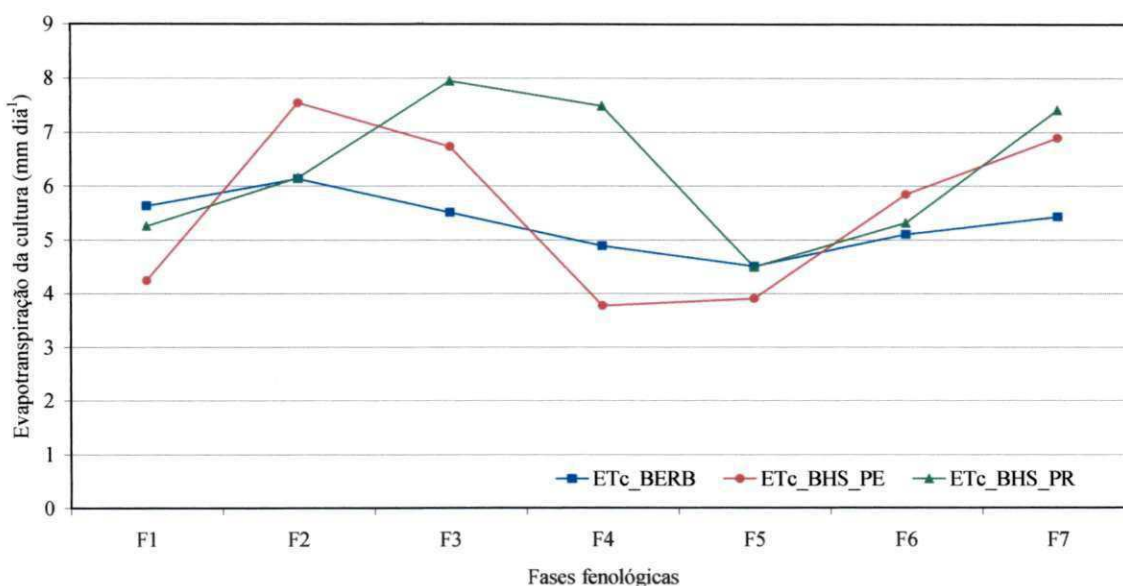


Figura 4.29. Comportamento médio diário para cada fase fenológica da evapotranspiração do pomar de goiabeiras Paluma obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen (ETc\_BERB); e pelo método do balanço hídrico no solo para a área de pesquisa (ETc\_BHS\_PE) e para área do produtor (ETc\_BHS\_PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

#### 4.2.5. Eficiência de uso da água

A determinação do uso eficiente de água é realizada com o conhecimento da produção de frutos e do consumo hídrico das plantas. A colheita foi acompanhada em todas as plantas do tratamento da pesquisa (PE) e do produtor (PR), resultando em uma produtividade de 96,25 kg planta<sup>-1</sup> no tratamento PE e 98,75 kg planta<sup>-1</sup> no tratamento PR. Extrapolando-se esses valores para a área de 1ha, ter-se-iam 26,74 t ha<sup>-1</sup> e 27,43 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente, com média de 27,11 t ha<sup>-1</sup> para o pomar.

A eficiência do uso da água (EUA) foi maior quando a evapotranspiração foi determinada pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen, alcançando 3,12 Kg.mm<sup>-1</sup>. Quando se considerou a evapotranspiração determinada pelo método do balanço hídrico do solo, aplicado aos dois tratamentos, obteve-se EUA = 2,91 kg mm<sup>-1</sup> para o tratamento da pesquisa e 2,66 kg mm<sup>-1</sup> para o produtor. Desta forma, pode-se dizer que, apesar de o produtor ter aplicado uma maior quantidade de água, essa água não foi eficientemente utilizada para produção de frutos, podendo ter-se perdido por drenagem profunda, evaporação ou ter sido utilizada na produção de folhas, uma vez a área foliar deste tratamento (PR) foi maior que do tratamento da PE.

Nesse sentido, Ferreira (2004) obteve EUA em goiabeira igual a 3,62 kg m<sup>-3</sup>, com uma produtividade de 24,097 t ha<sup>-1</sup>. Para a bananeira, Teixeira *et al.* (2002) observou EUA de 1,22 kg m<sup>-3</sup>. Nestes trabalhos, estes pesquisadores não realizaram a irrigação a nível diário, como a maioria dos produtores da região, mas aplicaram água para manter o solo com potencial matricial igual a - 40 kPa.

#### 4.2.6. Coeficiente de cultura – Kc

Os valores obtidos do coeficiente de cultura para o pomar de goiabeiras utilizando-se o método do balanço de energia com base na razão de Bowen e do balanço hídrico no solo para os dois tratamentos analisados são apresentados na Figura 4.30. Pode-se observar nesta figura, que os valores encontrados pelo balanço de energia (Kc\_BERB) foram mais constantes e, em média menores que os determinados por meio da metodologia do balanço hídrico (Kc\_BHS\_PE e Kc\_BHS\_PR). Ainda assim, os valores do Kc\_BERB apresentaram-se mais elevados do que aqueles obtidos na primeira fase desta pesquisa,

ocorrida em 2000, quando o  $K_c$  máximo ocorreu na fase 6, tendo sido igual a 0,84. O coeficiente de cultivo médio para todo período de desenvolvimento da cultura, determinado pelas diferentes metodologias foi:  $K_c\_BERB = 1,1$ ;  $K_c\_BHS\_PE = 1,2$  e  $K_c\_BHS\_PR = 1,3$ .

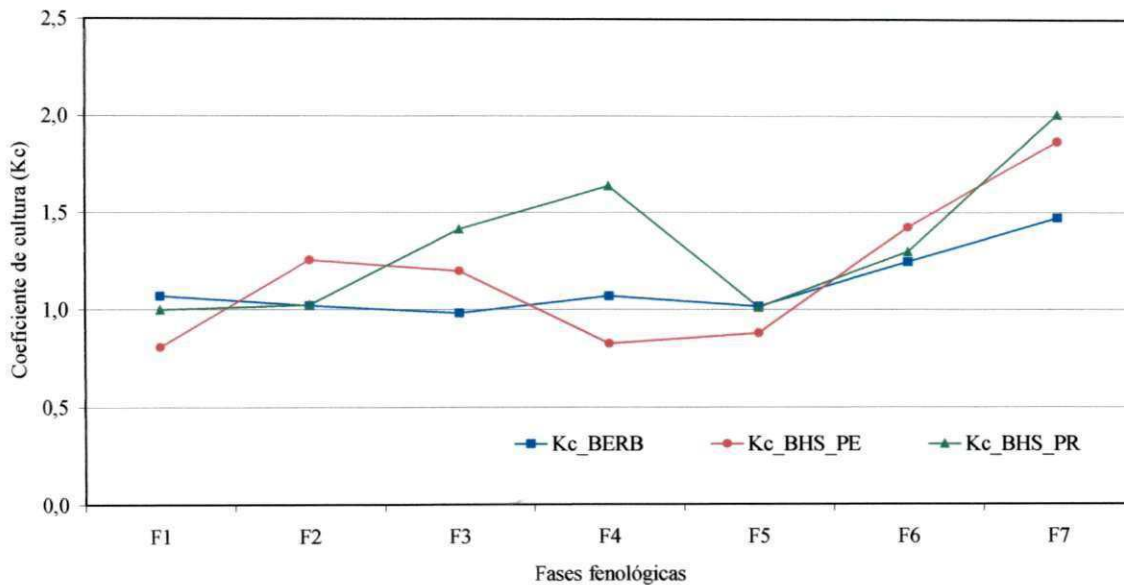


Figura 4.30. Comportamento médio diário para cada fase fenológica do coeficiente de cultura da goiabeira Paluma obtida pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen ( $K_c\_BERB$ ); e pelo método do balanço hídrico no solo para a área de pesquisa ( $K_c\_BHS\_PE$ ) e para área do produtor ( $K_c\_BHS\_PR$ ), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

#### 4.2.7. Qualidade de frutos

A massa dos frutos analisados variou de entre cada tratamento (PE e PR) e também entre cada estágio de maturação (E3 e E5), como mostrado na Tabela 4.7. Percebe-se que os frutos colhidos no estágio de maturação E3 apresentaram maior massa no tratamento do produtor. No entanto, com o desenvolvimento dos frutos e sua colheita no estágio de maturação E5, houve um maior ganho de peso no tratamento da pesquisa, que apresentou massa média de frutos igual a 208,30g, enquanto que no tratamento PR, a massa dos frutos foi igual a 197,84g. Em média, os frutos colhidos no tratamento PE apresentaram massa média um pouco superior aos colhidos do tratamento PR, sendo que os valores foram iguais a 201,3g e 198,3g, respectivamente. Essas características de massa configuram a dupla aptidão dos frutos da goiaba Paluma, que podem ser consumidos *in natura* ou utilizados para o processamento industrial. A massa dos frutos colhidos nesse experimento foi bem superior àquela observada por Lima *et al.* (2002) em frutos de goiaba Paluma colhidos em área experimental no Submédio São Francisco, cuja média foi 104,8g.

Quanto ao teor de sólidos solúveis totais (°Brix), pode-se observar na Tabela 4.7 que os valores mais elevados ocorreram no tratamento PE, tanto no E3 (9,95) quanto no E5 (10,35). Durante a colheita, foram realizadas algumas degustações no campo, cujos relatos já evidenciavam que os frutos do tratamento da pesquisa (PE) eram mais saborosos que os do tratamento PR. Esses valores de SST estão de acordo com Lima *et al.* (2002), que encontraram valor de SST igual a 10,4 para a goiaba Paluma.

A acidez total titulável (ATT, % de ácido cítrico) foi igual a 0,76 % ác. cítrico nos frutos colhidos no E3 no tratamento PE e 0,86 % ác. cítrico naqueles colhidos no tratamento PR, para o mesmo estágio de maturação. Com o aumento da maturação o valor da ATT diminuiu e ficou praticamente igual nos dois tratamentos. A relação SST/ATT representa melhor o sabor dos frutos do que o conhecimento isolado de cada um destes parâmetros, principalmente quando o destino dos frutos é o consumo *in natura*. Os valores mais elevados da relação SST/ATT (Tabela 4.7) foram observados no tratamento PE, para os dois estágios de maturação dos frutos. Lima *et al.* (2002) observou que a relação SST/ATT foi igual a 17,63 para frutos da goiaba Paluma.

Os valores de pH obtidos, variando de 2,89 a 3,10 (Tabela 4.7), não são considerados altos. Os maiores valores de pH ocorrem em frutos cuja ATT foi maior.

Quando os frutos destinam-se ao processamento industrial, essa característica reduz a adição de acidificantes artificiais.

Tabela 4.7. Características físico-químicas de frutos de goiabeira Paluma colhidos em dois diferentes estágios de maturação (E3 e E5), nos tratamentos da pesquisa (PE) e do produtor (PR), Núcleo 9 do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, Petrolina - PE.

Tratamento	Estágio de maturação dos frutos	Peso (gramas, g)	SST (°Brix)	ATT (% ác. cítrico)	Relação SST/ATT	pH
<b>PE</b>	E3	194,36	9,95	0,76	13,30	2,95
	E5	208,30	10,35	0,57	18,23	3,04
<b>PR</b>	E3	198,67	9,60	0,86	11,28	2,89
	E5	197,84	10,1	0,58	17,67	3,10

## Capítulo 5 | CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados obtidos a partir de experimento de campo realizado no pomar de goiabeiras, cultivar Paluma, com 5 anos de idade, no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, em Petrolina – PE, conclui-se que:

- Houve diferenças no coeficiente de cultura entre as duas campanhas. Essas diferenças estão relacionadas, provavelmente, com dois fatores principais: aumento do volume da copa, da primeira para a segunda etapa e seu efeito sobre o metabolismo da planta.
- O ciclo produtivo da segunda etapa compreendeu 179 dias, os quais foram divididos em sete fases fenológicas, sendo que a maior foi a Fase 7 (terceira fase de crescimento de frutos, maturação e colheita) com duração de 69 dias.
- A curva de crescimento dos frutos foi do tipo dupla-sigmóide e as plantas do tratamento do produtor (PR) apresentaram maior índice de pegamento de frutos do que as plantas da pesquisa.
- O saldo de radiação (Rn) pode ser estimado a partir da radiação solar incidente (Rg) por meio da seguinte equação:  $Rn = 0,6803.Rg - 8,4489$ , com  $R^2 = 0,9939$ . O Rn representou sempre mais de 65% de Rg e o albedo do pomar de goiabeira foi aproximadamente 17,2% durante todo período produtivo.

- O fluxo de calor no solo e o fluxo de calor sensível representaram pequena fração do saldo de radiação, tendo sido da ordem de 3,63 e 12,3%, respectivamente. Quase todo saldo de radiação foi usado para evapotranspiração do pomar (90,7%).
- Os valores da razão de Bowen foram pequenos (entre 0,1 e 0,2) e em geral, foram positivos para o período diurno e, os erros relativos associados ao cálculo da razão de Bowen e do fluxo de calor latente foram iguais a 28,4 e 3,1%, respectivamente.
- A evapotranspiração do pomar de goiabeira determinada pelo método do balanço de energia com base na razão de Bowen foi, em média, igual a 5,3 mm.dia<sup>-1</sup>, enquanto que a determinada pelo balanço hídrico no solo para o tratamento da pesquisa foi igual 5,6 mm.dia<sup>-1</sup> e para o tratamento do produtor, igual a 6,3 mm.dia<sup>-1</sup>, os quais são valores elevados.
- O coeficiente de cultura do pomar de goiabeira obtido usando a evapotranspiração da cultura determinada pelo balanço de energia com base na razão de Bowen, apresentou pequena variação entre as fases fenológicas, sendo, em média, igual 1,1 e superior ao determinado na primeira etapa da pesquisa, refletindo o aumento da área foliar e da produção de frutos.
- Apesar da produção por planta ter sido maior no tratamento do produtor, o uso eficiente de água foi maior no tratamento da pesquisa;

A realização de trabalhos para determinação das necessidades hídricas de culturas realizadas ao nível de produtor é difícil e requer muito cuidado. No entanto, esses estudos devem ser levados ao público, para que os mesmos possam utilizar os resultados e promover um manejo de irrigação mais adequado, garantindo a preservação e sustentabilidade do meio ambiente e da produção agrícola.



## Capítulo 6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; *et al.* **Crop evapotranspiration**. Roma: FAO, 1998. 301p. (Irrigation and Drainage paper 56).

ALVES, A. V. **Balances de radiação e de energia em um cultivo de melão**. Campina Grande: DCA/CCT/UFPB, 1997. 95p. (Dissertação de Mestrado).

ANDRÉ, R. G. B.; SILVA FILHO, V. P.; MOLION, L. C. B.; *et al.* Balanço de radiação sobre a Floresta Amazônica (estações seca e úmida). **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 269-274, 1988.

ANGUS, D. E.; WATTS, P. J. Evapotranspiration How good is the Bowen ratio method? **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 8, p. 133-150, 1984.

ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. North Carolina: Academic Press, 1988. 307 p.

ASSENG, S.; HSIAO, T. C. Canopy CO<sub>2</sub> assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. **Field Crops Research**. v. 67, p. 191-206, 2000.

AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 58, p. 241-254, 2003.

- BARRADAS, V. L.; TEJEDA-MARTINEZ, A.; JAUREGUI, E. Energy balance measurements in a suburban vegetated area in Mexico City. **Atmospheric Environment**, v. 33, p. 4109-4113, 1999.
- BASSOI, L. H.; TEIXEIRA, A. H. C.; SILVA, J. A. M.; SILVA, E. E. G.; TARGINO, E. L.; MAIA, J. L.T.; FERREIRA, M. N. L. Parâmetro para o manejo da irrigação da goiabeira no Vale do São Francisco (CD Rom). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31, Salvador, 2002. *Anais...*, Salvador: SBEA, UFBA, EMBRAPA, 2002.
- BOWEN, I. S. The ration of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v. 27, p. 779-787. 1926.
- BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Departamento de Desenvolvimento Hidroagrícola. **Goiaba**. Brasília, 2001, 8p. (MI/SIH-DPE. Pernambuco, Frutiséries, 1).
- CASA, R.; RUSSEL, G.; CASCIO, B. Lo. Estimation of evapotranspiration from a field of linseed in central Italy. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 104, p. 289-301, 2000.
- CENTURION, J. F.; MORAES, M. H.; DELLA LIBERA, C. L. F. Comparação de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 173-179, 1997.
- CORRÊA, M. C. M.; PRADO, R. M.; NATALE, W.; SILVA, M. A. C.; PEREIRA, L. Índice de pegamento de frutos em goiabeira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 783-786, 2002.
- COSTA, S. N. **Desenvolvimento de um modelo computacional para simular o transporte de água e solutos no solo sob condições de escoamento não-permanente na vertical**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1998. 145p. (Tese de Doutorado).
- CRAGO, R.; BRUTSAERT, W. Daytime evaporation and the self-preservation of the evaporative fraction and the Bowen ratio. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 178, p. 241-255, 1996.

DAAMEN, C. C.; DUGAS, W. A.; PRENDERGAST, P. T. *et al.* Energy flux measurements in a sheltered lemon orchard. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 93, n. 1, p. 171-183, 1999.

DOOREMBOS, J.; KASSAN, A. H. **Yield response to water**. Roma: FAO. 1979. 193p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 33).

FELDBERG, N. P.; PEREIRA, F. M.; NACHTIGAL, J. C. Crescimento dos frutos de goiabeira (*Pisidium guajava* L.), seleção 8502-01. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 15, 1998, Poços de Caldas. **Resumos...**, Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 1998, p. 368.

FERREIRA, M. N. L. **Distribuição radicular e consumo de água da goiabeira (*Pisidium guajava*, L.) irrigada por microaspersão em Petrolina-PE**. Piracicaba: Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz/USP, 2004. 106p. (Tese de Doutorado).

FRITSCHEN, L. J.; SIMPSON, J. R. Surface energy and radiation balance systems: general description and improvements. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 28, p. 680-689, 1989.

FUCHS, M.; TANNER, C. B. Error analysis of Bowen ratio measured by differential psychrometry. **Agricultural Meteorological**, Amsterdam, v. 7, n. 1, p. 329-334, 1970.

GONZAGA NETO, L. **Cultura da goiabeira**. Petrolina, PE: EMBRAPA-CPATSA, 1990. 26p. (EMBRAPA-CPATSA, Circular Técnica, 23).

GONZAGA NETO, L.; ABRAMOF, L.; BEZERRA, J.E.F.; PEDROSA, A.C.; SILVA, H.M. Seleção de cultivares de goiabeira (*Pisidium guajava* L.) para consumo ao natural, na Região do Vale do Rio Moxotó, em Ibibimirim-Pernambuco. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, v.9, n,2, p.63-66, 1987.

GONZAGA NETO, L.; SOARES, J. M. **Goiaba para exportação: aspectos técnicos da produção**. Petrolina, PE: EMBRAPA-CPATSA, 1994. 26p. (EMBRAPA-CPATSA, Frupep).

GUTIERREZ, M. V.; MEINZER, F. C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. **Journal of American Society Horticultural Science**, Alexandria, v. 119, n. 3, p. 652-657, 1994.

HEILMAN, J. L.; BRITTIN, C. L.; NEALE, C. M. U. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 71, n. 1, p. 99-114, 1989.

HEILMAN, J. L.; McINNES, J. K.; SAVAGE, M. J.; GESCH, R. W.; LASCANO, R. J. Soil and canopy energy balances in a west Texas vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 71, p. 99-114, 1994.

HEUSINKVELD, B. G.; JACOBS, A.F.G.; HOLTSLAG, A.A.M.; BERKOWICZ, S.M. Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 122, p. 21-37, 2004.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 332p. 1990.

KLAR, A. E. **Irrigação: frequência e quantidade de irrigação**. São Paulo: Nobel, 1991. 153p.

KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; RAMALINGAM, K.; HIPPS, L. E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, p. 249-264, 2000.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; MOURA, M. S. B.; SALDANHA, T. R. F. C.; *et al.* Balanço de radiação sobre um solo descoberto para quatro períodos do ano. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 15, p. 57 - 63, 2000.

LEITÃO, M. M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. Influência da irrigação sobre o albedo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 214-218, 2000.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: ESALQ - Departamento de Física e Meteorologia, 1995. 497 p.

LIMA, M. A. C.; ASSIS, J. S.; GONZAGA NETO, L. Caracterização dos frutos de goiabeira e seleção de cultivares na região do submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 273-276, abril 2002.

LOPES, P. M. O. **Evapotranspiração da mangueira na região do Submédio São Francisco**. 1999. 108p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

LOPES, P. M. O.; SILVA, B. B.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, V. P. R.; TEIXEIRA, A. H. C.; SOARES, J. M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Balanço de energia num pomar de mangueira irrigado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. n. 1, p. 1 – 8, 2001.

MALEK, E. Rapid changes of the surface soil heat flux and its effects on the estimation of evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 142, p. 89 –97, 1993.

MANICA, I.; KIST, H.; MICHELETTO, E.L.; KRAUSE, C.A. Competição entre quatro cultivares e duas seleções de goiabeira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.8, p.1305-1313, 1998.

MARIN, F. R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 118p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

MARIN, F. R. **Evapotranspiração, transpiração balanço de energia em pomar de lima ácida “Tahiti”**. 2000. 74p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba

MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; VILLA NOVA, N. A.; *et al.* Balanço de energia e sua relação com a transpiração em pomar de lima ácida “Tahiti”. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, 2000, Rio de Janeiro. **Anais...**, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000, CD Rom.

MASTRORILLI, M.; KATERJI, N.; RANA, G. *et al.* Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 90, n. 1, p. 81 - 89, 1998.

MEDINA, J. C. Goiaba I – Cultura. In: INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS (Campinas, SP). **Goiaba: cultura, matéria prima, processamento e aspectos econômicos**. 2<sup>a</sup> ed., Campinas, 1991. Cap. I, p. 1 – 121.

MERCADO-SILVA, E. M.; BAUTISTA, P. B.; VELASCO, M. A. G. Fruit development, harvest index and ripening changes of guavas produced in central Mexico. **Postharvest Biology and Technology**. v. 13, p. 143-150, 1998.

MOKATE, A. S.; VARSHNEYA, M. C.; NAIDU, T. R. V.; *et al.* Evapotranspiration and energy balance studies over wheat crop by Bowen ratio energy balance method. **Journal Maharashtra Agricultural Universities**, Pune, v. 20, n. 2, p. 273-276, 1995.

MOURA, M. S. B. **Balço de radiação em um solo descoberto, para duas épocas diferentes, em Mossoró-RN**. 1998. 72p. Monografia (Graduação) – Escola Superior de Agricultura de Mossoró, ESAM, Mossoró.

MOURA, M. S. B. **Fenologia e consumo hídrico da goiabeira (*Psidium guajava*, L.) irrigada**. 2001. 124p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

MUALEN, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Reseach**, Washington, v. 12, n. 3, p. 513 – 522, 1976.

OLIVEIRA, G. M. **Adveção sobre um cultivo de amendoim irrigado**. DCA\CCTUFPB, Campina Grande – PB, 111p. 1998. (Dissertação de mestrado).

PAIVA, M.C.; MANICA, I.; FIORAVANÇO, J.C.; KIST, H. Caracterização química dos frutos de quatro cultivares e duas seleções de goiabeira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Cruz das Almas, v.19, n.1, p.57-63, 1997.

PALOMO, M. J.; MORENO, F.; FERNÁNDEZ, J. E.; GIRÓN, I. F. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. **Agricultural Water Management**, v. 55, p. 15-35, 2002.

PAULETTO, E. A.; LIBARDI, P. L.; MANFRON, P. A. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campina, v. 12, n. 1, p. 189-195, 1988.



- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz: **FEALQ**, São Paulo, 183 p. 1997.
- PEREIRA, F. M.; JOSÉ, A. B. S. Estudo do desenvolvimento de frutos da goiabeira “Paluma e Rica” . In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 9, 1987, Campinas. *Anais...*, Campinas: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 1987, p. 369.
- PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; *et al.* Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 97, p. 141-150, 1999.
- PLESSIS, H. M. du. Evapotranspiration of citrus as affected by soil water deficit and soil salinity. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 6., p. 51-61, 1985.
- RANA, G.; KATERJI, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the fiel under mediterranean climate: a review. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 125 – 152, 2000.
- RATHORE, D. S. Effect of season in the growth and chemical composition of guava (*Psidium guajava* L.) fruits. **Journal of Horticultural Science**, Ashford-Kent, v. 51, n. 1, p. 41-47. 1976.
- REDDY, S. J.; AMORIM NETO, M. S. Dados de precipitação, evapotranspiração potencial, radiação solar global de alguns locais e classificação climática do Nordeste do Brasil. Petrolina-PE, **EMBRAPA/CPATSA**, 280 p., 1983.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Editora Manole LTDA, 188p. 1990.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Editora Manole LTDA, 478p. 2004.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S.B. **Microclimate: The biological environment**. 2<sup>nd</sup> Edition, Lincoln – Nebraska: John Wiley & Sons, 1983, 495p.
- SILANS, A. P.; MONTENY, B. A.; LHOMME, J. P. The correction of soil heat flux measurements to derive an accurate surface energy balance by the Bowen ratio method. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 1/4, p. 453 - 465, 1997.

SILVA, R. P.; SILVA, H.; GONDIM, T. M. S. Fenologia de plantas e características de frutos de goiabeira cv. Paluma na região semi-árida. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 15, 1998, Poços de Caldas. *Resumos...*, Poços de Caldas: Sociedade Brasileira de Fruticultura, 1998, p. 371.

SILVA, V. P. R. **Estimativa das necessidades hídricas da mangueira**. Campina Grande: DCA/CCT/UFPB, 2000. 129p. (Tese de Doutorado).

SILVA, V. P. R.; SOUZA, I. F., AZEVEDO, P. V., SILVA, B. B.; CINTRA, F. L. D. Evapotranspiração do coqueiro (*Cocos nucifera* L.) com base no balanço hídrico no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XII, 2004, Fortaleza. *Anais...*, Fortaleza: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2004. Cd-Rom.

SINGH, R.; SEHGAL, O. P. Studies on the blossom biology of *Psidium guajava* L. (guava); 2, Pollen studies stigmal receptivity pollination and fruit set. **Indian Journal of Horticulture**, v. 25, p. 52-59, 1968.

SOARES, J. M. **Consumo hídrico da videira Festival sob intermitência de irrigação no Submédio São Francisco**. 2003. 309p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SOARES, J. M.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. Balanço de energia em videira cultivada na região do Submédio do rio São Francisco. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 207 – 214, 2003.

SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; COUTO, F. A. A. Influência da irrigação na goiabeira (*Psidium guajava* L. var. Ogawa III). II: Florescimento e vingamento dos frutos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE A CULTURA DA GOIABEIRA, 1, 1997, Jaboticabal. *Anais...*, Jaboticabal: FCAJ-UNESP/FUNEP GOIABRAS, 1997, p. 171.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Avaliação das sondas de TDRmuiti-haste segmentadas para estimative da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 63 – 68, 2002.

SOUZA, K. B. **Necessidades hídricas, crescimento e desenvolvimento do abacaxizeiro nos tabuleiros de Santa Rita – PB**. Campina Grande: DCA/CCT/UFCG, 2003. 124p. (Tese de Doutorado).

SRIVASTAVA, H. C.; NARASIMHAN, P. Physiological studies during the growth and development of different varieties of guavas (*Psidium guajava* L.). **The Journal of Horticultural Science**, v. 42, p. 97-104, 1967.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. maize canopies under two soil water regimes IV: Validity of Bowen ratio-energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, n. 1, p. 215 – 228, 1998.

TEIXEIRA, A. H. C. Balanço de energia na cultura da bananeira no primeiro ciclo de produção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, XI, 2000, Rio de Janeiro. *Anais...*, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2000. Cd-Rom.

TEIXEIRA, A. H. C., BASSOI, L. H. B., COSTA, W. P. L., SILVA, J. A. M., SILVA, E. E. G. Consumo da bananeira no Vale do São Francisco estimado pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 1, p. 45 – 50, 2002.

TEIXEIRA, A. H. C.; BASSOI, L. H. B.; REIS, V. C. S.; SILVA, T. G. F.; FERREIRA, M. N. L.; MAIA, J. L. T. Estimativa do consumo hídrico da goiabeira, utilizando estações agrometeorológicas automática e convencional. *Revista Brasileira de Fruticultura*, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 457-460, dezembro 2003.

TEIXEIRA, A. H. C.; LIMA FILHO, J. M. P.; SOARES, J. M. Saldo de radiação e índice de área foliar na cultura da videira, conduzida em um sistema de latada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10, 1997, Piracicaba. *Anais...*, Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997, p. 523.

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

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. Measurements of soil water using time-domain reflectometry (TDR). **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 49, p. 19-24, 1985.

TRAMBOUZE, W.; BERTUZZI, P.; VOLTZ, M. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 91, p. 193-208, 1998.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L.; FOLION, L. L.; *et al.* Estimativa da radiação solar global diária em Botucatu – SP a partir da insolação diária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, p. 53-60, 1976.

TWINE, T. E.; KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M.; COOK, D. R.; HOUSER, P. R.; MEYERS, T. P.; PRUEGER, J. H.; STARKS, P. J.; WESEJY, M. L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 103, p. 279–300, 2000.

UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTEWORTH, W. *et al.* Surface flux measurements and modeling at a semi-arid sonoran desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 82, p. 119 – 153, 1996.

van GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, p. 892-989, 1980.

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

VIEIRA, S. R.; CASTRO, O. M. Determinação, em laboratório, de curvas de retenção de água com tensiômetros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, n. 1, p. 87-90, 1987.

VILLAGRA, M. M.; BACCHI, O. O. S.; TUON, R. L. *et al.* Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 63, n. 1, p. 317 – 325, 1995.

WALLACE, J. S.; LLOYD, C. R.; SIVAKUMAR, M. V. K. Measurements of soil, plant and total evaporation from millet in Niger. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 63, p. 149-169, 1993.

ZAMBÃO, J. C.; BELLINTANI NETO, A. M. **Cultura da goiabeira**, Campinas, CATI, 1998, 23 p. (Boletim Técnico, 236).

ZANG, L.; LEMEUR, R. evaluation of daily evapotranspiration estimates from instantaneous measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 74, p. 139-154, 1995.