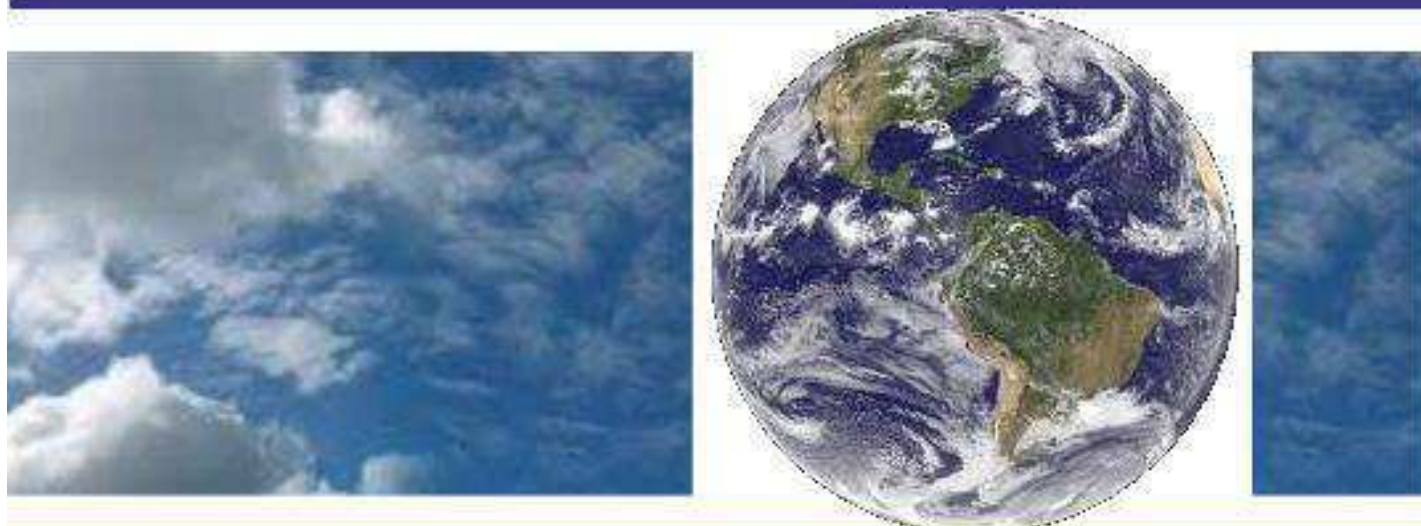


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



Tese de Doutorado

MARCUS VINÍCIUS CÂNDIDO BEZERRA

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO E DA BIOMASSA DO
ALGODOEIRO IRRIGADO POR MEIO DE IMAGENS TM – LANDSAT 5**

Campina Grande, Junho de 2009



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



TESE DE DOUTORADO

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO E DA BIOMASSA DO
ALGODOEIRO IRRIGADO POR MEIO DE IMAGENS TM – LANDSAT 5**

MARCUS VINÍCIUS CÂNDIDO BEZERRA

ORIENTADOR: PROF. DR. BERNARDO BARBOSA DA SILVA

**CAMPINA GRANDE – PB
JUNHO DE 2009**

MARCUS VINÍCIUS CÂNDIDO BEZERRA

**DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO E DA BIOMASSA DO
ALGODOEIRO IRRIGADO POR MEIO DE IMAGENS TM – LANDSAT 5**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: **Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia**

Sub-área: **Sensoriamento Remoto Aplicado**

Orientador: Professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Campina Grande – PB

Junho de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

B574d

2009 Bezerra, Marcus Vinícius Cândido.

Determinação do coeficiente de cultivo e da biomassa do algodoeiro irrigado por meio de imagens TM – Landsat 5 / Marcus Vinicius Cândido Bezerra . – Campina Grande, 2009.

91 f. : il.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva.

1. Evapotranspiração. 2. Fluxo de Calor Latente. 3. Balanço de Energia. 4. METRIC. I. Título.

CDU - 631.587(043)

MARCUS VINÍCIUS CÂNDIDO BEZERRA

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE CULTIVO E DA BIOMASSA DO
ALGODOEIRO IRRIGADO POR MEIO DE IMAGENS TM – LANDSAT 5

TESE APROVADA EM 19/06/2009

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. CÉLIA CAMPOS BRAGA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. MAGALY DE FÁTIMA CORREIA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande



Profa. Dra. SUZANA MARIA GICO LIMA MONTENEGRO
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. PAULO HENRIQUE CARAMORI
Instituto Agrônomo do Paraná

DEDICATÓRIA

Dedico, primeiramente, a Deus por todos os esforços empregados na conclusão deste trabalho, pois Nele é depositada toda a fé necessária para não fraquejarmos em nossas caminhadas. A minha esposa Cinthia Regina de Lima, aos meus pais, Antônio Bezerra e Marlene Cândido Bezerra, a minha irmã Sandra Keilla Cândido Bezerra, a minha tia Esmeralda Bezerra Albuquerque, aos meus sogros Constantino Laureano de Lima e Regina Maria de Lima e ao meu cunhado Lucas Constantino de Lima.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que é princípio, meio e fim de todas as coisas e que está me dando a oportunidade de concluir mais uma etapa de minha vida.

Ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande, pelas oportunidades.

Ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Dr. Bernardo Barbosa da Silva pela orientação e dedicação.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Meteorologia, pelos ensinamentos transmitidos no decorrer do curso.

A administração da Fazenda Busato por todo apoio dado na realização deste trabalho.

A minha esposa Cinthia Regina de Lima, pelo amor e apoio dedicados em todos os momentos de minha vida.

Aos meus pais Antônio Bezerra e Marlene Cândido Bezerra e a minha irmã Sandra Keilla Cândido Bezerra.

Aos meus amigos Bergson Guedes Bezerra, Ziany Neiva Brandão, Valéria Peixoto Borges, Rafael da Costa Ferreira e Saulo Tasso Araújo da Silva, pela união, solidariedade e força para a realização deste trabalho; para essas pessoas especiais, meu muito obrigado.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas, em especial a Divanete C. Rocha e Eyres Diana Ventura Silva por estarem sempre dispostas a ajudar.

E, finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 – Métodos tradicionais de medida da ET.....	5
2.2 – O algoritmo SEBAL/METRIC.....	7
2.3 – Estimativas da biomassa acima do solo.....	11
2.4 – Estimativa da ETr em escala regional.....	12
2.5 – Demais aplicações do sensoriamento remoto.....	16
2.6 – Algodoeiro herbáceo.....	17
3 – MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 – Área de estudo.....	19
3.2 – Métodos.....	26
3.2.1 – Saldo de radiação à superfície.....	26
3.2.2 – Fluxo de calor no solo.....	32
3.2.3 – Fluxo de calor sensível.....	32
3.2.4 – Fluxo de calor latente.....	38
3.2.5 – Evapotranspiração real horária.....	38
3.2.6 – Fração de evapotranspiração de referência.....	38
3.2.7 – Evapotranspiração diária.....	38
3.2.8 – Evapotranspiração sazonal.....	39
3.2.9 – Biomassa acima do solo.....	39

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1 – Análise das imagens do IVDN.....	42
4.2 – Análise das imagens do saldo de radiação.....	48
4.3 – Análise das imagens do fluxo de calor no solo.....	52
4.4 – Análise das imagens do fluxo de calor sensível.....	55
4.5 – Análise do fluxo de calor latente.....	59
4.6 – Análise das imagens da evapotranspiração diária e sazonal.....	62
4.7 – Análise das imagens do coeficiente de cultivo.....	70
4.8 – Análise das imagens da biomassa diária acima do solo.....	75
5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	81
5.1 – Conclusões.....	81
5.2 – Sugestões.....	82
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

RESUMO

A determinação da evapotranspiração real – ETr de culturas irrigadas é de suma importância em regiões áridas e semi-áridas, pois a ETr tem grande influência no gerenciamento dos recursos hídricos. O uso de técnicas de sensoriamento remoto e imagens de satélite tem se tornado ferramenta poderosa, eficiente e econômica na estimativa da ETr e no desenvolvimento de curvas do coeficiente de cultivo – Kc em escala regional. Tais técnicas também têm sido utilizadas na determinação da biomassa de cultura irrigadas, caracterizando o seu desenvolvimento e rendimento, através da combinação dos modelos de Monteith (1972), usado na determinação da radiação fotossinteticamente ativa absorvida, de Field et al. (1995), usado na determinação da eficiência do uso de luz e o algoritmo METRIC, usado na determinação dos componentes do balanço de energia. Por conseguinte, a presente pesquisa teve por objetivo estimar a ETr diária e sazonal, o Kc e a biomassa do algodoeiro irrigado pelo sistema de pivô central, variedades Delta Opal e Delta Penta, através de imagens TM – Landsat 5 correspondentes a diferentes fases fenológicas da cultura, e dados complementares coletados por estação meteorológica automática instalada no interior da Fazenda Busato (13° 15' S, 43° 25' W, 436 m), utilizados na determinação da ET de referência – ET₀ através da equação de Penman-Monteith-FAO. Os resultados mostraram que no período de pleno desenvolvimento da cultura, 13% do saldo de radiação – Rn foi destinado ao aquecimento do solo – G, 7% ao aquecimento do ar – H e 80% do Rn ao processo evapotranspirativo – LE. A ETr diária máxima neste mesmo período foi em torno de 6 mm dia⁻¹ e ET sazonal superior a 730 mm para ciclo médio 200 dias. O Kc do algodoeiro variou de 0,39 a 1,12 entre as fases fenológicas consideradas. Por sua vez, a biomassa máxima foi superior a 200 kg ha⁻¹ no período de pleno desenvolvimento da cultura e a validação da mesma mostrou diferença relativa média de 12% entre as estimativas e as medições. Tais resultados evidenciaram que as técnicas empregadas propiciaram determinações consistentes da ETr, das curvas de Kc e da biomassa, que são de grande importância para o desenvolvimento de projetos de irrigação e uso racional da água.

Palavras-chave: Evapotranspiração, fluxo de calor latente, balanço de energia, METRIC.

ABSTRACT

The determination of actual evapotranspiration – ET_a of irrigated crops is extremely important in arid and semi-arid, since ET_a has great influence in water resources management. The use of remote sensing techniques and satellite images have become powerful, efficient and economical tool for estimation of ET_a and crop coefficient – K_c curves at the regional scale. Such techniques have also been used for determining the biomass of irrigated crops, characterizing their development and yield through of Monteith's model, used for calculation of absorbed photosynthetic active radiation (APAR); the Carnegie Institution Stanford model, used for determining the light use efficiency, and the METRIC algorithm, used in determination of the energy balance. Therefore, the objectives of the present study were the estimation the daily and seasonal ET_a, the K_c and biomass of cotton crop irrigated by center pivot system, varieties Delta Opal and Delta Penta. TM – Landsat 5 images, corresponding to different phenological stages of the crop and additional data collected by an automatic weather station installed on the Busato Farm (13 ° 15 'S, 43 ° 25' W, 436 m), were used in determining the energy balance components and reference ET according to Penman-Monteith-FAO, respectively. The results showed that the period of full development of culture, 13% of net radiation – R_n was used for heating the soil – G, 7% for heating the air – H and 80% of R_n was used as latent heat flux – LE. The maximum daily ET_a in the same period was approximately 6 mm day⁻¹ and an averaged seasonal ET of 850 mm, for an average cycle of 200 days. The K_c of cotton ranged from 0.39 to 1.12 among the phenological stages considered. In turn, the maximum biomass was over 200 kg ha⁻¹ in the period of full development of culture and the validation showed an average error of 12% between the estimates and measurements. These results showed that the methods used in this research resulted in reliable estimates of ET_a, curves of K_c and biomass, which are very important in irrigated projects and sustainable use of water.

Keywords: Evapotranspiration, latent heat flux, energy balance, METRIC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – a) Mapa do estado da Bahia e b) área de estudo na combinação RGB dos canais 4, 3 e 2 do TM – Landsat 5.....	20
Figura 3.2 – a) Sistema de irrigação (pivô central) aplicado no cultivo do algodoeiro na Fazenda Busato e b) fotografia do pivô 21 em 05 de abril de 2007.....	20
Figura 3.3 – Identificação dos pivôs na Fazenda Busato.....	21
Figura 3.4 – a) Precipitação média mensal e b) Umidade Relativa e temperatura média mensal do município de Bom Jesus da Lapa – BA (período de 1961 a 1990).....	22
Figura 3.5 – a) Precipitação mensal, b) Umidade Relativa e temperatura média mensal e c) radiação global média mensal registrada pela estação meteorológica automática da Fazenda Busato entre os meses de janeiro e agosto de 2007.....	24
Figura 3.6 – Fluxograma do processamento do saldo de radiação à superfície – Rn.....	27
Figura 3.7 – Fluxograma do processo iterativo para a obtenção do fluxo de calor sensível – H.....	33
Figura 3.8 – Fluxograma do cálculo da biomassa acima do solo.....	41
Figura 4.1 – Imagens do IVDN dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007.....	44
Figura 4.2 – Curva do IVDN x DAS das variedades a) Delta Opal e b) Delta Penta....	47
Figura 4.3 – Imagens do Rn ($W m^{-2}$) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007.....	51
Figura 4.4 – Imagens do G ($W m^{-2}$) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007.....	54
Figura 4.5 – Imagens do H ($W m^{-2}$) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007.....	58
Figura 4.6 – Imagens do LE ($W m^{-2}$) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007.....	61
Figura 4.7 – Variação da ET_0 diária durante o ciclo do algodoeiro herbáceo.....	63
Figura 4.8 – Imagens da ET_d ($mm dia^{-1}$) para os dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007.....	65
Figura 4.9 – Curva do ET_d x DAS para as variedades a) Delta Opal e b) Delta Penta.....	68

Figura 4.10 – Imagens do Kc dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007.....	70
Figura 4.11 – Curva do Kc x DAS para as variedades a) Delta Opal e b) Delta Penta.....	74
Figura 4.12 – Imagens da biomassa diária (kg ha ⁻¹) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007.....	77
Figura 4.13 – Curva da biomassa diária (kg ha ⁻¹) versus DAS para as variedades a) Delta Opal e b) Delta Penta.....	79
Figura 4.14 – Biomassa (kg ha ⁻¹) medida e estimado em 12 de maio de 2007.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Escalonamento da semeadura e colheita do algodoeiro na Fazenda Busato, no primeiro semestre de 2007.....	25
Tabela 3.2 – Coeficientes de calibração do Landsat 5 – TM – a_b e b_b , irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera – k_b , coeficientes peso da energia solar potencial de cada banda à superfície – w_b	26
Tabela 3.3 – Valores de d_r , δ , ω , $\cos Z$, e_a e T_{ar} para cada data de estudo.....	29
Tabela 3.4 – Constantes de calibração C_1 – C_5 e C_b do Landsat 5 – TM.....	29
Tabela 3.5 – Velocidade do vento instantâneo ao nível de 2 m – u_x e 100 m – u_{100}	34
Tabela 3.6 – Valores da ET_0 horária e diária por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	35
Tabela 3.7 – Valores da radiação solar diária por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	40
Tabela 3.8 – Valores da T_{opt} , T_{mon} , T_1 e T_2 para os sete primeiros meses de 2007.....	41
Tabela 4.1 – Data de semeadura e colheita, ciclo da cultura do algodão e área plantada para e variedade do algodoeiro herbáceo para os pivôs selecionados.....	45
Tabela 4.2 – Dias Após a Semeadura – DAS do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	46
Tabela 4.3 – IVDN médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	46
Tabela 4.4 – Transmissividade atmosférica – τ_{sw} , temperatura do ar – T_{ar} ($^{\circ}C$), radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície – $R_{L\downarrow}$ ($W\ m^{-2}$), radiação solar instantânea incidente na superfície medida e estimada – $R_{S\downarrow}$ ($W\ m^{-2}$), diferença absoluta ($W\ m^{-2}$) e diferença relativa (%) entre $R_{S\downarrow}$ medida e estimada.....	49
Tabela 4.5 – R_n médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	52
Tabela 4.6 – G médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	55
Tabela 4.7 – Funções da diferença de temperatura instantânea entre a superfície e o ar próximo a mesma para cada imagem estudada.....	56
Tabela 4.8 – H médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	59
Tabela 4.9 – LE médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	62

Tabela 4.10. Comparação entre a ETd obtida pelo produto do Kc recomendado pelo programa computacional da Fazenda Busato pela $ET_0 - ET_{FB}$ (mm dia^{-1}) e a ETd estimada obtida pelo algoritmo METRIC – ET_M (mm dia^{-1}), diferença absoluta – DA (mm dia^{-1}) e diferença relativa – DR (%) entre as mesmas.....	67
Tabela 4.11 – ET sazonal média (mm), ET_0 acumulada (mm) no mesmo período e percentual de equivalência da ET_{saz} em relação a ET_{0_ac} – Eq. (%).....	69
Tabela 4.12 – Kc médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	73
Tabela 4.13 – Comparação entre Kc médio do algodoeiro para ambas as variedades estimado pelo METRIC e o Kc utilizado na Fazenda Busato.....	75
Tabela 4.14 – Biomassa diária (kg ha^{-1}) do algodoeiro por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definição	Unidades
Cd	Constante denominador para eq. ASCE Penman-Montheith	–
Cn	Constante numerador para eq. ASCE Penman-Montheith	–
cos θ	Cosseno do ângulo de incidência dos raios solares normal a superfície	–
cos η	Cosseno do ângulo de visada do satélite	–
cos Z	Cosseno do ângulo zenital solar	–
c_p	Calor específico do ar à pressão constante	J kg ⁻¹ K ⁻¹
DSA	Dia Sequencial do Ano	–
dr	Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol	–
e_a	Pressão real de vapor	kPa
e_s	Pressão de saturação do vapor	kPa
E	Evaporação	mm h ⁻¹ , mm dia ⁻¹
ETr	Evapotranspiração real	mm h ⁻¹ , mm dia ⁻¹
ETd	Evapotranspiração diária	mm dia ⁻¹
ET ₀	Evapotranspiração de referência	mm h ⁻¹ , mm dia ⁻¹
ETSaz	Evapotranspiração sazonal	mm
FE	Fração Evaporativa	–
FET ₀	Fração de Evapotranspiração de Referência	–
g	Módulo do campo gravitacional terrestre	m s ⁻²
G	Fluxo de calor no solo	W m ⁻²
H	Fluxo de calor sensível	W m ⁻²
h	Altura média da vegetação	m
IAF	Índice de Área Foliar	–
IVAS	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo	–
IVDN	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada	–

k	Constante de von Karman	–
k_b	Irradiância solar espectral no topo da atmosfera	$W m^{-2} \mu m^{-1}$
Kc	Coefficiente de cultivo	–
Kt	Coefficiente de turbidez do ar	–
L	Constante de ajuste na eq. do IVAS	–
L	Comprimento de Monin-Obukhov	m
L_b	Radiância espectral monocromática da banda b	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
LE	Fluxo de calor latente	$W m^{-2}$
L_M	Longitude central da cena	graus
LE_0	Fluxo de calor latente de referência	$W m^{-2}$
L_Z	Longitude da zona central de tempo local	graus
ND	Número Digital	–
P	Pressão atmosférica	kPa
r_{ah}	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor	$s m^{-1}$
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa	$W m^{-2}$
RFAA	Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida	$W m^{-2}$
R_G	Radiação solar global	$MJ m^{-2} dia^{-1}$
$R_{L\uparrow}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície	$W m^{-2}$
$R_{L\downarrow}$	Radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera	$W m^{-2}$
Rn	Saldo de radiação	$W m^{-2}$
$R_{S\downarrow}$	Radiação solar incidente	$W m^{-2}$
$R_{S\downarrow 24h}$	Radiação solar incidente diária	$W m^{-2}$
s	Inclinação da superfície	rad
S	Constante solar	$W m^{-2}$
S_C	Correção sazonal para o tempo solar	–
t	Hora de passagem do satélite	hora

T	Temperatura média do ar	K, °C
T_{ar}	Temperatura do ar	K, °C
T_{opt}	Temperatura ótima	°C
T_{mon}	Temperatura média mensal	°C
T_s	Temperatura da superfície	K, °C
T_{Sdatum}	Temperatura da superfície ajustada ao efeito da elevação	K, °C
u_x	Velocidade do vento	ms^{-1}
u_*	Velocidade de fricção	$m s^{-1}$
u_{100}	Velocidade do vento ao nível de 100 m	$m s^{-1}$
W	Água precipitável	mm
w_b	Coeficiente peso da energia solar potencial de cada banda à superfície	
z	Elevação de cada pixel acima do nível do mar	m
z_{0m}	Coeficiente de rugosidade	m
α	Albedo da superfície	–
γ	Ângulo azimutal da superfície	rad
γ	Constante psicométrica	kPa.°C
Δ	Inclinação da curva de pressão de vapor	kPa.°C
ΔT	Diferença de temperatura do ar próxima à superfície	K, °C
Δz	Elevação de cada pixel menos a elevação média da cena	m
δ	Declinação do Sol	rad
ϵ_0	Emissividade da superfície	–
ϵ_{NB}	Emissividade termal	–
ϵ_{atm}	Emissividade atmosférica	–
ϕ	Latitude	rad
ρ	Densidade do ar úmido	$kg m^{-3}$
ρ_b	Refletância planetária	–

$\rho_{s,b}$	Refletividade à superfície	–
$\rho_{atm,b}$	Refletância atmosférica	–
σ	Constante de Stefan-Boltzman	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
$\tau_{asc,b}$	Transmissividade para a radiação solar refletida da superfície	–
$\tau_{inc,b}$	Transmissividade atmosférica para a radiação solar incidente	–
τ_{sw}	Transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar	–
$\tau_{sw 24h}$	Transmissividade atmosférica diária	–
ω	Ângulo horário	rad

1 – INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água em nosso planeta é cerca de 400 milhões de quilômetros cúbicos e apenas 2,5% desse volume é de água doce, disponível em geleiras, águas subterrâneas, rios e lagos. Da água doce utilizada pelo homem, cerca de 70% são utilizadas na agricultura irrigada. No futuro haverá pouca disponibilidade de água para a produção agrícola devido ao acréscimo na demanda dos setores industriais e domésticos, que ao mesmo tempo, com o aumento da população mundial, acarreta numa crescente necessidade pela produção de alimentos (Zwart e Bastiaanssen, 2007).

Atento a essa problemática e ao fato de que a evapotranspiração real – ETr das áreas agrícolas e da vegetação nativa transfere grandes volumes de água para a atmosfera, há a necessidade de que a mesma seja quantificada em escala regional, vez que a ETr é importante componente do ciclo hidrológico.

A determinação da ETr pode ser realizada através de métodos tradicionais consagrados tais como o balanço de energia baseado na razão de Bowen, método das correlações turbulentas, lisímetro de pesagem, dentre outros. As medidas e/ou estimativas de tais métodos são bastante precisas, porém são válidas para áreas homogêneas de pequenas dimensões. Para estimar a ETr em escala regional, apresentando sua variabilidade espacial sobre áreas parcialmente homogêneas ou heterogêneas, tais métodos tornam-se limitados.

Dessa forma, a determinação da ETr em escala regional requer a utilização de técnicas de sensoriamento remoto – SR que envolve o uso de um conjunto de equações

destinadas a converter as medidas radiométricas originadas de sensores a bordo de satélites (Landsat – TM, NOAA – AVHRR, Terra – MODIS, Aqua – MODIS, Terra – ASTER, ERS – ATRS etc) ou a bordo de aeronaves em fluxos de energia à superfície. Tais técnicas têm proporcionado grandes mudanças no gerenciamento dos recursos hídricos, pois possibilitam quantificar a variabilidade espacial e temporal da ETr, mesmo em regiões bastante heterogêneas, tornando-se uma ferramenta de grande importância para a atividade agrícola irrigada e gestão sustentável de bacias hidrográficas. Nesse sentido, de acordo com Su e Jacobs (2001), a estimativa da ETr tem sido reconhecida como um dos processos mais importantes na determinação das transferências de energia e massa entre a hidrosfera, atmosfera e biosfera.

Segundo Bastiaanssen (2000) as técnicas de SR aplicadas à agricultura oferecem vantagens, tais como: a) as informações são obtidas de forma a possibilitar a geração de várias séries temporais das cenas estudadas, facilitando a comparação entre as mesmas; b) oferece uma cobertura espacial muito ampla, favorecendo a análise da cena como um todo; e c) as informações obtidas podem ser espacialmente representadas e, em geral, revelam aspectos importantes para o planejamento agrícola.

Uma alternativa ao SR é a modelagem hidrológica, que direcionada à produção agrícola foca a disponibilidade e a necessidade hídrica das culturas agrícolas. Mas o SR tornou-se uma ferramenta de suma importância, pois possibilita a obtenção de medidas representativas da ETr em escala regional (Su, 2002) de forma econômica, eficiente e operacional. Assim, as informações espaciais e temporais proporcionadas pelo SR sobre o uso de água, produção de culturas e produtividade de água desempenham papel vital no manejo e na avaliação da escassez dos recursos hídricos em dada região onde a produtividade de água pode ser melhorada (Zwart e Bastiaanssen, 2007).

Nos modelos baseados em técnicas de SR são utilizados algoritmos destinados a converter as medidas radiométricas originadas de sensores a bordo de satélites em fluxos de energia. Dentre os algoritmos existentes pode-se destacar o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) e o METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration), que têm como objetivo obter a ETr como resíduo do balanço de energia à superfície com base em medições radiométricas obtidas por radiômetros a bordo de satélites.

O SEBAL, desenvolvido por Bastiaanssen (1995), Bastiaanssen et al. (1998a, b) e Bastiaanssen (2000), tendo sido amplamente aplicado em diversos países, tais como Espanha, Itália, Turquia, Paquistão, Índia, Sri Lanka, Egito, Nigéria, China, EUA e Brasil. Para o processamento do mesmo faz-se necessário o uso de dados coletados via satélite, cujos sensores ofereçam informações no espectro eletromagnético visível, infravermelho próximo e termal, bem como poucos dados complementares de superfície, que representa uma das principais vantagens do SEBAL (Trezza, 2005).

Por sua vez, o METRIC é uma versão aprimorada do SEBAL, tendo sido desenvolvido por Allen et al. (2007a), tendo como objetivo prover melhor controle das estimativas da ETr usando a evapotranspiração de referência – ET_0 obtida pela equação de Penman-Monteith ASCE-EWRI (ASCE-EWRI, 2005) aplicada à cultura da alfafa. Tal algoritmo proporciona a obtenção do albedo da superfície corrigido atmosféricamente banda a banda, além da obtenção dos fluxos de energia à superfície e, conseqüentemente, a ETr em regiões montanhosas utilizando informações digitais sobre a topografia da região de interesse. As experiências realizadas com uso desse algoritmo têm corroborado e gerado confiança por parte dos pesquisadores, no que diz respeito ao uso de dados meteorológicos horários para a obtenção da ET_0 utilizada nas estimativas da ETr diária e sazonal (Allen et al., 2007b).

A determinação da biomassa diária de culturas irrigadas através de técnicas de SR e imagens de satélite tem sido realizada pela combinação de três modelos, quais sejam: o modelo de Monteith (1972), utilizado na determinação da radiação fotossinteticamente ativa absorvida – RFAA; o modelo de Field et al. (1995), utilizado na determinação da eficiência do uso de luz, e; o algoritmo METRIC, utilizado na determinação dos componentes do balanço de energia à superfície. Tais técnicas têm proporcionado melhorias no gerenciamento dos recursos hídricos de bacias hidrográficas e propiciado aprimoramento na relação custo-benefício das culturas irrigadas, pois através destas técnicas é possível estimar o rendimento das culturas e a produtividade de água da mesma.

A aplicação das técnicas brevemente descritas acima foi realizada em oito imagens TM – Landsat 5 geradas entre janeiro e julho de 2007 compreendendo a Fazenda Busato com 2.500 ha de algodoeiro herbáceo irrigado pelo sistema de pivô central, variedades Delta Opal e Delta Penta, localizada a 35 km a oeste do município de Bom Jesus da Lapa – BA, além do Projeto de Irrigação Formoso da CODEVASF

com cultivo de frutíferas, áreas de vegetação nativa e o rio Corrente, afluente do rio São Francisco. Tal área foi escolhida em virtude de ter sido possível acompanhar o ciclo fenológico da cultura através das imagens de satélite e por demandar um volume muito expressivo de água em culturas irrigadas.

Como a região Nordeste do Brasil sofre com a intensidade e a distribuição irregular das precipitações pluviométricas que ocasionam limitação na disponibilidade de água no solo, causando prejuízos no crescimento, desenvolvimento e produtividade em diversas culturas, sobretudo no cultivo do algodão, importante fibra têxtil, é imprescindível o conhecimento da demanda hídrica das culturas agrícolas, em especial o algodoeiro, devido à importância do uso racional da água de bacias hidrográficas, a exemplo da bacia do rio São Francisco, que abrange cerca de 640 mil km² de área de drenagem (7,5% do país) com vazão média em torno de 3.000 m³ s⁻¹.

As chuvas irregulares nas regiões áridas e semi-áridas também comprometerem o rendimento das culturas agrícolas, tornando, desse modo, essencial o uso de sistemas de irrigação tais como pivô central, gotejamento e microaspersão, que podem ampliar substancialmente o rendimento dos mesmos, inclusive com a possibilidade de mais de uma colheita por ano. Por conseguinte, é fundamental o estudo sobre o rendimento das culturas e a produtividade de água das culturas irrigadas, pois tais estudos promovem o conhecimento da eficiência do uso de água, ou seja, a produção de determinado bem por unidade de água aplicada ou consumida.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo geral determinar a curva do coeficiente de cultivo e estimar a biomassa diária em diferentes fases fenológicas do algodoeiro irrigado através de imagens geradas pelo TM – Landsat 5.

A fim de alcançar o objetivo geral têm-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Mapear os componentes do balanço de energia à superfície com o SEBAL/METRIC;
- b) Estimar a ETr diária e sazonal com o SEBAL/METRIC;
- c) Validar os resultados do Kc estimado com o Kc utilizado pela administração da Fazenda Busado;
- d) Validar os resultados da biomassa estimada com os resultados medidos;

2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – Métodos tradicionais de medida da ET

A evapotranspiração – ET, termo proposto por Thorthwaith e Holzman (1944), é um processo combinado entre a evaporação da água do solo e/ou de superfícies livres de água – E e a transpiração das plantas – T, podendo ser medida e/ou estimada experimentalmente, com precisão aceitável pelos métodos da razão de Bowen (Bowen, 1926), método das correlações turbulentas e lisímetros de pesagem, entre outros. Porém, essas medidas se limitam a áreas homogêneas, quanto à fenologia, condições de umidade do solo, configuração de semeadura e umidade, o que impede que as mesmas sejam aplicadas a áreas heterogêneas e de grandes dimensões.

A razão de Bowen – β é um índice que relaciona as densidades de fluxo de calor latente – LE e sensível – H. Essa técnica tem sido amplamente utilizada em todo o globo, a exemplo de Dow e De Walle (2000), Liu e Foken (2001) e Silva et al. (2005), com o objetivo de estimar as componentes do balanço de energia – BE e a ETr.

Nesse sentido, ainda podem ser citados: Galvani et al. (2000), que sob ambiente natural e protegido (casa de vegetação), determinaram o balanço de energia ao longo do ciclo da cultura do pepineiro no período outono-inverno e primavera-verão,

utilizando o método da razão de Bowen, no qual os resultados mostram que a maior parte da energia disponível foi utilizada no fluxo de calor latente de evaporação e que as componentes do balanço de energia apresentaram-se mais consistentes em níveis próximos ao dossel da cultura e em ambiente protegido. Já Teixeira et al. (2003) estimaram a ET da cultura da goiabeira durante um ciclo de produção, localizada no campo experimental da Embrapa Semi-Árido em Petrolina – PE, utilizando-se da razão de Bowen, na qual obtiveram a ET acumulada entre a poda (julho de 2001) e a colheita (dezembro de 2001) de 906 mm em 200 dias (média de 4,53 mm dia⁻¹).

Em estudo realizado no sub-médio São Francisco, Teixeira et al. (2007) mediram o balanço hídrico e de energia em dois cultivos comerciais de videiras irrigadas por microaspersão, em que a ET real foi obtida pela razão de Bowen. Neste estudo a fração evaporativa foi superior a 80% nos dois ciclos analisados. Por sua vez, a ET acumulada foi de 393 e 352 mm para o primeiro e segundo ciclos e a produtividade de água por unidade da ET foi de 1,06 e 3,18 kg m⁻³, respectivamente.

Os outros dois métodos tradicionais supracitados, método das correlações turbulentas e lisímetro de pesagem, podem ser brevemente descritos da seguinte forma: o método das correlações turbulentas baseia-se no fato de que os fluxos de H e LE são amplamente transferidos via difusão turbulenta. Por esse motivo, tais fluxos podem ser diretamente medidos pela correlação das flutuações do componente vertical da velocidade do vento – w' com as flutuações da temperatura e umidade específica, admitindo que a velocidade vertical média do vento a superfície é nula. Dessa forma, são utilizadas as seguintes expressões para a obtenção de tais fluxos de energia: $H = \rho_{ar} c_p \overline{w'T'}$ e $LE = \rho_{ar} \overline{w'q'}$, em que T' é o desvio instantâneo da temperatura do ar do valor médio temporal, q' é o desvio instantâneo da umidade específica do valor médio temporal, ρ_{ar} é a densidade do ar e c_p é o calor específico do ar a pressão constante. Por outro lado, o lisímetro de pesagem constitui de um container, geralmente metálico, pelo qual se pode medir a ETr através da verificação da variação do seu peso do container. Ao contrário dos outros métodos anteriormente citados, as medidas efetuadas através do mesmo baseiam-se no balanço hídrico e não no balanço de energia. De acordo com Allen et al. (1998), os lisímetros flutuantes oferecem medidas mais precisas com relação à quantidade de água perdida pelo solo e por superfícies vegetadas.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos utilizando tais métodos, combinados ou não. A exemplo de Silva et al. (2005) que utilizaram os métodos da razão de Bowen e lisímetro de pesagem em área cultivada com Capim Tanzânia localizada no município de Piracicaba – SP no período de 21 de julho de 2000 a 15 de julho de 2001 e obtiveram valores médios diários da ETr, para tal período, de 4,13 mm dia⁻¹ (razão de Bowen) e 4,34 mm dia⁻¹ (lisímetro de pesagem), representando erro relativo de 4,8%. Por sua vez, Silva et al. (2007) obtiveram cerca de 70% do saldo de radiação destinado ao fluxo de calor latente e cerca de 8% destinado ao fluxo de calor no solo, em duas campanhas experimentais (1998 e 1999) conduzidas na cultura da manga, localizada na estação experimental de Bebedouro no submédio São Francisco utilizando a razão de Bowen. Segundo esses autores, tais resultados podem ser usados no planejamento e gerenciamento da irrigação da cultura da mangueira em condições ambientais similares.

Por sua vez, Teixeira et al. (2008b) ao efetuarem o balanço hídrico e o balanço de energia para análise da produtividade de água sob pomar de mangueiras irrigado no sub-médio São Francisco, utilizaram a técnica das correlações turbulentas para medir os fluxos de energia e a razão de Bowen para determinar a ETr, enquanto que a ET₀ foi obtida pela equação de Penman-Monteith. Nesse estudo foi obtido ETr acumulada média de 1.419 mm ano⁻¹ e ETr diária média de 3,7 mm dia⁻¹. Os valores médios do coeficiente de cultivo baseado na ETr – Kc e baseado na transpiração – Kcb foram de 0,91 e 0,73, respectivamente, com fração evaporativa média de 0,83 e produção média de 45 toneladas ha⁻¹, sendo equivalente a produtividade de água de 3,2 kg m⁻³.

2.2 – O Algoritmo SEBAL/METRIC

O SEBAL é um algoritmo destinado a obter o balanço de energia à superfície utilizando a temperatura da superfície, a refletância hemisférica da superfície, índices de vegetação e dados meteorológicos complementares. Para tanto, a ETr é computada com informações providas de imagens de satélite obtidas no momento de sua passagem, sendo calculada para cada pixel da imagem como resíduo da equação do balanço de energia – BE. Já o METRIC representa um aprimoramento do algoritmo SEBAL, o qual obtém o mapeamento da ETr com base no BE, disponibilizando melhor controle das estimativas através da ET₀. No METRIC é possível obter a ETr em áreas montanhosas com base nas características topográficas em formato digital.

Para tanto, faz-se necessário obter primeiramente a estimativa do saldo de radiação à superfície – R_n , que por sua vez é computado pela diferença entre os fluxos radiantes descendentes e ascendentes, ou seja, saldo de radiação = ganhos – perdas radiativas. Os fluxos descendentes são representados pela radiação de onda curta incidente e pela radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície. Os fluxos ascendentes são representados pela radiação de onda curta refletida pela superfície, pela radiação de onda longa emitida pela superfície e pela radiação de onda longa atmosférica refletida pela superfície.

No SEBAL e no METRIC, o R_n é obtido no instante da passagem do satélite (R_n instantâneo), em função da refletância da superfície, da emissividade e da temperatura da mesma. R_n representa a energia disponível para diferentes processos biofísicos que ocorrem na superfície. De acordo com o BE, esta energia disponível é repartida nos seguintes componentes: fluxo de calor no solo – G , que representa a fração de R_n destinada ao aquecimento do solo (e no caso de corpos d'água, energia destinada ao aquecimento da água); fluxo de calor sensível – H , que representa a fração de R_n que promove o aquecimento do ar; e fluxo de calor latente – LE , que representa a fração importante de R_n destinada ao processo evapotranspirativo, que em essência representa o fluxo de massa, ou de vapor d'água.

No METRIC o cômputo do albedo superficial, diferentemente do apresentado nas versões anteriores do SEBAL, é obtida a partir da refletância corrigida aos efeitos atmosféricos banda a banda. Este método estima o albedo superficial pelo cômputo da refletância da superfície para cada banda do sensor, através da utilização de código de transferência radiativa e equações de regressão que visam simplificar a estimativa da transmissividade em cada banda refletiva do TM – Landsat 5, oferecendo mais operacionalidade ao processo.

Também é introduzida na metodologia METRIC parametrização atualizada da determinação de G , que de acordo com Tasumi (2003) melhor estima tal fluxo para solo exposto. Esta parametrização é composta de duas equações em que G é determinado em função da temperatura da superfície, do Índice de Área Foliar – IAF e R_n , em que uma das equações é utilizada na determinação de G em solo exposto ($IAF < 0,5$) e a outra em solo vegetado ($IAF \geq 0,5$).

O H representa o cerne da metodologia SEBAL, sendo computado em função da velocidade do vento observada, da estimativa da resistência aerodinâmica ao

transporte de calor e da diferença de temperatura estimada entre a superfície e o ar próximo a mesma (Tasumi, 2003), na qual a maior presunção está na obtenção do gradiente de temperatura próxima à superfície, ΔT , sendo obtida como função linear entre ΔT e T_s – temperatura da superfície, eliminando a necessidade da calibração da temperatura absoluta da superfície, que é o maior obstáculo na operacionalidade da obtenção da E_{Tr} através do SR (Bastiaanssen et al., 2005).

Para a obtenção da função ΔT são selecionados dois pixels de condições extremas de temperatura e umidade dentro da área de interesse, denominados de pixels âncoras, pixels “quente” e “frio”. Na metodologia tradicional do SEBAL (Bastiaanssen et al., 1998a) o pixel frio é selecionado num corpo d’água, cujo H é nulo e LE é máximo, enquanto que o pixel quente é geralmente selecionado numa área de deserto, cujo LE é nulo e o H é máximo. Na versão SEBAL – ID (SEBAL Idaho), proposto por Allen et al. (2002), o pixel frio é selecionado num campo agrícola de alta densidade vegetativa e bem irrigado, cuja E_{Tr} é 5% superior a ET_0 , ou seja, $LE = 1,05 LE_0$, e o valor de H é obtido como resíduo do balanço de energia ($H = R_n - G - LE$). Por sua vez, o pixel quente é selecionado num campo agrícola desprovido de vegetação com solo seco, cuja E_{Tr} é nula ($LE = 0$) e H é máximo.

A extrapolação da E_{Tr} instantânea para a E_{Tr} diária – ET_d é efetuada em função da Fração de Evapotranspiração de Referência – FET_0 , que é obtida pela razão entre a E_{Tr} instantânea e a ET_0 horária baseado na cultura da alfafa ao invés da Fração Evaporativa – FE , obtida pela razão entre LE instantâneo e a energia disponível instantânea ($R_n - G$), utilizada no SEBAL tradicional, contabilizando melhor os efeitos da variação da velocidade do vento e da advecção. Tanto a FET_0 quanto a FE são consideradas constantes ao longo do dia em questão. A ET_0 representa uma espécie de “ET potencial”, sendo definida como a ET de um campo de alfafa bem irrigado com altura de 50 cm, com resistência superficial – r_s diária de 45 s m^{-1} , r_s horária diurna de 30 s m^{-1} e r_s noturna de 200 s m^{-1} , apresentando albedo de 0,23 (Allen et al., 1998). Sendo assim, a FET_0 é utilizada na extrapolação da E_{Tr} pelo produto da mesma com a ET_0 diária. De acordo com Tasumi (2003) a maior vantagem do uso da FE no SEBAL tradicional está relacionada à dispensa do uso de dados meteorológicos horários e diários no cômputo da ET_0 horária e diária.

Nesse sentido, o METRIC é autocalibrado para cada imagem de satélite usando a ET_0 , baseado em dados meteorológicos horários obtidos em estação localizada

na área de interesse. A calibração interna computada na obtenção do fluxo de calor sensível utilizada em ambas as metodologias e o uso do gradiente de temperatura indexado eliminam a necessidade de correções atmosféricas refinadas da temperatura da superfície ou de medidas da refletância (albedo) usando modelos de transferência radiativa (Tasumi et al., 2005b). Esta calibração interna também reduz erros na estimativa da correção da estabilidade aerodinâmica ou rugosidade da superfície. De fato, análises de sensibilidade conduzidas por Tasumi (2003) evidenciaram que dobrando ou reduzindo à metade a rugosidade da superfície e eliminando as correções atmosféricas os impactos inferiores a 5% na estimativa de H. Este atributo da calibração interna e a compensação substancial para as estimativas dos componentes do BE proporcionam operacionalidade do METRIC em aplicações importantes da ETr, como o manejo e planejamento dos recursos hídricos (Allen et al., 2007b).

Sendo assim, o METRIC torna-se atrativo para o gerenciamento dos recursos hídricos pelas seguintes razões:

- a) calcula a ETr sem requerer conhecimento da cobertura do solo, ou seja, nenhuma classificação do solo é necessária;
- b) o uso da ET_0 na sua calibração e o uso da FET_0 na extrapolação para a ETr proporcionam equivalência e coerência com a ET estimada usando a aproximação do tradicional produto $Kc \times ET_0$ diária, e;
- c) é autocalibrado para cada imagem utilizando a ET_0 obtida através de dados meteorológicos à superfície, onde a precisão da ET_0 estimada tem sido estabelecida por medidas lisimétricas.

Em relação aos dados de superfície são necessárias as seguintes informações: velocidade do vento, temperatura do ar, altura média da vegetação circundante ao local das medições em campo e demais dados meteorológicos necessários para a obtenção da ET_0 . A velocidade do vento no momento da passagem do satélite é utilizada para cálculo de H, a temperatura do ar para se obter a radiação de onda longa incidente e a altura média da vegetação é utilizada para o cálculo do coeficiente de rugosidade ao transporte de momento, admitindo-se a atmosfera em estabilidade neutra.

As condições do tempo podem não ser uniformes na composição da imagem. Se a área de interesse possui variedade de terrenos, essas condições variam significativamente. Se o principal interesse é a ETr da área agrícola, podem-se utilizar

dados de estações locais. Em caso de grande variedade de terrenos, utilizam-se dados de duas ou mais estações. É importante que as estações sejam próximas às localizações das áreas selecionadas como referência, denominado pixels âncoras.

Segundo Tasumi (2003), as técnicas de SR aplicadas a imagens de satélite não podem estimar a ETr em áreas com cobertura de nuvens ou sombreadas pelas mesmas, sem que haja identificação dos efeitos causados pela sua presença. É possível identificar tais áreas através da combinação das bandas 4, 6 e 5 do TM – Landsat 5.

As nuvens espessas são de fácil identificação, pois apresentam valores de albedo em torno de 0,45 a 0,80 e temperaturas muito baixas. As áreas sombreadas por nuvens espessas são muito escuras e também apresentam baixa temperatura, em virtude de receber a incidência apenas da radiação solar difusa. Ainda assim, é possível obter a ETr em áreas sombreadas assumindo a radiação difusa como a radiação solar incidente. Por conseguinte, as sombras não permanecem nas mesmas áreas durante todo o dia e dessa forma a ETd pode ser estimada.

Outra problemática encontra-se na presença de nuvens tênues, pois são muito difíceis de serem identificadas pela “cor verdadeira” (combinação das bandas 1, 2 e 3) ou na “falsa cor” (combinação das bandas 2, 3 e 4). Porém, são claramente identificadas na banda termal (banda 6), devido tais nuvens apresentarem temperatura “aparente” da superfície em torno de 5 a 10 °C, proporcionando superestimativas da ETr.

O processo de mascaramento de nuvens é feito manualmente, visto que as sombras das nuvens e as nuvens tênues são difíceis de serem identificadas automaticamente. Assim, tais áreas são “demarcadas”, fazendo com que a ETd não possa ser estimada. Em vista disso, para a estimativa da ET sazonal, os valores da FET_0 nessas áreas são interpolados usando dados de imagem adjacentes.

2.3 – Estimativas da biomassa acima do solo

A estimativa da biomassa acima do solo é efetuada através da combinação dos modelos da radiação fotossinteticamente ativa absorvida – RFAA, proposta por Monteith (1972); da eficiência do uso de luz, proposto por Field et al. (1995) e do balanço de energia à superfície (METRIC), proposto por Allen et al. (2007a).

A radiação fotossinteticamente ativa – RFA representa a porção da radiação solar de onda curta (0,3 – 3,0 μm) disponível para o processo de fotossíntese da plantas.

Essa porção da radiação solar varia com a visibilidade, profundidade óptica, quantidade de ozônio, entre outros fatores, cujo valor varia de 45 a 50% da radiação solar de onda curta, segundo Moran et al. (1996). Porém, devido aos efeitos de transmissão e reflexão da radiação solar por parte das folhas constituintes da vegetação, uma fração da RFA é absorvida pela planta nesse processo e usada para a assimilação do dióxido de carbono, denominada de RFAA, resultado do balanço de radiação nas folhas. Assim, a razão entre a RFAA e a RFA pode ser estimada pelo SR através das medidas espectrais das bandas do vermelho e infravermelho próximo, resultando numa função linear do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – IVDN (Rouse et al., 1974), que representa a manifestação da atividade fotossintética expressa pela biomassa fresca e vigor da vegetação. O IVDN é o índice de vegetação mais conhecido e amplamente usado, que se baseia no contraste entre a absorção máxima no vermelho devido aos pigmentos da clorofila e a reflexão máxima no infravermelho causado pela estrutura celular da folha.

Para se obter efetivamente a biomassa da vegetação faz-se necessário à estimativa da eficiência do uso de luz – ϵ , que segundo Montheit (1972), varia apenas com o tipo de vegetação. Entretanto, melhorias no modelo de Montheit (1972) em relação ao impacto da umidade do solo e calor foram propostas por Field et al. (1995), que desenvolveram um modelo mais abrangente incorporando tais fatores de impacto. Tal modelo é dado como uma função da temperatura média do ar durante o mês de máximo Índice de Área Foliar – IAF ou IVDN, denominado temperatura ótima – T_{opt} , a temperatura média mensal do ar – T_{mon} e a Fração Evaporativa – FE, além do parâmetro ϵ' , que é um fator de conversão máximo característico de biomassa quando as condições ambientais são ótimas. Tal parâmetro, de acordo com a literatura, assume o valor de 2,5 g MJ⁻¹ para culturas do tipo c₃ (trigo, arroz, algodão, cevada, girassol, alfafa, beterraba, batata, pomares, etc.) e 4 g MJ⁻¹ para o tipo c₄ (sorgo, cana-de-açúcar, milho, etc.).

2.4 – Estimativa da ETr em escala regional

As estimativas da ETr possibilitam o uso racional dos recursos hídricos existentes em bacias hidrográficas, particularmente em agriculturas irrigadas, visto que a mesma é uma das maiores usuárias de água doce disponível no mundo, representando cerca de 70% da água retirada dos rios, lagos, mananciais e outras fontes. Estima-se que as culturas irrigadas sejam responsáveis por cerca de 30% do alimento produzido mundialmente e que também ocupem cerca de 17% de toda terra arável do planeta

(Seckler et al.,1998). Ainda de acordo com Seckler et al. (1998) em torno de 60% da precipitação na superfície da Terra é evaporada para a atmosfera.

Devido a essa problemática têm sido desenvolvidos em inúmeros estudos com o objetivo de se estimar a ETr em escala regional, visando principalmente as áreas agrícolas e as bacias hidrográficas, a exemplo de Roerink et al. (2000) que utilizaram o S-SEBI e imagens TM – Landsat 5 da Itália e obtiveram diferença de 8% entre as medidas realizadas com base na razão de Bowen e as estimativas para o cultivo da beterraba, e diferença de 2% quando comparado às medidas com base nas técnicas das correlações turbulentas. Por conseguinte, no cultivo de girassol obtiveram diferença de 5% entre os valores medidos e estimados.

Ao comparar as estimativas de ETr obtidas com o SEBAL aplicado a imagens TM – Landsat 5 e ETM+ – Landsat 7 do oeste de Murtaugh, Idaho (EUA) em áreas agrícolas, com medidas de lisímetro, Tasumi (2003) verificou que as estimativas obtidas corroboram com as medidas lisimétricas, enquanto que, Hafeez e Khan (2004) utilizaram o SEBAL e imagens TERRA – MODIS de áreas irrigadas na China e obtiveram desvio de 5% entre as estimativas da ET sazonal e as medidas lisimétricas, no qual atribuíram tal desvio à resolução espacial moderada da banda termal do MODIS (1 km²), mas que esse desvio está compreendido na faixa aceitável.

Por sua vez, Ayenew (2003) mostrou ao aplicar o SEBAL a imagens TM – Landsat 5 da Etiópia, que a evaporação de um lago depende da temperatura da superfície, do albedo e dos fluxos de energia incidentes, obtendo, dessa forma, evaporação diária entre 4,9 e 5,9 mm dia⁻¹, enquanto que no solo a ETr aumenta com a altitude, seguindo a disponibilidade de umidade no solo, obtendo valores médios da ETr de 0,2 mm dia⁻¹ em solos lacustres e 4,5 mm dia⁻¹ para margens de lagos salobros em picos de montanhas elevadas com cobertura vegetativa afro-alpino.

Menenti et al. (2003) ao usar o algoritmo SEBI (versão completa do S-SEBI) a imagens de satélite correspondentes a áreas agrícolas da França, obtiveram diferenças relativas entre as estimativas da ETr e FE e as medidas realizadas em campo para a cultura da beterraba de 11,5 e 9,6%, respectivamente, e diferenças de 5,6% (em relação a ETr) e 0% (em relação a FE) para área de floresta.

Feitosa (2005) ao comparar as estimativas do SEBAL aplicado a imagens TM – Landsat 5 e medidas de campo, observou que os fluxos estimados sobreestimaram os

medidos em campo, dos quais o Rn foi o fluxo que apresentou melhor estimativa, com diferença relativa de cerca de 8% e o G acusou pior estimativa, com diferença relativa de 34%. Por sua vez, a ETr estimada proporcionou diferença relativa em torno de 21%.

Allen et al. (2005) compararam estimativas da ET sazonal da cultura da beterraba obtidas pelo METRIC com medidas lisimétricas e obtiveram diferenças inferiores a 1%, ocasião em que a ET sazonal estimada foi de 714 mm e a ET sazonal medida por lisímetro foi de 718 mm. Já Wang et al. (2005) utilizaram o SEBAL e imagens ASTER da cultura da noz-pecã no Novo México para estimar a ETr, quando obtiveram diferença relativa média de 11% e diferença absoluta média de 0,47 mm dia⁻¹ entre as estimativas e os valores medidos através da razão de Bowen.

Com o uso de imagens ASTER da Holanda e os algoritmos SEBAL e S-SEBI, Weligepolage (2005) concluiu que a distribuição espacial da ETr é similar em ambos os algoritmos, sendo contabilizados desvios de 6 a 16% para os valores médios da ETr diária dos dias analisados, correspondendo ao desvio máximo de 1 mm.

Tasumi et al. (2005a) concluíram, em estudo sobre a bacia de Bear River – EUA, que as estimativas da ETr com o SEBAL corroboraram com as medidas lisimétricas, uma vez que a estimativa da ET acumulada no período de quatro meses apresentou diferença de apenas 4,3% em relação às medições lisimétricas. Neste mesmo estudo, obtiveram diferença absoluta entre ETr estimada e as medidas lisimétricas de 0,01 mm h⁻¹ (estimativas instantâneas) e de 0,1 mm dia⁻¹ (estimativas diárias).

Sobrinho et al. (2005) utilizaram o S-SEBI para a obtenção da ETr em campos de alfafa, milho e cevada localizada em Albacete, Espanha, e obtiveram diferenças inferiores a 1 mm dia⁻¹. Bisht et al. (2005), entretanto, propôs um modelo denominado Modelo Senoidal que permite obter a estimativa do ciclo diurno do Rn para dia de céu claro baseado apenas no Rn instantâneo e na duração efetiva de brilho solar. Utilizando imagens Terra – MODIS e Aqua – MODIS, Ataíde (2006) fez estimativas para o estado do Ceará utilizando a proposta de Bisht et al. (2005), alcançando resultados significativos. Batra et al. (2006), por sua vez, acresceram a esta metodologia a obtenção do ciclo diurno da ETr utilizando os sensores MODIS e AVHRR (a bordo do satélite NOAA 14 e NOAA 16).

Tasumi e Trezza (2007) obtiveram variação da ET acumulada durante a estação de crescimento de 472 mm (feijão) a 891 mm (beterraba) e variação do

coeficiente de cultivo médio de 0,34 (feijão) a 0,65 (beterraba), quando aplicado a metodologia METRIC a imagens TM – Landsat 5. Também utilizando mesma metodologia a imagens TM – Landsat 5 da região de Kimberly, Idaho – EUA, Allen et al. (2007b) obtiveram diferenças relativas entre os valores estimados da ETr e as medidas lisimétricas variando de 3 a 139%. Os erros muito elevados foram atribuídos ao fato da incompatibilidade entre a área de representatividade do lisímetro e o tamanho do pixel do canal termal do referido sensor.

Teixeira et al. (2008a) analisaram fluxos de energia em área de vegetação irrigada e natural no semi-árido brasileiro com o uso do SEBAL aplicado a imagens TM – Landsat 5, quando obtiveram FE de 0,71 e 0,90 para pomares de manga e uva, respectivamente, revelando que a maior parte da energia disponível ($R_n - G$) foi destinada ao processo evapotranspirativo. Por sua vez, em áreas de caatinga a FE variou entre 0,25 e 0,40, tais valores, relativamente baixos, foram atribuídos ao fato de que a disponibilidade de água nessas áreas se deve à precipitação.

Em estudo realizado na região do Cariri Cearense, englobando a Chapada do Araripe, Bezerra et al. (2008) aplicaram o SEBAL a quatro imagens TM – Landsat 5 da referida área e obtiveram que os melhores resultados, referentes aos componentes do BE, foram alcançados nas estimativas do R_n e do LE com diferenças inferiores a 10%, em três das quatro imagens analisadas, em relação às medidas de superfície. Por sua vez, as estimativas referentes à H foram insatisfatórias, com diferenças superiores a 10%, que segundo os autores este fato pode estar relacionado à dimensão da área de resolução do canal termal do TM – Landsat 5 (120 m x 120 m). Já em relação às estimativas da ETr, o SEBAL se mostrou bastante eficiente apresentando resultados satisfatórios com diferenças inferiores a 4%.

Também ao aplicar o SEBAL a imagens TM – Landsat 5 da região do sub-médio São Francisco em área agrícolas irrigadas com o cultivo de uva de vinho e uva de mesa, e manga, Teixeira et al. (2009a) obtiveram excelente concordância nos resultados do R_n e do LE, com coeficientes de determinação – R^2 de 0,94 e 0,93, respectivamente. Por sua vez, em relação a H e G foi obtida menor precisão, com R^2 de 0,83. Já em relação à ETr diária o R^2 foi de 0,91, com erro quadrático médio de 0,38 mm dia⁻¹ e desvio de 1%. Em estudo complementar, Teixeira et al. (2009b) obtiveram que a ETr média estimada para a vegetação irrigada foi de 3,6 mm dia⁻¹, enquanto que para a caatinga, a mesma foi de 1,4 mm dia⁻¹. Nesse mesmo estudo, os autores estimaram que

a produtividade de água da cultura por unidade da ETr variou de 0,40 a 1,70 litros de vinho por metro cúbico de água, 1,70 a 4,00 kg de uva de mesa por metro cúbico e 2,20 a 5,00 kg de manga por metro cúbico.

2.5 – Demais aplicações do sensoriamento remoto

Em outros estudos o algoritmo SEBAL/METRIC tem sido aplicado como uma ferramenta auxiliar na estimativa da biomassa acima do solo, produtividade de água e sequestro de carbono. Para Bastiaanssen et al. (2001) o uso de imagens de satélite de baixa resolução espacial e baixo custo (NOAA – AVHRR) complementado com dados de superfície favorece a determinação do uso de água e na avaliação de indicadores de desempenho de irrigação, bem como na estimativa da biomassa acima do solo que, por sua vez, é utilizada na avaliação da produtividade de água.

Com o objetivo de estimar a produtividade de água da cultura, Batiaanssen e Ali (2003) combinaram o modelo da RFAA de Monteith (1972) com o modelo de eficiência do uso de luz de Field et al. (1995) e o SEBAL com imagens NOAA – AVHRR, obtendo erros quadráticos médios: 525, 616, 551 e 13 484 kg ha⁻¹, respectivamente para o trigo, arroz, algodão e cana-de-açúcar.

Por sua vez, Namayanga (2002) estimou o carbono sequestrado pela produção de biomassa acima do solo com dados de SR obtidos com imagens TM – Landsat 5, aplicando os algoritmos SEBAL e CASA (Carnegie, Ames, Stanford Approach) em área do semi-árido de Serowe-Botswana, obtendo a quantidade de 752.000 toneladas de carbono sequestrado para uma área de 244.048 hectares. Aman (2003) avaliou e comparou o desempenho de diferentes sistemas de irrigação usando dados de SR e o SIG na região de Alentejo, Portugal, concluindo que as estimativas da ETr e da produção da cultura obtidas com essa técnica aplicada a imagens MODIS estão na faixa aceitável, o que, segundo o autor, torna possível o uso de dados de SR para monitorar e avaliar o desempenho da irrigação.

Bricklemyer et al. (2007) fizeram uso de imagens TM – Landsat 5 na verificação da rotação de culturas para o aproveitamento do solo e na quantificação do resíduo de biomassa da cultura na região de Montana, bem como a estimativa do sequestro de carbono. Apesar de ter sido registrado pelos autores erro quadrático médio elevado (1.981 kg ha⁻¹), os resultados e as pesquisas prévias relatam que as imagens de

satélite são ferramentas efetivas no monitoramento e verificação das práticas agrícolas associado ao sequestro de carbono sobre grandes áreas.

Com uso do SEBAL e imagens de alta e baixa resolução para quantificar a variação espacial da ETr, produção de culturas e produtividade de água, Zwart e Bastiaanssen (2007) obtiveram estimativa da produção média do trigo em área localizada no México de 5,5 toneladas ha⁻¹. Esse resultado se encontra na faixa da produção medida relatada na literatura. A produtividade de água, nesta mesma área, foi de 1,37 kg m⁻³, que segundo os autores, pode ser considerados alto quando comparado a outros sistemas irrigados ao redor do mundo, em que foi aplicada a mesma metodologia.

2.6 – Algodoeiro herbáceo

O algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum*) é uma cultura que apresenta rentabilidade razoável, ocupando a área disponibilizada para seu cultivo por curto período, de 110 a 150 dias (Beltrão et al., 1993). Suas necessidades hídricas são consideradas baixas, quando comparadas às de outras culturas, entre 500 e 1.300 mm.

Por se tratar de uma cultura originária de regiões semi-áridas, suporta períodos secos de várias semanas em determinadas fases de seu ciclo. Porém existem fases em que a necessidade hídrica é elevada. No início do período vegetativo é cerca de 10% do total, elevando-se durante o período de floração, fase de máxima área foliar, de 50% a 60% do total da exigência hídrica (Doorenbos e Kassam, 1994). Dessa forma, as necessidades hídricas do algodoeiro durante seu ciclo variam em função da cultivar, das práticas culturais, da disponibilidade de água no solo e da demanda atmosférica, apresentando variações consideráveis para diferentes regiões (Araújo, 2006).

Em relação à fenologia do algodoeiro, Oosterhuis (1999) a divide em seis fases: 1º. da semente à emergência: 6 Dias Após Sementeira – DAS; 2º. surgimento da primeira folha verdadeira: 14 DAS; 3º. primeiro botão floral: 35 DAS; 4º. primeira flor: 65 DAS; 5º. primeira maçã: 95 DAS, e; 6º. primeiro capulho: 110 DAS.

O principal produto do algodoeiro é a fibra, podendo ser utilizada em diferentes aplicações industriais. Já sua semente é rica em óleo em cerca de 14 a 25%, e contém proteína bruta em torno de 20 a 25%, sendo utilizada na alimentação humana e na fabricação de sabão e margarina. O subproduto da extração do óleo, o bagaço, é utilizado na alimentação animal devido ao alto teor protéico (40 a 45%) (Araújo, 2006).

Estudos têm sido realizados nas últimas décadas com o objetivo de avaliar as necessidades hídricas, produção e rendimento do algodoeiro, a exemplo de: Aragão Jr. et al. (1989) realizaram pesquisas com o algodoeiro, cultivar BR-1, no município de Russas – CE, onde obtiveram que a irrigação com base em 80% da evapotranspiração máxima, com frequência de seis dias, apresentou rendimento máximo (1,9 toneladas ha⁻¹) para uma irrigação média de 752 mm. Já Nunes Filho et al. (1998) estudaram o rendimento e a qualidade da fibra de cultivares do algodoeiro herbáceo (CNPA 7H, CNPA Precoce 1 e CNPA 6H) submetida a quatro lâminas de irrigação que variaram de 671 a 927 mm e obtiveram rendimentos máximos superiores a 2 toneladas ha⁻¹, enquanto que a uniformidade da fibra variou com o manejo e a intensidade da irrigação e o comprimento, a resistência e a finura não foram afetados nas condições estudadas com tais cultivares.

Em estudos realizados por Radin et al. (1985) e Halevy e Kramer (1986), as produtividades do algodoeiro foram determinadas pela interação nitrogênio versus água, concluindo que quanto maior o nível em que um desses fatores for mantido, maior é a produtividade para um nível constante do outro fator.

3 – MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – Área de estudo

A área de estudo está localizada a 35 km a oeste da sede do município de Bom Jesus da Lapa, cujas coordenadas são 13° 15' 18'' S, 43° 25' 05'' W, 436 m a.n.m, na região oeste do Estado da Bahia (Figura 3.1a), a 796 km da capital do estado, Salvador.

Na Figura 3.1b está apresentada a área de estudo na combinação RGB dos canais 4, 3 e 2 do TM – Landsat 5, cujas coordenadas dos cantos da imagem são: canto superior esquerdo 13° 05' 54'' S e 43° 50' 18'' W, canto superior direito 13° 05' 54'' S e 43° 35' 27'' W, canto inferior esquerdo 13° 18' 06'' S e 43° 50' 18'' W e canto inferior direito 13° 18' 06'' S e 43° 35' 27'' W. A referida cena possui área aproximada de 60 mil ha, com destaque para o rio Corrente, afluente do rio São Francisco. Na parte inferior ao rio, encontra-se a fazenda Busato, com 2.500 ha de algodoeiro irrigado por pivô central (Figura 3.2a), cultivares Delta Opal e Delta Penta; o Projeto de Irrigação Formoso, da CODEVASF (Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco), no qual a bananeira é a principal cultura; áreas de vegetação nativa e, na parte superior, outras áreas de cultura irrigada por pivô central e vegetação nativa.

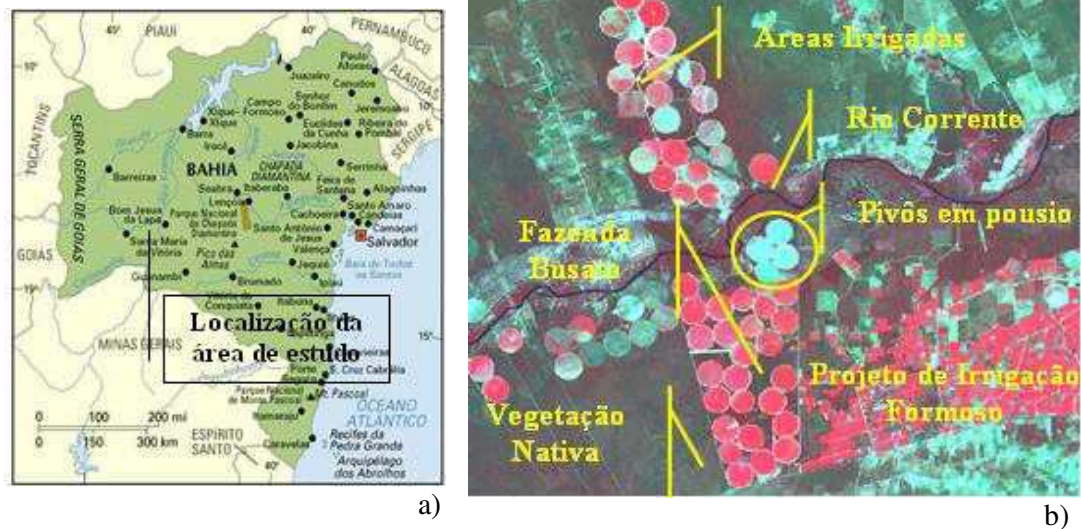


Figura 3.1 – a) Mapa do estado da Bahia e b) área de estudo na combinação RGB dos canais 4, 3 e 2 do TM – Landsat 5

A semeadura do algodoeiro ocorreu do dia 08 de janeiro (Dia Sequencial do Ano – DSA 8) ao dia 06 de março (DSA 65) de 2007, abrangendo um período de 57 dias. O ciclo médio dos cultivares utilizados foi de 180 dias. A colheita foi iniciada no mês de junho de 2007, estendendo-se até o mês de agosto do mesmo ano. Na Figura 3.2a e 3.2b estão representadas fotografias do sistema de irrigação por pivô central e o algodoeiro do pivô 21 em 05 de abril de 2007.

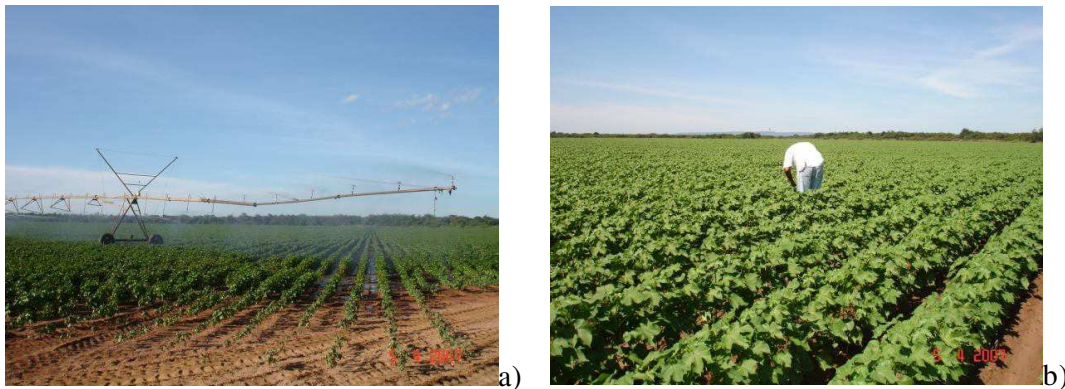


Figura 3.2 – a) Sistema de irrigação (pivô central) aplicado no cultivo do algodoeiro na Fazenda Busato e b) fotografia do pivô 21 em 05 de abril de 2007

Na Tabela 3.2 estão apresentadas as datas de semeadura em cada pivô, os quais são identificados na Figura 3.3, com destaque para os pivôs do algodoeiro irrigado de 5 a 29. Na data da imagem apresentada na Figura 3.3 (26 de abril de 2007) os pivôs 1, 2, 3 e 30 encontravam-se em pousio e o pivô 4, desativado. Dos pivôs constituintes

da área de estudo, a cultivar Delta Penta encontrava-se nos pivôs 5, 20, 21 e 27, e os demais pivôs com a cultivar Delta Opal.

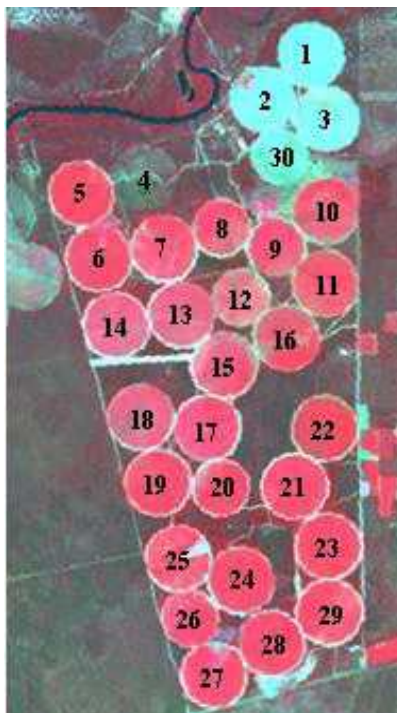


Figura 3.3 – Identificação dos pivôs na Fazenda Busato

O manejo da irrigação na Fazenda Busato foi realizado com auxílio de um programa computacional desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa, que estima a ET_0 pelo método da FAO Penman-Monteith (Allen et al., 1998) a partir de dados gerados por estação meteorológica automática (Davis modelo Vantage Pro[®]), cujas coordenadas de sua instalação foram $13^{\circ} 17' 50,7''$ S e $43^{\circ} 43' 15,4''$ W, fornecendo dados a cada meia hora, totalizando 48 leituras diárias. O turno de rega diário variou conforme a lâmina necessária a ser aplicada.

O clima da região de estudo é classificado como semiárido e subúmido a seco, tipologia DdA', segundo metodologia de Thornthwaite e Matther, com estação chuvosa no período de primavera-verão, como constatado no gráfico da Figura 3.4. Os solos predominantes na área de estudo são Latossolos e Cambissolos e a vegetação natural é classificada como Contato Caatinga-Floresta Estacional e Formações Pioneiras com Influência Fluvio-marinha (SEI, 2008).

Segundo dados climatológicos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) apresentados nos gráficos das Figuras 3.4a e 3.4b, que representam as normais climatológicas da precipitação média mensal (Figura 3.4a) e a umidade relativa

e a temperatura média mensal (Figura 3.4b) entre 1961 e 1990, verifica-se que o mês mais chuvoso é dezembro e o menos chuvoso é o mês de julho, com precipitação média mensal de 69 mm e precipitação média anual de 830 mm. No gráfico da Figura 3.4b, constata-se que a UR média mais elevada apresenta-se no mês de dezembro e a menos elevada no mês de setembro, com média anual de 62%. Ainda em relação ao gráfico da Figura 3.4b, verifica-se que o mês mais quente é setembro e o mês mais frio é julho, com média anual de 25,3 °C.

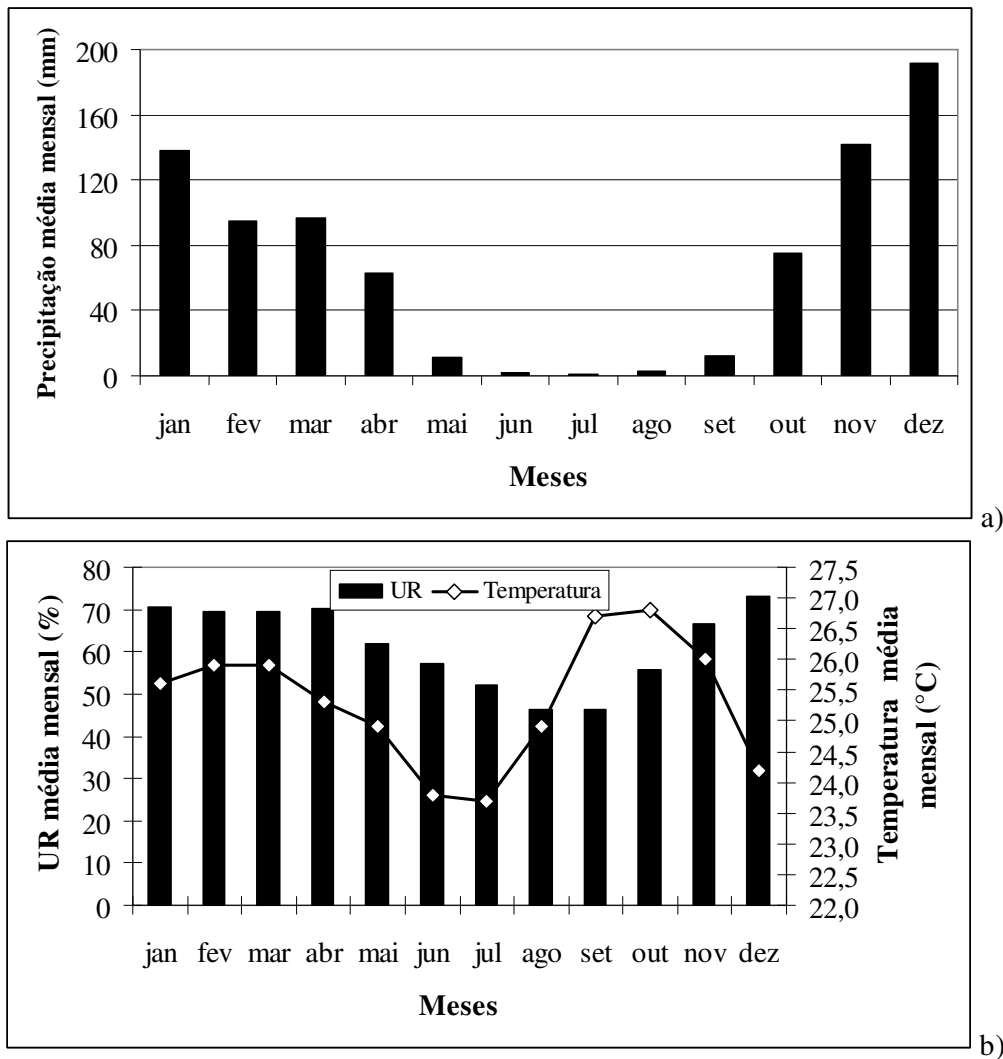
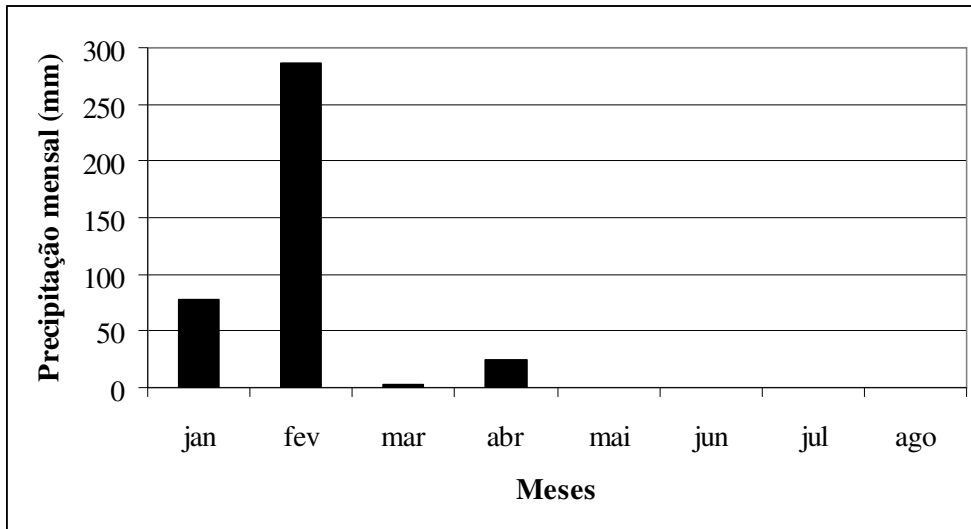


Figura 3.4 – a) Precipitação média mensal e b) Umidade Relativa e temperatura média mensal do município de Bom Jesus da Lapa – BA (período de 1961 a 1990)

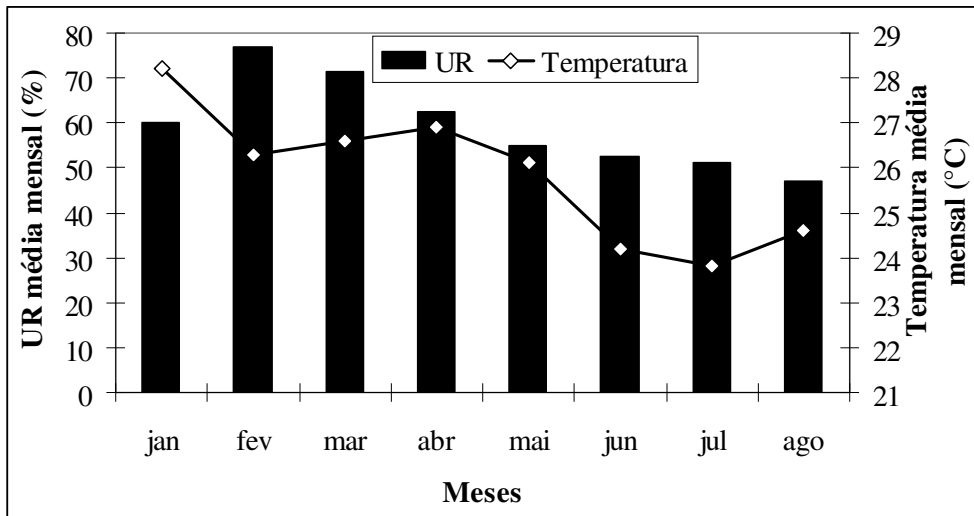
Os valores da precipitação mensal, da umidade relativa e temperatura média mensal entre os meses de janeiro a agosto de 2007 registrados na estação meteorológica automática da Fazenda Busato, período que engloba todo o ciclo da cultura do algodoeiro da área de estudo, estão apresentados nos gráficos da Figura 3.5a a 3.5c, onde se verifica que a maior ocorrência de precipitação foi no mês de fevereiro com 287 mm, não ocorrendo precipitação nos meses de maio a agosto de 2007. No período de janeiro a agosto de 2007 a precipitação total foi de 392 mm, proporcionando média de 49 mm mensais. Também foi verificado a não ocorrendo precipitação nos cinco dias que antecederam a geração das imagens de satélite utilizadas no presente estudo.

Verifica-se no gráfico da Figura 3.5b, que o mês de fevereiro apresentou a UR mais elevada e o mês de agosto a mais baixa, com UR média do período sendo igual a 60%, praticamente igual a média histórica. Ainda no gráfico da Figura 3.5b, constata-se que o mês mais quente foi janeiro, com temperatura média de 28,2 °C e o mês mais frio foi julho, com média de 23,8 °C. A temperatura média do período de janeiro a agosto foi de 25,8 °C, também próxima a média histórica.

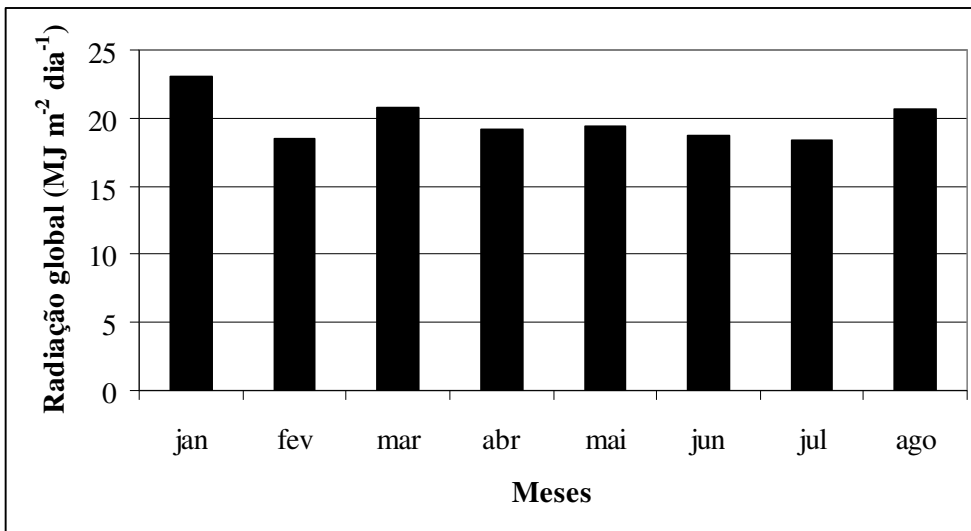
Por sua vez, no gráfico da Figura 3.5c está representada a radiação média global dos meses de janeiro a agosto de 2007, onde observa-se que o a maior média ocorreu no mês de janeiro com 23 MJ m⁻² dia⁻¹, período de verão, e as menores médias ocorreram nos meses de fevereiro, mês com precipitação mais elevada, e julho, período de inverno, com média de 18 MJ m⁻² dia⁻¹. A radiação global média para todo o período de estudo foi de 20 MJ m⁻² dia⁻¹.



a)



b)



c)

Figura 3.5 – a) Precipitação mensal, b) Umidade Relativa e temperatura média mensal e c) radiação global média mensal registrada pela estação meteorológica automática da Fazenda Busato entre os meses de janeiro e agosto de 2007

Tabela 3.1 – Escalonamento da semeadura e colheita do algodoeiro na Fazenda Busato, no primeiro semestre de 2007

Data de semeadura – DAS	Nº do pivô	Data de colheita – DSA	Ciclo da cultura (dias)
08/01 – 08	23	28/07 – 209	201
09/01 – 09	28	07/08 (setor Oeste) – 219	210
09/01 – 09	28	16/08 (setor Leste) – 228	219
11/01 – 11	15	10/07 – 191	180
11/01 – 11	17	16/07 – 200	189
12/01 – 12	12	06/07 – 187	175
15/01 – 15	10 (setor Norte)	14/07 – 195	180
16/01 – 16	24 (setor Oeste)	11/08 – 223	207
16/01 – 16	26	18/08 – 230	214
16/01 – 16	29	14/08 – 226	210
17/01 – 17	14	08/07 – 189	172
18/01 – 18	6	23/07 – 204	186
18/01 – 18	13	01/07 – 182	164
19/01 – 19	7	04/07 – 185	166
19/01 – 19	8 (setor Sul)	04/08 – 216	197
19/01 – 19	24 (setor Leste)	13/08 – 225	206
20/01 – 20	5	07/08 – 219	199
21/01 – 21	20	22/07 – 203	182
21/01 – 21	21	22/07 – 203	182
22/01 – 22	19	20 e 22/07 – 201 e 203	181
23/01 – 23	18	19/07 – 200	177
24/01 – 24	27	22 e 24/08 – 234 e 236	212
26/01 – 26	16	11/07 – 192	166
27/01 – 27	9	09/08 – 221	194
27/01 – 27	10 (setor Sul)	13/07 – 194	167
28/01 – 28	11	27/07 – 208	180
27/02 – 58	25	26/08 – 238	180
01/03 – 60	8 (setor Norte)	27/08 – 239	179
06/03 – 65	22	30/08 – 242	177

As imagens de satélite utilizadas foram geradas pelo Mapeador Temático do satélite Landsat 5, órbita 219 e ponto 69, adquiridas junto ao INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). Foram utilizadas oito imagens, obtidas em datas distintas do ciclo do algodoeiro cultivado na Fazenda Busato: 20 de janeiro (DSA 20), 25 de março (DSA 84), 26 de abril (DSA 116), 12 de maio (DSA 132), 28 de maio (DSA 148), 13 de junho (DSA 164), 15 de julho (DSA 196) e 31 de julho (DSA 212) de 2007. O satélite tem resolução temporal de 16 dias, e o horário de passagem sobre a área de interesse ocorreu, em todas as imagens, em torno das 09 horas e 56 minutos.

3.2 – Métodos

3.2.1 – Saldo de radiação à superfície

Na Figura 3.6 está representado o fluxograma das etapas computacionais do processamento de obtenção do saldo de radiação à superfície – Rn, descritas a seguir, na qual a primeira etapa consiste na conversão do Número Digital – ND em radiância espectral monocromática, obtida pela seguinte expressão (Markham e Baker, 1986):

$$L_b = a_b + \left(\frac{b_b - a_b}{255} \right) ND \quad (3.1)$$

em que: a_b e b_b são coeficientes de calibração espectral do sensor (Chander e Markham, 2003 – Tabela 3.2) e o subscrito “b” refere-se a cada banda espectral.

Tabela 3.2 – Coeficientes de calibração do Landsat 5 – TM – a_b e b_b , irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera – k_b , coeficientes peso da energia solar potencial de cada banda à superfície – w_b

Banda	a_b	b_b	k_b	w_b
	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$	$W m^{-2} \mu m^{-1}$	
1	-1,52	193,0	1957	0,254
2	-2,84	365,0	1826	0,149
3	-1,17	264,0	1554	0,147
4	-1,51	221,0	1036	0,311
5	-0,37	30,2	215,0	0,102
6	1,2378	15,303	–	–
7	-0,15	16,5	80,67	0,036

Fonte: Chander e Markham (2003)

A etapa seguinte compreende o cômputo da refletância planetária de cada banda espectral – ρ_b , de acordo com a seguinte equação (Allen et al., 2002):

$$\rho_b = \frac{\pi L_b}{k_b \cos \theta d_r} \quad (3.2)$$

em que: L_b é a radiância espectral, k_b é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera (Tabela 3.2), $\cos \theta$ é o cosseno do ângulo de incidência dos raios solares e a normal da superfície e d_r é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol, dados por (Allen et al., 2002):

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi) \cos(s) - \text{sen}(\delta) \cos(\phi) \text{sen}(s) \cos(\gamma) + \\ & \cos(\delta) \cos(\phi) \cos(s) \cos(\omega) + \cos(\delta) \text{sen}(\phi) \text{sen}(s) \cos(\gamma) \cos(\omega) + \\ & \cos(\delta) \text{sen}(\gamma) \text{sen}(s) \text{sen}(\omega) \end{aligned} \quad (3.3)$$

em que: δ é a declinação do Sol, ϕ é a latitude central da cena ($-13,2^\circ$), s é a inclinação da superfície, γ é o ângulo azimutal da superfície e ω é o ângulo horário (em radianos).

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(DSA \frac{2\pi}{365}\right) \quad (3.4)$$

em que: DSA é o dia sequencial do ano.

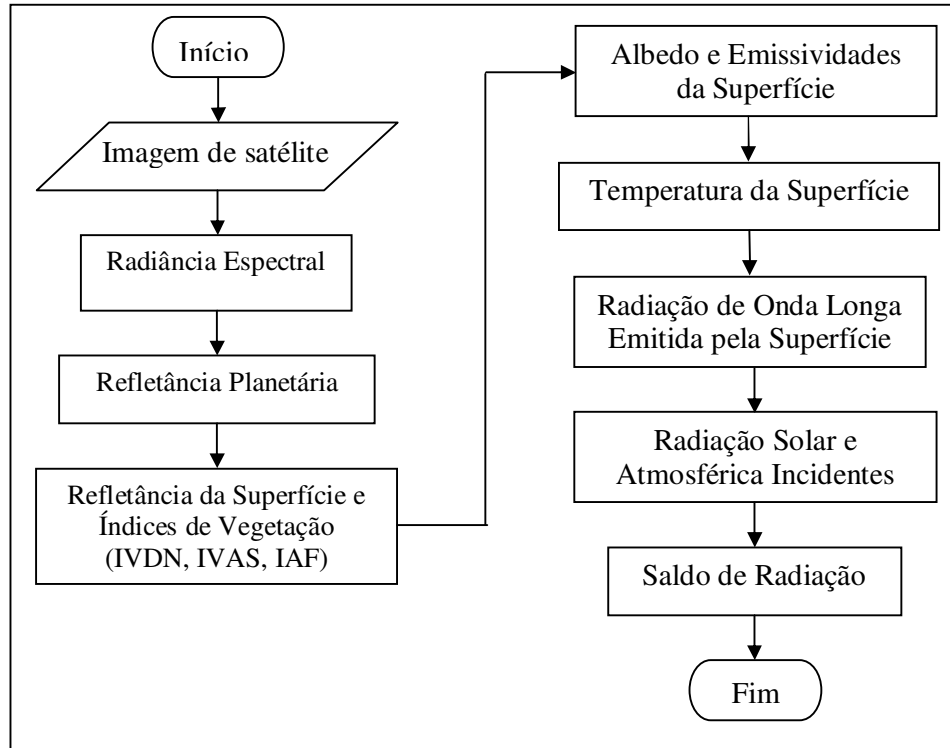


Figura 3.6 – Fluxograma do processamento do saldo de radiação à superfície – R_n

Por sua vez, δ e ω foram obtidos por (Allen et al., 1998):

$$\delta = 0,409 \sin\left(DSA \frac{2\pi}{365} - 1,39\right) \quad (3.5)$$

$$\omega = \frac{\pi}{12} \left[\left(t + \frac{L_Z - L_M}{15} + S_C \right) - 12 \right] \quad (3.6)$$

em que: t é a hora de passagem do satélite, L_Z é a longitude central (45°), L_M é a longitude central da cena, e S_C é a correção sazonal para a hora solar dada pela seguinte expressão (Duffie e Beckman, 1991):

$$S_c = 0,1645 \sin \left[\frac{4\pi(DSA-81)}{364} \right] - 0,1255 \cos \left[\frac{2\pi(DSA-81)}{364} \right] - 0,025 \sin \left[\frac{2\pi(DSA-81)}{364} \right] \quad (3.7)$$

O processo de conversão da refletância planetária em refletância da superfície, banda a banda, foi realizado segundo a metodologia proposta por Allen et al. (2007a):

$$\rho_{s,b} = \frac{\rho_b - \rho_{atm,b}}{\tau_{inc,b} \tau_{asc,b}} \quad (3.8)$$

em que: $\rho_{s,b}$ é a refletividade à superfície, ρ_b é a refletividade no topo da atmosfera, $\rho_{atm,b}$ é a refletância atmosférica, $\tau_{inc,b}$ é a transmissividade atmosférica para a radiação solar incidente e $\tau_{asc,b}$ é a transmissividade para a radiação solar refletida da superfície.

Por sua vez, a $\tau_{inc,b}$ foi calculada por (Allen et al., 2007a):

$$\tau_{inc,b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 P}{Kt \cos Z} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos Z} \right] + C_5 \quad (3.9)$$

em que: $C_1 - C_5$ são os coeficientes derivados de modelo de transferência radiativa (Tabela 3.4), P é a pressão atmosférica em kPa (Equação 3.10), W é a água precipitável na atmosfera em mm (Equação 3.11), Kt é o coeficiente de turbidez atmosférica (valor padrão = 1,0) e $\cos Z$ é o cosseno do ângulo zenital solar apresentado na Tabela 3.3.

$$P = 101,3 \left(\frac{Tar - 0,0065 z}{Tar} \right)^{5,26} \quad (3.10)$$

em que: Tar é a temperatura do ar (K) e z é a elevação de cada pixel acima do nível do mar, obtida com o Modelo de Elevação Digital – MED.

$$W = 0,14 e_a P + 2,1 \quad (3.11)$$

em que: e_a é a pressão real do vapor (kPa).

Já a $\tau_{asc,b}$ foi obtida através da expressão (Allen et al., 2007a):

$$\tau_{asc,b} = C_1 \exp \left[\frac{C_2 P}{Kt \cos \eta} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \eta} \right] + C_5 \quad (3.12)$$

em que: η é o ângulo de visão do sensor relativo a perpendicular de uma superfície plana e horizontal. No caso do Landsat, que tem ângulo de visão no nadir, o $\cos \eta = 1$.

A refletância atmosférica – $\rho_{\text{atm},b}$ foi obtida através de (Allen et al., 2007a):

$$\rho_{\text{atm},b} = C_b (1 - \tau_{\text{inc},b}) \quad (3.13)$$

em que: C_b é o coeficiente derivado de modelo de transferência radiativa (Tabela 3.4).

Tabela 3.3 – Valores de dr , δ , ω , $\cos Z$, e_a e Tar para cada data de estudo

Data	dr	δ	ω	$\cos Z$	e_a	Tar
	–	rad	rad	–	kPa	°C
20/jan	1,03	-0,35	-0,49	0,85	1,34	32,3
25/mar	1,00	0,02	-0,47	0,83	2,08	29,5
26/abr	0,99	0,23	-0,40	0,78	2,20	29,7
12/mai	0,98	0,32	-0,42	0,75	1,61	25,1
28/mai	0,97	0,37	-0,42	0,72	2,04	28,0
13/jun	0,97	0,41	-0,43	0,69	1,92	27,3
15/jul	0,97	0,37	-0,45	0,69	1,33	26,8
31/jul	0,97	0,32	-0,45	0,72	1,17	22,2

Tabela 3.4 – Constantes de calibração $C_1 - C_5$ e C_b do Landsat 5 – TM

Coefficiente	Banda 1	Banda 2	Banda 3	Banda 4	Banda 5	Banda 7
C_1	0,987	2,319	0,951	0,375	0,234	0,365
C_2	-0,00071	-0,00016	-0,00033	-0,00048	-0,00101	-0,00097
C_3	0,000036	0,000105	0,00028	0,005018	0,004336	0,004296
C_4	0,0880	0,0437	0,0875	0,1355	0,0560	0,0155
C_5	0,0789	-1,2697	0,1014	0,6621	0,7757	0,639
C_b	0,640	0,310	0,286	0,189	0,274	-0,186

Fonte: Allen et al. (2007a)

O cômputo do albedo da superfície – α foi obtido pela combinação linear das refletâncias monocromáticas de cada banda:

$$\alpha = \sum_{b=1}^i (\rho_{s,b} \omega_b) \quad (3.14)$$

em que: ω_b é o coeficiente peso que considera a fração de toda a energia solar potencial a superfície sobre uma faixa representada para cada banda (Tabela 3.4).

Na etapa subsequente, foram obtidos os índices de vegetação usados na estimativa da rugosidade aerodinâmica e das emissividades termal e superficial. Primeiramente, obteve-se o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – IVDN (Rouse et al., 1974) através da razão entre a diferença das refletividades planetárias (no topo da atmosfera) do IV-próximo – ρ_{IV} e do vermelho – ρ_{V} e a soma das mesmas:

$$\text{IVDN} = \frac{\rho_{\text{IV}} - \rho_{\text{V}}}{\rho_{\text{IV}} + \rho_{\text{V}}} \quad (3.15)$$

O IVDN é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde e sua magnitude reflete o nível de atividade fotossintética da vegetação. Seus valores variam de -1 a $+1$, sendo para superfícies vegetadas superior a zero, enquanto que para corpos d'água e nuvens o IVDN geralmente é inferior a zero.

Já o Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo – IVAS, que é um índice que busca amenizar os efeitos do “background” do solo, foi calculado por meio da seguinte expressão, proposta por Huete (1988):

$$IVAS = \frac{(1+L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (3.16)$$

em que: L é denominado de fator de ajuste do índice, cujo valor mais frequente na literatura é $0,5$, que representa vegetação com densidade moderada, utilizado por diversos pesquisadores, a exemplo de Accioly et al. (2002), Feitosa (2005), Silva e Bezerra (2006) e Bezerra et al. (2008). Porém, seu valor pode variar de $0,25$ (vegetação de alta densidade) a $1,0$ (vegetação de baixa densidade).

Por sua vez, o Índice de Área Foliar – IAF, um indicador da biomassa de cada pixel da imagem, foi computado pela seguinte equação empírica (Allen et al., 2002):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - IVAS}{0,59}\right)}{0,91} \quad (3.17)$$

Na obtenção da temperatura da superfície – T_s foi utilizada a equação de Planck resolvida para a temperatura (Equação 3.19), válida para corpo negro. Como cada pixel não emite radiação como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal – ε_{NB} . Quando da obtenção da radiação de onda longa emitida – $R_{L\uparrow}$ por cada pixel, no entanto, há de ser considerada a emissividade no domínio da radiação de banda larga – ε_0 . Segundo Allen et al. (2002), essas emissividades podem ser obtidas, para $IVDN > 0$ e $IAF < 3$ por:

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331IAF \quad \text{e} \quad \varepsilon_0 = 0,95 + 0,011IAF \quad (3.18)$$

Para pixels com $IAF \geq 3$ assume-se $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$. Porém, para corpos de água ($IVDN < 0$), são utilizados os valores de $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$.

Na obtenção da T_s (K) foi utilizada a seguinte equação:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} K_1}{L_6} + 1\right)} \quad (3.19)$$

em que: $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ e $K_2 = 1260,56 \text{ K}$ são constantes de calibração da banda termal (Markham e Barker, 1986) e L_6 é a radiância da banda termal.

Por sua vez, a $R_{L\uparrow}$ (W m^{-2}) foi obtida através da equação de Stefan-Boltzman:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_s^4 \quad (3.20)$$

em que: σ é a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$).

Sequencialmente foi obtida a radiação solar incidente – $R_{S\downarrow}$ (W m^{-2}) para condição de céu claro dada por (Allen et al., 2002; Silva e Bezerra, 2006):

$$R_{S\downarrow} = S \cos \theta \text{ dr } \tau_{sw} \quad (3.21)$$

em que: S é a constante solar (1367 W m^{-2}) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar, dada por (ASCE-EWRI, 2005):

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp\left[\frac{-0,00146P}{k_t} - 0,075\left(\frac{W}{\cos Z}\right)^{0,4}\right] \quad (3.22)$$

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície – $R_{L\downarrow}$ (W m^{-2}) também foi obtida através da equação de Stefan-Boltzman:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_{atm} \sigma T_{ar}^4 \quad (3.23)$$

em que: ε_{atm} é a emissividade atmosférica obtida por: $\varepsilon_{atm} = 0,85(-\ln \tau_{sw})^{0,09}$ (Allen et al., 2002) e T_{ar} é a temperatura do ar (K), apresentada na Tabela 3.4.

O R_n (W m^{-2}) foi obtido pela equação do balanço de radiação à superfície:

$$R_n = (1 - \alpha) R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o) R_{L\downarrow} \quad (3.24)$$

em que: $R_{S\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente, α é o albedo da superfície, $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera, $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida e ε_o é a emissividade da superfície.

3.2.2 – Fluxo de calor no solo

O G (W m^{-2}) foi obtido segundo equações propostas por Tasumi (2003):

$$G = [0,05 + 0,18 \exp(-0,521 \cdot \text{IAF})] R_n \quad (\text{IAF} \geq 0,5) \quad (3.25a)$$

$$G = [(1,80 T_s / R_n) + 0,084] R_n \quad (\text{IAF} < 0,5) \quad (3.25b)$$

em que: para as águas do rio Corrente, cujo $\text{IVDN} < 0$, assumiu-se que $G = 0,3 \cdot R_n$.

3.2.3 – Fluxo de calor sensível

Na Figura 3.7 está apresentado o fluxograma das etapas computacionais do processo iterativo para a obtenção do fluxo de calor sensível – H (W m^{-2}), descrito nesta seção, que, por sua vez, foi estimado com base na velocidade do vento e temperatura da superfície usando uma calibração interna da diferença de temperatura próxima à superfície entre dois níveis, segundo a equação (Allen et al., 2007a):

$$H = \rho c_p \frac{(a + b T_{s_{\text{datum}}})}{r_{\text{ah}}} \quad (3.26)$$

em que: ρ é a densidade do ar em kg m^{-3} (Equação 3.27), cujo valor médio para todas as imagens foi em torno de $1,1 \text{ kg m}^{-3}$, c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($1.004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), a e b são constantes de calibração da diferença de temperatura, $T_{s_{\text{datum}}}$ é a temperatura da superfície (K) ajustada ao efeito da elevação, definida posteriormente, e r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível (s m^{-1}).

$$\rho = \frac{1000 \cdot P}{1,01 T_{\text{ar}} 287} \quad (3.27)$$

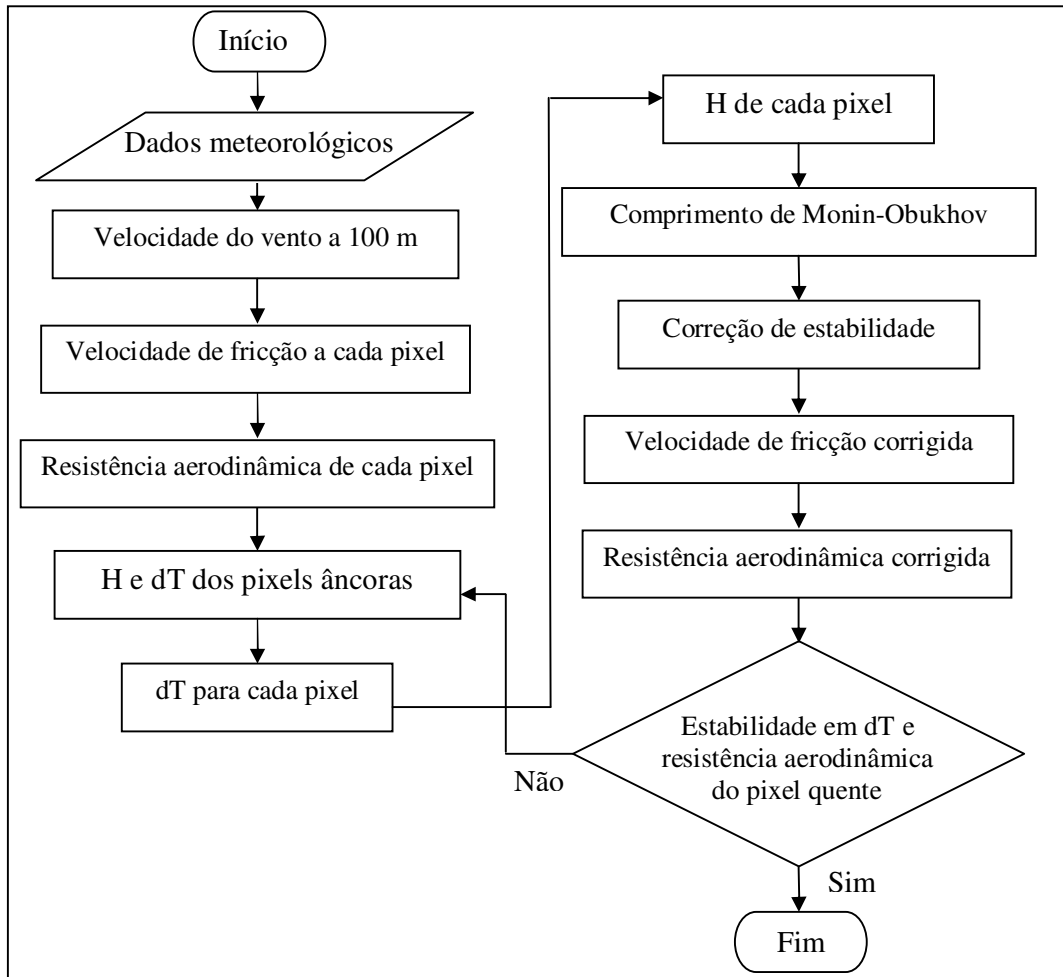


Figura 3.7 – Fluxograma do processo iterativo para a obtenção do fluxo de calor sensível – H

Inicialmente, foram reunidas as informações sobre velocidade do vento ao nível de 2 metros – u (m s^{-1}) e a altura média da vegetação circundante – h (m) que envolve a estação meteorológica. Considera-se um raio igual à metade da resolução espacial do satélite, no caso do TM – Landsat 5 utilizou-se 15 m, e a altura de obtenção de u , 2,0 m. Dessa forma, foi calculado o coeficiente de rugosidade – z_{0m} na estação meteorológica em função de h , segundo Brutsaert (1982):

$$z_{0m} = 0,12h \quad (3.28)$$

A velocidade de fricção u_* (m s^{-1}) foi computada usando o perfil logarítmico do vento para condição de estabilidade neutra:

$$u_* = \frac{ku_x}{\ln\left(\frac{z_x}{z_{0m}}\right)} \quad (3.29)$$

em que: k é constante de von Karman (0,41) e u_x é a velocidade do vento ($m s^{-1}$) na altura z_x (2,0 m).

Em seguida, considerando-se, ainda, a atmosfera em equilíbrio neutro, estimou-se a velocidade do vento ao nível de 100 m – u_{100} ($m s^{-1}$), “blending height”, onde foi assumido que os efeitos da rugosidade da superfície são desprezíveis:

$$u_{100} = u^* \frac{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (3.30)$$

Tabela 3.5 – Velocidade do vento instantâneo ao nível de 2 m – u_x e 100 m – u_{100} por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Data	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	12/jun	15/jul	31/jul
u_x ($m s^{-1}$)	0,95	1,84	0,83	1,33	0,89	1,27	0,83	2,10
u_{100} ($m s^{-1}$)	1,88	3,63	1,64	2,63	1,76	2,51	1,64	4,14

Com a hipótese de que u_{100} é constante em toda a cena estudada, foi obtida a velocidade de fricção u^* ($m s^{-1}$) para cada pixel através da equação:

$$u^* = \frac{ku_{100}}{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)} \quad (3.31)$$

em que: z_{0m} (m) foi obtido para cada pixel em função do IVAS, através da seguinte expressão proposta por Bastiaanssen (2000):

$$z_{0m} = \exp(-5,809 + 5,62 \text{IVAS}) \quad (3.32)$$

De posse dos valores de u^* , pixel a pixel, foi estimada a resistência aerodinâmica ao transporte de calor – r_{ah} ($s m^{-1}$) admitindo-se a atmosfera em condição de estabilidade neutra pela seguinte expressão:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^* k} \quad (3.33)$$

em que: z_1 e z_2 são as alturas acima da superfície (0,1 m e 2,0 m, respectivamente).

O cômputo da diferença de temperatura próxima à superfície ΔT ($^{\circ}C$) para cada pixel foi computada através da relação linear entre ΔT e T_s :

$$\Delta T = a + b T_{s_{\text{datum}}} \quad (3.34)$$

em que: a e b são coeficientes da relação linear obtidos através dos pixels “âncoras” (“pixel frio” e “pixel quente”) e $T_{s_{\text{datum}}}$ foi obtida de acordo com Tasumi (2003):

$$T_{s_{\text{datum}}} = T_s + 0,0065\Delta z \quad (3.35)$$

em que: Δz é a elevação de cada pixel menos a elevação média da cena (452 m).

O “pixel frio” encontra-se numa área bem irrigada, onde foi assumido que: $H_{\text{frio}} = R_n - G - LE_{\text{frio}}$, em que o fluxo de calor latente LE_{frio} (W m^{-2}) foi obtido por:

$$LE_{\text{frio}} = 1,05 LE_0 \quad (3.36)$$

em que: LE_0 é o fluxo de calor latente de referência, obtido com base na evapotranspiração de referência horária – ET_0 (mm h^{-1}), segundo ASCE-EWRI (2005):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + u_2 Cd)} \quad (3.37)$$

em que: R_n e G são dados em $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$, T é a temperatura média horária do ar, u_2 é a média horária da velocidade do vento ao nível de 2 m (m s^{-1}), e_s e e_a são, respectivamente, as pressões de saturação e real de vapor (kPa), Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor, γ é constante psicométrica, ambos em $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}$, C_n tem o valor de 66 e Cd , o valor de 0,25 para período diurno e 1,7 para o período noturno. Para a obtenção da ET_0 diária (mm dia^{-1}), os fluxos R_n e G são expressos em $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$, e os valores de C_n e Cd são 1600 e 0,38, respectivamente.

Tabela 3.6 – Valores da ET_0 horária e diária por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Data	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	12/jun	15/jul	31/jul
ET_0 (mm h^{-1})	0,72	0,70	0,56	0,58	0,52	0,53	0,50	0,61
ET_0 (mm dia^{-1})	6,41	5,38	4,78	4,81	4,23	4,47	4,10	5,42

Portanto, tem-se que:

$$\Delta T_{\text{frio}} = \frac{H_{\text{frio}} r_{\text{ah_frio}}}{\rho_{\text{frio}} c_p} \quad (3.38)$$

em que: ΔT_{frio} é a diferença de temperatura, H_{frio} é o fluxo de calor sensível, $r_{\text{ah_frio}}$ é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor, todos para o “pixel frio”.

Por sua vez, o “pixel quente” foi escolhido numa área de solo exposto, onde assumiu-se $LE_{\text{quente}} = 0$ e $H_{\text{quente}} = R_n - G$ (W m^{-2}). Assim:

$$\Delta T_{\text{quente}} = \frac{H_{\text{quente}} r_{\text{ah_quente}}}{\rho_{\text{quente}} c_p} \quad (3.39)$$

em que: ΔT_{quente} é a diferença de temperatura, H_{quente} é o fluxo de calor sensível, $r_{\text{ah_quente}}$ é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor, todos para o “pixel quente”.

Dessa forma, tem-se um sistema com duas equações e duas incógnitas, o que possibilita o cálculo dos coeficientes da Equação 3.34, pelas seguintes expressões:

$$a = \frac{\Delta T_{\text{quente}} - \Delta T_{\text{frio}}}{T_{s_{\text{datum_quente}}} - T_{s_{\text{datum_frio}}}} \quad (3.40a)$$

$$b = \frac{\Delta T_{\text{quente}} - a}{T_{s_{\text{datum_quente}}}} \quad (3.40b)$$

Os valores obtidos não representam adequadamente o H de cada pixel e servem, tão somente, como valores iniciais de um processo iterativo, que nas etapas seguintes foram consideradas, efetivamente, as condições de estabilidade de cada pixel.

Nesse sentido, o comprimento de Monin-Obukhov – L (m) foi utilizado para definir as condições de estabilidade da atmosfera, sendo computado pela seguinte expressão (Allen et al., 2002; Allen et al. 2007a):

$$L = - \frac{\rho c_p u^{*3} T_s}{kgH} \quad (3.41)$$

em que: g é o módulo do campo gravitacional terrestre ($9,81 \text{ m s}^{-2}$) e H é o fluxo de calor sensível (W m^{-2}), pixel a pixel, obtido inicialmente considerando a condição de neutralidade. Os valores de L definem as condições de estabilidade da seguinte forma: se $L < 0$, a atmosfera é considerada instável; se $L > 0$, a atmosfera é considerada estável e se $L = 0$ a atmosfera é considerada neutra.

Dependendo das condições atmosféricas, os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum – ψ_m e de calor – ψ_h deverão ser considerados. Para isto, utilizou-se das formulações de Paulson (1970) e Webb (1970):

1) Se $L < 0$ (condição de instabilidade):

$$\psi_{m(100m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(100m)}}{2} \right) + \ln \left(\frac{1 + x_{(100m)}^2}{2} \right) - 2 \arctg(x_{(100m)}) + 0,5 \pi \quad (3.42a)$$

$$\psi_{h(2m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2} \right) \quad (3.42b)$$

$$\Psi_{h(0,1m)} = 2 \ln \left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2} \right) \quad (3.42c)$$

em que:

$$x_{(100m)} = \left(1 - 16 \frac{100}{L} \right)^{0,25} \quad (3.43a)$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L} \right)^{0,25} \quad (3.43b)$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L} \right)^{0,25} \quad (3.43c)$$

2) Se $L > 0$ (condição de estabilidade):

$$\Psi_{m(100m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \quad (3.44a)$$

$$\Psi_{m(2m)} = -5 \left(\frac{2}{L} \right) \quad (3.44b)$$

$$\Psi_{m(0,1m)} = -5 \left(\frac{0,1}{L} \right) \quad (3.44c)$$

3) Se $L = 0$ (condição de neutralidade): $\Psi_m = 0$ e $\Psi_h = 0$.

O valor corrigido para a velocidade de fricção u^* ($m s^{-1}$) é dado por:

$$u^* = \frac{u_{100k}}{\ln \left(\frac{100}{z_{0m}} \right) - \Psi_{m(100m)}} \quad (3.45)$$

em que: $\Psi_{m(100m)}$ é a correção da estabilidade para o transporte de momentum a 100 m.

De posse dos valores corrigidos de u^* , foram obtidos os valores corrigidos da r_{ah} ($s m^{-1}$) para cada pixel através da seguinte equação:

$$r_{ah} = \frac{\ln \left(\frac{z_2}{z_1} \right) - \Psi_{h(z_2)} + \Psi_{h(z_1)}}{u^* k} \quad (3.46)$$

em que: $\Psi_{h(z_1)}$ e $\Psi_{h(z_2)}$ são as correções de estabilidade para o transporte de calor a 0,1 m e 2,0 m, respectivamente.

Após obtidos os valores dessas variáveis, retornou-se ao cômputo da função da diferença de temperatura ΔT , repetindo-se os cálculos mencionados anteriormente até que fosse observada a estabilidade nos valores sucessivos de ΔT e de r_{ah} para o pixel quente. Para tanto, foram necessárias sete iterações para cada imagem.

3.2.3 – Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente – LE ($W m^{-2}$) foi obtido como resíduo do BE:

$$LE = R_n - G - H \quad (3.47)$$

3.2.5 – Evapotranspiração real horária

Tendo-se estimado LE instantâneo para cada pixel pela equação anterior, pôde-se converter seu valor em lâmina de água perdida da superfície para a atmosfera, ou seja, evapotranspiração real horária – ETr ($mm h^{-1}$) pela seguinte equação (Allen et al., 2007a):

$$ETr = \frac{3600LE}{(2,501 - 0,00236Ts)10^6} \quad (3.48)$$

em que: Ts é a temperatura da superfície ($^{\circ}C$).

3.2.6 – Fração da evapotranspiração de referência

A fração da evapotranspiração de referência – FET_0 é definida como sendo a razão entre a ETr horária e a ET_0 horária para cada pixel, sendo utilizada para extrapolar os valores instantâneos da ETr em valores diários ou em períodos maiores:

$$FET_0 = \frac{ETr}{ET_0} \quad (3.49)$$

3.2.7 – Evapotranspiração diária e coeficiente de cultivo

Os valores diários da ETr – ETd ($mm dia^{-1}$) são muito úteis para estimativa do consumo hídrico de culturas e de bacias hidrográficas. Para se obter a ETd, foi utilizada a metodologia tradicional do SEBAL, apresentado por Bastiaanssen (2000). Dessa forma, a ETd foi obtida como sendo:

$$ETd = 0,035.\Lambda \left[(1 - \alpha) R_{s\downarrow 24h} - 110\tau_{sw\downarrow 24h} \right] \quad (3.50a)$$

$$K_c = \frac{ET_d}{ET_{0d}} \quad (3.50b)$$

em que: Λ é a fração evaporativa (definida posteriormente), $R_{S\downarrow 24h}$ é a radiação solar incidente diária ($W\ m^{-2}$), $\tau_{sw\downarrow 24h}$ é a transmissividade atmosférica diária (valor médio 0,675), 0,035 é fator de conversão de $W\ m^{-2}$ para $mm\ dia^{-1}$ e ET_{0d} é a ET_0 diária.

3.2.8 – Evapotranspiração sazonal

A evapotranspiração sazonal – ET_{saz} foi obtida assumindo-se que a ETr para toda área é proporcional a ET_0 e que a FET_0 obtida para o momento da passagem do satélite é constante para todo o período representado pela imagem. Para tanto, foram necessários a adoção dos seguintes passos:

1° Passo: Escolha do comprimento da estação para a qual se deseja obter a ET real;

2° Passo: Determinação do período representado por cada imagem dentro da estação escolhida;

3° Passo: Cálculo da ET_0 acumulada para o período representado pela imagem, isto é, a soma dos valores da ET_0 diária para todo o período;

4° Passo: Cálculo da ETr acumulada para cada período como sendo:

$$ETr_{período} = FET_{0_período} \sum_1^n ET_{0d} \quad (3.51)$$

em que: $FET_{0_período}$ é a FET_0 representativa para o período considerado, ET_{0d} é a ET_0 diária acumulada e n é o número de dias no período.

5° Passo: Cálculo da ET sazonal pela soma de todos os valores da $ETr_{período}$ para a estação em questão.

3.2.9 – Biomassa acima do solo

Na determinação da biomassa acima do solo, cujas etapas computacionais estão representadas na Figura 3.8, foi obtida, inicialmente, a Radiação Fotossinteticamente Ativa – RFA ($MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$) pela seguinte expressão (Monteith, 1972):

$$RFA = 0,48.R_{G_24h} \quad (3.52)$$

em que: R_{G_24h} representa a radiação solar diária incidente em $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 – Valores da radiação solar diária por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Data	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	12/jun	15/jul	31/jul
R_G (MJ m⁻² dia⁻¹)	27,9	22,7	22,0	20,6	19,4	18,6	19,3	20,2

Porém, nem toda RFA é utilizada no processo fotossintético. Nesse sentido, foi obtida a Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida – RFAA (MJ m⁻² dia⁻¹), segundo Bastiaanssen e Ali (2003):

$$RFAA = (-0,161 + 1,257 IVDN) RFA \quad (3.53)$$

Por conseguinte, a biomassa (kg ha⁻¹) foi estimada segundo Bastiaanssen e Ali (2003):

$$\text{biomassa} = 10\varepsilon RFAA \quad (3.54)$$

em que: ε (g MJ⁻¹) é a eficiência do uso de luz dado pelo modelo de Field et al. (1995):

$$\varepsilon = \varepsilon' T_1 T_2 FE \quad (3.55)$$

em que: ε' é um fator de conversão máximo característico da cultura em condições ambientais ótimas, cujo valor para a cultura do algodoeiro é 2,5 g MJ⁻¹, FE é a fração evaporativa e, T₁ e T₂ relatam a ordem de crescimento da planta, dados por (Bastiaanssen, 2000; Bastiaanssen e Ali, 2003):

$$FE = \frac{LE}{R_n - G} = \frac{LE}{LE + H} \quad (3.56a)$$

$$T_1 = 0,8 + 0,02 T_{opt} - 0,0005 T_{opt}^2 \quad (3.56b)$$

$$T_2 = \frac{1}{1 + \exp(0,2 T_{opt} - 10 - T_{mon})} \frac{1}{1 + \exp[0,3(-T_{opt} - 10 + T_{mon})]} \quad (3.56c)$$

em que: T_{opt} é a temperatura média do ar do mês de máximo IAF ou IVDN (°C) e T_{mon} é a temperatura média mensal do ar (°C).

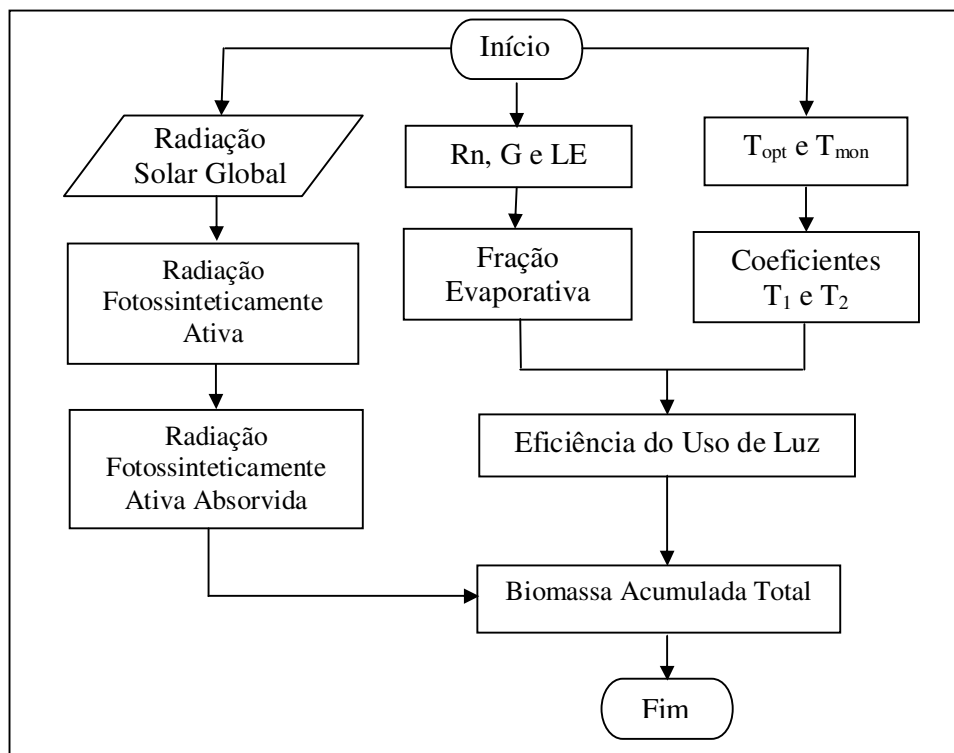


Figura 3.8 – Fluxograma do cálculo da biomassa acima do solo

Tabela 3.8 – Valores da T_{opt} , T_{mon} , T_1 e T_2 para os sete primeiros meses de 2007

Mês	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul
T_{opt}	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1	26,1
T_{mon}	28,2	26,3	26,6	26,9	26,1	24,2	23,8
T_1	0,981	0,981	0,981	0,981	0,981	0,981	0,981
T_2	0,916	0,951	0,946	0,940	0,953	0,973	0,976

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Análise das imagens do IVDN

O IVDN obtido através das refletâncias das bandas 3 e 4 do TM – Landsat 5 fornece informações sobre a quantidade e a condição da vegetação verde, que de acordo com Walsh et al. (1997) a variação espacial do mesmo não está sujeita apenas a influência da quantidade de vegetação, mas também a topografia, inclinação da superfície, disponibilidade de radiação solar, entre outros fatores.

Nas Figuras 4.1a a 4.1h estão apresentadas as imagens do IVDN para os oito dias estudados, nas quais são apresentadas a legenda correspondente a seis diferentes classes, onde a cor vermelha caracteriza áreas com IVDN inferior a 0,30; a cor laranja, IVDN variando de 0,30 a 0,40; a cor amarela IVDN entre 0,40 e 0,50; a cor verde IVDN a faixa de 0,50 a 0,60; a cor azul representa IVDN entre 0,60 e 0,70; e a cor violeta os valores de IVDN superiores a 0,70.

De forma geral, observa-se nas Figuras 4.1a a 4.1d predominância do IVDN superiores a 0,50, enquanto que nas Figuras 4.1e e 4.1f predomina IVDN entre 0,30 e 0,50, e nas demais figuras, prevalece IVDN inferior a 0,40. Essas faixas de IVDN predominantes correspondem às áreas de vegetação nativa, em que o decréscimo observado pode ser atribuído ao regime pluviométrico local, como evidenciado pela Figura 3.5a, que apresenta a precipitação mensal do período de estudo.

Em relação ao Projeto Irrigado de Formoso constata-se em todas as figuras que o IVDN é praticamente constante, sendo superior a 0,60. Essa uniformidade na

densidade vegetativa é atribuída ao fato da cobertura nessa área ser composta por vegetação perene, prevalecendo pomar de bananeiras. Silva et al. (2005b) utilizando imagens TM – Landsat 5 compreendendo o Perímetro Irrigado Senador Nilo Coelho (PISNC) no município de Petrolina – PE obtiveram valores de mesma magnitude.

Na área foco, Fazenda Busato, observa-se que os pivôs em pousio, identificados na Figura 3.1b, apresentam IVDN superior a 0,70 na Figura 4.1a, evidenciando a presença de vegetação irrigada em 20 de janeiro de 2007. Porém, nas demais imagens, Figuras 3.1b a 3.1h, constata-se que o IVDN dessa área é inferior a 0,30, correspondendo a áreas com solo exposto, que de acordo com Huete e Tucker (1991) os valores do IVDN para tais áreas variam entre 0,05 e 0,30.

Nos pivôs correspondentes ao cultivo do algodoeiro, observa-se que o IVDN é inferior a 0,30 na Figura 4.1a, correspondente ao período de semeadura à emergência, podendo-se afirmar que correspondem a solo exposto ou a solos com vegetação rala, já que, como evidenciado pela Tabela 3.1, em alguns dos pivôs a semeadura ocorreu após a geração da primeira imagem pelo TM – Landsat 5.

Na Figura 4.1b verifica-se que o IVDN do algodoeiro varia, predominantemente, entre 0,40 e 0,60, correspondente majoritariamente ao período de floração da cultura. Nas Figuras 4.1c e 4.1d o IVDN, em tal área, apresenta valores superiores a 0,70, correspondendo ao período de pleno desenvolvimento da cultura, entre os meses de abril e maio. Nas Figuras 4.1e e 4.1h constata-se ligeiro decréscimo do IVDN, variando de 0,60 a 0,70. Nas demais, observa-se que o IVDN é predominantemente inferior a 0,40, correspondendo ao período de maturação do algodoeiro, no final do mês de julho. Dessa forma, fica evidente que o IVDN é uma variável que auxilia na identificação das condições da vegetação, que no caso do algodoeiro evidenciou suas fases fenológicas.

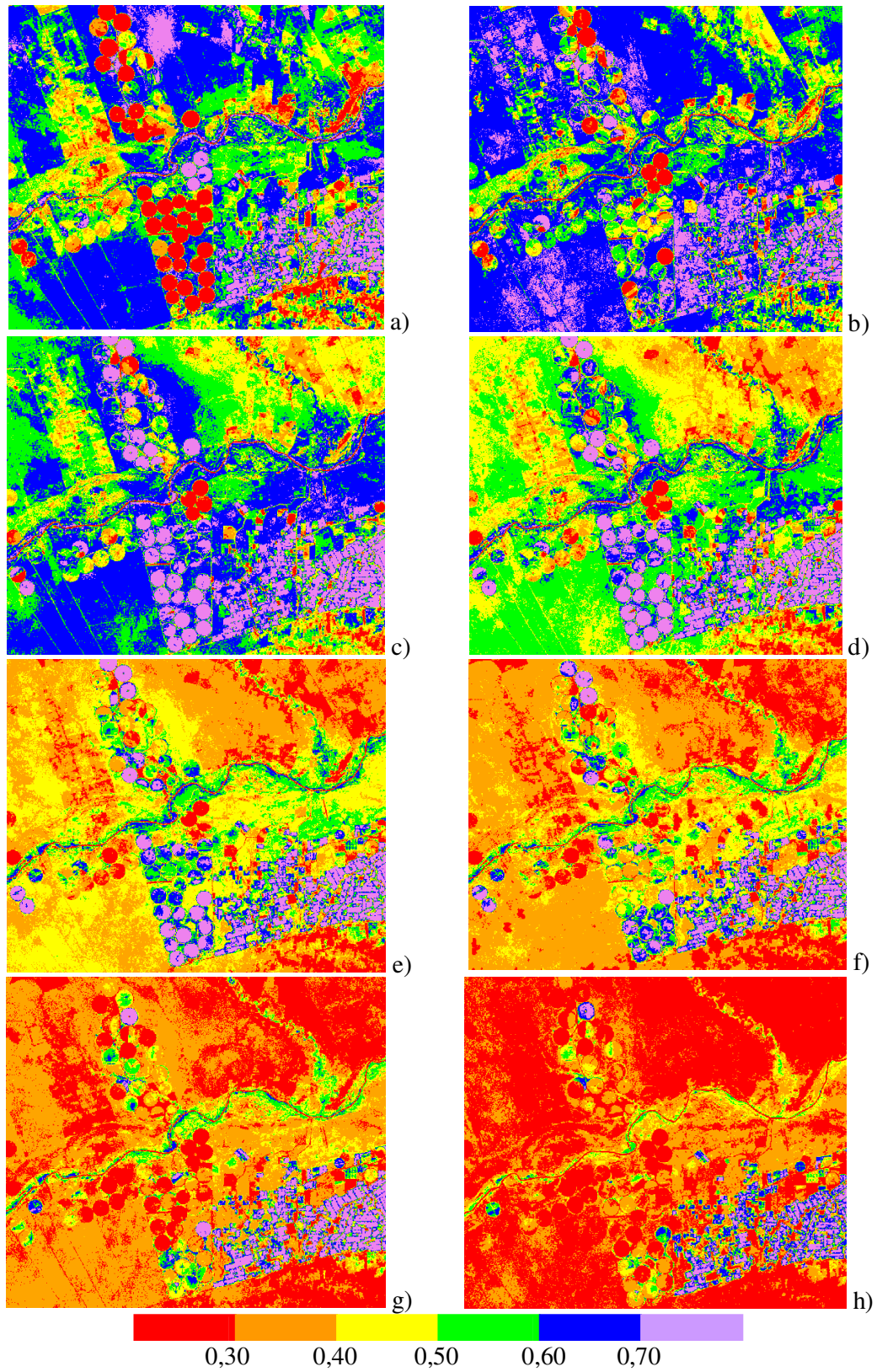


Figura 4.1 – Imagens do IVDN dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007

Na Tabela 4.1 estão apresentadas as datas de semeadura e colheita, a duração do ciclo da cultura, área plantada e a variedade do algodoeiro para cada um dos pivôs selecionados para análise, segundo a Figura 3.3. Nos pivôs 23 e 10, as semeaduras ocorreram doze e cinco dias antes da geração da primeira imagem pelo TM – Landsat 5 e a colheita ocorreu três e dezessete dias antes da geração da última imagem, respectivamente, enquanto que no pivô 5 a semeadura ocorreu exatamente no dia da geração da primeira imagem e colhido sete dias após a geração da última imagem.

Nos pivôs 20 e 21, as semeaduras ocorreram um dia após a geração da primeira imagem e a colheita ocorreu nove dias após a geração da sexta imagem. Já no pivô 27, a semeadura ocorreu quatro dias após a geração da primeira imagem e a colheita ocorreu vinte e dois e vinte e quatro dias após a geração da última imagem. A semeadura e a colheita do algodoeiro no pivô 25 ocorreram vinte e sete dias antes da geração da segunda imagem e vinte e seis dias após a geração da última imagem, respectivamente. Por fim, no pivô 22 a semeadura ocorreu vinte dias antes da geração da segunda imagem e a colheita trinta dias após a geração da última imagem. Diante disto, tem-se que a duração do ciclo da cultura variou de 177 a 236 dias, com média de 199 dias, caracterizando cultura de ciclo longo.

Tabela 4.1 – Data de semeadura e colheita, ciclo da cultura do algodão e área plantada e variedade do algodoeiro herbáceo dos pivôs selecionados

Pivô	Data de semeadura	Data de colheita	Ciclo da cultura (dias)	Área (ha)	Variedade
5	20/janeiro	07/agosto	219	90	Delta Penta
10	15/janeiro	14/julho	180	90	Delta Opal
20	21/janeiro	22/julho	182	66	Delta Penta
21	21/janeiro	22/julho	182	90	Delta Penta
22	06/março	30/agosto	177	90	Delta Opal
23	08/janeiro	28/julho	201	90	Delta Opal
25	27/fevereiro	26/agosto	180	90	Delta Opal
27	24/janeiro	22 e 24/agosto	234 e 236	90	Delta Penta

Na Tabela 4.2 estão apresentados o número de DAS do algodoeiro e na Tabela 4.3 constam os valores médios do IVDN em cada pivô selecionado nas datas de geração das imagens. Na Tabela 4.3 fica evidente, para ambas as variedades, que em janeiro, época de semeadura ou de preparação do solo por parte da maioria dos pivôs selecionados, o IVDN foi da ordem de 0,20. No período de pleno desenvolvimento da cultura, meses de abril e maio, o IVDN foi máximo, oscilando entre 0,70 e 0,80. A

partir de julho, alguns pivôs demonstram decréscimos nos valores do IVDN em vista a fase de maturação da cultura.

Em campanha experimental no município de Barbalha – CE, Borges (2002) analisou o crescimento e desenvolvimento do algodoeiro herbáceo BRS-201, quando observou que a altura média da cultura foi de 0,87 m, com máxima de 1,08 m, fato ocorrido em torno de 98 DAS. Já o pleno desenvolvimento da cultura ocorreu entre 28 e 77 DAS, onde houve queda desse crescimento em torno de 80 DAS, período em que a planta perde suas estruturas reprodutivas. Dessa forma, Borges (2002) conclui que o crescimento do algodoeiro ocorreu entre 28 e 98 DAS, e sua estacionalidade ocorreu entre 98 e 126 DAS.

Tabela 4.2 – Dias Após a Semeadura – DAS do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Pivô	DAS							
	Variedade Delta Opal							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
10	5	69	101	117	133	149	181	–
22	–	19	51	67	83	99	131	147
23	12	76	108	124	140	156	188	–
25	–	26	58	74	90	106	138	154

Pivô	DAS							
	Variedade Delta Penta							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
5	–	64	96	112	128	144	176	192
20	–	63	95	111	127	143	175	–
21	–	63	95	111	127	143	175	–
27	–	60	92	108	124	140	172	188

Tabela 4.3 – IVDN médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Pivô	IVDN médio							
	Variedade Delta Opal							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
10	0,187	0,529	0,693	0,704	0,597	0,426	0,352	0,301
22	0,157	0,174	0,766	0,780	0,793	0,781	0,744	0,592
23	0,177	0,714	0,817	0,811	0,776	0,711	0,376	0,342
25	0,186	0,253	0,754	0,780	0,779	0,758	0,612	0,467

Pivô	IVDN médio							
	Variedade Delta Penta							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
5	0,205	0,718	0,823	0,820	0,797	0,781	0,446	0,241
20	0,208	0,703	0,780	0,803	0,785	0,683	0,445	0,332
21	0,174	0,716	0,786	0,808	0,758	0,735	0,311	0,234
27	0,217	0,559	0,784	0,805	0,735	0,692	0,542	0,473

Nas Figuras 4.2a e 4.2b estão apresentados os gráficos do IVDN versus DAS, a função que caracteriza tal relação e o coeficiente de determinação – R^2 para as variedades Delta Opal e Delta Penta, respectivamente. Na Figura 4.2a, consta-se que o IVDN foi inferior a 0,70 até 50 DAS. Já entre 50 e 100 DAS, o IVDN esteve compreendido entre 0,70 e 0,80, caracterizando o período de pleno desenvolvimento da cultura por parte da variedade Delta Opal. Após 100 DAS, os valores do IVDN tornaram a ser inferiores a 0,70, caracterizando a fase de maturação da cultura. Por sua vez, observa-se no gráfico da Figura 4.2b que o período de pleno desenvolvimento da cultura para a variedade Delta Penta, ou seja, IVDN variando entre 0,70 e 0,80, ocorreu em torno dos 100 DAS.

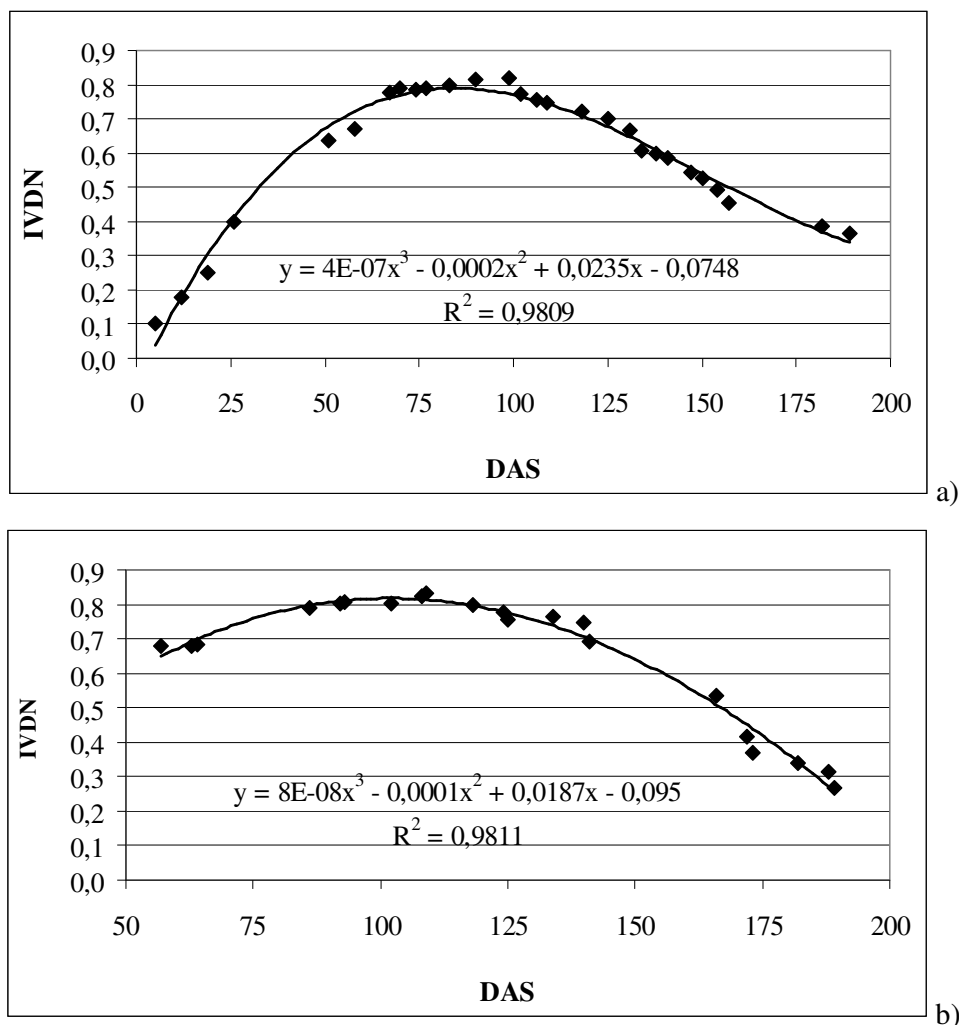


Figura 4.2 – Curva do IVDN x DAS das variedades a) Delta Opal e b) Delta Penta

4.2 – Análise das imagens do saldo de radiação à superfície

O saldo de radiação – Rn constitui um elemento chave no cômputo do balanço de energia e da evapotranspiração real – ETr, em virtude desta variável ser utilizada em diversas aplicações, incluindo monitoramento climático, previsão do tempo e em meteorologia agrícola. Para melhor análise do Rn de cada imagem apresentada nas Figuras 4.2a a 4.2h, faz-se necessário relatar brevemente o comportamento de algumas variáveis que influenciam sua determinação, tais como: albedo da superfície – α , temperatura da superfície – Ts, radiação solar incidente – $R_{S\downarrow}$, radiação de onda longa emitida pela atmosfera – $R_{L\downarrow}$ e transmissividade atmosférica – τ_{sw} .

Num contexto geral, os valores de α correspondentes às áreas de cultivo do algodoeiro apresentaram variação em torno de 15 a 20%, concordando com o albedo da cultura do algodoeiro apresentado por Moreira (2003), de 21%. As áreas com cultivo de frutíferas, do Projeto Irrigado de Formoso, mostraram valores de α praticamente constantes, em torno de 15%. Estes valores corroboram com o fato de que o albedo estimado em campos com alta cobertura vegetativa derivados dos sensores TM – Landsat 5 e ETM+ – Landsat 7 variam entre 15 e 25% (Tasumi, 2003).

A vegetação nativa, que compõe maior parte das áreas nas imagens estudadas apresentou α em torno de 11%, com exceção da imagem de 31 de julho de 2007, onde apresentou valores próximos a 15%. Já as áreas compostas de solo exposto mostraram valores de α variando entre 20 e 25%. Tais valores são inferiores aos obtidos por Chandrapala e Wimalasuriya (2003) e Silva et al. (2005b), que obtiveram albedo em áreas de solo exposto superiores a 30%. Por sua vez, o albedo do rio Corrente foi inferior a 10%, corroborando com estimativas feitas pelos mesmos autores supracitados.

A Ts variou de 20 a 23 °C para áreas com cultivo do algodoeiro irrigado e de 22 a 25 °C para áreas com cultivo de frutíferas. Em áreas de vegetação nativa, a Ts ficou entre 23 e 28 °C, enquanto que nas áreas de solo exposto, a mesma foi superior a 30 °C e, no leito do rio Corrente a Ts variou de 20 a 23 °C. Esses resultados corroboram com os obtidos por Silva et al. (2005b).

Os valores instantâneos da τ_{sw} , Tar, $R_{L\downarrow}$, $R_{S\downarrow}$ medida e estima, e as diferenças absoluta e relativa entre as mesmas estão apresentadas na Tabela 4.4. Os valores da τ_{sw} variaram de 0,72 a 0,76, devido, principalmente, à pressão real de vapor – e_a , pois esta é utilizada na obtenção da água precipitável – W, que por sua vez é, de acordo com a

Equação 3.11, utilizada no cálculo de τ_{sw} . Este comportamento se deve também ao fato de que os valores instantâneos da pressão atmosférica – P e do cosseno do ângulo zenital solar – $\cos Z$ terem baixa amplitude nas datas estudadas. A respeito da pressão atmosférica, os valores medidos nas datas analisadas foi em torno de 101,2 kPA contra 96,2 kPA estimado pela Equação 3.10, gerando diferença relativa de 5%.

De acordo com a Equação 3.23, a $R_{L\downarrow}$ foi obtida em função da τ_{sw} , utilizada no cálculo da emissividade da atmosfera, e da temperatura do ar – Tar, ambas apresentadas na Tabela 4.4. Como τ_{sw} pouco varia, pode-se concluir que $R_{L\downarrow}$ é sensível à Tar. Dessa forma, observa-se que o maior valor de $R_{L\downarrow}$ foi obtido em 20 de janeiro de 2007 (período de temperaturas do ar mais elevadas) e o menor valor em 31 de julho de 2007 (período de temperaturas do ar mais amenas).

Ainda na Tabela 4.4 estão apresentados os valores medidos na estação automática e os estimados pela Equação 3.21 da $R_{S\downarrow}$. Diante disso, foram obtidas diferenças absolutas entre 50 e 105 $W m^{-2}$, ocorridas respectivamente em 31 de julho e 20 de janeiro de 2007, com média em torno de 70 $W m^{-2}$, e diferenças relativas entre 7,6 e 14,2 %, com média de 10,2%.

Tabela 4.4 – Transmissividade atmosférica – τ_{sw} , temperatura do ar – Tar ($^{\circ}C$), radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície – $R_{L\downarrow}$ ($W m^{-2}$), radiação solar instantânea incidente na superfície medida e estimada – $R_{S\downarrow}$ ($W m^{-2}$), diferença absoluta ($W m^{-2}$) e diferença relativa (%) entre $R_{S\downarrow}$ medida e estimada

Data	τ_{sw}	Tar	$R_{L\downarrow}$	$R_{S\downarrow}$ Medida	$R_{S\downarrow}$ Estimada	Diferença Absoluta	Diferença Relativa
20/jan	0,76	32,3	373,8	831,3	914,8	83,5	10,0
25/mar	0,74	29,5	362,1	735,0	839,6	104,6	14,2
26/abr	0,74	29,7	365,8	703,6	779,5	75,9	10,8
12/mai	0,74	25,1	343,0	667,8	740,3	72,5	10,9
28/mai	0,72	28,0	358,6	625,3	685,8	60,5	9,7
13/jun	0,72	27,3	355,4	601,4	661,6	60,2	10,0
15/jul	0,74	26,8	350,9	629,2	680,4	51,2	8,1
31/jul	0,74	22,2	328,7	654,8	704,8	50,0	7,6
Média	0,74	27,6	354,8	681,1	750,9	69,8	10,2

As imagens do Rn instantâneo ($W m^{-2}$) estão apresentadas nas Figuras 4.3a a 4.3h, onde constata-se que o leito do rio Corrente apresentou os maiores valores de Rn em todas as imagens, sendo nas Figuras 4.3a e 4.3b superior a 700 $W m^{-2}$, nas Figuras 4.3c e 4.3d foi superior a 600 $W m^{-2}$ e nas demais figuras, Rn foi acima de 570 $W m^{-2}$. Nas áreas em azul, nas Figuras 4.3a a 4.3h, que correspondem, principalmente, às áreas de vegetação nativa, verifica-se que o Rn variou entre 500 e 780 $W m^{-2}$. Já as áreas de

solo exposto ao norte da Fazenda Busato, apresentaram R_n entre 500 e 600 $W m^{-2}$, exceto na Figura 4.3a, onde a referida área apresentou presença de vegetação.

Nas áreas com cultivo de frutíferas, o R_n variou entre 600 e 780 $W m^{-2}$ na Figura 4.3a, nas Figuras 4.3b e 4.3c a mesma área apresentou valores máximos de R_n em torno de 700 $W m^{-2}$ e nas demais figuras R_n ficou entre 450 e 580 $W m^{-2}$. Estes valores corroboram com os obtidos por Silva et al (2005b), que estimaram através do algoritmo SEBAL e imagens TM – Landsat 5, R_n em torno de 630 $W m^{-2}$ às 10 h para áreas com cultivo de frutíferas irrigadas no submédio São Francisco.

Nas áreas com cultivo do algodoeiro irrigado, observa-se na Figura 4.3a que os valores do R_n estão compreendidos em diferentes classes, ficando evidente que nesta data o algodoeiro estava em fase de preparação para a semeadura ou fase inicial de germinação. Na figura seguinte também se observa diferentes classes representando os valores do R_n , porém o algodoeiro encontrava-se em fase de floração. Por sua vez, nas Figuras 4.3c e 4.3d, o R_n foi em torno de 600 $W m^{-2}$, fase de pleno desenvolvimento da cultura e nas demais figuras, correspondentes à fase de maturação da cultura, se observa decréscimo no R_n , predominantemente inferior a 500 $W m^{-2}$.

Utilizando imagens de satélite obtidas às 9:30h, Bastiaanssen (2000) estimou R_n de 374 e 272 $W m^{-2}$ para o cultivo do algodoeiro em fases fenológicas distintas. Borges (2002) analisou o crescimento, o desenvolvimento e o balanço de radiação no algodoeiro irrigado, em campanha experimental no município de Barbalha – CE e obteve R_n , em torno das 10 h, de 600 $W m^{-2}$, na primeira e segunda fase fenológica da cultura. Na terceira e quarta fase, R_n de 700 $W m^{-2}$ e na quinta fase, R_n de 780 $W m^{-2}$. Por sua vez, Rodrigues (2003) analisando as necessidades hídricas do algodoeiro na mesma região, obteve antes, durante e depois do processo de irrigação, R_n entre 600 e 700 $W m^{-2}$ em torno das 10 h.

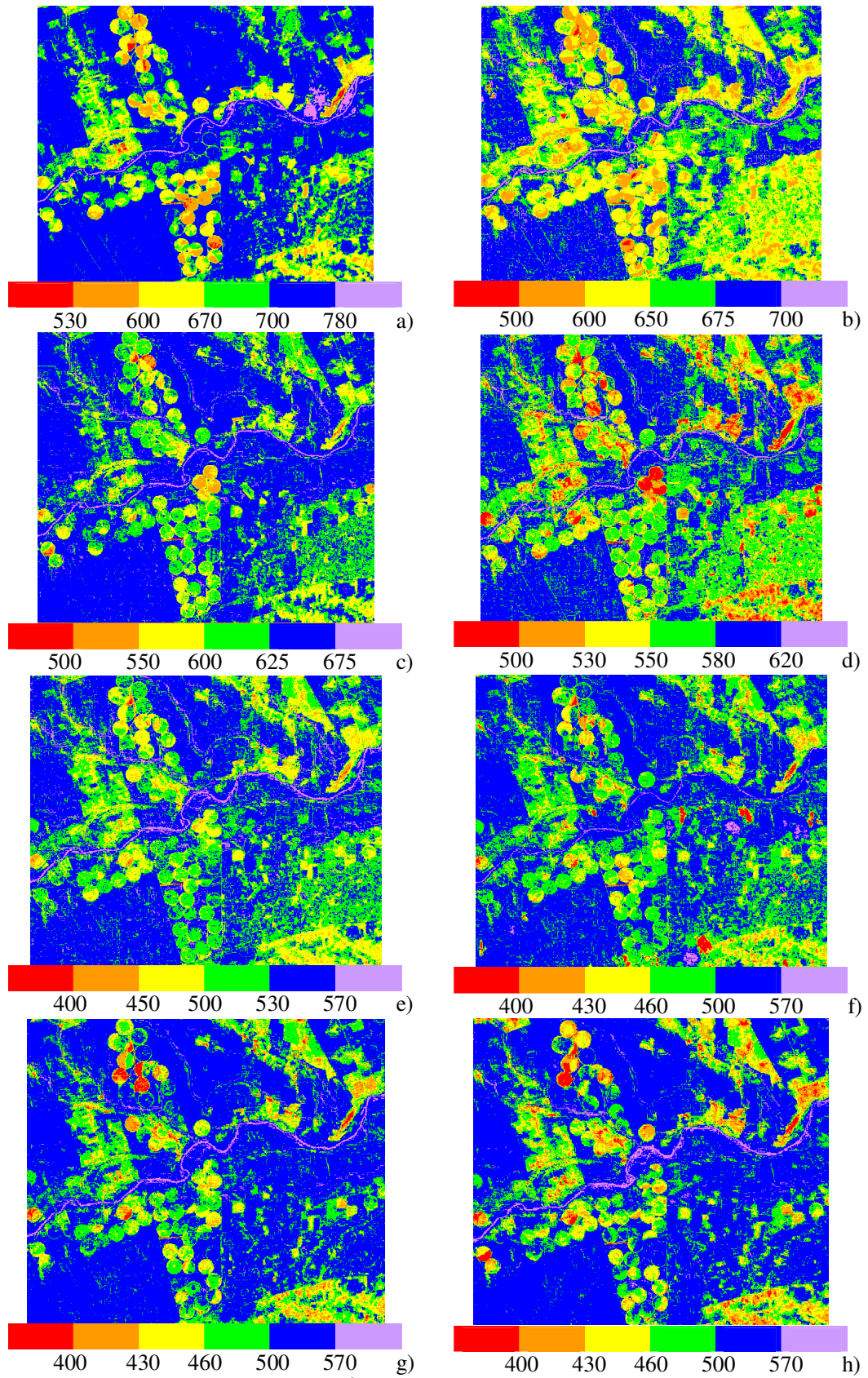


Figura 4.3 – Imagens do Rn ($W m^{-2}$) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007

Os valores de Rn médio para o algodoeiro dos pivôs selecionados estão apresentados na Tabela 4.5, onde se observa que Rn variou entre 430 e 690 W m⁻², com média em torno de 550 W m⁻². Em 26 de abril, 12 e 28 de maio de 2007, datas que representam o período de pleno desenvolvimento da cultura, observa-se que Rn variou entre 500 e 620 W m⁻² para ambas as variedades, com média em torno de 560 W m⁻². A partir de 13 de junho de 2007, Rn foi majoritariamente inferior a 500 W m⁻², ocasião em que a cultura ultrapassava 100 DAS (fase de maturação), exceto no pivô 22, que estava com 99 DAS, portanto em fase de floração.

Tabela 4.5 – Rn médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Pivô	Rn médio (W m ⁻²)							
	Variedade Delta Opal							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
10	605,8	613,2	613,3	561,4	522,9	447,9	484,1	471,4
22	666,7	585,4	619,3	571,8	534,7	505,0	528,9	527,5
23	543,8	645,9	601,7	557,2	516,9	490,0	482,9	478,5
25	642,3	498,9	588,4	537,6	519,8	511,0	519,2	482,1
Pivô	Rn médio (W m ⁻²)							
	Variedade Delta Penta							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
5	689,0	611,6	590,6	552,5	520,8	482,1	498,7	483,7
20	661,0	639,6	617,4	556,8	524,0	433,6	464,0	463,0
21	611,6	594,7	602,4	553,0	521,1	485,6	453,5	442,4
27	665,2	586,2	602,7	546,2	519,8	493,6	487,6	489,1

4.3 – Análise das imagens do fluxo de calor no solo

As imagens do G instantâneo (W m⁻²) estão apresentadas na Figura 4.4a a 4.4h, onde verifica-se que no leito do rio Corrente, cujos valores de G correspondem ao fluxo de calor utilizado para aquecimento da água, representando 30% do Rn, é superior a 200 W m⁻² nas Figuras 4.4a e 4.4b. Nas Figuras 4.4c e 4.4d, o mesmo foi superior a 150 W m⁻² e nas demais figuras, superior a 130 W m⁻². Silva e Bezerra (2006) registraram valores de G em torno de 190 W m⁻² no lago de Sobradinho no estado de Pernambuco, com uso do SEBAL e imagens TM – Landsat 5. Já Chavez et al. (2007) encontraram G entre 370 e 380 W m⁻² no Lago Meredith, no Texas – EUA. Por sua vez, Costa Filho (2005) encontrou G de 216 W m⁻² em corpos d'água.

Segundo Allen et al. (2002), para lagos claros e profundos G corresponde a 50% do Rn. Diferentemente, nesta pesquisa foi utilizado G igual a 30% do Rn, por

acreditar que tal relação melhor caracteriza as condições do leito do rio Corrente. Porém, estudos específicos necessitam ser realizados com vistas à melhoria da parametrização dessa relação.

Nas áreas de vegetação nativa, verifica-se decréscimo gradativo em G, como observado no leito do rio Corrente. Nas Figuras 4.4a a 4.4c, verifica-se que G varia de 100 a 135 W m⁻², e nas demais figuras, varia de 85 a 100 W m⁻², corresponde a cerca de 17% do Rn. Nas áreas de solo exposto, G variou de 85 a 100 W m⁻², correspondendo a cerca de 13 a 17% do Rn. Nas áreas com cultivo de frutíferas irrigadas, os valores máximos de G foram de 115 W m⁻², representando cerca de 18% do Rn.

Ao investigar as necessidades hídricas da videira no submédio São Francisco, Ávila Neto (1997) obteve valores de G em torno de 9% do Rn, enquanto que Teixeira (2001) obteve sobre a cultura da bananeira irrigada na mesma região, G em torno de 11% do Rn durante o ciclo produtivo da cultura. Por sua vez, Silva et al. (2007) obtiveram sobre a cultura da mangueira, também no submédio São Francisco, G correspondente a cerca de 5% do Rn. Teixeira et al (2007) sobre pomar de videiras no mesmo local, obtiveram G correspondente a 1% do Rn em duas campanhas experimentais. Já Silva e Bezerra (2006), em pesquisa realizada com imagens TM – Landsat 5 do PISNC, obtiveram valores de G às 10 h, em torno de 14 a 17% do Rn.

Nas áreas com cultivo do algodoeiro irrigado, constata-se nas Figuras 4.4a e 4.4b, que G variou entre 90 e 115 W m⁻², representando cerca de 18% do Rn e nas demais figuras, foi inferior a 90 W.m⁻², correspondendo de 15 a 19% do Rn. Bastiaanssen (2000) obteve sobre a cultura do algodoeiro em fases fenológicas distintas, G às 9:30h de 82 W m⁻² (22% do Rn) e de 29 W m⁻² (11% do Rn) com o uso do SEBAL e imagens TM – Landsat 5. Por sua vez, Rodrigues (2003) obteve para os 130 dias do ciclo fenológico do algodoeiro, média diária de 4% do Rn destinado ao processo de aquecimento do solo.

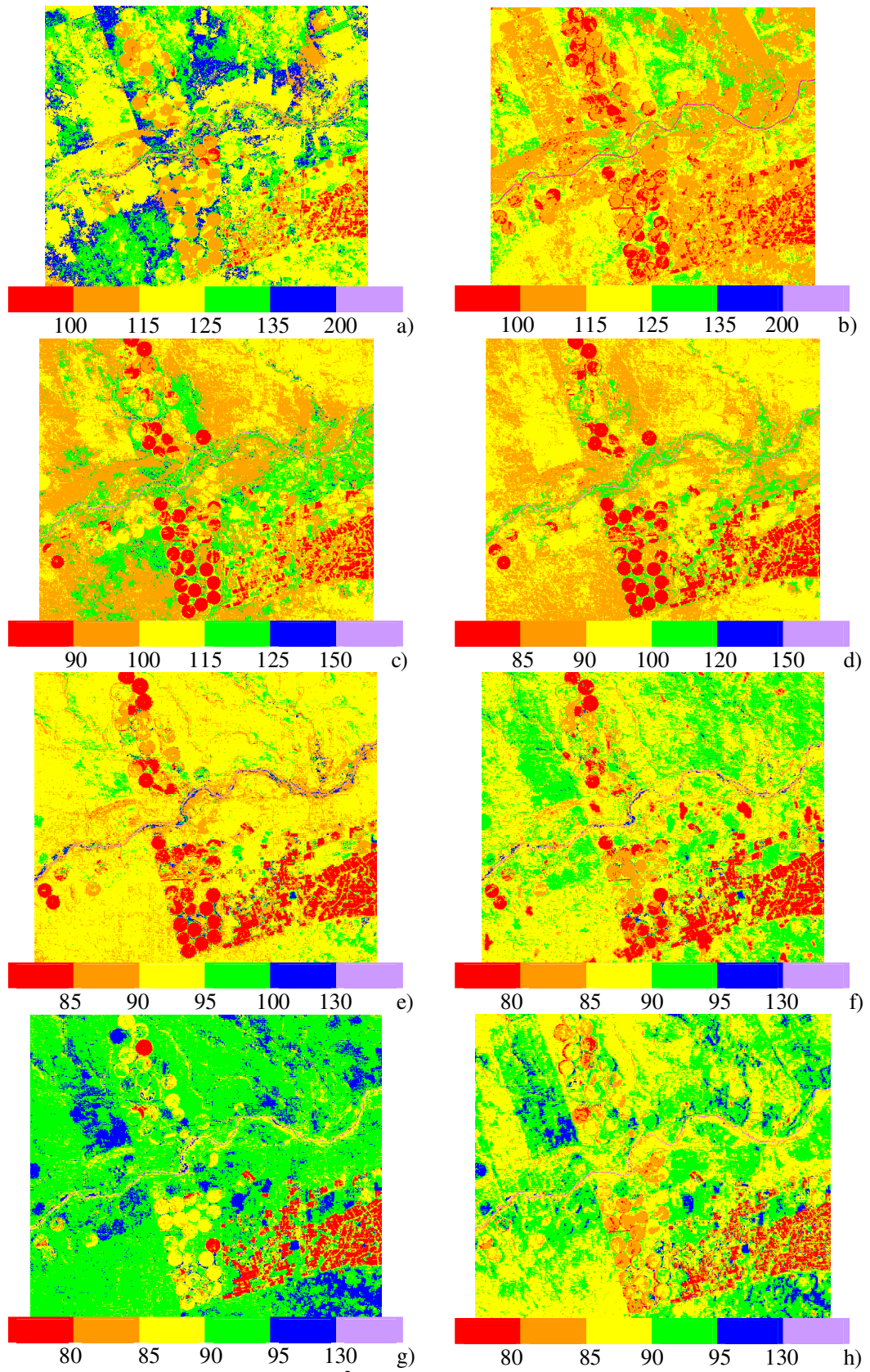


Figura 4.4 – Imagens do G ($W m^{-2}$) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007

As médias de G para o algodoeiro dos pivôs selecionados estão apresentadas na Tabela 4.6, onde se observa que G nos referidos pivôs foi superior a 100 W m^{-2} em 20 de janeiro de 2007, correspondendo a menos de 20% do Rn. Em 25 de março de 2007, data em que metade dos pivôs apresentou IVDN superior a 0,70 e apenas os pivôs 22 e 25 apresentou IVDN inferior a 0,30, G também foi em torno de 100 W m^{-2} , correspondendo de 15 a 20% do Rn.

No período de pleno desenvolvimento da cultura verifica-se que G variou entre 50 e 100 W m^{-2} , com média em torno de 70 W m^{-2} , correspondendo a cerca de 10 a 17% do Rn, ficando evidente que o fluxo de calor no solo varia inversamente com a densidade vegetativa. Por sua vez, nas últimas datas estudadas, verifica-se que as médias de G se elevaram quando comparadas as médias do período de pleno desenvolvimento da cultura, correspondendo de 12 a 20% do Rn.

Tabela 4.6 – G médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Pivô	G médio (W m^{-2})							
	Variedade Delta Opal							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
10	112,5	104,9	97,2	83,7	89,7	82,6	89,0	87,3
22	108,7	98,3	81,4	78,0	67,9	60,9	75,1	92,6
23	109,3	98,3	60,6	58,2	69,3	76,3	88,3	90,3
25	120,0	99,1	69,9	55,7	68,2	73,2	86,7	86,6
Pivô	G médio (W m^{-2})							
	Variedade Delta Penta							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
5	119,1	90,2	60,2	53,9	60,9	63,7	91,0	85,5
20	109,3	97,3	76,4	68,5	72,7	77,4	90,3	89,8
21	103,5	101,6	72,2	60,1	67,7	77,7	89,1	85,5
27	116,3	99,0	62,4	58,8	58,1	72,0	86,5	81,1

4.4 – Análise das imagens do fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível – H (W m^{-2}) é o cerne da metodologia SEBAL/METRIC, obtido a partir das estimativas do gradiente de temperatura – ΔT e da resistência aerodinâmica ao transporte de calor – r_{ah} através de processo iterativo, conforme descrito em Material e Métodos. Estas duas variáveis foram estimadas para cada imagem utilizando-se pixels âncora (pixels frio e quente) e a velocidade do vento instantânea ao nível de dois metros medida na estação automática da Fazenda Busato.

Por conseguinte, foram obtidas as funções ΔT ($^{\circ}\text{C}$) apresentadas na Tabela 4.7 determinadas na última iteração para cada imagem, nas quais foram obtidos para solo exposto ΔT entre 4,0 e 6,0 $^{\circ}\text{C}$, para as águas do rio Corrente, ΔT entre 0 e 1,0 $^{\circ}\text{C}$, para áreas de vegetação nativa, ΔT variou entre 1,5 e 3,0 $^{\circ}\text{C}$ e para as áreas com cultivo de frutíferas irrigadas (Projeto Irrigado Formoso) e para as áreas com cultivo do algodoeiro irrigado por pivô central (Fazenda Busato), ΔT variou entre 0,5 e 1,5 $^{\circ}\text{C}$.

Tabela 4.7 – Funções da diferença de temperatura instantânea entre a superfície e o ar próximo a mesma para cada imagem estudada

Data	Funções
20 de janeiro de 2007	$\Delta T = -9,95 + 0,40.T_s$
25 de março de 2007	$\Delta T = -12,30 + 0,53.T_s$
26 de abril de 2007	$\Delta T = -13,84 + 0,64.T_s$
12 de maio de 2007	$\Delta T = -12,03 + 0,60.T_s$
28 de maio de 2007	$\Delta T = -16,83 + 0,87.T_s$
13 de junho de 2007	$\Delta T = -17,17 + 0,81.T_s$
15 de julho de 2007	$\Delta T = -11,58 + 0,51.T_s$
31 de julho de 2007	$\Delta T = -18,38 + 0,86.T_s$

As imagens de H instantâneo estão apresentadas nas Figuras 4.5a a 4.5h, onde verifica-se que no leito do rio Corrente H foi inferior a 30 W m^{-2} nas Figuras 4.5a a 4.5e, correspondendo a 5% do R_n , enquanto que nas demais figuras H foi inferior a 70 W m^{-2} , correspondendo a 12% do R_n . Utilizando imagens TM – Landsat 5 e o SEBAL, Bastiaanssen (2000) obteve na bacia de Gediz, na Turquia, H inferior a 1,5 W m^{-2} em corpos d'água às 9:30 h e, Silva e Bezerra (2006) obtiveram H inferior à zero para o lago de Sobradinho e o rio São Francisco às 10 h.

Nas áreas de vegetação nativa observa-se que H variou entre 30 e 100 W m^{-2} nas Figuras 4.5a a 4.5d, representando cerca de 5 a 17% do R_n , enquanto que na Figura 4.5e variou entre 80 e 180 W m^{-2} , correspondendo de 15 a 30% do R_n . Na Figura 4.5f, H ficou na faixa de 150 a 300 W m^{-2} , equivalendo a cerca de 30 a 60 % do R_n . Na Figura 4.5g observa-se decréscimo em H variando de 50 a 150 W m^{-2} (cerca de 10 a 30% do R_n). Por sua vez, na Figura 4.5h verifica-se elevação do H em relação à figura anterior, onde H variou entre 70 e 200 W m^{-2} , correspondendo a cerca de 15 a 35% do R_n . Resultados semelhantes foram obtidos por Bezerra et al. (2008) ao aplicar o SEBAL a imagens TM – Landsat 5 do semi-árido cearense, onde obtiveram para vegetação nativa densa e rala H entre 150 e 200 W m^{-2} e superior a 300 W m^{-2} , respectivamente.

Nas áreas de solo exposto constata-se os maiores valores de H entre as Figuras 4.5b a 4.5h, correspondendo de 35 a 60% do Rn. Com uso de técnicas de SR e imagens de satélite Ma et al. (2004) obtiveram H de 140 W m^{-2} para deserto, enquanto Silva e Bezerra (2006) obtiveram H de 200 W m^{-2} para solo exposto.

Nas Figuras 4.5a a 4.5e as áreas com cultivo de frutíferas apresentaram H entre 30 e 100 W m^{-2} , enquanto que nas demais figuras foi inferior a 70 W m^{-2} , correspondendo assim, a cerca de 10 a 20% do Rn. Em campanhas experimentais realizadas no submédio São Francisco na cultura da mangueira irrigada, Silva (2000) obteve H em torno de 100 W m^{-2} às 9:30 h, para dia de céu claro. Moura (2001) observou que G e H representavam pequenas frações do Rn na cultura da goiabeira. Por sua vez, Teixeira (2001), em estudo realizado na mesma região, obteve H correspondente a 2% do Rn num pomar de bananeiras e atribuiu esse baixo percentual a advecção de umidade para cultura proveniente do rio São Francisco. Em outra pesquisa na mesma região, sobre pomar de videiras, Teixeira et al. (2007) obtiveram H para condições atmosféricas próximas da neutralidade correspondente a 12% de Rn.

No cultivo do algodoeiro irrigado observa-se nas Figuras 4.5a e 4.5b que H variou de 30 a 60 W m^{-2} , equivalendo a cerca de 5 a 10% do Rn. Nas Figuras 4.5c e 4.5d, cujo IVDN foi superior a 0,70, H foi inferior a 30 W m^{-2} , representando 5% do Rn. Na figura subsequente, constata-se que H variou de 30 a 80 W m^{-2} , representando de 6 a 16% do Rn. Já na Figura 4.5f, H ficou entre 30 e 200 W m^{-2} , essa elevada amplitude de H está relacionada ao fato de que o algodoeiro da região norte da fazenda apresentou IVDN inferior a 0,60; enquanto que na região sul apresentou IVDN superior a 0,60 e nas demais figuras, H foi majoritariamente inferior a 100 W m^{-2} , caracterizando sua fase de maturação. Bastiaanssen (2000) estimou H de 190 e 34 W m^{-2} para o cultivo do algodoeiro em fases fenológicas distintas com o uso de técnicas de SR e Rodrigues (2003) obteve média diária de H para todo ciclo fenológico do algodoeiro herbáceo correspondente a 7% do Rn.

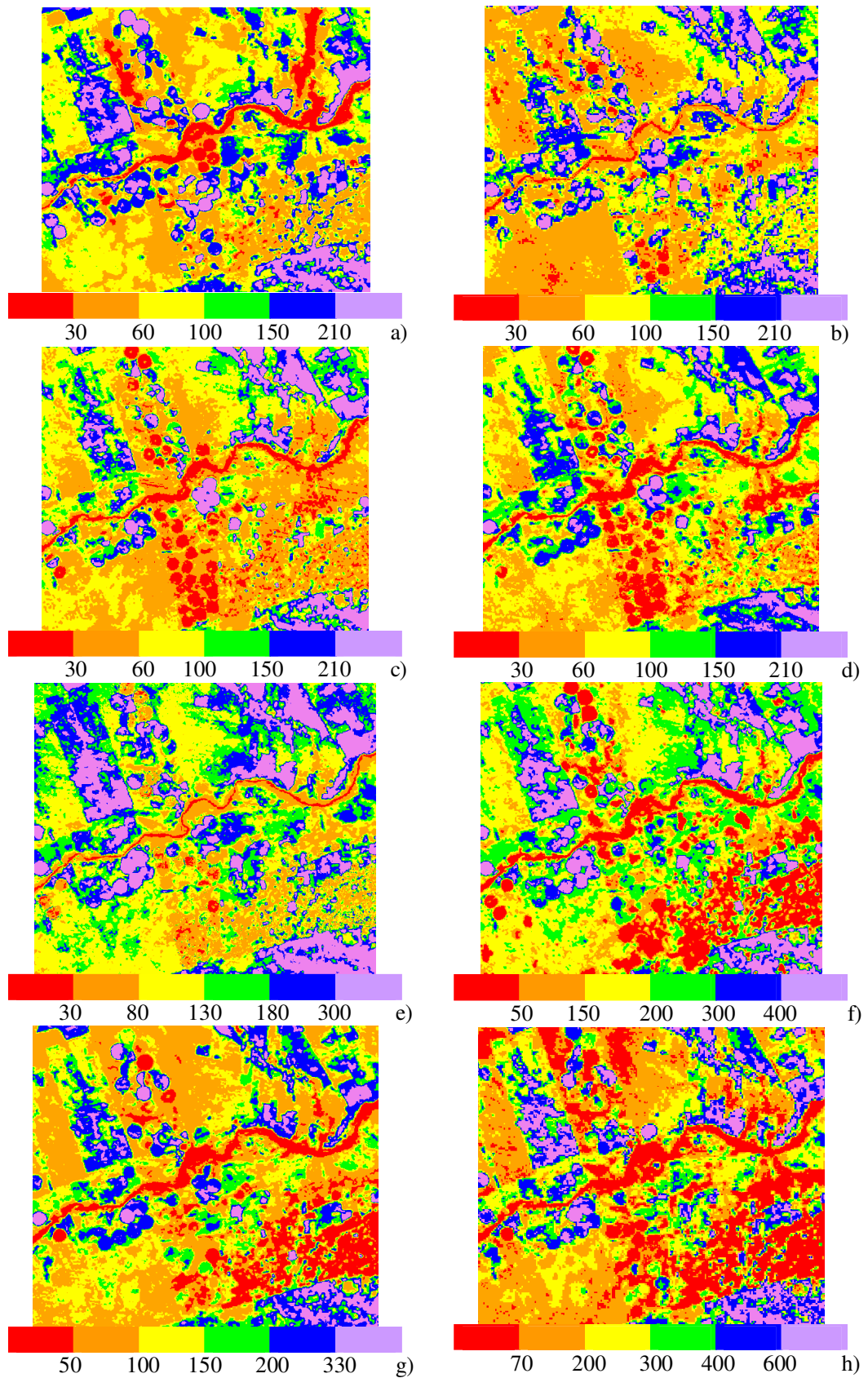


Figura 4.5 – Imagens do H (W m^{-2}) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007

Na Tabela 4.8 estão apresentados os valores médios do H instantâneo dos pivôs selecionados, onde se observa que em 20 de janeiro de 2007, H do algodoeiro dos pivôs 5, 10, 21 e 23 foi superior a 100 W m^{-2} , correspondendo de 24 a 35% do Rn, enquanto que nos pivôs 20, 22, 25 e 27, foi inferior a 90 W m^{-2} , representando de 7 a 12% do Rn. Em 25 de março de 2007, constata-se que H na maioria dos pivôs foi inferior a 100 W m^{-2} , correspondendo de 2 a 16% do Rn, enquanto que nos pivôs 21 e 27 correspondeu a 25 e 18% do Rn, respectivamente.

Em relação ao período pleno desenvolvimento da cultura observa-se que H foi majoritariamente inferior a 70 W m^{-2} , correspondendo de 1 a 17% do Rn, exceto para o pivô 21 em 28 de maio de 2007, que apresentou H próximo a 150 W m^{-2} , correspondendo a 28% do Rn. Nas datas subsequentes analisadas, percebe-se que as médias de H elevam-se quando comparadas às médias anteriores, evidenciando que à medida que a densidade vegetativa decresce o fluxo de calor sensível aumenta.

Tabela 4.8 – H médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Pivô	H médio (W m^{-2})							
	Variedade Delta Opal							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
10	167,2	65,1	31,5	23,6	56,1	241,3	286,4	279,5
22	49,5	91	17,7	16,6	20,3	9,9	7,8	63,1
23	188,8	10,4	10,3	4,1	87,4	46,3	79,3	371,1
25	48,9	47,3	47,6	36,9	29,7	30,9	30,9	181,6
Pivô	H médio (W m^{-2})							
	Variedade Delta Penta							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
5	165,4	64,4	10,9	11,2	35,0	53,5	135,2	197,4
20	62,1	45,8	5,7	7,9	70,3	147,3	125,0	360,0
21	164,5	146,5	19,6	14,1	148,1	135,6	158,7	303,0
27	82,5	105,0	18,3	14,7	59,6	67,4	85,4	81,1

4.5 – Análise das imagens do fluxo de calor latente

As estimativas do LE foram importantes por representarem a parcela do Rn destinada aos processos de vaporização da água do solo, de corpos d'água e transpiração da vegetação. Dessa forma, nas Figuras 4.6a a 4.6h estão apresentadas as imagens do LE instantâneo (W m^{-2}), onde verifica-se que no leito do rio Corrente encontram-se os maiores valores de LE, superiores a 500 W m^{-2} nas Figuras 4.6a a 4.6d e superiores a

350 W m⁻² nas Figuras 4.6e a 4.6h, representando de 60 a 70% do Rn. Valores semelhantes foram obtidos por Silva e Bezerra (2006) para corpos d'água.

Nas áreas de vegetação nativa o LE variou entre 500 e 600 W m⁻² (Figuras 4.6a e 4.6b). Nas Figuras 4.6c a 4.6d, LE ficou entre 400 e 500 W m⁻², representando de 70 a 80% do Rn e nas demais figuras, variou de 250 a 350 W m⁻², correspondendo de 50 a 65% do Rn. Resultados diferentes foram obtidos por Silva e Bezerra (2006) para a caatinga do submédio São Francisco, com LE correspondendo de 25 a 30% do Rn. Por sua vez, Bezerra et al. (2008) para a caatinga densa e rala do cariri cearense, obtiveram LE correspondente a 60 e 15% do Rn, respectivamente.

Nas áreas de solo exposto verifica-se que LE foi inferior a 300 W m⁻² (Figuras 4.6b a 4.6d), representando de 50 a 60% do Rn, na Figura 4.6e, foi inferior a 250 W m⁻², correspondendo a 50% do Rn e Nas demais figuras, LE foi inferior a 150 W m⁻², representando cerca de 30% do Rn. Resultados semelhantes foram obtidos por Ma et al. (2004), que utilizando técnicas de SR e imagens de satélite de regiões áridas da China, obtiveram LE de 130 W m⁻² para o deserto. Porém, na Figura 4.6a, onde a referida área estava vegetada, LE foi superior a 600 W m⁻², correspondendo a mais de 80% do Rn. Por sua vez, nas áreas com cultivo de frutíferas irrigadas, constata-se nas Figuras 4.6a a 4.6h que LE variou entre de 350 e 600 W m⁻², representando mais de 80% do Rn, corroborando com resultados obtidos em campanhas experimentais realizadas por Teixeira (2001), Moura (2001), Silva et al. (2007) e Teixeira et al. (2007).

Observa-se na Figura 4.6a, que representa o algodoeiro em fase de preparação para a semeadura ou fase de germinação, que LE foi inferior a 400 W m⁻². Na Figura 4.6b, período em que maior parte do algodoeiro estava acima de 90 DAS, LE foi inferior a 450 W m⁻², correspondendo a cerca de 70% do Rn em ambos os casos. Nas Figuras 4.6c e 4.6d, período de pleno desenvolvimento do algodoeiro, LE ficou na faixa de 450 a 500 W m⁻², representando 80% do Rn. Na Figura 4.6e, verifica-se que LE variou de 350 a 450 W m⁻², período em que maior parte da cultura estava acima de 100 DAS, correspondendo a cerca de 70% do Rn e nas figuras subsequentes LE variou de 250 a 400 W m⁻², equivalendo a 60% do Rn.

Bastiaanssen (2000) estimou para o cultivo do algodoeiro em fases fenológicas distintas em duas imagens TM – Landsat 5 da bacia de Gediz (Turquia) LE de 102 e 209 W m⁻², correspondendo a 27 e 78% do Rn, respectivamente. Já Rodrigues (2003) obteve para todo o ciclo fenológico do algodoeiro, LE equivalente a 89% do Rn.

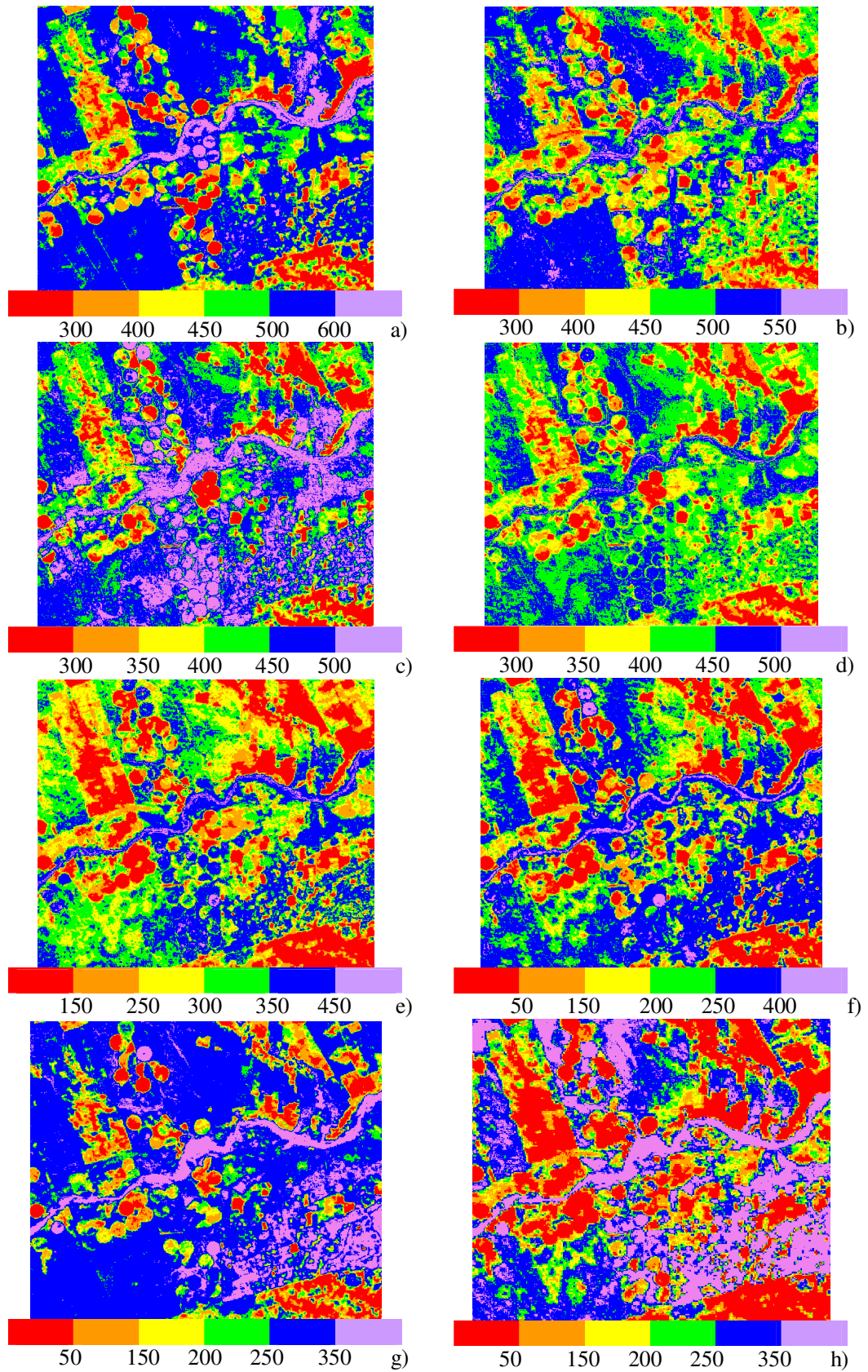


Figura 4.6 – Imagens do LE (Wm^{-2}) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007

Os valores médios do LE instantâneo dos pivôs selecionados estão apresentados na Tabela 4.9, onde se verifica que LE variou entre 250 e 500 W m⁻², em 20 de janeiro de 2007, representando cerca de 45 a 76% do Rn. Em 25 de março de 2007, observa-se que a menor e maior média do LE ocorreram nos pivôs 21 e 23, correspondendo a 58 e 83% do Rn, respectivamente.

No período de pleno desenvolvimento da cultura, constata-se que LE variou entre 300 e 530 W m⁻² para ambas as variedades, equivalendo de correspondendo de 60 a 90% de Rn, com média em torno de 460 W m⁻². Nas datas subsequentes, fase de floração ou início da fase de maturação, observa-se decréscimo em LE, chegando a representar menos de 5% do Rn no final de seu ciclo. Também pode ser observado que apenas o algodoeiro dos pivôs 22 e 27 tiveram LE superior a 300 W m⁻² em 31 de julho de 2007, correspondendo a cerca de 70% do Rn.

Tabela 4.9 – LE médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Pivô	LE médio (W m ⁻²)							
	Variedade Delta Opal							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
10	326,1	443,2	484,6	454,1	377,1	124,0	108,7	104,6
22	508,5	396,1	520,2	477,2	446,5	434,2	446,0	371,8
23	245,7	537,2	530,8	494,9	360,2	367,4	315,3	17,1
25	473,4	352,5	470,9	445,0	421,9	406,9	401,6	213,9
Pivô	LE médio (W m ⁻²)							
	Variedade Delta Penta							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
5	404,5	457,0	519,5	487,4	424,9	364,9	272,5	200,8
20	489,6	496,5	535,3	480,4	381,0	208,9	248,7	13,2
21	343,6	346,6	510,6	478,8	305,3	272,3	205,7	53,9
27	466,4	382,2	522,0	472,7	402,1	354,2	315,7	326,9

4.6 – Análise das imagens da evapotranspiração diária e sazonal

Na Figura 4.7 está apresentado o gráfico da ET₀ diária (mm dia⁻¹) no intervalo de 01 de janeiro a 31 de agosto de 2007, constando a ET₀ de todo o ciclo da cultura do algodoeiro, onde a ET₀ mínima foi de 1,81 mm dia⁻¹, ocorrida em 16 de fevereiro de 2007 e a máxima foi de 7,41 mm.dia⁻¹, ocorrida em 21 de agosto de 2007, com média de 4,92 mm dia⁻¹ e ET₀ acumulada de 1.195,7 mm.

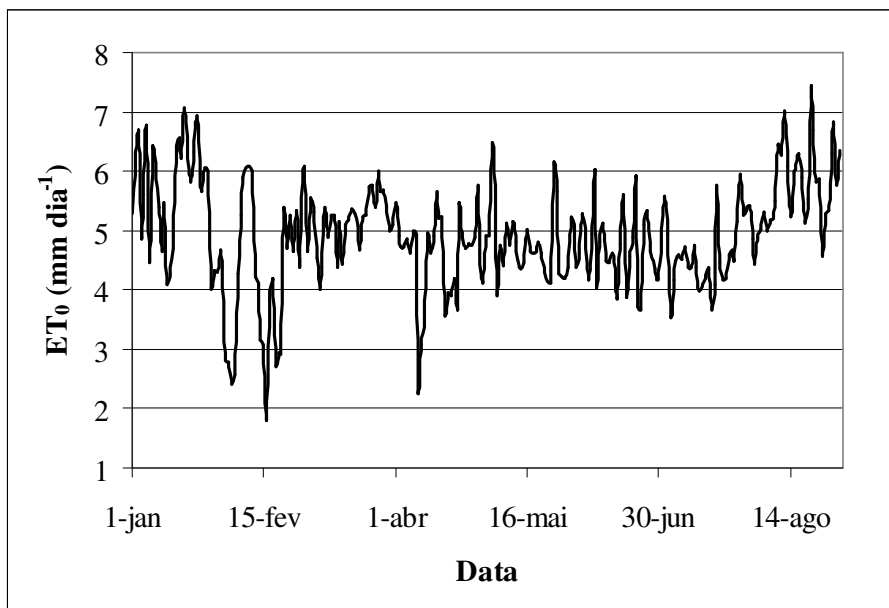


Figura 4.7 – Variação da ET_0 diária durante o ciclo do algodoeiro herbáceo

Devido a ET transferir grandes volumes de água do solo e da vegetação para a atmosfera é de suma importância sua quantificação em áreas agrícolas irrigadas, pois tal quantificação auxilia no uso racional da água. Dessa forma, nas Figuras 4.8a a 4.8h estão apresentadas as imagens da ETr diária – ETd ($mm\ dia^{-1}$), onde se observa que no leito do rio Corrente a evaporação foi superior a $7,0\ mm\ dia^{-1}$ (Figura 4.8a); superior a $6,0\ mm\ dia^{-1}$ (Figuras 4.8b a 4.8d), e superior a $5,0\ mm\ dia^{-1}$ nas demais figuras.

A menor ETd foi observada nas áreas de solo exposto, que na Figura 4.8b variou de $1,0$ a $3,0\ mm\ dia^{-1}$. Na Figura 4.8c a ETd foi a $2,0\ mm\ dia^{-1}$, tornando a variar entre $1,0$ e $3,0\ mm\ dia^{-1}$ nas Figuras 4.8d e 4.8e, e nas figuras seguintes, a ETd foi inferior a $1,0\ mm\ dia^{-1}$. Diferentemente, na Figura 4.8a as mesmas áreas apresentaram ETd superior a $7,0\ mm\ dia^{-1}$, devido a presença de cultivo irrigado.

Nas áreas de vegetação nativa, verifica-se que a ETd na Figura 4.8a variou de $6,0$ a $7,0\ mm\ dia^{-1}$, nas Figuras 4.8b a 4.8d, variou entre $5,0$ e $6,0\ mm\ dia^{-1}$, nas Figuras 4.8f e 4.8e, observa-se decréscimos na ETd , sendo expressa na faixa de $3,0$ a $5,0\ mm\ dia^{-1}$ e nas últimas figuras, a ETd variou de $2,0$ a $5,0\ mm\ dia^{-1}$. Bezerra et al. (2008) obtiveram para vegetação nativa rala e densa ETd entre $0,5$ e $3,5\ mm\ dia^{-1}$.

Nas áreas com cultivo de frutíferas foi observada ETd na Figura 4.8a entre $6,0$ e $7,0\ mm\ dia^{-1}$, com ETd em algumas áreas superior a $7,0\ mm\ dia^{-1}$. Na Figura 4.8b, a ETd ficou entre $5,0$ e $6,0\ mm\ dia^{-1}$. O mesmo foi observado nas Figuras 4.8c e 4.8d,

com algumas áreas superior a $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$ na Figura 4.8c. Nas demais figuras a ETd variou de $4,0$ a $5,0 \text{ mmdia}^{-1}$. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva (2000), que avaliou a ETd sobre pomar mangueiras irrigadas no submédio São Francisco, obtendo no início da floração, ETd de $2,4 \text{ mm dia}^{-1}$, no final da formação dos frutos, $7,9 \text{ mm dia}^{-1}$, na fase de maturação, $3,5 \text{ mm dia}^{-1}$, e média de $4,2 \text{ mm dia}^{-1}$. Em estudos na mesma região, Moura (2001) determinou a ETd sobre pomar de goiabeiras irrigadas na fase inicial e final da cultura, obtendo $2,9$ e $6,3 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente. Por sua vez, Teixeira et al. (2007) sobre pomar de videiras irrigadas, obtiveram ETd média entre $3,0$ e $4,5 \text{ mm dia}^{-1}$ e Teixeira et al. (2009b) usando imagens TM – Landsat 5 do PISNC, obtiveram diferenças entre as estimativas e as medidas inferiores a 1% e 5% para um pomar de mangueiras irrigadas e para a caatinga, respectivamente.

Na Figura 4.8a constata-se diferentes valores da ETd nas áreas com cultivo do algodoeiro irrigado, entre $2,0$ e $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$, devido às diferentes fases fenológicas da cultura e a disponibilidade de água na solo. Na Figura 4.8b, observa-se que a ETd variou de $5,0$ a $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$, com algumas áreas apresentando ETd superior a esse limite, devido ao desenvolvimento da cultura. Na Figura 4.8c, período de pleno desenvolvimento, verifica-se predominância da ETd superior a $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$. Por sua vez, na Figura 4.8d a ETd da cultura permaneceu entre $5,0$ e $6,0 \text{ mm dia}^{-1}$ e a partir da Figura 4.8e observa-se redução da ETd, atingindo valores inferiores a $1,0 \text{ mm dia}^{-1}$ na Figura 4.8h, em decorrência da fase de maturação.

Utilizando imagens de satélite da bacia de Gediz na Turquia, Granger (2000) obteve ETd médio entre $2,6$ e $3,5 \text{ mm dia}^{-1}$ para o cultivo do algodoeiro. Bastiaanssen (2000) usando o SEBAL e imagens TM – Landsat 5 da mesma área e mesma cultura, obteve ETd de $2,4$ e $4,4 \text{ mm dia}^{-1}$ em diferentes fases fenológicas. Por sua vez, Boegh et al. (2000) usando imagens TM – Landsat 5, avaliaram a ETd em diferentes culturas em fases fenológicas distintas e observaram que a ETd variou de $1,5$ a $7,2 \text{ mm dia}^{-1}$. Com uso de imagens TM – Landsat 5 e o SEBAL, Tasumi (2003) obteve para solo exposto seco e úmido ETd entre 0 e 4 mm dia^{-1} , para corpos d'água, ETd entre 4 e 5 mm dia^{-1} , e para áreas agrícolas, ETd entre 5 e 8 mm dia^{-1} . Já Li et al (2008) obtiveram diferenças em torno de $4,3\%$ entre estimativas com o SEBAL aplicada a imagens AVHRR – NOAA e medidas lisimétricas para todo o ciclo do cultivo do trigo na China. Tais resultados evidenciam a coerência dos valores da ET obtidos nessa pesquisa.

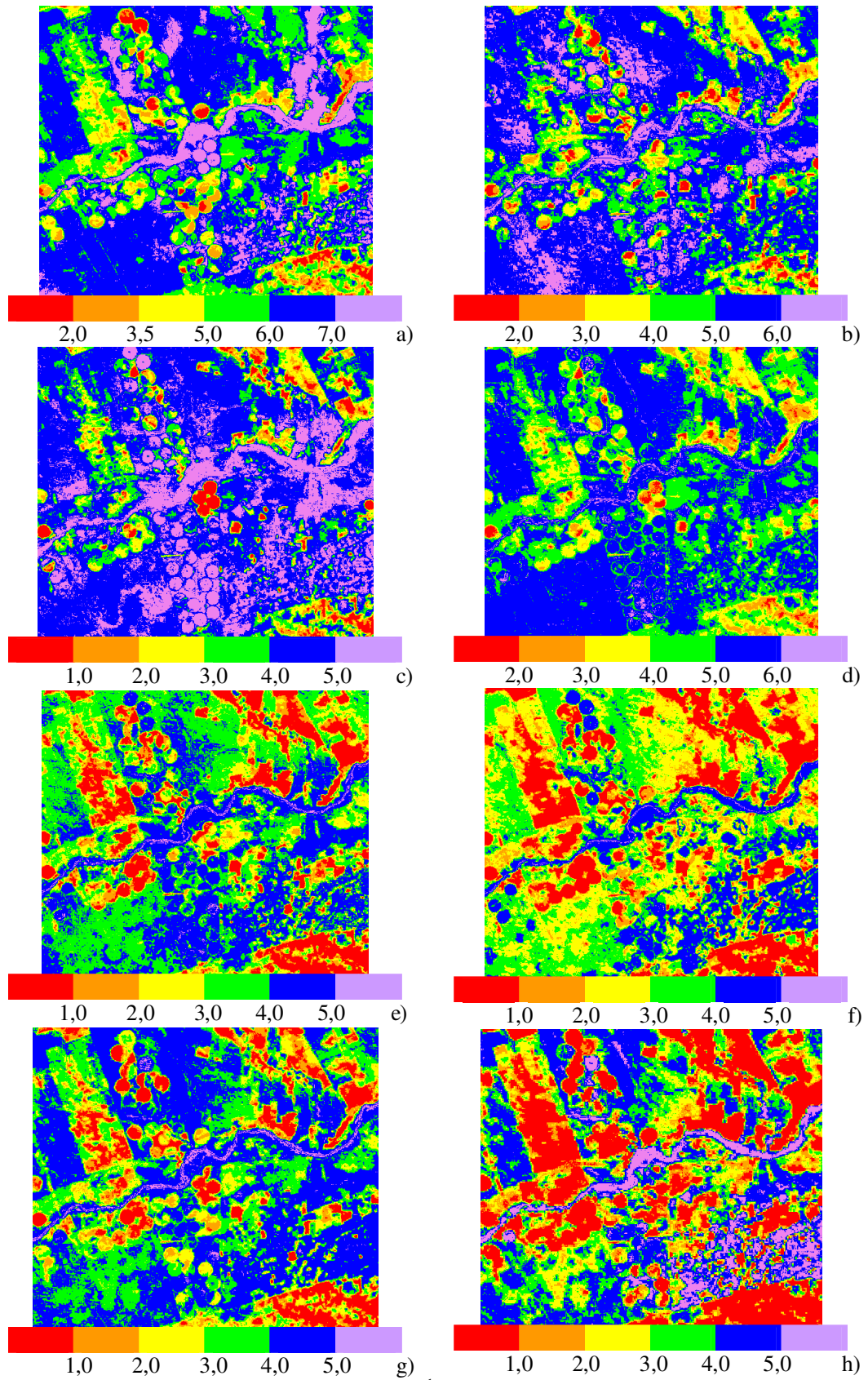


Figura 4.8 – Imagens da ETd (mm dia⁻¹) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007

Na Tabela 4.10 está apresentada a ET_d obtida pelo produto do Kc utilizado na Fazenda Busato – ET_{FB}, quais sejam: 0,47 (emergência, de até 6 DAS), 0,80 (desenvolvimento, de 7 a 70 DAS), 1,15 (floração, de 71 a 126 DAS) e 0,60 (maturação, superior a 126 DAS), e a ET_d estimada pelo METRIC – ET_M, além da diferença absoluta – DA e a diferença relativa – DR.

Em 20 de janeiro de 2007, a DR foi superior a 30% para os pivôs 10 e 23, e para os demais pivôs, que nesta data ainda não havia sido semeado, pode-se atribuir a ET_M dos mesmos a evaporação da água do solo. Em 25 de março de 2007, dos pivôs da variedade Delta Opal, apenas o pivô 23 estava na fase de floração e os demais, em fase de desenvolvimento. Assim, verifica-se que a DR oscilou entre 15 a 34%. Para a variedade Delta Penta, que estava na fase de desenvolvimento, a DR foi inferior a 8%.

Em 26 de abril de 2007, a DR foi inferior em todos os pivôs de ambas as variedades. Nesta data os pivôs estavam em fase de floração, com exceção dos pivôs 22 e 25 que estavam em fase de desenvolvimento. Em 12 de maio de 2007, período em que todos os pivôs selecionados estavam em fase de floração, constata-se que a DR varando de entre 6 e 27%.

Por sua vez, em 28 de maio de 2007, foi obtido DR superior a 60% para os pivôs 10 e 23, em fase de maturação, enquanto que os pivôs 22 e 25, em fase de floração, a DR foi inferior a 8%. Para a variedade Delta Penta, em fase inicial de maturação, constata-se que a DR variou de 24 a 49%. Em relação às demais datas a DR oscilou ente 0,4 e 74%, para ambas as variedades que estavam entre as fases de floração e maturação.

Com uso de técnicas de SR Chavez et al. (2007) obtiveram para o algodoeiro irrigado em estágio parcial de desenvolvimento ET de 6,1 mm dia⁻¹. Já Nagler et al (2005), Bezerra et al. (2008) e Payan e Watts (2005) obtiveram ET entre 6,0 e 7,0 mm dia⁻¹ para o algodoeiro em pleno desenvolvimento. Por sua vez, Corad et al. (2007) obtiveram para o algodoeiro ET entre 1,5 e 2,0 mm dia⁻¹ na fase inicial da cultura, ET entre 2,5 e 5,0 mm dia⁻¹ na fase de crescimento, com demanda máxima de 6,5 mm dia⁻¹, ocorrida com desenvolvimento total e, durante a colheita, a ET foi de 2,0 mm dia⁻¹. Tais resultados reportados assemelham-se aos obtidos nesta pesquisa.

Tabela 4.10. Comparação entre a ETd obtida pelo produto do Kc recomendado pelo programa computacional da Fazenda Busato pela $ET_0 - ET_{FB}$ (mm dia⁻¹) e a ETd estimada obtida pelo algoritmo METRIC – ET_M (mm dia⁻¹), diferença absoluta – DA (mm dia⁻¹) e diferença relativa – DR (%) entre as mesmas

Data		Delta Opal				Delta Penta			
		10	22	23	25	5	20	21	27
20/jan	ET _{FB}	2,98	–	5,13	–	–	–	–	–
	ET _M	1,95	–	2,20	–	–	–	–	–
	DA	1,03	–	2,93	–	–	–	–	–
	DR	34,6	–	57,1	–	–	–	–	–
25/mar	ET _{FB}	4,31	4,31	6,19	4,31	4,31	4,31	4,31	4,31
	ET _M	4,94	2,86	4,96	3,19	4,63	4,45	4,39	4,20
	DA	0,63	1,45	1,23	1,12	0,32	0,14	0,08	0,11
	DR	14,6	33,6	19,9	26,0	7,4	3,2	1,9	2,6
26/abr	ET _{FB}	5,5	3,82	5,5	3,82	5,5	5,5	5,5	5,5
	ET _M	5,49	4,45	5,72	4,52	5,59	5,56	5,47	5,44
	DA	0,01	0,63	0,22	0,7	0,09	0,06	0,03	0,06
	DR	0,2	16,5	4,0	18,3	1,6	1,1	0,5	1,1
12/mai	ET _{FB}	5,53	3,85	5,53	5,53	5,83	5,83	5,83	5,83
	ET _M	5,14	4,89	4,37	4,98	4,51	5,48	4,59	5,50
	DA	0,39	1,04	1,16	0,55	1,32	0,35	1,24	0,33
	DR	7,1	27,0	21,0	9,9	22,6	6,0	21,3	5,7
28/mai	ET _{FB}	2,54	4,87	2,54	4,87	2,54	2,54	2,54	4,87
	ET _M	4,13	5,14	4,08	5,25	3,45	3,78	3,46	3,72
	DA	1,59	0,27	1,54	0,38	0,91	1,24	0,92	1,15
	DR	62,6	5,5	60,6	7,8	35,8	48,8	36,2	23,6
13/jun	ET _{FB}	2,68	5,14	2,68	5,14	2,68	2,68	2,68	2,68
	ET _M	3,75	5,42	3,21	5,61	3,02	3,11	3,21	3,22
	DA	1,07	0,28	0,53	0,47	0,34	0,43	0,53	0,54
	DR	39,9	5,4	19,8	9,1	12,7	16,0	19,8	20,1
15/jul	ET _{FB}	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46	2,46
	ET _M	3,11	4,27	3,11	4,16	2,45	2,51	2,51	2,82
	DA	0,65	1,81	0,65	1,7	0,01	0,05	0,05	0,36
	DR	26,4	73,6	26,4	69,1	0,4	2,0	2,0	14,6
31/jul	ET _{FB}	–	3,25	–	3,25	3,25	–	–	3,25
	ET _M	–	3,78	–	3,58	1,92	–	–	2,35
	DA	–	0,53	–	0,33	1,33	–	–	0,9
	DR	–	16,3	–	10,2	40,9	–	–	27,7

Os gráficos da ETd versus DAS estão apresentados nas Figuras 4.9a e 4.9b para ambas as variedades, em conjunto com a função que caracteriza tal relação e o R^2 , onde constata-se na Figura 4.9a que a ETd foi inferior a $4,5 \text{ mm dia}^{-1}$ até 50 DAS. Entre 50 e 125 DAS, verifica-se que a ETd variou de $4,5$ a 6 mm dia^{-1} , atingindo seu valor máximo dentro do período de pleno desenvolvimento da cultura, enquanto que na Figura 4.9b, observa-se que os valores máximos da ETd ocorreram em torno do 100 DAS, atingindo valores entre $5,5 \text{ mm dia}^{-1}$.

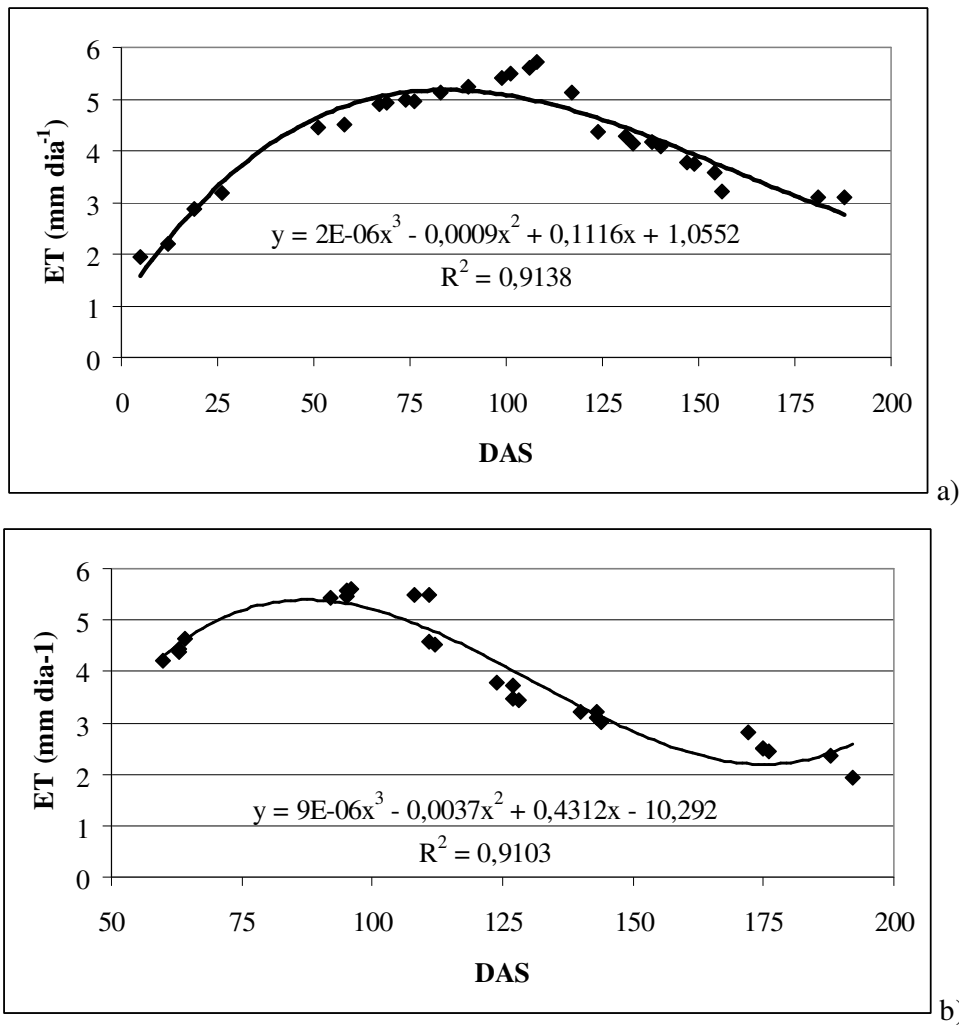


Figura 4.9 – Curva do ETd x DAS para as variedades a) Delta Opal e b) Delta Penta

Na Tabela 4.11 está representada a ET sazonal – ETsaz média do algodoeiro dos pivôs selecionados de ambas as variedades, a ET_0 acumulada no mesmo período – ET_{0_ac} e o percentual de equivalência da ETsaz em relação à ET_{0_ac} , onde observa-se que a ETsaz da variedade Delta Opal, variou entre 610,0 e 807,2 mm, com média de 728,7 mm. Para o pivô 10, cuja sazonalidade foi de 15 de janeiro a 14 de julho de 2007

(180 dias), a ET_{saz} equivaleu a 71% da ET₀ acumulada. Para o pivô 22, cuja sazonalidade foi de 06 de março a 30 de agosto de 2007 (181 dias), a ET_{saz} correspondeu a 92% da ET₀ acumulada. Para a sazonalidade de 08 de janeiro a 28 de julho de 2007 (201 dias), equivalente ao pivô 23, observa-se que ET_{saz} correspondeu a 83% da ET₀ acumulada. Por sua vez, a sazonalidade do pivô 25 foi de 27 de fevereiro a 26 de agosto de 2007 (180 dias), proporcionando ET_{saz} igual a 79% da ET₀ acumulada.

Para a variedade Delta Penta, observa-se na Tabela 4.11 que a ET_{saz} variou entre 618,5 e 830,1 mm, com média de 741,6 mm. Para o pivô 5, a ET_{saz}, computada de 20 de janeiro a 07 de agosto de 2007 (199 dias), correspondeu a 83% da ET₀ acumulada. Em relação aos pivôs 20 e 21, com sazonalidade de 21 de janeiro a 22 de julho de 2007 (182 dias), a ET_{saz} foi representou 85 e 72% da ET₀ acumulada, respectivamente. Por sua vez, ET_{saz} do pivô 27, obtida no período de 24 de janeiro a 24 de agosto de 2007 (234 dias), equivaleu a 82% da ET₀ acumulada.

Segundo Tasumi (2003) a ET obtida pelo SEBAL indica alto potencial do mesmo em sua estimativa sobre áreas agrícolas quando comparada às medidas lisimétricas, resultando informações com boa precisão para o gerenciamento dos recursos hídricos. Dessa forma, as estimativas da ET_{saz} com o SEBAL corroboram com as medidas lisimétricas, proporcionando erros médios em torno de 2,5%. Allen et al. (2007b) utilizando o METRIC e imagens TM – Landsat 5 de Kimberly, Idaho – EUA, obtiveram diferenças relativas inferior a 1% entre as estimativas e as medidas lisimétricas com relação à ET_{saz} sobre a cultura da beterraba. Por sua vez, Bastiaanssen et al. (2008) confirmam que a ET_{saz} estimada pelo SEBAL apresenta diferenças relativas aceitáveis quando comparada à ET_{saz} medida, pois tais medidas também possuem erros, afirmando que as estimativas são satisfatórias.

Tabela 4.11 – ET sazonal média (mm), ET₀ acumulada (mm) no mesmo período e percentual de equivalência da ET_{saz} em relação a ET_{0 ac} – Eq. (%)

	Variedade Delta Opal				Variedade Delta Penta			
Pivô	10	22	23	25	5	20	21	27
ET _{saz}	610,0	807,2	802,8	694,6	783,9	734,1	618,5	830,1
ET _{0 ac}	862,4	873,1	962,5	884,7	945,8	859,6	859,6	1.010,9
Eq.(%)	71	92	83	79	83	85	72	82

4.7 – Análise das imagens do coeficiente de cultivo

Nas Figuras 4.10a a 4.10h estão apresentadas as imagens do Kc. Como esta variável está relacionada às condições da vegetação e do clima, apenas faz sentido seu relato em relação às áreas de vegetação nativa e às áreas com cultivo irrigado. Nesse sentido, observa-se nas Figuras 4.10a a 4.10c que nas áreas com vegetação nativa o Kc variou de 0,90 a 1,20, enquanto que na Figura 4.10d o Kc variou entre 0,80 e 1,20. Porém, nas áreas com vegetação nativa a oeste da fazenda, o Kc ficou entre 1,10 e 1,20. Por sua vez, nas Figuras 4.10e e 4.10f, observa-se decréscimo do Kc, ficando entre 0,70 e 1,00 e entre 0,50 e 0,90, respectivamente. Nas demais figuras constatam-se elevação do Kc quando comparado às duas figuras anteriores, variando de 0,90 a 1,10.

Nas áreas com cultivo de frutíferas irrigadas, verifica-se na Figura 4.10a Kc variando de 1,10 a 1,20; enquanto que na Figura 4.10b, variou de 0,90 a 1,10. A variação do Kc foi de 1,00 a 1,20 na Figura 4.10c, data em que se observam maiores valores do Kc nas referidas áreas. Nas demais figuras o Kc ficou entre 0,90 e 1,20. Com base nas faixas de Kc obtidos para tais áreas, tem-se Kc médio em torno de 1,10.

Constata-se na Figura 4.10a que nas áreas com cultivo do algodoeiro irrigado, o Kc abrangeu três diferentes classes, variando de 0,70 a 1,10. Porém, em áreas ao norte da fazenda, o Kc foi inferior a 0,50. Na Figura 4.10b, observa-se elevação do Kc, onde o Kc variou entre 1,10 e 1,20 nos pivôs ao sul da fazenda, e ao norte variou de 0,90 a 1,10, evidenciando diferentes fases fenológicas da cultura numa mesma imagem, já que a semeadura ocorreu em datas distintas. Na Figura 4.10c, período de pleno desenvolvimento, verifica-se que ao sul da fazenda o Kc foi superior a 1,20, enquanto que ao norte variou de 1,10 a 1,20. Por sua vez, na Figura 4.10d, constata-se uniformidade nos valores do Kc, entre 1,10 e 1,20.

Na Figura 4.10e, os pivôs ao sul da fazenda apresentaram Kc entre 1,00 e 1,30 e ao norte, entre 0,70 e 0,90. Na Figura 4.10f, o Kc variou de 0,90 a 1,20 para os pivôs ao sul da fazenda, enquanto que para os pivôs ao norte observa-se Kc variando de 0,70 a 0,90. Constata-se predominância do Kc acima de 0,90 na Figura 4.10g, com destaque para o pivô 22 (ver Figura 3.3), que apresentou Kc superior a 1,20. Por sua vez, na Figura 4.10h verifica-se que o Kc abrangeu diferentes classes, caracterizando, novamente, fases fenológicas distintas.

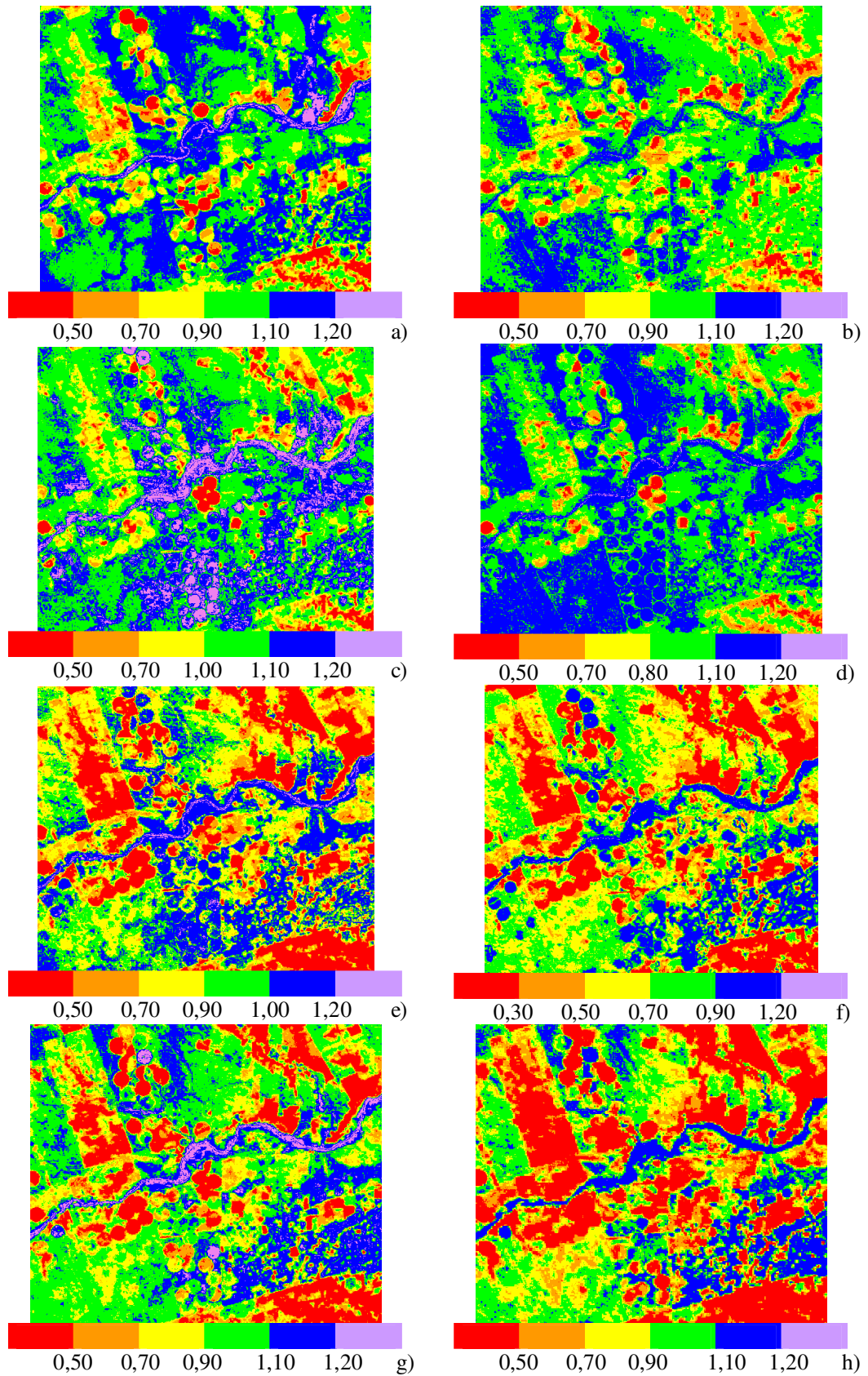


Figura 4.10 – Imagens do Kc dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007

Na Tabela 4.12 está apresentado o Kc médio do algodoeiro para ambas as variedades nas datas de geração das imagens, abrangendo diferentes fases fenológicas da cultura. Os pivôs 10 e 23 que em 20 de janeiro de 2007 estavam, respectivamente, em fase de emergência e desenvolvimento, apresentaram Kc em torno de 0,30. Comparando tais valores ao Kc utilizado na Fazenda Busato, que na fase de emergência foi 0,465 e na fase de desenvolvimento foi de 0,80, obtém-se DR entre 35 e 63%.

Em 25 de março de 2007, observa-se que o pivô 10, em fase de desenvolvimento, apresentou Kc de 1,01, correspondendo a DR de 21% em relação ao Kc utilizado na fazenda e o pivô 23, em fase de floração, apresentou DR de 6%. Nos demais pivôs da variedade Delta Opal, que nesta data estavam em fase de desenvolvimento, apresentaram Kc 30% inferior ao utilizado na fazenda. Nesta mesma data, a variedade Delta Penta, em fase de desenvolvimento, apresentou Kc em torno de 0,80, valor este idêntico ao utilizado na fazenda.

No de pleno desenvolvimento da cultura, observa-se que em 26 de abril de 2007, data em que o algodoeiro dos os pivôs 10 e 23 estavam em fase de floração e o dos pivôs 22 e 25 em fase de desenvolvimento, o Kc variou de 0,90 a 1,20, aproximando-se dos valores utilizados na fazenda em ambas as fases, com DR entre 1 e 13%. Em 12 de maio de 2007, observa-se que o Kc oscilou entre 0,99 e 1,11, em torno do valor recomendado na fase de floração. Por sua vez, em 28 de maio de 2008, os pivôs 10 e 23, em fase de maturação, apresentaram Kc de 0,98 e 0,91, respectivamente, correspondendo a DR em torno de 35%, e em relação aos pivôs 22 e 25, em fase de floração, observa-se Kc próximo ao valor utilizado na fazenda.

Em relação à variedade Delta Penta no período de pleno desenvolvimento, verifica-se que o Kc em torno de 1,10 em 26 de abril de 2007, quando o algodoeiro estava em fase de floração. Em 12 de maio de 2007, com pivôs ainda em fase de floração, o Kc foi em torno de 1,15, valor este idêntico ao utilizado na fazenda no mesmo período. Por sua vez, em 28 de maio de 2007 com pivôs em fase inicial de maturação, observa-se Kc variando entre 0,90 e 1,00.

Em 13 de junho de 2007, constata-se que os pivôs 22 e 25 apresentaram Kc superior a 1,00, enquanto que os pivôs 10 e 23, apresentaram Kc em torno de 0,77. É importante evidenciar que o algodoeiro dos pivôs 10 e 23 estava em fase de maturação e dos pivôs 22 e 25, em fase de floração. Em 15 de julho de 2007, fase de maturação verifica-se Kc foi inferior a 0,70, com exceção dos pivôs 22 e 25. Finalmente, em 31 de

julho de 2007 os pivôs 10 e 23 já haviam sido colhidos e os pivôs 22 e 25 estavam em fase de maturação, apresentaram Kc em torno de 0,85. E em relação à variedade Delta Penta em 13 de junho, 15 e 31 de julho de 2007 verifica-se que o Kc foi ligeiramente superior a 0,60.

De acordo com Allen et al. (1998), o Kc do algodoeiro é em torno de 0,35 na fase inicial; variando entre 1,10 e 1,15 na fase intermediária; e entre 0,70 e 0,50 na fase final. Azevedo et al. (1993), obtiveram os seguintes valores do Kc para o algodoeiro herbáceo, cultivar CNPA Precoce 1: na Fase I, 0,40 a 0,50; na Fase II, 0,50 a 0,80; na Fase III, de 0,80 a 0,90, e; na Fase IV, de 0,90 a 1,20. Barreto et al. (2005) para o algodoeiro herbáceo, cultivar CNPA 6H obtiveram Kc para as quatro fases fenológicas : 0,36; 0,64; 0,86 e 0,71. Por sua vez, Rodrigues (2003) para o algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 201, obteve Kc variando de 0,44 a 0,81. E Bezerra et al. (1995) Amaral e Silva (2006) obtiveram Kc do algodoeiro herbáceo variando entre 0,40 e 1,05.

Segundo Barreto et al. (2003), o Kc da cultura do algodão é de 0,45 na primeira fase, entre 5 e 20 Dias Após a Emergência – DAE, de 0,75 na segunda fase, entre 20 e 40 DAE, de 1,15 na terceira fase, entre 40 e 80 DAE e de 0,85 na quarta fase, entre 80 e 100 DAE.

Tabela 4.12 – Kc médio do algodoeiro dos pivôs selecionados por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Pivô	Kc							
	Variedade Delta Opal							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
10	0,30	1,01	1,15	1,11	0,98	0,81	0,68	–
22	–	0,53	0,92	0,99	1,10	1,13	1,01	0,89
23	0,34	1,08	1,17	1,07	0,91	0,72	0,65	–
25	–	0,59	0,92	1,02	1,14	1,16	0,96	0,79
Pivô	Kc							
	Variedade Delta Penta							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
5	–	0,86	1,14	1,14	0,89	0,69	0,60	0,39
20	–	0,83	1,14	1,16	0,92	0,70	0,61	–
21	–	0,82	1,08	1,17	0,92	0,72	0,61	–
27	–	0,78	1,07	1,14	0,98	0,72	0,63	0,43

Os gráficos do Kc versus DAS estão apresentados nas Figuras 4.11a e 4.11b para ambas as variedades, em conjunto com a função que caracteriza tal relação e o R², onde se constata na Figura 4.11a que o Kc da variedade Delta Opal atingiu valor máximo entre 75 e 125 DAS, período de pleno desenvolvimento da cultura, com Kc variando entre 1,00 e 1,20, enquanto que na Figura 4.11b, que representa a curva do Kc para a variedade Delta Penta, observa-se que o Kc atingiu valor máximo em torno de 100 DAS (período de pleno desenvolvimento), com Kc ligeiramente inferior a 1,20.

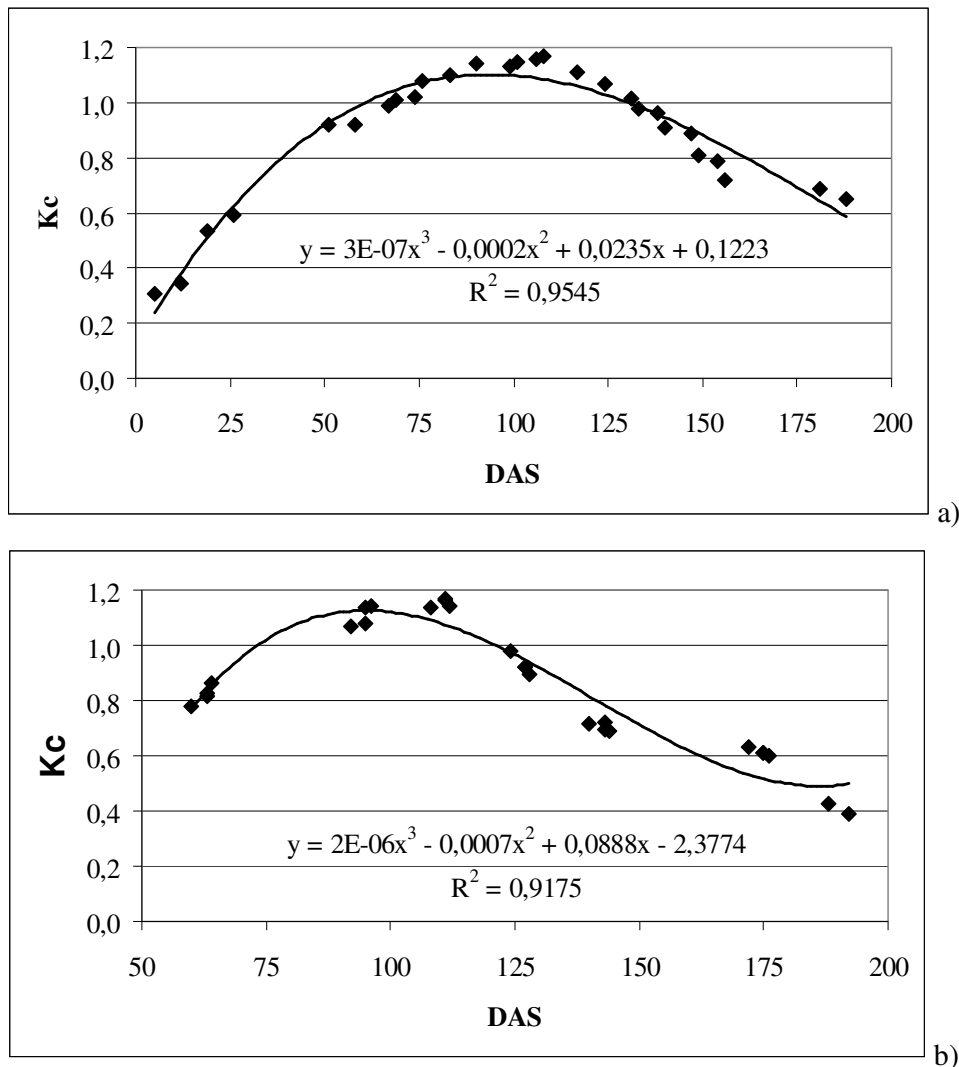


Figura 4.11 – Curva do Kc x DAS para as variedades a) Delta Opal e b) Delta Penta

O valor médio do Kc nas diferentes fases fenológicas do algodoeiro está apresentado na Tabela 4.13 para ambas as variedades, sendo comparado ao Kc utilizado na Fazenda Busato. Em relação à variedade Delta Opal observa-se que o Kc estimado na fase de emergência foi 16% inferior ao Kc utilizado na mesma fase. Na fase de

desenvolvimento, o Kc estimado também foi 14% superior ao Kc utilizado nesta mesma fase. Na fase de floração foi obtida a menor diferença relativa entre o Kc estimado e o utilizado, com DR de apenas 3%. Por sua vez, na fase de maturação, o Kc estimado foi 40% superior ao Kc utilizado nesta mesma fase.

Para a variedade Delta Penta, devido sua semeadura ter ocorrido após a geração da primeira imagem e cerca de dois meses antes da geração da segunda imagem pelo TM – Landsat 5, não foi possível obter estimativas do Kc na fase de emergência. Portanto, na fase de desenvolvimento foi obtido DR de 2%, na fase de floração foi obtido DR de 3%, e na fase de maturação, DR de 13% superior ao Kc utilizado.

Diante do exposto anteriormente, constata-se que o Kc estimado apresentou melhor concordância com o valor utilizado na Fazenda Busato na fase de floração.

Tabela 4.13 – Comparação entre Kc médio do algodoeiro para ambas as variedades estimado pelo METRIC e o Kc utilizado na Fazenda Busato

Fase da Cultura	Variedade		Kc utilizado na Fazenda Busato	Variedade			
	Delta Opal	Delta Penta		Delta Opal		Delta Penta	
	Kc	Kc	DA	DR(%)	DA	DR(%)	
Emergência	0,39	–	0,47	0,08	16	–	–
Desenvolvimento	0,91	0,82	0,80	0,11	14	0,02	2
Floração	1,12	1,11	1,15	0,03	3	0,04	3
Maturação	0,84	0,68	0,60	0,24	40	0,08	13

4.7 – Análise das imagens da biomassa diária acima do solo

Nas Figuras 4.12a a 4.12h estão apresentadas as imagens da biomassa diária acima do solo (kg ha^{-1}), onde verifica-se que nas Figuras 4.12a e 4.12b as áreas com vegetação nativa apresentaram biomassa variando entre 160 e 200 kg ha^{-1} , enquanto que na Figura 4.12c observa-se nas mesmas áreas biomassa inferior, entre 120 e 160 kg ha^{-1} . Na Figura 4.12d, a biomassa variou entre 70 e 140 kg ha^{-1} e nas demais figuras, constata-se que a Biomassa foi inferior a 60 kg ha^{-1} . A biomassa relativamente elevada por parte da vegetação nativa observada nas Figuras 4.12a e 4.12b, pode ser atribuído ao regime pluviométrico.

Nas áreas com cultivo de frutíferas irrigadas, constata-se que a biomassa na Figura 4.12a foi superior a 200 kg ha^{-1} , enquanto que na Figura 4.12b, a biomassa

variou de 120 a 200 kg ha⁻¹. Por sua vez, nas Figuras 4.12c e 4.12d, a biomassa destas áreas variou entre 140 e 200 kg ha⁻¹ e nas demais figuras, ficou entre 100 e 150 kg ha⁻¹.

Observa-se nas áreas com cultivo do algodoeiro irrigado que a biomassa na Figura 4.12a foi inferior a 40 kg ha⁻¹, com algumas áreas variando entre 40 e 80 kg ha⁻¹. Na Figura 4.12b, período em que todos os pivôs já haviam sido semeados, porém em fases fenológicas distintas, observa-se ao norte da fazenda que a biomassa variou de 80 a 120 kg ha⁻¹, enquanto que no centro da fazenda a biomassa variou entre 80 e 160 kg ha⁻¹ e ao sul variou de 160 a 200 kg ha⁻¹. Nas Figuras 4.12c a 4.12e, período de pleno desenvolvimento da cultura, observa-se na Figura 4.12c que em toda a fazenda, a biomassa ficou na faixa de 160 a 200 kg ha⁻¹, predominantemente. Nas demais figuras, observa-se predominantemente biomassa inferior a 50 kg ha⁻¹. Dessa forma, pode-se afirmar que a biomassa do algodoeiro apresentou ascensão entre as imagens de 20 de janeiro e 26 de abril de 2007, sendo praticamente constante até 28 de maio de 2007 e reduzindo entre 13 de junho e 31 de julho de 2007.

Utilizando imagens AVHRR – NOAA da bacia de Indus, no Paquistão, Bastiaanssen e Ali (2003), obtiveram que a produção anual média do trigo foi superior a 2.200 kg ha⁻¹, para o arroz foi superior a 1.700 kg ha⁻¹, para a fibra do algodão obtiveram estimativa em torno de 1.300 kg ha⁻¹, enquanto que para a cana-de-açúcar, de aproximadamente 48.000 kg ha⁻¹. Por sua vez, Samarasinghe (2003) também com imagens AVHRR – NOAA do Sri Lanka obteve concordância de 88% em relação à previsão da produção do arroz, estimando produção anual de 2.835 kg ha⁻¹.

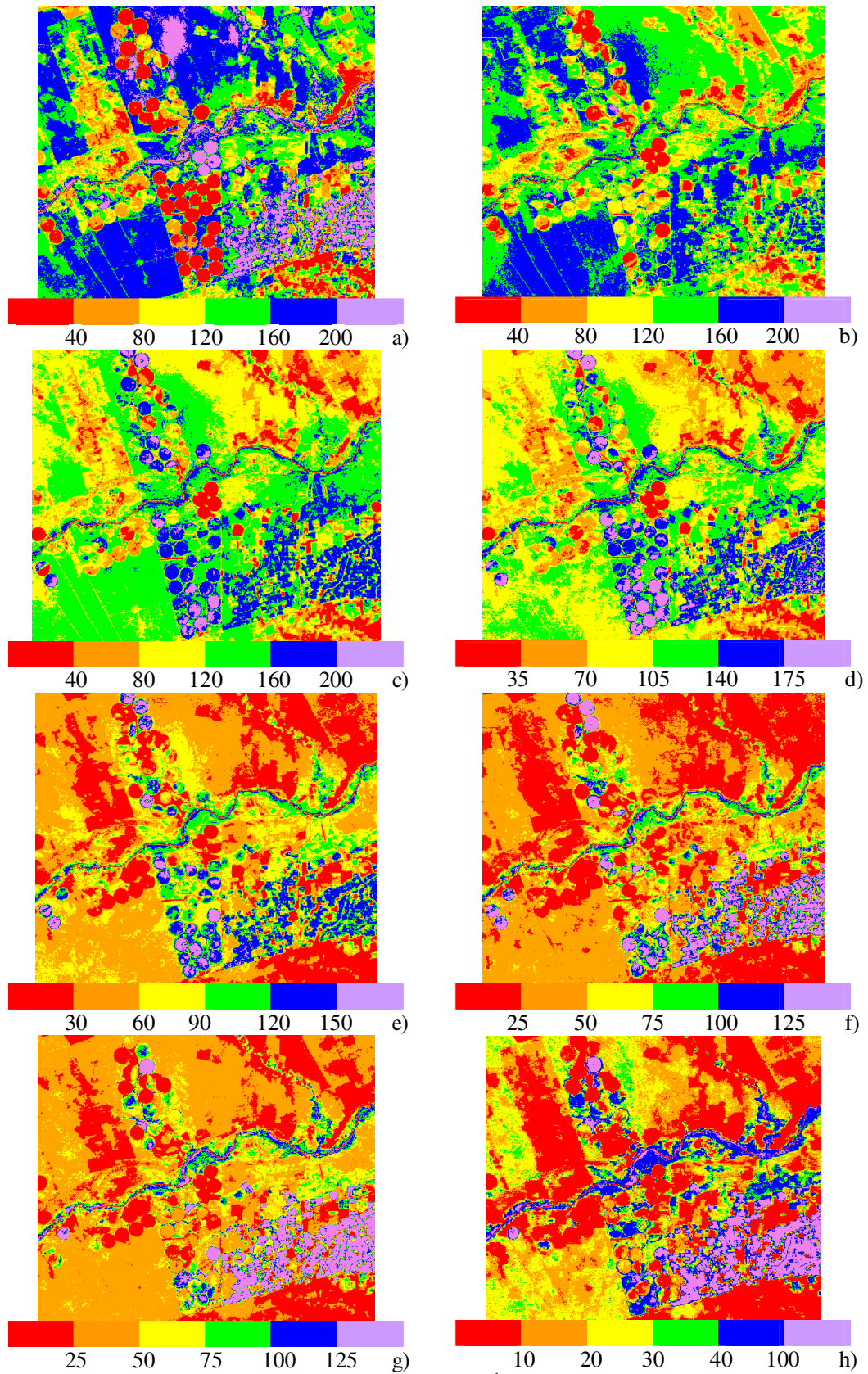


Figura 4.12 – Imagens da biomassa diária (kg ha^{-1}) dos dias a) 20/janeiro; b) 25/março; c) 26/abril; d) 12/maio; e) 28/maio; f) 13/junho; g) 15/julho, e; h) 31/julho de 2007

A biomassa média diária (kg ha^{-1}) do algodoeiro de ambas as variedades está apresentada na Tabela 4.14, onde se constata que, em 20 de janeiro de 2007, sob os pivôs 10 e 23, em fase de emergência e fase de desenvolvimento, respectivamente, houve acúmulo de 15 kg ha^{-1} . Em relação à variedade Delta Opal em 25 de março de 2007, observa-se nos pivôs 10 e 23, em fase de desenvolvimento e floração, respectivamente, que a biomassa foi superior a 100 kg ha^{-1} , enquanto que o nos pivôs 22 e 23, em fase inicial de desenvolvimento, apresentaram biomassa média de 12 e 35 kg ha^{-1} , respectivamente. Por sua vez, para a variedade Delta Penta, em fase de desenvolvimento, apresentou biomassa superior a 100 kg ha^{-1} nesta mesma data.

No período de pleno desenvolvimento da cultura, observa-se que a biomassa de ambas as variedades Delta Opal oscila entre 160 e 200 kg ha^{-1} . Nas demais datas analisadas observam-se decréscimo dos valores médios da biomassa para ambas as variedades, apresetando valores inferiores a 100 kg ha^{-1} , predominantemente, caracterizando período de maturação, com exceção do pivô 22.

Tabela 4.14 – Biomassa diária (kg ha^{-1}) do algodoeiro por ocasião das datas em que foram geradas as imagens TM – Landsat 5

Pivô	Biomassa Diária (kg ha^{-1})							
	Variedade Delta Opal							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
10	14,7	111,1	162,4	159,0	111,6	27,1	17,2	–
22	–	11,9	188,9	183,0	173,9	171,0	168,8	115,7
23	10,5	182,6	206,9	196,7	142,6	138,7	55,2	–
25	–	35,0	174,0	174,8	166,3	156,8	125,3	53,5
Pivô	Biomassa Diária (kg ha^{-1})							
	Variedade Delta Penta							
	20/jan	25/mar	26/abr	12/mai	28/mai	13/jun	15/jul	31/jul
5	–	164,3	208,4	196,4	169,0	152,5	59,2	16,6
20	–	167,2	197,5	192,8	151,7	87,2	58,8	–
21	–	131,3	194,0	191,8	116,0	108,5	28,8	–
27	–	107,4	194,0	190,7	144,6	126,9	90,8	80,6

Os gráficos da biomassa versus DAS de ambas as variedades estão apresentados nas Figuras 4.13a e 4.13b, onde se observa na Figura 4.13a, correspondente à variedade Delta Opal, que a biomassa foi inferior a 50 kg ha^{-1} até 25 DAS e entre 25 e 75 DAS atingiu valor máximo em torno de 200 kg ha^{-1} . Após este período, verifica-se que a biomassa descende, variando entre 100 e 180 kg ha^{-1} no

período de 100 e 150 DAS e acima de 150 DAS, a biomassa variou entre 50 e 100 kg ha⁻¹. Para a variedade Delta Penta, observa-se na Figura 4.13b que a biomassa ascende entre 50 e 100 DAS, variando de 60 a 200 kg ha⁻¹, atingindo seu valor máximo. Após 100 DAS, a biomassa descende, ficando entre 150 e 200 kg ha⁻¹, entre 100 e 125 DAS e acima de 125 DAS, verifica-se que a biomassa descende acentuadamente, atingindo valores inferiores a 50 kg ha⁻¹ no final do ciclo.

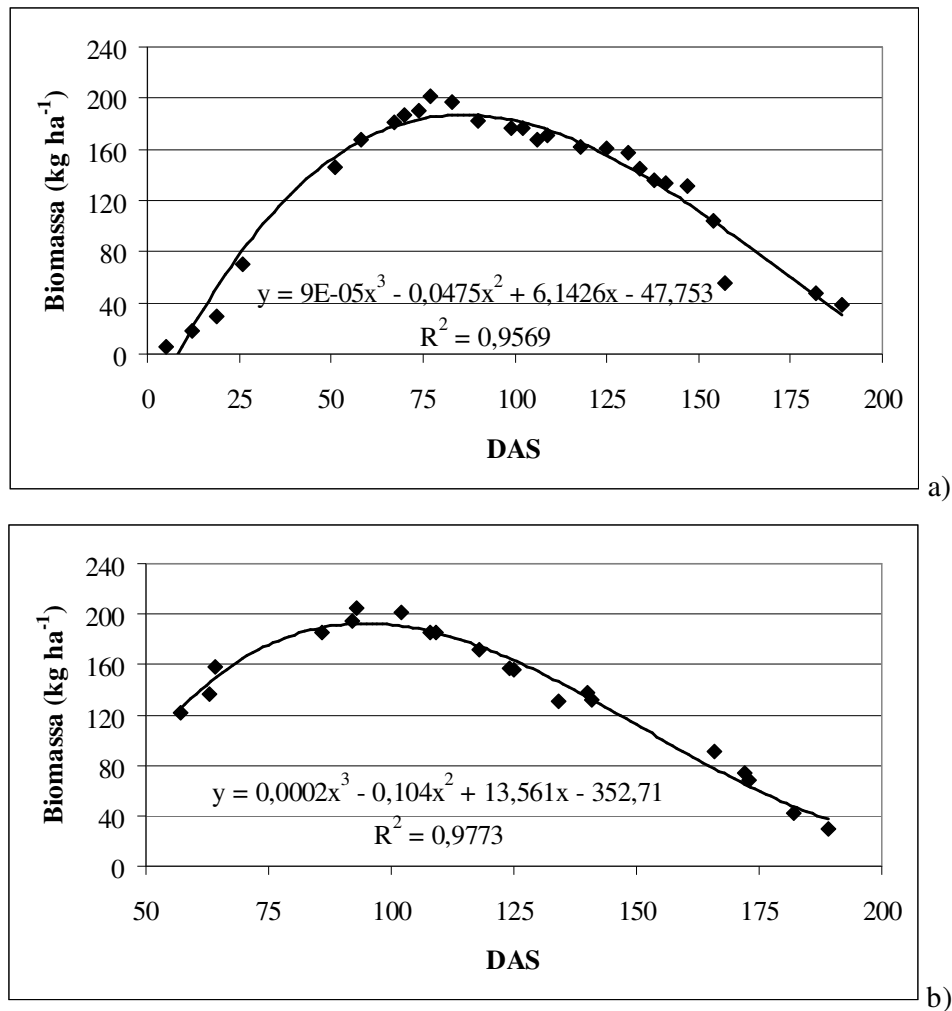


Figura 4.13 – Curva da biomassa diária (kg ha⁻¹) versus DAS para as variedades a) Delta Opal e b) Delta Penta

Para melhor consistência das estimativas da biomassa, está apresentado na Figura 4.14 o gráfico da comparação entre a biomassa diária medida e estimada do algodoeiro de quatro pivôs em 12 de maio de 2007, todos em fase de floração, quais sejam: pivô 11, com 104 DAS; o pivô 18, com 109 DAS; pivô 21, com 111 DAS; e pivô 25, com 74 DAS. Dessa forma, na Figura 4.14, constata-se que a DR entre o valor medido e estimado nos pivôs 11, 18 e 25 foi inferior a 10%, enquanto que para o pivô

21 foi de em torno de 30%, representando a maior diferença entre o valor medido e estimado. Portanto, diante destes resultados, pode-se observar que as estimativas tenderam a subestimar os valores medidos, com exceção pivô 25.

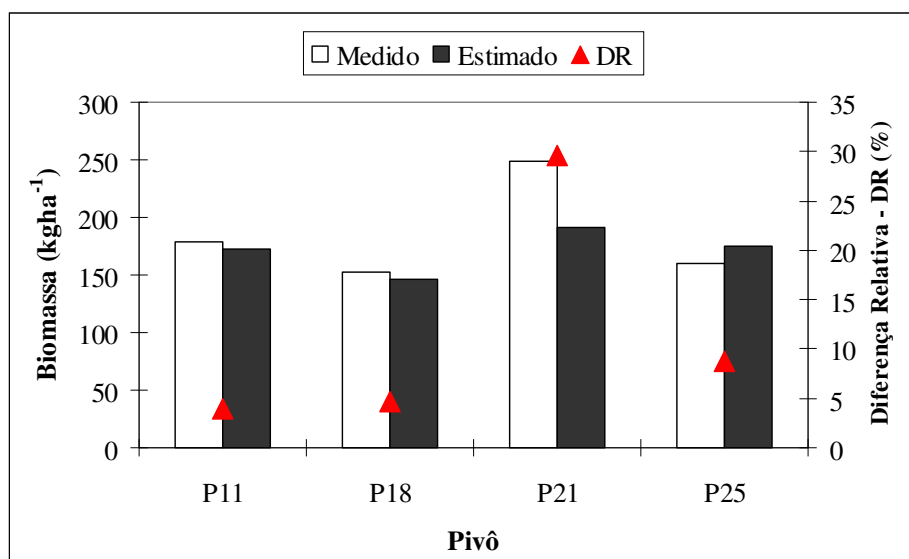


Figura 4.14 – Biomassa (kg ha⁻¹) medida e estimado em 12 de maio de 2007

5 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 – Conclusões

Com base nos resultados obtidos nas análises das imagens referentes à área de estudo, conclui-se que:

- 1.** O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – IVDN mostrou-se um excelente indicador do desenvolvimento da cultura, constituindo ferramenta importante para o manejo da cultura e estimativa da produtividade;
- 2.** O balanço de energia apresentou valores coerentes com a literatura e mostrou adequadamente a variabilidade existente na área de estudo, indicando que a metodologia empregada foi adequada aos objetivos propostos;
- 3.** A ET diária estimada para todo o ciclo da cultura atingiu valor máximo em torno de 6 mm dia^{-1} , para ambas as variedades, demonstrando coerência com os valores apresentados pela literatura;
- 4.** A ET sazonal média estimada foi superior a 730 mm para ciclo médio em torno de 200 dias para ambas as variedades, evidenciando elevada ET para cultura de ciclo longo, superior aos valores apresentados pela literatura;
- 5.** O Kc estimado para ambas as variedades foi superior ao Kc utilizado na Fazenda Busato e superior aos valores relatados pela literatura para o algodoeiro herbáceo de ciclo curto em todas as fases fenológicas consideradas;

6. A biomassa diária estimada de ambas as variedades alcançou valor máximo superior a 200 kg ha^{-1} , evidenciando alta densidade vegetativa no período de pleno desenvolvimento da cultura;
7. A validação mostrou que a biomassa estimada tendeu a subestimar a biomassa medida, com diferença relativa média em torno de 12%;
8. Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciaram a eficácia e precisão das estimativas da ET diária, do Kc e da biomassa obtidas pela metodologia aplicada.

5.2 – Sugestões

Sugere-se que em pesquisas futuras:

1. Sejam realizadas campanhas experimentais em áreas com diferentes tipos de vegetação, naturais e agrícolas, e em diferentes tipos de clima, para que se possa investigar melhor a precisão das estimativas realizadas com o uso do sensoriamento remoto e imagens de satélite, assegurando a aplicabilidade da metodologia;
2. Sejam realizados estudos específicos em corpos d'água, a exemplo do rio Corrente, para que se possa ter maior precisão no que diz respeito as estimativas do fluxo de calor na água, e por conseguinte, nas estimativas da água evaporada por estes alvos;
3. Sejam utilizadas imagens de satélite de alta resolução espacial intercaladas com imagens de alta resolução temporal para melhor análise do ciclo de culturas irrigadas.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCIOLY, L. J. O., PACHECO, A., COSTA, T. C. C., LOPES, O. F. e OLIVEIRA, M. A. J. Relações empíricas entre a estrutura da vegetação e dados do sensor TM/Landsat. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 6, n. 3, p. 392-398. Campina Grande-PB, DEAg/UFCG, 2002.

ALLEN, R. G.; PERREIRA, L. S.; RAES, D. & SMITH, M. Crop evapotranspiration, FAO irrigation and drainage paper 56, FAO. 1998.

ALLEN, R., TASUMI, M. e TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advanced Training and Users Manual, 2002.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W. G.; MORSE, T.; KRAMBER, W.; WRIGHT, J. METRIC – High Resolution Satellite Qualification of Evapotranspiration. University of Idaho, Kimberly, Idaho. 2005.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Reston, v.133, n.395, p.380-394, 2007a.

ALLEN, R.; TASUMI, M.; TREZZA, R.. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Reston, v.133, n.395, p.395-406, 2007b.

AMAN, MEHADIA. Evaluating and comparing the performance of different irrigation systems using remote sensing and GIS (A case study in Alentejo region, Portugal). International Institute for Geo-information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands. Thesis, 2003.

AMARAL, J. A. B. do; SILVA, M. T. Zoneamento agrícola do algodão herbáceo no Nordeste brasileiro safra 2006/2007 – Estado do Rio Grande do Norte. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Comunicado Técnico 302. Campina Grande – PB, Dezembro/2006.

ARAGÃO JR., TC.; MAGALHÃES, C. A. de; SANTOS, C.S. V. dos. Estudo de lâminas de irrigação na cultura do algodão herbáceo. Fortaleza: EPACE, 15p. (EPACE, Boletim de Pesquisa, 14), 1989.

ARAÚJO, L. R. Resposta do algodoeiro herbáceo cultivar BRS Rubi a adubação nitrogenada e alteração do regime hídrico no solo. 87f. Tese (Doutorado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia do Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia – PB, 2006.

ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Rep., ASCE, 2005.

ATAÍDE, K. R. da P. Determinação do saldo de radiação e radiação solar global com produtos MODIS. 78f, Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2006.

ÁVILA NETO, J. Necessidades hídricas da videira na região do sub-médio São Francisco. Campina Grande. Dissertação de Mestrado- DCA. CCT.UFPB. 86p. 1997.

AYENEW, T. Evapotranspiration estimation using thematic mapper spectral satellite data in the Ethiopian rift and adjacent highlands. *Journal of Hydrology*, 279, 83 – 93, 2003.

AZEVEDO, P. V. de A, RAMANA RAO, T. V., AMORIM NETO, M. da SILVA. Estimativa do consumo hídrico de um cultivo de algodão herbáceo irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 7, Viçosa. Resumos. Universidade Federal de Viçosa, p. 229-231. 1993.

BASTIAANSSEN, W. G. M. Regionation of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain – A Remote Sensing Approach Under Clear Skies in Mediterranean Climates. Thesis, 273, 1995.

BASTIAANSSEN, W. G. M; MENENTI, M; FEDDES, R.A.; HOLSLAG, A.A.M. A Remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) – Formulation. *Journal of Hydrology*, v. 212-213, p.198-212, 1998a.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F. ROENRINK, G. J. VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) – Validacion. *Journal of Hydrology*, v. 212–213, p.213-229. 1998b.

BASTIAANSSEN, W. G. M. SEBAL – Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229, 87 – 100, 2000.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; R. A. L. BRITO, M. G. BOS; R. A. SOUZA; E. B. CAVALCANTE; M. M. BAKKER. Low cost satellite data for monthly irrigation performance monitoring: benchmarks from Nilo Coelho, Brazil. *Irrigation Drainage System.*, 15: 53-79p. 2001.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; ALI, SAMIA. A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 94, 321 – 340, 2003.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M. PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P. e ALLEN, R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation Draining Engineering*, 131 (1), 85 – 93, 2005.

BASTIAANSSEN, W. G. M., PELGRUM, H., SOPPE, R. W. O., ALLEN, R. G., THORESON, B. P., TEIXEIRA, A. H. de C. Thermal infrared technology for local and regional scale irrigation: TNO Committee on Hydrological, vol. 39, Gravenhage, The Netherlands, pp. 5 – 31, 2008.

BATRA, N.; ISLAM, S.; VENTURINE, V.; BISHT, G.; JIANG LE. Estimation and comparison of evapotranspiration from MODIS and AVHRR sensors for clear sky days over the Southern Great Plains. *Remote Sensing of Environment*, v. 103, p. 1-15, 2006.

BELTRÃO, N.E. de M.; BEZERRA, J. F. C.; BARRETO, A. N. Recomendações técnicas para o cultivo do algodoeiro herbáceo de sequeiro e irrigado nas regiões Nordeste e Norte do Brasil. Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, 1993. 72p. (Circular Técnica, 17).

BARRETO, A. N.; BORDINI, J. A. do A; SOUSA, E. F. Avaliação da demanda hídrica das culturas irrigadas: estudo de caso – algodão herbáceo, amendoim, girassol e coco. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2003b. (Circular Técnica, 73).

BARRETO, A. N.; BEZERRA, J. R. C.; SILVA, A. A. G. da. Cálculo da Necessidade Hídrica do Algodoeiro com base na evapotranspiração de referência, E_{To} , e no coeficiente de cultura, K_c , para Barreiras, BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, IV CBA, SALVADOR, BA. Anais, 2005.

BEZERRA, J. R. C., BARRETO, A. N., SILVA, B. B. da. Consumo hídrico do algodoeiro herbáceo. In: EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa do Algodão. Campina Grande-PB, p. 151-154. (Relatório Técnico Anual, 1992-1993), 1995.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B. da; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM – Landsat 5. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.23, n.3, 305-317, 2008.

BISHT, G.; VENTURINI, V.; ISLAM, S.; JIANG, LE. Estimation of the net radiation using MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data for clear sky days. *Remote Sensing of Environment*, v. 97, p. 52-67, 2005.

BOEGH, E., SCHELDE, K. & SOEGAARD, H. Estimating Transpiration Rates in a Danish Agricultural Area Using Landsat Thermal Mapper Data. *Phys. Chem. Earth (B)*, vol 25, n°7 – 8, p. 685 – 689, 2000.

BORGES, P. F. Crescimento, desenvolvimento e balanço de radiação do algodoeiro herbáceo BRS – 201 em Condições Irrigadas. 87f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2002.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physic Ver.* 27: 779-787, 1926.

BRICKLEMYER, R. S.; LAWRENCE, R. L.; MILLER, P. R.; BATTOGTOKH, N. Monitoring and verifying agricultural practices related to soil carbon sequestration with satellite imagery. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118 201–210, 2007.

BRUTSAERT, W. Evaporation into the Atmosphere. D. Reidel. 229 p., 1982.

CHANDRAPALA, L. e WIMALASUIYA, M. Satellite Measurements Supplemented with Meteorological Data to Operationally Estimate Evaporation in Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, v. 58. p. 89 – 107, 2003.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges. *IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, v. 41. n. 11. 2003.

CHAVEZ, J. L. ; GOWDA, P. H. ; HOWELL, T. A.; MAREK, T. H.; NEW, L. L. Evapotranspiration mapping using METRIC™ for region with highly advective conditions. In.: 2007 ASABE Annual International Meeting. Anais... Minneapolis: ASABE, 2007.

CONRAD, C.; DECH, S. W.; HAFEEZ, M.; LAMERS, J.; MARTIUS, C.; STRUNZ, G. Mapping and assessing water use in a Central Asian irrigation system by utilizing MODIS remote sensing products. *Irrigation and Drainage Systems*, v. 21, n. 3-4 , p. 197-218, dez, 2007.

COSTA FILHO, J. F. Avaliação dos componentes do balanço de energia e evapotranspiração em uma região semi-árida usando imagens orbitais Landsat-5 TM e Terra-Modis. 141f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2005.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. Campina Grande: UFPB, 306p. (FAO: Irrigação e Drenagem, 33), 1994.

DOW, C. L. e DE WALLE, D. R. Trends in evaporation and Bowen ratio on urbanizing watersheds in eastern United States. *Water Resources Research*, vol. 36, no. 7, pages 1835–1843, July 2000.

DUFFIE, J. A. e BECKMAN, W. A. Solar engineering of thermal process. 2nd Ed, John Wiley and sons, NY. 1991.

FEITOSA, J. R. P. Uso de Técnicas de Sensoriamento Remoto e Imagens Landsat-TM e NOAA-AVHRR na Estimativa do Balanço de Energia à Superfície. CDRN/CCT/UFCG. 163p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 2005.

- FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T. MALMSTROM, C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing Environment*, 51, 74 – 88, 1995.
- GALVANI, E.; ESCOBEDO, J. F.; PEREIRA, A.B.; CAMPOS, C. J. Medidas e estimativa do albedo em cultura de pepineiro cultivado a campo e em ambiente protegido. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 163-169, 2000.
- GRANGER, R. J. Satellite-derived Estimates of Evapotranspiration in the Gediz Basin. *Journal of Hydrology*, v. 229, p. 70 – 76, 2000.
- HAFEEZ, M. e KHAN, S. Remote Sensing Application for Estimation of Irrigation Water Consumption in Liuyankou Irrigation System in China. *Modeling and Simulation Society of Australia and New Zealand*, www.wssanz.or.au, 2004.
- HALEY, J. e KRAMER, O. Nitrogen fertilizer management of cotton grown under drip irrigation in a grumusal. *Irrigation Science*, Heidelberg, v. 7, p. 62-72, 1986.
- HUETE, A. R.. Adjusting Vegetation Indices for Soil Influences. *International Agrophysics*. 3(3): 367-376, 1988.
- HUETE, A. R. & TUCKER, C. J. Investigation of soil influence in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 12 (6): 1223-1242. 1991.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. www.inmet.gov.br. Acessado em: 22 de maio de 2009.
- LI, H.; ZHENG, LI; LEI, YUPING; LI, CHUQIANG; LIU, ZHIJUN; ZHANG, S. Estimation of water consumption and crop water productivity of winter wheat in North China Plain using remote sensing technology *Agricultural Water Management*, v. 95, n°. 11, p. 1271-1278, 2008.
- LIU, H. e FOLKEN, T. A modied Bowen ratio method to determine sensible and latent heat fluxes. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 10, No. 1, 71-80 (February 2001).
- MA, Y-m., MENENTI, M., TSUKAMOTO, O., ISHIKAWA, H., WANG, J-m. & GAO, Q-z. Remote Sensing Parameterization of Regional Land Surface heat Fluxes Over Arid Area in Northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 57, p. 117 – 133, 2004.
- MARKHAM, B. L. & BAKER, J. L. Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectance and At-Satellite Temperatures. *EOSAT Landsat Tech*, 1986.
- MENENTI, M.; JIA, L.; SU, Z. On SEBI-SEBS validation in France, Italy, Spain, USA and China. *ICID Workshop on Remote Sensing of ET for Large Regions*, 17 september, 2003.
- MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal Applied of Ecology*, 9, 747 – 766, 1972.

- MORAN, M. S; RAHMAN, A. F; WASHBURNE, J. C; GOODRICH, D. C; WELTZ, M. A; KUSTAS, W.P. Combining the Penman-Monteith equation with measurements of surface temperature and reflectance to estimate evaporation rates of semiarid grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 80, 87-109p. 1996.
- MOREIRA, M. A. Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2003.
- MOURA, M. S. B. Fenologia e consumo hídrico da Goiabeira (*Psidium Guajava L.*) irrigada. (Dissertação de Mestrado): DCA/CMM/UFPB. Campina Grande-PB. 128p.2001.
- NAGLER, P.L.; SCOTT, R.L.; WESTENBURG, C.; CLEVERLY, J.R.; GLENN, E.P.; HUETE, A.R. Evapotranspiration on Western U.S. Rivers Estimated Using the Enhanced Vegetation Index from MODIS and Data from Eddy Covariance and Bowen Ratio Flux Towers. *Remote Sensing of the Environment*, v. 97, p. 337-351, 2005.
- NAMAYANGA, N. L. Estimating terrestrial carbon sequestered in aboveground woody biomass from remotely sensed data (The use of SEBAL and CASA algorithms in a semi-arid area of Serowe-Botswana). International Institute for Geo-information Science and Earth Observation Enschede, The Netherlands. Thesis, 2002.
- NUNES FILHO, J.; SÁ, V. A. de L. e; OLIVEIRA JR., I. S. de; COUTINHO, J. L. B.; SANTOS, V. F. dos. Efeito de lâminas de irrigação sobre o rendimento e qualidade da fibra de cultivares de algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum L. r. latifolium Hutch.*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 3, p. 295-299. Campina Grande-PB, DEAg/UFPB, 1998.
- OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of a cotton plant. In: CIA, E. Et al. *Cultura do algodoeiro*. Piracicaba: Potafos, 286 p, 1999.
- PAYAN, J. G.; WATTS, C. J. The use of remote sensing for estimating ET of irrigated wheat and cotton in Northwest Mexico. *Irrigation and Drainage Systems*, v. 19, p. 301–320, 2005.
- PAULSON, C. A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmosphere surface layer. *Application Meteorology*, 9: 857 – 861, 1970.
- RADIN, J. W.; MAUNEY, J. R.; GUINN, G. Effects of N fertility on plant water relations and stomatal responses to water stress in irrigated cotton. *Crop Science*, Madison, v. 25, n. 1, p. 110-115, 1985.
- ROERINK, G. J., SU Z. e MENENTI, M. A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, nº 25, p. 137 – 157, 2000.
- RODRIGUES, M. F. G. Necessidades hídricas, crescimento e desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, cultivar BRS 201. CDRN/CCT/UFCG. 132p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB. 2003.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, USA, 1 – 371, 1974.

SAMARASINGHE, G. Growth and yields of Sri Lanka's major crops interpreted from public domain satellites. *Agriculture Water Management*, 58, 145 – 157, 2003.

SECKLER, D.; AMERASINGHE, U; MOLDEN, D. de SILVA, R. BARKER, R. World water demand and supply, 1990 to 2025: scenarios and issues. Research Report 19, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 40 p.1998.

SEI. Informações geo-ambientais. Disponível em: www.sei.ba.gov.br/geoambientais. Acessado em: julho de 2008.

SILVA, V. P. R. Estimativas das necessidades hídricas da mangueira. Campina Grande-UFPB-CDRN. Tese de Doutorado em Recursos Naturais- Curso de Doutorado em Recursos Naturais. Centro de Ciências e Tecnologia. 129p., 2000.

SILVA, B. B. da.; LOPES, G. M.; AZEVEDO P. V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5-TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 20, n. 2, p. 243 – 252, 2005b.

SILVA, L. D. B.; FOLEGATTI, M. V.; NOVA, N. A. V. Evapotranspiração do capim tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.25, n.3, p.705-712, set./dez. 2005.

SILVA, B. B. da.; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM – Landsat 5. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. v. 14, n. 2, p.174-186, 2006.

SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. Surface energy fluxes and evapotranspiration of a mango orchard grown in a semiarid environment. *American Society of Agronomy. Agronomy Journal*, 99: 1391-1396, 2007.

SOBRINO, J. A.; GÓMEZ, M.; JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; OLIOSO, A.; CHEHBOUNI, G. A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: Application to the DAISEX campaigns. *Journal of hydrology*, 315, 117-125, 2005.

SU, Z e JACOBS, C.(Eds). *Advanced Earth Observation – Land Surface Climate*. Report USP – 2, 01 – 02, Publications of the National Remote Sensing Board (BCRS), 183p, 2001.

SU, Z. A Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heatfluxes. *hydrology earth system. Sci.* 6 (1), 85 - 99, 2002.

TASUMI, M. Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. University of Idaho (USA). 355 p., 2003.

TASUMI. M.; TREZZA, R.; ALLEN, R.G.; WRIGHT, J.L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. *Irrigation and Drainage Systems*, v. 19, p.355–376, 2005a.

TASUMI, M., TREZZA, R., ALLEN, R. G., and WRIGHT, J. L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. *Irrig. Drain. Syst.*, 19, 355-376, 2005b.

TASUMI, M., TREZZA, R. Satellite-based ET mapping to assess variation in ET with timing of crop development. *Agricultural Water Management*, 88, 54 – 62, 2007.

TEIXEIRA, A. H. C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, n. 1, p. 28-32, Campina Grande – PB, DEAg/UFPB, 2001.

TEXEIRA, A. H. C.; BASSOI, L. H.; 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 - SP, v. 25, n. 3, p. 457 – 460, dezembro 2003.

TEXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; BASSOI, L.H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the São Francisco river basin, Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology* 94, 31 – 42, 2007.

TEXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D., MOURA, M.S.B.; BOS, M.G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology*, 362, 110– 127, 2008a.

TEXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; MOURA, M.S.B.; J.M. SOARES AHMAD, M.D., BOS, M.G. Energy and water balance measurements for water productivity analysis in irrigated mango trees, Northeast Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology* 148 () 1524 – 1537, 2008b.

TEXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D., BOS, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration e validation. *Agricultural and forest meteorology* 149, 462 – 476, 2009.

TEXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSSEN, W.G.M.; AHMAD, M.D., BOS, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the regional scale. *Agricultural and forest meteorology* 149, 477 – 490, 2009.

THORNTHWAITE, W.C.; HOLZMAN, B. Measurement of evaporation from land and water surface. Washington: U.S. Department of Agriculture, (Technical Bulletin, 817-B), p. 4-11, 1944.

TREZZA, R. Estimation of Crop Water Use from Satellite-Based Surface Energy Balance Models for Water Management in Irrigation Districts in Venezuela, South America. *Earth observation for Vegetation Monitoring and Water Management*, 2005.

WANG, J.; SAMMIS, C. A.; MEIER, L.; SIMMONS, D. R.; SAMANI, Z. A modified SEBAL model for spatially estimating pecan consumptive water use for Las Cruces, New Mexico. *Applied Climatology in Agriculture and Natural Resources*. Session 7,

2005. Disponível em: <http://ams.cofex.com/ams/pdfpapers/92012.pdf>. Acesso em: 13 de Julho de 2007.

WALSH, S. J., MOODY, A., ALLEN, T. R., and BRAOWN, D.G. Scale dependence of NDVI and its relationship to mountainous terrain. In D. A. Quattrochi, & M. F. Goodchild (Eds), *Scale in Remote Sensing and GIS* (pp. 27-55). Boca Raton, FL: Lewis Publishers. 1997.

WEBB, E. K. Profile relationships: the log-linear range, and extension to strong stability. *Quart. J. Roy. Meteorology Society*, 96: 67 – 90, 1970.

WELIGEPOLAGE, K. Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remote sensing: A case study in Hupselse Beek, The Netherlands. ITC – International Institute for Geo-information Science and Earth Observation Enschede, Thesis, 2005.

ZWART, S. J., BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL for detecting spatial variation of water productivity and scope for improvement in eight irrigated wheat systems. *Agricultural Water management*, 95, 11 – 24, 2008.