



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



# PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

## Tese de Doutorado

OBTENÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS E  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR MEDIANTE  
IMAGENS ORBITAIS NA REGIÃO DO SUB MÉDIO SÃO FRANCISCO

VANDA MARIA DE LIRA

Campina Grande  
Paraíba



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**  
**PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**



**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS E**  
**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR MEDIANTE**  
**IMAGENS ORBITAIS NA REGIÃO DO SUB MÉDIO SÃO FRANCISCO**

TESE DE DOUTORADO

**VANDA MARIA DE LIRA**

Engenheira Agrícola

Campina Grande-PB  
Julho - 2008

**VANDA MARIA DE LIRA**  
Engenheira Agrícola

**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS E  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR MEDIANTE  
IMAGENS ORBITAIS NA REGIÃO DO SUB MÉDIO SÃO FRANCISCO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Irrigação e Drenagem do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutor.

**Área de concentração: Irrigação e Drenagem**

Linha de Pesquisa: Manejo de Solo-Água-Planta

**Orientadores – Prof<sup>o</sup> Dr. Bernardo Barbosa da Silva**

**Prof<sup>o</sup> Dr. José Dantas Neto**

Campina Grande-PB, Julho - 2008



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

xxxx Lira Maria de, Vanda

Obtenção De Parâmetros Biofísicos E Evapotranspiração Da Cana-De-Açúcar  
Mediante Imagens Orbitais Na Região Do Sub Médio São Francisco// Vanda  
Maria de Lira — Campina Grande, 2008.

161f. il.

Referências.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) — Universidade Federal de  
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientador: Bernardo Barbosa da Silva  
José Dantas Neto

*1. Irrigação Agrícola*

1— Evapotranspiração - Sensoriamento 2— Produtividade da água 3— Cana-  
de-açúcar I— Título

CDU xxx.xx: xxx.xx



**PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE DA DOUTORANDA**

**VANDA MARIA DE LIRA**

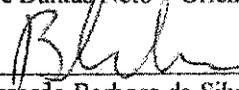
**OBTENÇÃO DE PARÂMETROS BIOFÍSICOS E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR  
MEDIANTE IMAGENS ORBITAIS NA REGIÃO DO SUB MÉDIO SÃO FRANCISCO**

BANCA EXAMINADORA

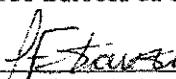
PARECER

  
\_\_\_\_\_  
Dr. José Dantas Neto - Orientador

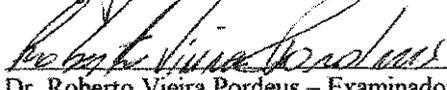
Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Bernardo Barbosa da Silva - Orientador

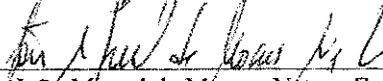
Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Inajá Francisco de Sousa - Examinador

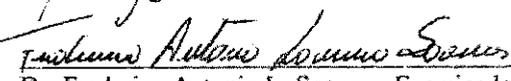
Aprovado

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Roberto Vieira Pordeus - Examinador

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Dr. João Miguel de Moraes Neto - Examinador

APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Frederico Antonio L. Soares - Examinador

APROVADO

JULHO - 2008

*Com coisas tremendas de justiça nos responderás ó Deus da nossa salvação; tu és a esperança de todas as extremidades da terra, e daqueles que estão longe sobre o mar. Ó que pela sua força consolida os montes, cingindo de fortaleza. Ó que aplaca o ruído dos mares, o ruído das suas ondas, e o tumulto das gentes. E os que habitam nos fins da terra temem os teus sinais; tu fazes alegres as saídas da manhã e da tarde. Tu visitas a terra, e a refrescas, tu a enriqueces grandemente com o rio de Deus que está cheio d'água, tu lhe dás o trigo quando assim a tens preparada. Enches d'água os seus sulcos, regulando a sua altura; amolece-la com a muita chuva e abençoa as suas novidades. Coroas o ano da tua bondade e as tuas veredas destilam gordura. Destilam sobre as pastagens do deserto, os outeiros cingem-se de alegria. Os campos cobrem-se de rebanhos e os vales vestem-se de trigo; por isso eles se regozijam e cantam.*

*Salm 65:5-13*

Água que nasce na fonte serena do mundo  
E que abre o profundo grotão  
Água que faz inocente riacho e deságua  
Na corrente do ribeirão  
Águas escuras dos rios  
Que levam a fertilidade ao sertão  
Águas que banham aldeias  
E matam a sede da população  
Águas que caem das pedras  
No véu das cascatas ronca de trovão  
E depois dormem tranqüilas  
No leito dos lagos, no leito dos lagos  
Água dos igarapés onde Jôra mãe d'água  
É misteriosa canção  
Água que o sol evapora  
pro céu vai embora  
Virar nuvens de algodão  
Gotas de água da chuva  
Alegre arco-íris sobre a plantação  
Gotas de água da chuva  
São tristes são lágrimas na inundação  
Águas que movem moinhos  
São as mesmas águas  
Que encharcam o chão  
E sempre voltam humildes  
Pro fundo da terra, pro fundo da terra  
Terra planeta água... terra planeta água  
Terra planeta água.

(Guilherme Arantes)

Aos meus irmãos **Vera Lúcia, Luiz Augusto** (*in memorian*), **Aderson Augusto e Verônica**, sobrinhos e sobrinhas, cunhados e cunhadas, pelo carinho.

## **OFEREÇO**

A meus pais, **Augusto Elói** (*in memorian*) e a **Luíza Lira**, mulher impar, pela incansável dedicação, carinho, apoio e perseverança.

## **DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, o mais Sábio dos sábios, Mestre dos mestres, que diante da Sua infinita bondade e poder vejo abençoada a minha vida e o cumprimento de mais uma meta. Que sejam também abençoadas as conquistas que se seguirão e que em outro momento, num futuro não muito distante eu possa contemplar o conteúdo destas páginas e com alegria no coração poder dizer: Valeu a pena!

Ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, em especial a coordenadora Josivanda Palmeira.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pelo suporte financeiro durante o curso.

Especial agradecimento aos professores Dr. **Bernardo Barbosa da Silva** e Dr. **José Dantas Neto** pela orientação, paciência, apoio e compreensão durante a realização deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos; em especial aos professores: Dr. **Hugo Orlando** pelo apoio material e amizade, ao Dr. **Marx Prestes Barbosa** por todas as informações prestadas e ao Dr. **Carlos Azevedo** por todo incentivo e empenho para o meu ingresso neste Programa.

A Embrapa Semi-Árido (CPATSA), em especial a Dr<sup>a</sup> **Magna Soelma Bezerra de Moura**, pelos dados e informações concedidos.

A AGROVALE e ao Engenheiro Agrônomo **Walter Farias**, por todas as informações de campo.

Ao professor Dr. **Hamilton Medeiros de Azevedo** e ao Engenheiro Agrônomo **Edmilsom Marcondes dos Santos**, por todos os ensinamentos, os quais foram marcantes na minha vida profissional.

Ao professor de la Universidad de Los Andes, Dr. **Ricardo Trezza**, pelo envio de material didático.

A **Christian Kox**, por todo o carinho e incentivo para conclusão deste trabalho.

Aos meus eternos amigos e companheiros: **Cruz Ramón, Euler Franco, Germana Gonzaga, Germana Paula, Maria Minervina** e **Maria Sallydelândia**, pelo constante incentivo e exemplo de amizade.

Aos meus amigos de curso: **Cláudia Germana (in memorian), Eliezer Siqueira, Francisco Jardel, Francisco Carolino, Francisca Magnólia, Frederico Antônio, Genival Barros, Gustavo Henrique, José Lins, Manassés Mesquita, Maria Betânia, Mário Cavalcanti, Ridelson Farias, Severino Pereira, Soahd Rached**, pelos bons momentos compartilhados.

Aos professores Dr. **Antônio Ricardo**, Dr. **Daniel Duarte**, Dr. **Renilson Targino** pela assistência e amizade.

Aos futuros doutores em Meteorologia: **Bergson Barbosa, Carlos Antonio, Marcus Vinicius e Saulo de Tasso**, pelo exemplo de colaboração, companheirismo e profissionalismo.

A **Rivanilda Diniz e Maria Aparecida**, secretárias do programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e **Divanete Farias**, secretária do programa de Pós-Graduação em Meteorologia.

Aos amigos de adolescência **Demétrio Gonçalves, Gilmar Barbosa, Irllys Brayner, Nadege Dantas, Solange Barbosa**, pelos bons e inesquecíveis momentos compartilhados.

Àqueles que todos os dias trazem muitas alegrias ao Laboratório de Irrigação e Drenagem, Sr. **Geraldo Silva**, Srta. **Maria Neide** e Sra. **Marlene Melo**.

A **Maria Araújo (Preta)** pelo enorme carinho e colaboração.

E a todas aquelas pessoas, muito especiais, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, a minha eterna gratidão!

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

RESUMO

ABSTRACT

1 - INTRODUÇÃO.....	21
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1 - A importância da agricultura irrigada.....	24
2.2 - Manejo da água na irrigação.....	25
2.3 - A técnica do sensoriamento remoto.....	27
2.4 - Necessidade hídrica das culturas.....	29
2.5 - Evapotranspiração.....	30
2.5.1 - Fatores determinantes da evapotranspiração.....	34
2.6 - Estimativa da evapotranspiração.....	35
2.7 - Evapotranspiração estimada a partir de dados orbitais.....	40
2.8 - O algoritmo SEBAL/METRIC.....	41
2.9 - A produtividade da água como indicador da agricultura irrigada.....	45
2.10 - O agronegócio da cana-de-açúcar.....	48
3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	52
3.1 - Material.....	52
3.1.1 - Caracterização da área de estudo.....	52
3.1.2 - Imagens de satélite.....	52
3.2 - Métodos.....	54
3.2.1 - Evapotranspiração da cultura.....	54
3.2.2 - Radiância espectral.....	56
3.2.3 - Reflectância monocromática planetária.....	58
3.2.4 - Reflectância monocromática à superfície.....	59
3.2.5 - Albedo de superfície.....	61
3.2.6 - Índices de vegetação.....	62
3.2.7 - Emissividade termal e superficial.....	63
3.2.8 - Temperatura da superfície.....	64
3.2.9 - Radiância termal da superfície corrigida.....	64

3.2.10 - Radiação de onda longa emitida.....	65
3.2.11 - Radiação de onda longa incidente.....	65
3.2.12 - Radiação de onda curta incidente.....	66
3.2.13 - Saldo de radiação.....	67
3.2.14 - Fluxo de calor no solo.....	67
3.2.15 - Fluxo de calor sensível.....	68
3.2.15a - Coeficiente de rugosidade da superfície.....	69
3.2.15b - Velocidade de fricção.....	70
3.2.15c - Velocidade de fricção para cada pixel.....	71
3.2.15d - Resistência aerodinâmica.....	71
3.2.15e - Correção da instabilidade atmosférica, velocidade de fricção e resistência aerodinâmica.....	73
3.2.16 - Fluxo de calor latente, fração evaporativa, umidade volumétrica do solo, evapotranspiração instantânea e fração evapotranspirativa.....	76
3.2.17 - Evapotranspiração diária.....	78
3.2.18 - Radiação fotossinteticamente ativa absorvida, uso eficiente da luz, biomassa fresca total diária, bioprodutividade .....	78
3.2.19 - Produtividade da água.....	82
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	83
4.1 - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI.....	85
4.2 - Valores instantâneos dos componentes do balanço de energia.....	93
4.3 - Umidade volumétrica do solo.....	99
4.4 - Evapotranspiração instantânea.....	107
4.5 - Fração evapotranspirativa.....	108
4.6 - Evapotranspiração real diária.....	113
4.7 - Evapotranspiração sazonal.....	125
4.8 - Biomassa fresca diária.....	126
4.9 - Bioprodutividade.....	134
4.10 - Produtividade da água.....	136
4.11 - Algoritmo SEBAL/METRIC - validação.....	138
5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	143
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145
7 - APÊNDICES.....	157

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Área cultivada e produção agrícola mundial.....	25
Figura 2.2	Processo evapotranspirativo.....	31
Figura 2.3	Balanco de energia à superfície.....	41
Figura 3.1	Espectro Espectro eletromagnético da radiação solar à superfície e posicionamento das bandas reflectivas do TM-Landsat 5.eletromagnético do sensor TM.....	53
Figura 3.2	Imagem da área de estudo em combinação das bandas RGB 4, 3 e 2, imageada em 30.07.2006.....	54
Figura 3.3	Estação meteorológica da Agrovale.....	55
Figura 3.4	Torre micrometeorológica instalada na área experimental.....	56
Figura 3.5	Diagrama com as etapas de obtenção da evapotranspiração.....	57
Figura 4.1a	Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	86
Figura 4.1b	Histograma de frequência do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	86
Figura 4.2a	Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	87
Figura 4.2b	Histograma de frequência do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	87
Figura 4.3a	Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.....	88
Figura 4.3b	Histograma de frequência do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 15 de outubro de 2005, Doa = 288.....	88
Figura 4.4a	Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	89
Figura 4.4b	Histograma de frequência do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	89
Figura 4.5a	Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	90
Figura 4.5b	Histograma de frequência do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	90
Figura 4.6	Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	100
Figura 4.7	Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	100
Figura 4.8	Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.....	101
Figura 4.9	Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> ) para o dia 22 de julho de 2006, doa = 211.....	101

Figura 4.10	Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	102
Figura4.11.1	Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	104
Figura4.11.2	Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	104
Figura4.11.3	Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.....	105
Figura4.11.4	Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	105
Figura4.11.5	Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	106
Figura 4.12	Valores máximo, médio e mínimo da evapotranspiração instantânea....	107
Figura 4.13	Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	108
Figura 4.14	Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	109
Figura 4.15	Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.....	110
Figura 4.16	Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	110
Figura 4.17	Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	111
Figura 4.18	Valores médios instantâneos da evapotranspiração ( $\text{mm h}^{-1}$ ), fração evapotranspirativa e evapotranspiração de referência ( $\text{mm h}^{-1}$ ) da área de cana-de-açúcar.....	112
Figura 4.19	Evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) dos dias estudados.....	114
Figura 4.20	Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	115
Figura 4.21	Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	116
Figura 4.22	Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.....	117
Figura 4.23	Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	117
Figura 4.24	Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	118
Figura4.25.1	Variação espacial da evapotranspiração real para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	120
Figura4.25.2	Variação espacial da evapotranspiração real para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	120
Figura4.25.3	Variação espacial da evapotranspiração real para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.....	121

Figura4.25.4	Variação espacial da evapotranspiração real para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	121
Figura4.25.5	Variação espacial da evapotranspiração para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	122
Figura4.26.1	Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	123
Figura4.26.2	Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	123
Figura4.26.3	Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para dia 15 de outubro de 2005, doa = 286.....	124
Figura4.26.4	Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	124
Figura4.26.5	Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	125
Figura 4.27	Mapa temático da evapotranspiração sazonal da área cultivada com cana-de-açúcar (julho/2006 a janeiro/2007).....	126
Figura 4.28	Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) dos dias estudados.....	127
Figura 4.29a	Mapa temático da radiação fotossinteticamente ativa absorvida para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	129
Figura 4.29b	Mapa temático da biomassa fresca total para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	129
Figura 4.30a	Mapa temático da radiação fotossinteticamente ativa absorvida para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	129
Figura 4.30b	Mapa temático da biomassa fresca total para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	129
Figura 4.31a	Mapa temático da radiação fotossinteticamente ativa absorvida para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.....	130
Figura 4.31b	Mapa temático da biomassa fresca total para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.....	130
Figura 4.32a	Mapa temático da radiação fotossinteticamente ativa absorvida para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	130
Figura 4.32b	Mapa temático da biomassa fresca total para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	130
Figura 4.33a	Mapa temático da radiação fotossinteticamente ativa absorvida para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	131
Figura 4.33b	Mapa temático da biomassa fresca total para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	131
Figura4.34.1	Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.....	132
Figura4.34.2	Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.....	133
Figura4.34.3	Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.....	133
Figura4.34.4	Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	133
Figura4.34.5	Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.....	134
Figura 4.35	Mapa temático da bioprodutividade para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.....	135

Figura 4.36	Mapa temático da produtividade da água para o dia 30 de julho de 2006, $doa = 211$ .....	137
Figura 4.37	Evapotranspiração instantânea ( $mm\ h^{-1}$ ) estimada pelo SEBAL/METRIC e medida na área cultivada com cana-de-açúcar.....	139
Figura 4.38	Evapotranspiração diária ( $mm\ dia^{-1}$ ) estimada pelo SEBAL/METRIC e medida na área cultivada com cana-de-açúcar.....	139
Figura 4.39a	Valores instantâneos dos componentes do Balanço de Radiação estimados pelo METRIC e medidos na área cultivada com cana-de-açúcar em 30 de julho de 2006.....	140
Figura 4.39b	Valores instantâneos dos componentes do Balanço de Radiação estimados pelo METRIC e medidos na área cultivada com cana-de-açúcar em 22 de janeiro de 2007.....	141

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Características das imagens TM-Landsat 5.....	53
Tabela 3.2	Bandas espectrais do sensor TM-Landsat 5, faixa espectral e respectivos coeficientes de calibração, segundo Chander & Markhan (2003), para imagens obtidas após 4 de maio de 2003.....	58
Tabela 3.3	Datas das imagens, ordem do dia no ano (doa), inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol (dr) e cosseno do ângulo zenital (cos $\theta$ ).....	59
Tabela 3.4	Valores das constantes $C_1 - C_5$ , $C_i$ e $W_i$ para uso com imagens Landsat....	61
Tabela 4.1	Valores de $\tau_{in}$ , $\tau_{out}$ e $\rho_{atm}$ das imagens estudadas.....	84
Tabela 4.2	NDVI máximo, médio e mínimo das áreas I e II.....	91
Tabela 4.3	Valores de $T_a$ ( $^{\circ}C$ ), $W$ (mm), $P$ (kPa), $R_{SKY}$ , $\cos \theta_{hor}$ e $\tau_{sw}$ para cada imagem.....	93
Tabela 4.4	Radiação de onda curta incidente $R_{s\downarrow}$ ( $W\ m^{-2}$ ) e radiação de onda longa incidente $R_{L\downarrow}$ ( $W\ m^{-2}$ ) no instante da obtenção das imagens selecionadas para o estudo.....	94
Tabela 4.5	Velocidade do vento medida na hora da passagem do satélite, velocidade de fricção ( $u^*$ ) e velocidade do vento a 100 m, das imagens estudadas.....	94
Tabela 4.6	Dados estatísticos do saldo de radiação ( $R_n$ ) instantâneo das imagens estudadas.....	95
Tabela 4.7	Dados estatísticos do fluxo de calor no solo ( $G$ ) instantâneo das imagens estudadas.....	96
Tabela 4.8	Dados estatísticos do fluxo de calor sensível ( $H$ ) instantâneo das imagens estudadas.....	97
Tabela 4.9	Dados estatísticos do fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ) instantânea das imagens estudadas.....	97
Tabela 4.10	Dados estatísticos da fração evaporativa ( $EF$ ) instantânea das imagens estudadas.....	98
Tabela 4.11	Evapotranspiração total da área irrigada com cana-de-açúcar.....	119
Tabela 4.12	Dados estatísticos da $ET_{SAZ}$ das áreas I e II.....	126
Tabela 4.13	Valores de $T_{opt}$ ( $^{\circ}C$ ), $T_{med}$ ( $^{\circ}C$ ), $T_1$ , $T_2$ , e $\tau_{sw}$ das imagens estudadas.....	127
Tabela 4.14	Valores máximo, médio e mínimo de $f$ e $\epsilon$ das imagens estudadas.....	128
Tabela 4.15	Quantidade de carbono estimada na área.....	136

## LISTA DE APÊNDICES

1	Valores instantâneos dos parâmetros e fluxos dos pixels frio e quente no dia 286 de 2004 - Passagem do satélite: 9:32 hs.....	157
2	Valores instantâneos dos parâmetros e fluxos dos pixels frio e quente no dia 311 de 2004 - Passagem do satélite: 9:33 hs.....	158
3	Valores instantâneos dos parâmetros e fluxos dos pixels frio e quente no dia 288 de 2005 -Passagem do satélite: 9:32 hs.....	159
4	Valores instantâneos dos parâmetros e fluxos dos pixels frio e quente no dia 211 de 2006 - Passagem do satélite: 9:41 hs.....	160
5	Valores instantâneos dos parâmetros e fluxos dos pixels frio e quente no dia 22 de 2007 - Passagem do satélite: 9:43 hs.....	161

## LISTA DE SIMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Definição</b>	<b>Unidade</b>
$\alpha_s$	Albedo de superfície	-
APAR	Radiação fotossintenticamente ativa absorvida	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
Bio <sub>dia</sub> <sup>tot</sup>	Biomassa fresca total diária	kg ha <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>
C <sub>1</sub> – C <sub>5</sub>	Constantes ajustadas para o satélite	-
c <sub>p</sub>	Calor específico do ar = 1004	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\Delta$	Tangente da curva de saturação do vapor da água	kPa °C <sup>-1</sup>
$\delta$	Declinação do sol	rad
doa	Ordem do dia no ano	-
dr	Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol	UA
dT	Diferença de temperatura próxima a superfície	°C
Es	Pressão de vapor de saturação na temperatura da superfície	kPa
e <sub>a</sub>	Pressão parcial do vapor d'água atmosférico	kPa
e <sup>o</sup> <sub>Tmin</sub>	Pressão de saturação do vapor com base na temperatura mínima	kPa
e <sup>o</sup> <sub>Tmax</sub>	Pressão de saturação do vapor com base na temperatura máxima	kPa
$\epsilon$	Uso eficiente da luz	G MJ <sup>-1</sup>
$\epsilon_a$	Emissividade atmosférica	-
$\epsilon_0$	Emissividade superficial	-
$\epsilon_{NB}$	Emissividade termal	-
ET <sub>inst</sub>	Evapotranspiração instantânea	mm h <sup>-1</sup>
ET <sub>r</sub>	Evapotranspiração de referência	mm dia <sup>-1</sup>
ET <sub>24</sub>	Evapotranspiração diária	mm dia <sup>-1</sup>
F <sub>ET<sub>r</sub></sub>	Fração evapotranspirativa de referência	-
f	Absorção da luz	-
G	Fluxo de calor no solo	W m <sup>-2</sup>

$G_{sc}$	Constante solar = 1367	$W m^{-2}$
$G$	Módulo do campo gravitacional terrestre = 9,81	$m s^{-2}$
$H$	Fluxo de calor sensível	$W m^{-2}$
$H$	Altura de referência	$m$
$h_{ind}^{dry}$	Índice de colheita	$kg kg^{-1}$
IAF	Índice de Área Foliar	-
$\phi$	Ângulo de elevação solar	rad
$\varphi$	Latitude	rad
$k$	Constante de von Karman = 0,41	-
$k_{\lambda}$	Irradiância solar espectral no topo da atmosfera	$W m^{-2} \mu m^{-1}$
$K_1$	Constante para banda 6 do Landsat 5	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
$K_2$	Constante para banda 6 do Landsat 5	K
$K_{\downarrow 24}$	Radiação solar diária	$MJ m^2 dia^{-1}$
$K_c$	Coeficiente da cultura	-
$K_t$	Coeficiente de turbidez	-
$K_{Ts}$	Condutividade termal do solo	$W m^{-1} K^{-1}$
$\lambda$	Calor latente de vaporização	$J kg^{-1}$
$L$	Comprimento de Monin-Obukhov	$m$
$LE$	Fluxo de calor latente	$W m^{-2}$
$L_{t6}$	Radiância espectral da banda 6	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
$L_r$	Radiância espectral	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
$L_{i,min}$	Constantes de calibração para o TM-Landsat 5	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
$L_{i,max}$	Constantes de calibração para o TM-Landsat 5	$W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$
$m_{oi}$	Fator de umidade	$kg kg^{-1}$
ND	Número digital	-
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada	-
$\eta$	Ângulo de visada do sensor perpendicular à superfície	rad

$\psi_m$	Transporte de momentum	-
$\psi_h$	Transporte de calor	-
P	Pressão atmosférica	kPa
$\partial T_s / \partial z$	Gradiente de temperatura	$^{\circ} \text{C/m}$
$\rho$	Densidade do ar úmido	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_w$	Densidade da água = 1000	$\text{kg m}^{-3}$
$\rho_t$	Reflectância monocromática planetária	-
$\rho_s$	Reflectância monocromática à superfície	-
$\rho_{atm}$	Reflectância atmosférica na banda i observada pelo satélite	-
$\rho_{toa}$	Reflectância no topo da atmosférica	-
PAR	Radiação fotossinteticamente ativa	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
PF	Pixel frio	-
PQ	Pixel quente	-
Ra24	Radiação extraterrestre diária	$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$
R <sub>C</sub>	Radiância termal corrigida	$\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$
R <sub>L↑</sub>	Radiação de onda longa emitida	$\text{W m}^{-2}$
R <sub>L↓</sub>	Radiação de onda longa incidente	$\text{W m}^{-2}$
R <sub>n</sub>	Saldo de radiação	$\text{W m}^{-2}$
R <sub>S↓</sub>	Radiação de onda curta incidente	$\text{W m}^{-2}$
R <sub>SKY</sub>	Radiação termal incidente para condições de céu claro	$\text{W m}^{-2}$
rah	Resistência aerodinâmica ao transporte de calor	$\text{s m}^{-1}$
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo	-
s	Slope	rad
$\theta_{rel}$	Ângulo de incidência solar	rad
$\theta_{hor}$	Ângulo zenital do sol	rad
$\theta_s$	Umidade volumétrica do solo	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$
$\tau_{in}$	Transmitância atmosférica da radiação solar incidente	-

$\tau_{out}$	Transmitância atmosférica da radiação solar refletida da superfície	-
$\tau_{SW}$	Transmissividade atmosférica	-
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8}$	$W m^{-2} K^{-4}$
$T_a$	Temperatura do ar	K
$T_s$	Temperatura da superfície	K
$T_{med}$	Temperatura média diária	$^{\circ}C$
$T_{opt}$	Temperatura referente ao maior valor de NDVI	$^{\circ}C$
$u_x$	Velocidade do vento	$m s^{-1}$
$u_*$	Velocidade de fricção	$m s^{-1}$
$u_{*cor}$	Velocidade de fricção corrigida	$m s^{-1}$
$u_{100}$	Velocidade do vento a 100 m	$m s^{-1}$
$UR_{min}$	Umidade relativa mínima	(%)
$UR_{max}$	Umidade relativa máxima	(%)
$z$	Altitude	m
$z_{om}$	Coefficiente de rugosidade da superfície	m
$z_{0m}$	Coefficiente de rugosidade ao transporte de momentum	m
$\omega$	Ângulo horário	rad
$W$	Água precipitável na atmosfera	mm
$WP_{ET}$	Produtividade da água	$kg m^{-3}$
$Y_B$	Bioprodutividade	$kg ha^{-1}$
$\gamma$	Constante psicométrica	$kPa ^{\circ}C^{-1}$

## RESUMO

A adoção de novas tecnologias tais como o sensoriamento remoto e sistema de informações geográficas têm sido de grande importância em estudos ambientais e em especial para o monitoramento de grandes áreas de cultivos irrigados, sobretudo com produtos comerciais. O uso sustentável dos recursos hídricos, face ao aumento competitivo de utilização da água, contribui para a expansão de mais áreas produtivas e assegura o fornecimento de alimentos em todo o mundo. Nos últimos anos vários algoritmos foram desenvolvidos para estimativa da evapotranspiração real das culturas através de dados remotos com base no balanço de energia à superfície e estes algoritmos têm sido aplicados e validados em diversas partes do mundo, inclusive no Brasil. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do uso de água na Agrovale a partir da estimativa da evapotranspiração real diária de toda a área cultivada com cana-de-açúcar, utilizando imagens TM-Landsat 5 e algoritmos SEBAL/METRIC. A área estudada está situada na região semi-árida do Nordeste brasileiro, às margens do Rio São Francisco, entre as coordenadas geográficas: latitude 8° 59' e 9° 50' S, longitude 39° 29' e 42° 30' W e altitude média de 389 m. Foram utilizadas imagens obtidas em 12 de outubro (doa = 286) e 13 de novembro (doa = 318) do ano de 2004, 15 de outubro de 2005 (doa = 288), 30 de julho de 2006 (doa = 211) e 22 de janeiro de 2007 (doa = 22). Além da evapotranspiração foram também estimados pelo modelo os parâmetros de umidade volumétrica do solo, a biomassa fresca, a bioprodutividade e a produtividade da água para os dias das imagens. A umidade volumétrica do solo foi estimada utilizando-se uma expressão em função da fração evaporativa e os valores obtidos apresentaram-se bastante uniformes e não se verificou distorções dos mesmos entre os dias estudados, apresentando, no entanto, maior variabilidade espacial nas áreas irrigadas por sulco. Os valores instantâneos dos componentes do balanço de energia e evapotranspiração real estimados pelo modelo foram validados com dados medidos na área pelo método da razão de Bowen em que o saldo de radiação ( $R_n$ ) e o fluxo de calor latente ( $\lambda LE$ ) apresentaram resultados bastante satisfatórios para os dias 211 do ano de 2006 e 22 do ano de 2007, com erro relativo da ordem de 9,20% entre os valores de  $R_n$  em 2006 e de 5,62% para os valores de  $\lambda LE$  referente ao dia 22 do ano de 2007. Os resultados do fluxo de calor sensível ( $H$ ) apresentaram diferenças significativas entre os valores estimados pelo modelo e os valores medidos, com erro relativo elevado nas duas datas. O fluxo de calor no solo foi a componente que apresentou maior discrepância entre os valores estimados e medidos em superfície. Os valores da evapotranspiração real estimado e medido apresentaram boa concordância e valores iguais a 5,85 mm dia<sup>-1</sup> e 7,96 mm dia<sup>-1</sup> estimados pelo modelo e de 4,70 mm dia<sup>-1</sup> e 6,43 mm dia<sup>-1</sup> medidos em superfície. Observa-se que os valores médios da produtividade da água estimados pelo modelo SEBAL/METRIC, para o dia 211 do ano de 2006, variaram entre 5,52 kg m<sup>-3</sup> e 7,40 kg m<sup>-3</sup>. Em todas as imagens os maiores valores dos parâmetros estimados foram identificados nas áreas irrigadas por pivô central, fato que pode estar relacionado à utilização permanente da irrigação e eficiência das práticas de manejo.

**Palavras chave:** Evapotranspiração real, cana-de-açúcar, sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

The new technologies application such as remote sensing and geographic information systems have been of great importance in environmental studies, specially to monitoring of large cropped irrigated areas, with trading products, meanly. The sustainable use of water resources in view to increase of the competitive water utilization which contributes to the expansion of much more productive areas, and thus making sure the food availability around world. In recent years several algorithms were developed to determine the crops actual evapotranspiration through remote sensing data obtained as a residual of the energy balance at the earth's surface, which have been applied and validated in many countries in world, including Brazil. The objective of this work was to evaluate the efficiency of water use in Agrovale as of actual daily evapotranspiration data estimated by TM-Landsat 5 images and SEBAL/METRIC algorithms for the whole sugarcane area. The studied area is located in Northeast of Brazil, in semi-arid region close to Sao Francisco River, (8° 59' and 9° 50' S; 39° 29' and 42° 30' W; 389 m). It was used five satellite images of TM-Landsat 5 sensor of 12<sup>th</sup> October 2004, 13<sup>th</sup> November 2004, 15<sup>th</sup> October 2005, 30<sup>th</sup> July 2006 and 22<sup>nd</sup> January 2005 of Sao Francisco region and the sugarcane irrigated area was delimited. For the days of images besides of the evapotranspiration, it was also evaluated by the model, the soil water content, fresh biomass, bioproductivity and water productivity parameters. The soil water content was estimated using evaporative fraction data and the values obtained presented uniformity and it was not observed distortion of them amongst the studied days, showing, however, higher spatial variability in the surface irrigated areas irrigated, furrow irrigation. The instantaneous values of the energy balance components and actual evapotranspiration estimated by the model were validated with data measured at surface by Bowen ratio method so that the net radiation (Rn) and latent heat flux ( $\lambda$ LE) showed satisfactory results for the days 211 of 2006 and 22 of 2007, presenting relative error around 9.20% between the values of Rn in 2006 and 5.62% for the values of  $\lambda$ LE referring to the day 22 of 2007. The sensible heat flux (H) results showed significant differences between the values estimated by the model and that ones measured at surface with high relative error in the two dates. The soil heat flux was the component that showed a greater discrepancy between the values estimated and measured at surface. The actual evapotranspiration values estimated and measured presented good agreement and values of 5.85 mm day<sup>-1</sup> and 7.96 mm day<sup>-1</sup> estimated by the model and 4.70 mm day<sup>-1</sup> and 6.43 mm day<sup>-1</sup> measured at surface. It observes which the averaged values of the water productivity estimated by the SEBAL/METRIC model in the day 211 of 2006 varied from 5,52 kg m<sup>-3</sup> to 7,40 kg m<sup>-3</sup>. In all images the highest values of the estimated parameters were identified in the center pivot irrigated areas, which may be related to permanent using of irrigation and efficient practice management.

**Key words:** Actual evapotranspiration, sugarcane, remote sensing.

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população mundial verificado nas últimas décadas demanda uma maior exploração dos solos agricultáveis devido à pressão cada vez maior de se produzir alimentos. Entretanto, grande parte das áreas produtivas se encontra em locais que apresentam condições climáticas adversas em virtude de índices elevados de temperatura e irregularidades pluviométricas, muito variáveis no tempo e espaço, o que compromete as áreas cultivadas.

Atualmente, os serviços agrometeorológicos têm sido essenciais à produção agrícola, no sentido de monitorar a variabilidade climática associada a eventos extremos do tempo que afetam as condições sócio-econômicas dos países, particularmente dos em desenvolvimento. No sentido de minimizar tal problema e proporcionar um aumento na produção dos cultivos, a prática da irrigação vem proporcionando a expansão e a incorporação de mais áreas irrigadas ao setor produtivo. Ademais, a água em conjunto com outros fatores agrometeorológicos, exerce influência direta na produtividade das culturas.

Em nível mundial, a agricultura irrigada é a atividade de maior utilização da água, demandando aproximadamente 70% dos recursos hídricos disponíveis, em muitos casos, com baixa eficiência do uso da água, com valor médio inferior a 40%. A FAO prevê que a irrigação nos países em desenvolvimento deverá crescer cerca de 20% até o ano de 2030 e por isso se faz necessário a utilização de sistemas mais eficientes de produção, ou seja, produzir mais alimentos utilizando menos água.

Durante séculos a humanidade considerou a água como um recurso inesgotável, e a utilizou de maneira predatória e insustentável. Nos dias atuais a possibilidade da falta de água tem sido uma preocupação em escala global, de modo que todos os países necessitam ponderar a quantidade de água destinada à produção de alimentos face à sua importância para a agricultura. Quando um país importa uma tonelada de grãos, também está importando na realidade e de forma “virtual” a água que foi utilizada para produção desse cultivo, permitindo a esses países importadores economizar tal recurso. Calcula-se que as importações de milho feitas no Egito no ano 2000 produziram uma economia de água nesse país em torno de 2.700 milhões de metros cúbicos. Em termos mundiais, a economia de água através das importações de alimentos é considerável e um cálculo inicial revela uma economia para os países importadores em torno de 385.000 milhões de metros cúbicos (FAO, 2003).

O Brasil possui uma das maiores reservas de água doce do planeta e ocupa posição de destaque na produção agrícola, notadamente em se tratando de cultivos comerciais. Atualmente, é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, cultura com elevada expressão econômica, devido à demanda de seus subprodutos e importante matéria-prima para a produção de biocombustível. Tal posição se justifica pelos altos índices de produtividade alcançados com a introdução da tecnologia da irrigação. Para tanto, se faz necessário que a produtividade da água se mantenha em altos patamares para preservar a estabilidade dos grandes e médios empreendimentos agrícolas, de modo que os mesmos se mantenham economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis.

A utilização de tecnologias de irrigação mais eficientes, que utilizem menor quantidade de água pode proporcionar maior expansão das áreas irrigadas, mesmo em locais onde este recurso é limitado. A produtividade da água na agricultura irrigada não deve ser entendida somente em termos de rendimento de grãos ou de biomassa, mas também em termos econômicos e sociais por volume de água utilizado em diferentes níveis dos sistemas de irrigação. Existem diversas metodologias para quantificar a distribuição e disponibilidade dos recursos hídricos, necessários para o manejo de áreas irrigadas. Dentre estas, a técnica do sensoriamento remoto é uma das mais indicadas para monitorar mudanças espaciais e temporais que possam ocorrer em grandes áreas. As imagens de satélites passaram a representar uma das formas mais viáveis de monitoramento ambiental em escala local e global, devido à rápida periodicidade e precisão de informações extraídas da superfície, contribuindo de forma positiva e eficiente para o planejamento e evolução dos grandes projetos de irrigação desenvolvidos no país.

O incremento da produtividade da água ou a eficiência do manejo da água de irrigação é alcançado quando a água utilizada pelas culturas é precisamente quantificada em função da evapotranspiração, que inclui a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas. A evapotranspiração varia regionalmente e sazonalmente de acordo com as condições climáticas e é um importante parâmetro no manejo dos recursos hídricos, notadamente em regiões áridas e semi-áridas onde o valor da água é bastante elevado (Allen, 2000). Monitorar a evapotranspiração eficientemente tornou-se um tema interdisciplinar entre os pesquisadores, já que a maioria das técnicas convencionais utiliza medidas pontuais para estimar a evapotranspiração em nível local, não sendo representativo para grandes áreas devido à dinâmica da natureza e variação regional.

Nas últimas décadas vários algoritmos, como SEBS (*Surface Energy Balance System*), SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), METRIC (*Mapping*

*Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration*) dentre outros, foram desenvolvidos para estimar a evapotranspiração real das culturas através de dados remotos com base no balanço de energia à superfície e têm sido aplicados e validados em diversos países do mundo. Tais modelos, baseados em dados remotos e poucos dados medidos em superfície, possibilitam obter com rapidez os parâmetros do sistema água-solo-planta-atmosfera de grandes áreas utilizando poucos parâmetros de superfície sem demandar extensivos e onerosos trabalhos em campo. Uma vantagem dos modelos SEBAL/METRIC para a estimativa de parâmetros de cultivos em ambientes semi-áridos reside no fato desses algoritmos terem sido validados e utilizados no mapeamento da evapotranspiração de cultivos irrigados em regiões sob condições advectivas.

Dentro deste contexto, o presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a eficiência do uso de água na AGROVALE, a partir da determinação da evapotranspiração real de toda a área plantada, com imagens TM-Landsat 5 e algoritmos SEBAL/METRIC.

## CAPÍTULO II

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

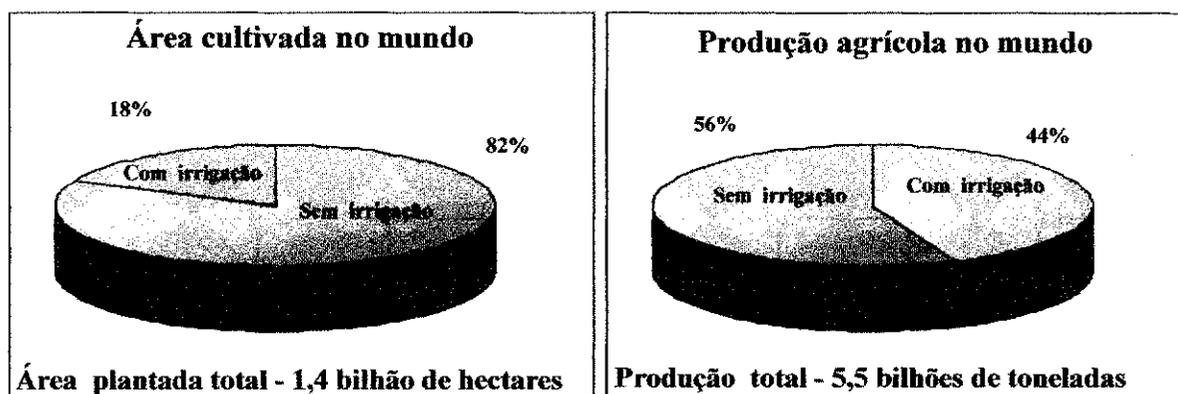
#### 2.1 - A importância da agricultura irrigada

A agricultura irrigada é uma técnica milenar que a exemplo de países como o Egito, a Índia e a China, vem sendo praticada há mais de 5.000 anos e está intimamente relacionada com o progresso econômico, cultural, artístico e social. A agricultura irrigada é responsável por mais de 40% das colheitas mundiais (Figura 2.1). No Brasil, em particular, a área irrigada corresponde a 18% da área destinada à exploração agrícola, mas contribui com 42% da produção total (Christofidis, 2002).

De acordo com Moraes & Jordão (2002), a população mundial duplicou nos últimos 60 anos, conduzindo a uma maior exploração dos solos agricultáveis devido à pressão cada vez maior de produção de alimentos. Atualmente, mais de 50% da população mundial depende de produtos irrigados. Por outro lado, os perímetros irrigados, por serem áreas de uso de uma tecnologia avançada, são indutores de várias outras atividades industriais e comerciais, promovendo uma dinamização da economia, circulando riquezas e gerando empregos. Estima-se que a agricultura irrigada brasileira seja responsável por 1,4 milhão de empregos diretos e 2,8 milhões de empregos indiretos, o que implica que cada hectare irrigado gera aproximadamente 1,5 emprego. O Brasil irriga menos de 3 milhões de hectares, o que corresponde a 5% da área cultivada, mas possui potencial para irrigar 16,1 milhões de hectares. Mantendo-se esses índices, a agricultura irrigada tem capacidade para empregar cerca de 24 milhões de pessoas no país (Christofidis, 1999).

Ainda segundo Christofidis (1999), a agricultura irrigada manejada adequadamente pode triplicar a produtividade de uma área; de modo contrário, se a irrigação não for manejada de modo eficiente, poderá provocar sérios danos ambientais, dentre eles: modificação do meio ambiente, consumo exagerado da disponibilidade hídrica da região, contaminação e assoreamento dos recursos hídricos, salinização do solo nas regiões áridas e semi-áridas e problemas de saúde pública, erosão dos solos dentre outros. Por isso se faz necessário a utilização de sistemas de irrigação que operem com a máxima eficiência. Reconhecer que a água é um recurso natural cada vez mais finito, implica na necessidade de se utilizar sistemas de produção mais eficientes, para garantir a sustentabilidade da agricultura

irrigada. A Lei 8.171/91, que dispõe sobre a Política Agrícola, define a irrigação como fator de bem-estar social de comunidades rurais.



**Figura 2.1** - Área cultivada e produção agrícola mundial.

Fonte: Adaptação: CODEFASF/ Ministério da Integração-2006.

Rebouças (1999) classifica a irrigação como obrigatória quando as condições edafo-climáticas assim determinam, é o caso de grandes extensões do semi-árido brasileiro onde a tecnologia da irrigação é necessária para assegurar a produção; e, como suplementar, quando embora as chuvas sejam suficientes, a irregularidade das precipitações acaba comprometendo o metabolismo das plantas e conseqüentemente, a produtividade da agricultura, caso que se enquadram diversas áreas agrícolas da região Sul.

Telles (1999) afirma que a irrigação no país pode ser dividida em três grupos: a irrigação “obrigatória” no Nordeste, irrigação “facilitada” no Rio Grande do Sul e irrigação “profissional” nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e parte do Sul. A irrigação “facilitada” é assim chamada devido à existência de extensas áreas planas próximas a áreas de grande disponibilidade hídrica. A chamada irrigação “profissional” é aquela na qual o agricultor investe em moderna tecnologia de irrigação, buscando o aumento da produtividade ou buscando duas ou mais colheitas no ano. Predomina a irrigação por aspersão mecanizada tipo pivô central, sistemas autopropelidos e de montagem direta – com pequenas áreas de aspersão convencional, e de irrigação localizada por gotejamento e microaspersão.

## 2.2 - Manejo da água na irrigação

De todos os setores produtivos, a agricultura irrigada é a atividade que mais consome água de boa qualidade. No entanto, uma vez introduzida, diminui a pressão pela abertura de

novas áreas de produção e assegura a constância no abastecimento de alimentos, tanto em termos de quantidade como de qualidade. Quando as técnicas de irrigação são utilizadas para suprir as demandas ou necessidades hídricas das culturas, mesmo na ausência de precipitação, os riscos de quebra de safra podem ser minimizados, com maior garantia de produção. Neste sentido, a irrigação constitui tecnologia que propicia grande eficiência da agricultura. Mesmo sendo uma técnica recomendada e utilizada em todo o mundo, nos últimos anos, a irrigação tem sido foco de sérias críticas, sobretudo no que se refere à quantidade de água utilizada em sistemas onde a água e a cultura são manejadas de forma inadequada, ou devido à falta de aprimoramento das tecnologias disponíveis. Mesmo sendo considerada a maior consumidora de água, a irrigação representa a maneira mais eficiente de aumento da produção de alimentos. Estima-se que, mundialmente, no ano de 2020, os índices de consumo de água para a produção agrícola sejam mais elevados na América do Sul, África e Austrália (Paz et al., 2000, citados por Medeiros, 2002).

Nascimento (2000) afirma que o consumo de água para fins agrícolas está estimado em 70% do total da água doce consumida no mundo. No que se refere especificamente à questão água, o Brasil, apesar de sua riqueza hídrica, também vem apresentando focos de escassez em alguns grandes centros. É o país mais rico em água potável, com 8% das reservas mundiais, concentrando 18% do potencial de água de superfície do planeta (Maia Neto, 1997). Além das descargas de superfície, o país possui aquíferos subterrâneos com volume da ordem de 112.000 km<sup>3</sup> (Andreoli, 2003). Apesar da situação aparentemente favorável, observa-se no Brasil uma desigualdade na distribuição regional dos recursos hídricos, ou seja: 70% para a região Norte, que detém a menor concentração populacional, 15% para o centro-oeste, 12% para as regiões Sul e Sudeste, que apresentam o maior consumo de água, e somente 3% para a região Nordeste. Região que além da carência de recursos hídricos, apresenta um regime pluviométrico irregular e baixa permeabilidade do terreno cristalino (Maia Neto, 1997). Deste modo, considerando em lugar de disponibilidade absoluta de recursos hídricos renováveis, àquela relativa à população que dele depende, o Brasil deixa de ser o primeiro e passa para o vigésimo terceiro no mundo (Projeto Água, 1998). Como a região Nordeste é caracterizada por baixas precipitações, altas taxas de evaporação e pouca disponibilidade de águas superficiais, as reservas hídricas subterrâneas constituem uma alternativa para abastecimento e produção agrícola irrigada.

Bowman et al. (1991) afirmam que uma irrigação deficiente pode acarretar perdas na produção, enquanto a aplicação de água em excesso além de prejudicar a produção pode significar desperdício de água e energia, podendo também contribuir para a lixiviação de

nutrientes e a erosão do solo. Nos perímetros irrigados esse problema ainda é maior, pois além da necessidade de proporcionar às áreas irrigadas, correspondentes a cada usuário, a quantidade de água requerida nos momentos em que for necessária, existe ainda a dificuldade de distribuição da água, uma vez que esses sistemas abrangem grandes áreas. Isso faz com que a eficiência global da irrigação seja quase sempre prejudicada, atingindo níveis geralmente inferiores àqueles observados em sistemas individuais.

No Brasil, até o ano de 2010, a agricultura irrigada deverá crescer no Centro-Oeste, Minas Gerais, Tocantins e Rondônia, podendo-se esperar um acréscimo de 250 a 300 mil hectares irrigados nessas regiões. Para o Nordeste espera-se uma adição de mais 100 mil hectares. Nas regiões Sul e Sudeste, o crescimento deve ser mínimo através de sistemas de irrigação localizada. Deve-se atingir perto dos 3.000.000 de hectares irrigados no país. Possíveis resultados governamentais de políticas de racionalização dos recursos hídricos não deverão ser significativos até aquele ano; então, as demandas de água para a irrigação terão praticamente os mesmos padrões de utilização atuais, podendo chegar a  $928,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Gineste, 2004). Em países em desenvolvimento, tais como a Índia, que atualmente possui um dos maiores potenciais de irrigação no mundo, a eficiência do uso da água é muito baixa, em torno de 20 a 40%, principalmente devido a manejos inadequados de irrigação, aplicação excessiva de água e conseqüentes perdas por percolação (Das, 1991).

### **2.3 - A técnica do sensoriamento remoto**

O termo sensoriamento remoto é utilizado para descrever a tecnologia que permite o estudo de algumas características de um objeto, sem que necessariamente se estabeleça contato com ele (Ferreira, 2006; Sausen, 2005). Para Lillesand & Kiefer (1995), sensoriamento remoto é a ciência e a arte de se obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno, por meio de análise de dados adquiridos por um sistema que não está em contato com esse objeto, área ou fenômeno sob investigação. A partir desta definição percebe-se que a obtenção de informações sobre objetos, áreas ou fenômenos, utilizando-se produtos de sensoriamento remoto só é possível através da análise de dados, ou seja, o da análise das relações entre alvos e a energia eletromagnética.

O sol é a principal fonte de energia eletromagnética utilizada no sensoriamento remoto e esta energia se propaga no vácuo com a velocidade de aproximadamente  $299.800 \text{ km s}^{-1}$ , possibilitando a transferência de informações, em altíssima velocidade, entre substâncias ou objetos de interesse e os sensores.

Os dados de sensoriamento remoto têm-se mostrado extremamente úteis para estudos e levantamentos de recursos naturais, principalmente por: sua visão sinótica que permite ver grandes extensões de área em uma imagem; sua resolução temporal, que permite a coleta de informações em diferentes épocas do ano e em anos distintos, o que facilita os estudos dinâmicos de uma região; sua resolução espectral, que permite a obtenção de informações sobre um alvo na natureza em distintas regiões do espectro, acrescentando assim uma infinidade de informações sobre o estado dele e sua resolução espacial, que possibilita a obtenção de informações em diferentes escalas, desde as regionais até locais (Sausen, 2005).

Os dados de sensoriamento remoto a partir de imagens de satélites proporcionam uma visão holística e multitemporal de grandes áreas da superfície terrestre, através das mesmas é possível observar todos os alvos e suas transformações temporais e espaciais, em especial os impactos causados por fenômenos naturais e atividades antrópicas. Os instrumentos de sensoriamento remoto podem observar vários locais simultaneamente e por isso esta técnica vem sendo utilizada na observação da variabilidade espacial dos processos da superfície terrestre, incluindo locais em que tais processos não podem ser observados por técnicas convencionais (Bastiaanssen et al., 1997).

Os satélites científicos têm favorecido, nos últimos anos, a realização de levantamentos à distância de variações físicas e químicas da superfície terrestre em áreas extensas e inóspitas, favorecendo, principalmente, os mapeamentos e monitoramentos sazonais da superfície da Terra. A composição espectral do fluxo radiante proveniente da superfície da Terra produz informações sobre propriedades físicas, químicas e biológicas de solos, vegetações e águas que caracterizam o sistema terrestre (Huete, 1988).

O sensoriamento remoto é uma tecnologia muito utilizada desde a década de 70, e esta tem trazido uma grande contribuição para o mapeamento e monitoramento dos recursos naturais, devido à sua visão sinótica e ao armazenamento da informação em formato digital, possibilitando sua análise com o uso de modernas técnicas computacionais (Guimarães et al., 2000, citados por Lira, 2006). Ainda segundo a autora, os sistemas de processamento digital de imagens possibilitam extrair informações das imagens orbitais, gerando mapas temáticos que evidenciam áreas degradadas, uso e ocupação do solo e de cobertura vegetal, os quais serão posteriormente utilizados, de forma a compor uma base de dados de um Sistema de Informações Geográficas.

A aplicação do sensoriamento remoto orbital, em conjunto com as técnicas de geoprocessamento, representa um avanço significativo na obtenção de informações sobre

dados da agricultura, por seu caráter multiespectral e temporal, seu custo e por ser uma tecnologia menos sujeita a erros de análise humana (Ramirez et al.,2006).

Nos últimos anos os satélites utilizados para avaliação dos recursos naturais sofreram sensíveis mudanças tecnológicas nos sensores, principalmente no que se refere às resoluções espacial e espectral. Estes avanços fizeram com que o sensoriamento remoto, baseado em medidas de reflectância espectral através das regiões do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético, se tornasse uma ferramenta de grande utilização, não somente no monitoramento dos recursos naturais, mas para o cômputo da evapotranspiração de grandes áreas, no mapeamento de solos salinizados, na estimativa da umidade volumétrica do solo, na estimativa do crescimento da biomassa e na obtenção de dados sobre a produtividade da água em áreas irrigadas.

#### **2.4 - Necessidade hídrica das culturas**

Necessidade hídrica é a quantidade de água requerida pela cultura durante o seu ciclo fenológico de modo a não limitar o seu crescimento, o seu desenvolvimento e a sua produção, sob as condições climáticas locais. Para Mannocchi & Mecarelli (1994), a água constitui o principal fator na produção agrícola, uma vez que toda planta necessita de um adequado suprimento a fim de atender suas necessidades fisiológicas. Sob o ponto de vista quantitativo, as plantas se comportam de maneira diferenciada em relação à quantidade mínima requerida de água, abaixo da qual a sobrevivência das mesmas é ameaçada. Para Oliveira et al. (2005) necessidade hídrica é a quantidade de água requerida pela cultura, em determinado período de tempo, de modo a não limitar seu crescimento e sua produção, nas condições climáticas locais, ou seja, é a quantidade de água necessária para atender à evapotranspiração e, se necessário, a lixiviação dos sais do solo.

Bernardo et al. (2005) afirma que a quantidade de água evapotranspirada depende principalmente da planta, do solo e do clima, sendo este último fator predominante sobre os demais, de modo que a quantidade de água requerida por uma cultura varia com a extensão da área coberta pelo vegetal e com as estações do ano.

Os dados de clima são fatores diretamente relacionados com a demanda atmosférica, e a possibilidade de se estimar corretamente a necessidade hídrica das culturas a partir desses fatores se faz necessário para a produção agrícola, manejo dos recursos hídricos e estudos ambientais. Sua estimativa é de extrema importância em regiões áridas e semi-áridas para a

determinação das necessidades de água para as culturas, como também para o dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação.

Estudos que determinam a real necessidade hídrica das culturas possibilitam a aquisição de conhecimentos que proporcionem melhor controle do aproveitamento de grandes reservatórios, racionalizando a demanda de água para fins industriais, domésticos e agrícolas. Também torna possível quantificar melhor as lâminas de água usadas na irrigação e os turnos de rega, minimizando os desperdícios e mantendo o solo em uma faixa de umidade adequada às plantas. Para o mesmo, o estudo da evaporação e da evapotranspiração é de extrema importância, mesmo quando são considerados apenas aspectos puramente meteorológicos (Varejão Silva, 2005).

## **2.5 - Evapotranspiração**

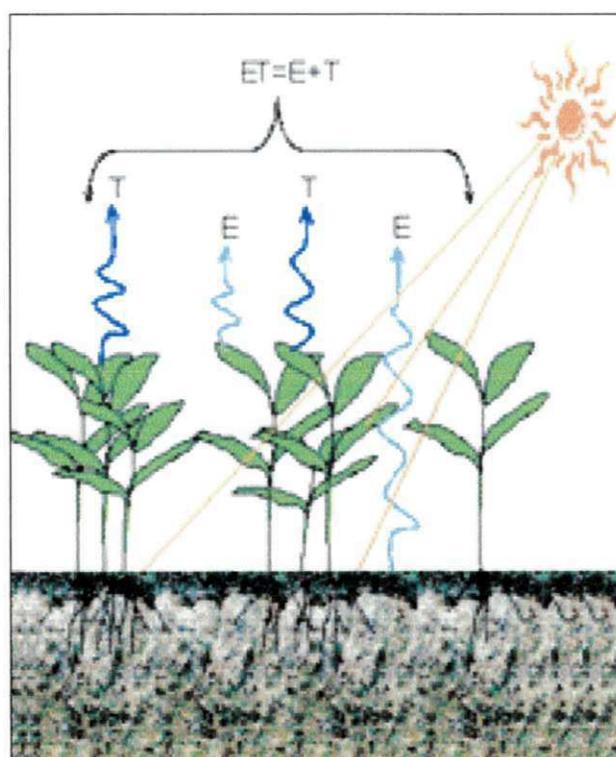
A evapotranspiração é um dos mais importantes componentes do ciclo hidrológico. Representa a quantidade de água, da superfície e do solo que retorna para a atmosfera em forma de vapor, através de processos físicos, e a transpiração das plantas por meio dos estômatos, também em forma de vapor, devido a fenômenos físicos e biológicos. Embora independentes esses processos ocorrem simultaneamente originando o termo evapotranspiração, conforme ilustrado na Figura 2.2.

A determinação da evapotranspiração é de grande importância para o planejamento de bacias hidrográficas e gestão dos recursos hídricos. O conceito de evapotranspiração é similar ao uso consuntivo que inclui a evaporação da água do solo e dos corpos d'água e a transpiração das plantas.

Segundo Camargo & Camargo (2000) o conceito de evapotranspiração foi introduzido pela primeira vez no início dos anos 40 por Thornthwaite et al. (1944) como sendo a ocorrência simultânea dos processos da evaporação e de transpiração, em superfícies vegetadas. Alguns anos mais tarde, Thornthwaite (1948) definiu como potencial (ETp) a evapotranspiração que ocorre nas seguintes condições de contorno: extensa superfície vegetada cobrindo totalmente o solo, em crescimento ativo e sem restrição hídrica, de modo que somente o balanço vertical de energia interfira no processo. No mesmo ano Penman também definiu a ETp, e posteriormente, utilizou o déficit de saturação do ar no termo aerodinâmico da equação geral para estimar a evaporação potencial em superfície natural de água. Para obter a transpiração potencial em superfície gramada propôs um fator de redução, variável de 0,6 a 0,8 no curso do ano e de região para região, e também uma adaptação da

equação para obter diretamente a transpiração potencial em gramado. O método de Penman é de natureza puramente física, embora tenha aspectos empíricos por utilizar a temperatura do ar em lugar da temperatura da superfície evaporante, como é empregada na clássica equação de Dalton.

Ainda segundo Camargo & Camargo (2000), a evapotranspiração potencial corresponde ao processo de transferência da água do solo para a atmosfera, ou a passagem da água do estado líquido para o gasoso. Tal processo requer suprimento de energia, e a única fonte disponível para isso é a radiação solar. Quando a umidade no solo é suficiente, a evapotranspiração potencial depende apenas do suprimento de energia solar.



**Figura 2.2** - Processo evapotranspirativo

Conforme citado por Bristot (1999), a evapotranspiração pode ser definida como a evaporação de toda a superfície de certo local mais a transpiração das plantas. Diz ainda que a evapotranspiração seja o mesmo que o uso consuntivo de água pelas plantas, quando desprezadas a quantidade de água usada nas atividades metabólicas, pois para a maioria das culturas agrícolas a quantidade de água retida é insignificante quando comparado com a evapotranspiração total das plantas.

Para Moura (2005), a definição da evapotranspiração sob o ponto de vista energético, pode ser considerada como a energia utilizada para transferir água da superfície do solo úmido e do interior das plantas para a atmosfera, sob a forma de vapor e é medida como densidade de fluxo de energia ( $W m^{-2}$ ).

A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de água do solo às plantas. No sentido de padronizar a evapotranspiração de comunidades vegetais, foram fixadas as condições nas quais sua medida deve ser feita. O conceito de evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) foi introduzido para estudar a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e de cobertura vegetal, pois quando a água é fartamente disponível para a cultura de referência, os fatores do solo não afetarão a evapotranspiração. Os valores de ET<sub>o</sub> medidos ou calculados em diferentes locais ou em diferentes épocas são comparáveis quando se referem à evapotranspiração da mesma superfície de referência. Os únicos fatores que afetam a ET<sub>o</sub> são os elementos do tempo de modo que a ET<sub>o</sub> é um parâmetro do tempo e clima e pode ser estimada a partir de dados a depender da escala temporal do clima. A ET<sub>o</sub> expressa a demanda evaporativa da atmosfera de um local específico e período do ano sem considerar as características da cultura e fatores do solo. O método de Penman-Monteith/FAO é recomendado como padrão para determinação da evapotranspiração de referência, tem embasamento físico e explicitamente incorpora os parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos (Allen et al., 1998). As culturas utilizadas como referência são a grama e a alfafa. De acordo com Doorenbos & Pruitt (1977), o valor da evapotranspiração de referência obtido com alfafa pode diferir daquele obtido com a grama em virtude do albedo e da rugosidade das duas superfícies, se as áreas cultivadas forem suficientemente extensas.

Bernardo et al. (2005) definem evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), como a evapotranspiração de determinada cultura, sob as condições normais de cultivo, isto é, sem a obrigatoriedade de o teor de umidade permanecer sempre próximo à capacidade de campo. Allen et al. (1998) apresentaram um conceito para evapotranspiração da cultura sob condição padrão e não padrão. A evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) em condição padrão, é a evapotranspiração de uma cultura livre de pragas, doenças e ervas daninhas, bem fertilizada, que se desenvolve em grandes áreas sob ótimas condições hídricas e que alcança o pleno potencial de produção sob determinadas condições climáticas. Neste caso a ET<sub>c</sub> pode ser calculada a partir de dados climáticos e integrar diretamente os fatores referentes à resistência da cultura ao albedo e à resistência do ar no método de Penman-Monteith. A evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) em condição não padrão é a evapotranspiração de culturas

que se desenvolvem sob condições ambientais e de manejo diferentes da condição padrão. Quando uma cultura é conduzida no campo, a evapotranspiração real da cultura pode diferir da ETc, porque ocorrem desvios da condição ótima, tais como: presença de pragas e doenças, salinidade e infertilidade do solo, déficit hídrico ou encharcamento. O que resulta em mau crescimento e baixa densidade de plantas e também pode reduzir a taxa da evapotranspiração abaixo da ETc. A evapotranspiração da cultura sob condições não padrão é calculada utilizando um coeficiente de estresse hídrico ( $k_s$ ) e/ou por ajustar o coeficiente de cultivo ( $k_c$ ) para os outros tipos de estresses e restrições ambientais sobre a ETc.

Para se medir os efeitos das características da cultura sobre suas necessidades hídricas, utilizam-se coeficientes de cultivo ( $k_c$ ) que relacionam a evapotranspiração da cultura com a evapotranspiração de referência (Doorenbos & Pruitt, 1977). Os coeficientes de cultivo são determinados experimentalmente e refletem a fisiologia da planta, o grau de cobertura e a localização onde os dados são coletados. Na fase de desenvolvimento inicial das culturas, o valor do  $k_c$  é baixo, vez que somente uma pequena fração do solo é coberta pela cultura que tem um sistema radicular pouco desenvolvido. Com a cultura em pleno desenvolvimento, o valor de  $k_c$  é máximo, podendo assumir valores superiores a unidade, indicando que a referida cultura perde mais água que a cultura de referência, mesmo que estas culturas sejam submetidas às mesmas condições climáticas (Reichardt & Timm, 2004).

A evapotranspiração real (ER) constitui a perda de água de uma superfície vegetada, independentemente de sua área, de seu porte e das condições de umidade do solo, ou seja, é aquela que ocorre em qualquer circunstância, sem imposição de qualquer condição de contorno. Logo a ER pode assumir tanto o valor potencial como o valor da evapotranspiração que ocorre em região vegetada circundada por extensa área seca. A evapotranspiração nessas condições representa um valor exagerado pela advecção de calor sensível (Pereira et al., 1997).

De acordo com Allen et al. (1998) o controle exercido pela vegetação seria através da sua estrutura, afetando o albedo, a rugosidade e o sistema radicular. À medida que a umidade do solo diminui, ocorrem restrições à transferência de água para a atmosfera, que passa a depender não somente das condições meteorológicas, mas também do sistema radicular das plantas, bem como de outras características, como o estado fitossanitário das mesmas. Esta condição permite distinguir entre a evapotranspiração potencial e real.

## 2.5.1 - Fatores determinantes da evapotranspiração

### Fatores meteorológicos

- Saldo de radiação ( $R_n$ ) - principal fonte de energia para o processo evapotranspirativo, depende principalmente da radiação solar incidente e do albedo da vegetação.
- Temperatura do ar ( $T_a$ ) - o calor sensível contribui com parte da energia necessária ao processo de evapotranspiração e a temperatura também está diretamente ligada à umidade relativa e ao déficit de saturação de ar.
- Umidade relativa (UR) - atua juntamente com a temperatura, determinando o déficit de saturação do ar, é um dos componentes do poder evaporante do ar.
- Vento ( $u$ ) - atua como um regulador da evapotranspiração e como um modificador da estrutura do dossel das plantas. É também responsável pelo transporte de calor de áreas mais secas (advecção).

### Fatores da planta

- Espécie - relacionado à arquitetura foliar, à resistência ao transporte de vapor no estômato e a outros aspectos morfológicos que interferem diretamente na evapotranspiração.
- Albedo - afeta o saldo de radiação, principal fonte de energia para o processo de evapotranspiração.
- Área foliar - relacionada ao tamanho da superfície foliar disponível para o processo de transpiração. Quanto maior a área foliar maior a exigência hídrica da planta.
- Altura da planta - interfere na interação planta-atmosfera. Plantas mais alta interagem mais com a atmosfera em movimento, extraindo mais energia do ar.
- Profundidade do sistema radicular - relacionado ao volume de solo explorado pelas raízes, objetivando o suprimento de água à planta.

### Fatores de Manejo e do solo

- Espaçamento/densidade de plantio - determina o nível de competição entre indivíduos da mesma espécie. Quanto menor o espaçamento, mais indivíduos e, por conseguinte maior consumo de água por área.
- Tipo de solo - solos argilosos têm maior capacidade de armazenamento de água do que os arenosos, e, portanto, a capacidade de atender as exigências hídricas da cultura por mais tempo.

- Disponibilidade de água no solo - afeta diretamente a evapotranspiração quando o armazenamento cai além do limite crítico, reduzindo-a.
- Impedimentos físico-químicos - limitam o crescimento do sistema radicular da cultura, reduzindo o volume de água disponível para o uso pelas plantas.

## **2.6 - Estimativa da evapotranspiração**

A evapotranspiração real é o parâmetro dominante do balanço hídrico e um dos mais difíceis de ser medido no campo. Sua estimativa se faz necessário nas áreas da hidrologia, ecologia, meteorologia e agricultura (Loheide & Gorelick, 2005). Deste modo, a determinação de ET é de fundamental importância para o gerenciamento dos recursos hídricos, em especial para avaliar e quantificar as necessidades hídricas das culturas irrigadas. Para Abdelghani et al. (2008), grandes esforços têm sido feitos com vistas a melhorar a estimativa da evapotranspiração, tendo como foco principal o impacto causado pela sua heterogeneidade espacial. Para eles um melhor manejo dos recursos hídricos só será alcançado mediante estimativas precisas de ET, em especial em áreas cultivadas em regiões de clima árido e semi-árido. Conforme Berlato & Molion (1981), citados por Meireles (2007), na escolha de um método para a estimativa da evapotranspiração devem ser considerados a praticidade e precisão, pois, apesar dos métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos, apresentam limitações, principalmente quanto à instrumentação, o que pode restringir a sua utilização.

Dentre os métodos indiretos, estes geralmente podem ser agrupados em cinco categorias, ou seja: os métodos empíricos, aerodinâmicos, métodos combinados, correlação de turbilhões e micrometeorológicos (Pereira et al., 1997; Klar, 1984).

### **Métodos empíricos**

Resultam de correlações entre a evapotranspiração medida em condições padrão e os elementos meteorológicos medidos em postos também padrões, dentre eles destacam-se: método do tanque classe A, método de Thornthwaite, método de Makkink, método da radiação solar, método de Linacre, método de Hargreaves-Samani, método de Blaney-Criddle.

### **Métodos aerodinâmicos**

São métodos micrometeorológicos com embasamento físico-teórico da dinâmica dos fluidos e transporte turbulento. De acordo com o autor o escoamento atmosférico acima de

uma superfície natural rugosa é predominantemente turbulento, onde existe mistura contínua na camada de ar que interage com a superfície. Os fluxos verticais resultantes da difusão turbulenta na camada limite da superfície são dados pelas equações de fluxo de calor latente, calor sensível e de momento.

### Métodos combinados

Estes métodos combinam os efeitos do balanço de energia com aqueles do poder evaporante do ar. O método de Penman foi o primeiro dessa categoria, sendo considerado por muitos como método padrão, é um método baseado em princípios físicos corretos. Os demais métodos combinados são aproximações e extensões desse método, com destaque para: método de Penman, método de Slatyer & McIlroy, método de Penman simplificado, método de Penman-Monteith.

Dentre os métodos combinados, o método de Penman-Monteith é considerado um dos métodos mais precisos para estimativa da evapotranspiração de referência e também, das culturas. Monteith adaptou o método de Penman por considerar a influência da resistência dos estômatos à transpiração e a influência da resistência aerodinâmica de uma cultura de referência à passagem de massas de ar. A resistência aerodinâmica dá origem a condições de turbulência do ar que aumentam a eficiência dos mecanismos de remoção do vapor da água da camada superior à superfície evaporante. A evaporação de referência é geralmente definida como a ET de uma superfície hipotética totalmente coberta com grama (ET<sub>o</sub>) ou alfafa (ET<sub>r</sub>) em ótimas condições de umidade. Este método para estimar a evapotranspiração de referência foi recentemente padronizado pelo método FAO-56 PM (Allen et al., 1998) e ASCE-EWRI (2005), conforme seguinte equação:

$$ET_{ref} = \frac{0,408 \Delta(Rn - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d u_2)} \quad (2.1)$$

onde ET<sub>ref</sub> é a evapotranspiração de referência para a grama ou alfafa (mm h<sup>-1</sup> ou mm dia<sup>-1</sup>), Rn é o saldo de radiação (MJ.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> ou MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>), G é o fluxo de calor no solo (MJ.m<sup>-2</sup>.h<sup>-1</sup> ou MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>), γ é a constante psicométrica (kPa °C<sup>-1</sup>), u<sub>2</sub> é a velocidade do vento a 2 m de altura (m.s<sup>-1</sup>), Δ - tangente da curva de saturação do vapor da água calculada em função da temperatura (kPa °C<sup>-1</sup>), e<sub>s</sub> é a pressão de saturação do vapor (kPa), e<sub>a</sub> é a pressão real de vapor (kPa), C<sub>n</sub> e C<sub>d</sub> são coeficientes referentes aos valores de resistência aerodinâmica da

cultura de referência utilizado e a escala de tempo das medições, ou seja; quando a cultura de referência for a grama: para valores de ET horário,  $C_n = 37$  para valores obtidos durante o dia e a noite e  $C_d = 0,24$  e  $0,96$ , respectivamente. Para valores de ET diários ou mensais,  $C_n = 900$  e  $C_d = 0,34$ . Quando a cultura de referência for a alfafa: para valores de ET horários,  $C_n = 66$  tanto para valores obtidos durante o dia como durante a noite e  $C_d = 0,25$  e  $1,7$ , e, para estimativas de ET diários ou mensais,  $C_n = 1600$  e  $C_d = 0,38$ .

### Métodos diretos

Medir a evapotranspiração diretamente não é processo simples e muitas vezes opta-se por monitorar outras variáveis hidrológicas e calcular a evapotranspiração de modo indireto.

Dentre os métodos utilizados para a determinação direta da evapotranspiração, destacam-se o método do balanço hídrico no solo, o método de lisímetros e os métodos micrometeorológicos. O método do balanço hídrico consiste em determinar a diferença entre a entrada e saída da água de um sistema, geralmente bacia hidrográfica. O método de lisímetros consiste em utilizar tanques enterrados contendo um volume de solo que permite conhecer com detalhe alguns termos do balanço hídrico do volume amostrado. É o método mais preciso para a determinação direta da evapotranspiração de referência, desde que instalados corretamente (Bernardo et al., 2005). Os métodos micrometeorológicos são aqueles que utilizam o princípio do balanço de energia, vez que o processo evapotranspirativo é governado pela troca de energia na superfície e limitado pela energia total disponível. Devido a esta limitação é possível estimar a taxa evapotranspirativa aplicando o princípio da conservação de energia.

No método do balanço de energia toda a energia radiativa incidente na superfície deve ser igual a energia emitida por ela no mesmo intervalo de tempo. Na equação clássica do balanço de energia todos os fluxos verticais de energia devem ser considerados, ou seja (Allen et al., 1998):

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2.2)$$

onde  $\lambda ET$  é o fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ),  $R_n$  é o saldo de radiação à superfície ( $W m^{-2}$ ),  $H$  o fluxo de calor sensível ( $W m^{-2}$ ),  $G$  o fluxo de calor no solo ( $G$ ) e  $\lambda$  o calor latente de vaporização ( $J kg^{-1}$ ).

Se todos os fluxos são conhecidos a ET pode então ser estimada.  $R_n$ ,  $G$  podem ser medidos ou estimados de parâmetros climáticos. A determinação de  $H$  é um tanto complexa e não pode ser facilmente obtido, requerendo medidas precisas de um gradiente de temperatura à superfície.

O método da razão de Bowen também utiliza o princípio do balanço de energia. É um índice que indica a partição de energia entre os fluxos de calor sensível ( $H$ ) e de calor latente  $\lambda LE$  (Pereira et al., 1997; Moura, 2005):

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (2.3)$$

Próximo a superfície, o vapor da água e as densidades de fluxos  $Le$  e  $H$ , podem ser expressos como:

$$LE = k_v \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \quad (2.4)$$

e

$$H = \rho C_p k_H \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.5)$$

Aplicando a teoria universal dos gases na Eq. (2.4), e, utilizando o calor latente de vaporização,  $\lambda$ , o fluxo de calor latente pode ser escrito em termos de pressão de vapor ( $e$ ):

$$LE = \frac{\lambda \rho \epsilon k_v}{P} \frac{\partial e}{\partial z} \quad (2.6)$$

onde  $P$  é a pressão atmosférica e  $\epsilon$  é a razão entre o peso molecular da água e o peso molecular do ar seco, ou seja:

$$LE = \frac{\lambda \rho \epsilon k_v}{P} \frac{(e_1 - e_2)}{(z_1 - z_2)} \text{ e } H = \rho C_p k_H \frac{(T_1 - T_2)}{(z_1 - z_2)} \quad (2.7)$$

em geral,  $k_v$  e  $k_H$  não são conhecidas e se assume como sendo iguais. Medindo-se os gradientes de temperatura e pressão de vapor entre dois níveis dentro de uma camada ajustada à superfície obtém  $\beta$ :

$$\beta = \frac{PC_p (\Delta T)}{\lambda \varepsilon (\Delta e_a)} \quad (2.8)$$

onde  $PC_p/\lambda\varepsilon$  é o fator psicométrico,  $\Delta T$  e  $\Delta e_a$  são a diferença de temperatura e a diferença de pressão de vapor medidos a dois níveis, respectivamente.

Combinando-se as equações (2.2) e (2.3), o fluxo de calor latente é dado por:

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (2.9)$$

O método da razão de Bowen apresenta uma série de limitações, pois é passível de erros devido à sensibilidade, à calibração instrumental, às suposições teóricas utilizadas para o seu cálculo e aqueles causados pelo processo advectivo. Diante de todas estas limitações tem sido bastante empregado.

Na determinação da necessidade hídrica da cultura da goiaba irrigada, cultivar paluma, no semi-árido nordestino, Moura (2005) estimou a evapotranspiração durante o ciclo produtivo da cultura através dos métodos da razão de Bowen e do balanço hídrico no solo e obteve valores médios de ET iguais a  $5,3 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $5,6 \text{ mm dia}^{-1}$  respectivamente. Xing et al. (2008) utilizaram os métodos de Penman-Monteith e Priestley-Taylor para estimar a evapotranspiração da cultura da batata no Canadá e validaram os referidos métodos com os valores obtidos pelo método da razão de Bowen e verificaram que os valores de ET calculados pelos modelos utilizados superestimaram os valores de ET obtidos pela razão de Bowen entre 5 e 14%. Inman-Bamber & McGlinchey (2003) utilizaram o método da razão de Bowen na estimativa de ET e na determinação de coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) para cana-de-açúcar na Austrália e Swaziland e observaram que os valores de  $K_c$  obtidos nos experimentos foram bastante similares aos indicados pela FAO-56. Concluíram que o  $K_c$  médio igual a 1,25 seria mais indicado para o cálculo da lâmina de irrigação, resultando em um adequado suprimento de água para a cultura.

De modo geral, a evapotranspiração é um bom indicador para a eficiência e o consumo total das plantas, podendo servir como parâmetro para o planejamento da irrigação, na gestão dos direitos de uso da água, e, para os estudos de rios e bacias hidrográficas. No entanto, os métodos tradicionais que estimam a evapotranspiração utilizam dados de variáveis meteorológicas obtidos em estações meteorológicas. A maior desvantagem desses métodos é que os mesmos geram somente valores pontuais que resultam em estimativas que não são

representativas para grandes áreas. Por outro lado, os métodos tradicionais são também baseados em fatores relacionados a culturas sob condições ideais e não podem, no entanto, representar a evapotranspiração real da cultura (Hafeez et al., 2002; Bastiaanssen et al., 1999).

## **2.7 - Evapotranspiração estimada a partir de dados orbitais**

Em superfícies homogêneas a ET pode ser medida através de métodos convencionais. De modo geral estes métodos apresentam resultados confiáveis, em termos de precisão; porém, a maior desvantagem desses métodos é que a maioria deles gera somente valores pontuais, resultando em estimativas que não são representativas para grandes áreas. Estes métodos são também baseados em fatores de culturas que são determinados de acordo com o tipo da cultura e estágio de desenvolvimento, e só são adequados para estimativas em grandes áreas quando há homogeneidade dentro dos cultivos. Estes métodos também não fornecem informações da distribuição espacial em escala regional, especialmente em regiões com condições climáticas advectivas (Allen et al., 2007a). Em regiões de clima árido e semi-árido a advecção do fluxo de calor sensível é uma fonte significativa de energia que produz grande impacto sobre a ET de áreas cultivadas.

Nos últimos anos tem-se observado uma grande evolução da tecnologia da computação digital como também o desenvolvimento de algoritmos que lidam com sinais bidimensionais, permitindo com isso um número acentuado de suas aplicações. Tais algoritmos utilizam técnicas de sensoriamento remoto para calcular a radiação disponível nas trocas de calor entre a atmosfera e a superfície terrestre, que é de extrema importância na estimativa da evaporação de corpos d'água e evapotranspiração real de áreas cultivadas, biomassa, produtividade da água, além de monitoramento de cultivos, estimativas de produção e previsão de secas.

Dentre estes algoritmos pode-se destacar o METRIC (*Mapping Evapotranspiration at high resolution with Internalized Calibration*) desenvolvido por Allen et al. (2005) e Tasumi et al. (2005a) seguindo todos os procedimentos teórico e técnico do algoritmo SEBAL (*Surface Energy Balance for Land*) desenvolvido por Bastiaanssen (1995) na Holanda e que tem sido aplicado em diversos países do mundo, inclusive no Brasil. Estes modelos convertem dados brutos de sensores remotos em reflectância, albedo de superfície, índices de vegetação e temperatura de superfície para estimar a ET a partir do resíduo da equação do balanço de energia à superfície, e não requer muitas variáveis meteorológicas em nível de

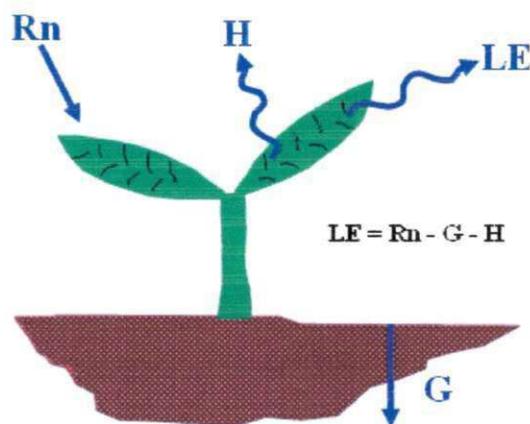
superfície Os referidos modelos têm sido bastante aplicados graças à precisão da estimativa da evapotranspiração real.

## 2.8 - O algoritmo SEBAL/METRIC

O METRIC foi desenvolvido a partir do modelo SEBAL com vistas a estimar a evapotranspiração de áreas agrícolas a partir de imagens de satélite, poucos dados meteorológicos e a aplicação dos balanços de radiação e energia a superfície. (Figura 2.3). A energia consumida no processo evapotranspirativo é calculada para cada pixel no momento da passagem do satélite como o resíduo da equação clássica do balanço de radiação (Allen et al., 2005; Tasumi et al., 2005; Allen et al., 2007a):

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (2.10)$$

onde  $\lambda ET$  é o fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ),  $R_n$  é o saldo de radiação a superfície ( $W m^{-2}$ ),  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ) e  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $W m^{-2}$ ).



**Figura 2.3** - Balanço de energia à superfície (Adaptado de Allen et al., 2002).

O saldo de radiação é calculado em função dos fluxos de radiação de ondas curtas e ondas longas que incidem na superfície, e àquelas por ela emitida e/ou refletida, e da emissividade.  $G$  é estimado a partir do saldo de radiação, da temperatura da superfície, do albedo e do NDVI, e,  $H$  é estimado em função de um gradiente de temperatura próximo à superfície e a resistência aerodinâmica. A estimativa da ET como resíduo da equação do

balanço de energia depende da precisão na estimativa da densidade de fluxo de calor sensível, obtido com base na temperatura radiométrica da superfície, a qual também depende da estimativa da resistência aerodinâmica para transferência de calor sensível. Na determinação da resistência aerodinâmica utiliza-se um processo iterativo para correção da estabilidade do ar e, para isto, aplica-se a teoria de similaridade de Monin-Obukhov (Bastiaanssen, 2000). Para tanto, assume-se que a diferença de temperatura entre a superfície e o ar varia linearmente com a temperatura da superfície e esta dedução é baseada em duas condições extremas, ou seja, na escolha de dois pixels dentro da imagem denominados de “pixel frio” e “pixel quente”, necessários para o cálculo do fluxo de calor sensível, conforme descrito no Capítulo 3. De acordo com Tasumi et al. (2005b) este procedimento elimina a necessidade de correção atmosférica da temperatura da superfície e do albedo, como também reduz os impactos na estimativa da correção da estabilidade aerodinâmica e da rugosidade da superfície. O METRIC apresenta algumas diferenças de outros métodos, ou seja: o pixel frio é selecionado dentro de uma área agrícola, assumindo que neste pixel as características biofísicas da cultura deveriam ser similares à da cultura de referência, neste caso, a alfafa. No METRIC utilizam-se dados horários ou períodos menores da  $E_{Tr}$  medida em estação meteorológica para determinar a fração evapotranspirativa ( $E_{Fr}$ ) e esta é utilizada para extrapolar a evapotranspiração calculada no momento da passagem do satélite ( $ET_{inst}$ ) para períodos diários ou mais longos, assumindo que  $E_{Fr}$  computada no momento da passagem do satélite permanece constante durante todo o dia. A hipótese utilizada no METRIC é que a  $ET$  para toda a área de interesse muda na proporção em que  $E_{Tr}$ , medida na estação meteorológica, muda. Ademais, a utilização dos valores diários da evapotranspiração ( $ET_{24}$ ) é mais indicada que os valores da evapotranspiração estimados no momento da passagem do satélite ( $ET_{inst}$ ). A  $E_{Fr}$  é essencialmente o mesmo que o tão conhecido coeficiente de cultivo  $K_c$  e é considerada como constante durante todo o dia. Trezza (2002) utilizou a  $E_{Fr}$  para estimar a  $ET_{24}$  para diversas culturas em Kimberly, Idaho, e obteve melhores resultados de  $ET$  em regiões sob condições advectivas quando comparados com os valores obtidos a partir da utilização da fração evaporativa ( $EF$ ) sugerida por Bastiaanssen et al. (1998).

O SEBAL foi aplicado em Idaho no mapeamento da  $ET$  durante os anos de 1985 e 1989 e os valores gerados foram validados com medidas de lisímetros, apresentando boa correlação entre os métodos. A diferença média mensal para o ano de 1985 foi de  $\pm 16\%$  e  $20\%$  para 1989, com diferença sazonal de somente  $4\%$  em 1985. No ano de 1989 a  $ET$  estimada pelo SEBAL foi de  $714$  mm e medida por lisímetro de  $718$  mm (Allen et al., 2002).

Bastiaanssen & Chandrapala (2003) utilizaram dados obtidos através do SEBAL no cálculo do balanço hídrico em escala nacional no Sri Lanka no período de junho de 1999 a junho de 2000. A média anual da evaporação estimada pelo SEBAL foi de 1279 mm e a diferença na evapotranspiração estimada pelo SEBAL e obtida no balanço hídrico variou de 1% a 11%. Para Bastiaanssen & Bandara (2001) a utilização do SEBAL em estudos hidrológicos no Sri Lanka foi de grande importância, pois através do modelo todos os termos do balanço hídrico foram estimados individualmente. Mohamed et al. (2004) também utilizaram o SEBAL para o mapeamento da evaporação e do conteúdo de umidade do solo mensal em áreas pantanosas da bacia do Nilo no Sudão. Em toda a área os dados anuais de umidade do solo estimados pelo SEBAL não apresentaram variações e o erro relativo da evaporação estimada foi somente de 4%. Hafeez (2002) aplicou o SEBAL com imagens ASTER, MODIS e Landsat para estimativa da evapotranspiração sazonal nas Filipinas e em 2006 Hafeez et al. utilizaram imagens dos sensores TERRA-MODIS, AVHRR-NOAA/18 em combinação com imagens do sensor TM-Landsat 5 adquiridas no mesmo dia e aplicaram o SEBAL para a estimativa da evapotranspiração real diária e da umidade do solo em áreas irrigadas em New South Wales, na Austrália. Os valores da evapotranspiração estimados pelo modelo foram validados com valores obtidos pelo método da Covariância de Eddy em que se observou uma sobreestimativa de 11,45% a 59,25% nos valores de ET estimados pelo AVHRR-NOAA e de 9,81% a 14,25% nos valores estimados pelo MODIS/TERRA. Os valores de ET obtidos através do sensor TM-LANDSAT 5 apresentaram os melhores resultados quando comparados com o método da covariância de Eddy, com menor erro relativo, igual a 1,21%. O grau de variação do conteúdo de umidade no solo variou de 0,3 a 0,7. Com esses resultados os autores concluíram que a estimativa da evapotranspiração real e do conteúdo de umidade no solo do TERRA/MODIS em combinação com as imagens Landsat indicaram uma boa precisão do modelo para o cálculo do balanço hídrico e análise da produtividade da água em nível de bacia.

Em Idaho, o METRIC tem sido utilizado para: estimativa do balanço hídrico na modelagem hidrológica, no monitoramento do uso da água, no planejamento sustentável dos recursos hídricos, na estimativa da depleção dos aquíferos, na calibração e operação de modelos de água superficiais, na estimativa da água utilizada na agricultura irrigada, para concessão de outorga da água, na estimativa dos coeficientes de cultivos e na avaliação da quantidade de água utilizada nos grandes projetos de irrigação. Na Califórnia o METRIC foi aplicado para quantificar a evapotranspiração de matas ciliares com vistas a melhorar as estimativas de ET usada nos balanços hídricos e no Texas para o mapeamento da ET sazonal

em nível regional. No Novo México, o modelo foi aplicado para quantificar a distribuição espacial e temporal de ET em áreas de várzeas, culturas irrigadas, espécies nativas e invasoras ao longo do médio Rio Grande.

No Brasil o modelo SEBAL/METRIC vem sendo utilizado em estudos realizados pelo INPE e por algumas universidades. Lopes (2003) utilizou imagens TM-Landsat 5 dos anos de 2000 e 2001 para estimativa do saldo de radiação em áreas irrigadas dos Estados de Pernambuco e Bahia. Bezerra (2004) utilizou a mesma área e imagens utilizadas por Lopes (2003) para determinação do balanço de energia utilizando o modelo SEBAL. Bezerra (2006) utilizou o SEBAL para determinação do balanço de energia e estimativa da evapotranspiração e validou com dados de superfície obtidos em cultivo de algodão no município de Barbalha, Estado do Ceará. Giongo (2008) estimou o balanço de radiação à superfície com a utilização do SEBAL e verificou que os dados estimados apresentaram boa correlação com dados medidos em superfície em região de Cerrado e em áreas de cana-de-açúcar. O modelo também foi utilizado para estimativa da evapotranspiração em áreas montanhosas de Minas Gerais (Menezes, 2006).

Folhes (2007) utilizou o METRIC e imagens Landsat 5 na estimativa das densidades de fluxo de energia à superfície e para quantificar a evapotranspiração real diária em áreas de cultivos no distrito de irrigação Jaguaribe-Apodí e adjacências, região semi-árida do Nordeste Brasileiro e concluiu que a  $ET_{24}$  estimada pelo modelo apresentou uma boa concordância com os resultados obtidos a partir das medições realizadas com o método das correlações turbulentas, verificando-se uma pequena sobrestimativa nos valores modelados de  $ET_{24}$  em todas as datas estudadas. Para ele, o modelo METRIC demonstrou ser útil e promissor para o mapeamento da evapotranspiração real de áreas agrícolas e para quantificar a água utilizada nos projetos de irrigação.

### **Vantagens em utilizar o SEBAL/METRIC**

- O SEBAL/METRIC pode ser aplicado em diversos agro-ecossistemas, sem que seja necessário informações quanto ao uso da terra ou tipo de cultura;
- Importante ferramenta para monitoramento de áreas salinizadas e para estudos sobre a degradação ambiental;
- O algoritmo calcula a evapotranspiração em tempo real, utilizando poucos parâmetros de campo;

- A utilização da evapotranspiração de referência na calibração do METRIC e da fração evapotranspirativa na extrapolação dos valores instantâneos de ET em valores diários fornece uma geral equivalência com a ET quando estimada utilizando a relação tradicional de  $K_c \cdot E_{Tr}$ , em que a  $E_{Tr}$  é a evapotranspiração de referência calculada segundo o método padrão de Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005). Tal equivalência é deveras importante na utilização de mapas de ET gerados pelo METRIC para o manejo dos recursos hídricos, principalmente em locais em que a gestão dos recursos hídricos é feita a partir de dados de ET previamente calculados a partir da relação tradicional do produto de  $K_c$  e  $E_{Tr}$ ;
- O METRIC é autocalibrado para cada imagem a partir dos valores de  $E_{Tr}$  obtidos em estações meteorológicas, e tem sido validado a partir de dados obtidos em lisímetros, apresentando bons resultados.

## 2.9 - A produtividade da água como indicador da agricultura irrigada

A incorporação e conseqüente expansão de áreas irrigadas devem estar associadas ao aumento dos níveis de produtividade atuais, porém, atenção especial deve ser dada às práticas apropriadas de irrigação sem que estas resultem em danos ao sistema solo-planta (Silva Paz et al. 2000).

Para Bernardo et al. (2005), é de suma importância que no projeto de irrigação não seja considerada apenas a captação e a condução de água, ou somente a sua aplicação dentro da parcela, mas sim uma operação integrada, incluindo, também; a equidade na distribuição da água, as práticas culturais, a retirada do excesso de água da área irrigada e a relação água-solo-planta e clima. Ressalta ainda que um bom programa de irrigação proporcione grandes benefícios para as culturas, e, em regiões áridas, onde a água é fator limitante, as pesquisas devem ser conduzidas de modo que se faça o planejamento de irrigações em termos de máxima produção por unidade de água aplicada.

Produtividade é um termo que esteve sempre relacionado com a terra e a cultura, no entanto, um novo conceito tem sido introduzido para melhor definir a produtividade da água, e com isso elevar a eficiência de seu uso nas áreas irrigadas sem comprometer a disponibilidade e a qualidade desse recurso natural. A produtividade da água está diretamente relacionada com a quantidade de água utilizada para produção de um determinado produto agrícola. Atualmente o mundo necessita desempenhar esforços similares para aumentar a produtividade da água (Brown, 2006). Segundo o autor, para se produzir 1 kg de grãos é

necessário 1 ton de água, sendo necessário elevar a eficiência da água utilizada e conseqüentemente a sua produtividade. Em se tratando de agricultura irrigada, os sistemas de irrigação devem ser manejados de modo a atingir os maiores índices de produtividade da água, principalmente em locais em que este recurso é escasso ou a produtividade da água é baixa.

O desempenho da agricultura irrigada tem sido expresso em termos de eficiências no uso da água e este termo é freqüentemente confundido com várias versões de eficiência da irrigação. Por outro lado, o conceito clássico de eficiência quando usado na engenharia omite os valores de produção. Para melhorar o manejo da água e sua produtividade se faz necessário avaliar a relação causa-efeito entre as variáveis hidrológicas tais como evaporação, transpiração, percolação ou ascensão capilar e as variáveis biofísicas como matéria seca e bioproductividade sob diferentes condições ecohidrológicas. O conceito de produtividade da água expressa o valor ou benefício derivado do uso da água e inclui vários aspectos do manejo da água, o que é de grande relevância em regiões áridas e semi-áridas (Molden et al., 2001; Droogers and Bastiaanssen, 2002; Kijne et al., 2003; Singh et al., 2006).

Para enfatizar a importância da produtividade da água, Molden et al. (2001) afirmam que um incremento na produtividade da água na agricultura de 40% em nível global pode reduzir a zero as retiradas adicionais de água doce necessária para alimentar a crescente população do mundo. Como, quando e onde tal afirmativa poderá ser validada é atualmente incerto. Entretanto, é evidente que elevar a produtividade da água é uma condição crítica para o desenvolvimento sustentável humano.

A produtividade da água pode ser avaliada através de indicadores. Para tanto, já existem vários indicadores que relacionam a água com a produção. Em geral existem três diferentes tipos de produtividade da água que podem ser expressos como (Zoebl, 2006; Immerzeel et al., 2008):

- Produtividade da água em termos técnicos ( $\text{kg m}^{-3}$ ), definida como a bioproductividade por unidade de água consumida;
- Produtividade da água em termos econômicos ( $\text{\$ m}^{-3}$ ), definida como a bioproductividade transformada em unidade monetária por unidade de água consumida;
- Produtividade da água em termos sócio-econômicos ( $\text{\$ m}^{-3}$ ), definida como o benefício social líquido por unidade de água consumida, o que é difícil de valorar.

O conceito de produtividade da água tem como base mais colheita com menos água ou produzir mais alimento utilizando a mesma quantidade de água ou ainda, produzir a mesma quantidade de alimento utilizando menor quantidade de água. Neste sentido, a produtividade

da água está relacionada ao valor ou benefício derivado do uso da água. As definições de produtividade da água não são uniformes e mudam de acordo com o objetivo do pesquisador ou gestor (Van Dam et al., 2006).

Para Immerzeel et al. (2008) o manejo da água deve, no entanto, focar a redução das perdas de água pela evapotranspiração com vistas a elevar a produtividade da água. Deste modo, para a agricultura irrigada o conceito mais adequado da produtividade da água é a quantidade de produto pela quantidade de água evapotranspirada. Para Singh et al. (2006) essa flexibilidade na definição da produtividade da água fornece bons indicadores para avaliar a utilização da água e para identificar onde e quando a água pode ser economizada.

Immerzeel et al. (2008) utilizaram o SEBAL e imagens do sensor MODIS-TERRA na bacia hidrográfica do Rio Krishna na Índia, para estimar a evapotranspiração no período compreendido entre outubro de 2004 e Maio de 2005 com vistas a avaliar a produtividade da água de áreas irrigadas e cultivadas com cana-de-açúcar, sorgo e trigo e obtiveram valores médios da produtividade da água de  $2,9 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $1,3 \text{ kg m}^{-3}$  e  $1,3 \text{ kg m}^{-3}$  respectivamente. No Iran, Akbari et al. (2007) avaliaram a eficiência do uso da água na irrigação em duas bacias hidrográficas de Esfahan a partir de dados de evapotranspiração estimados pelo SEBAL com imagens TM-Landsat 5 e constataram que o maior valor da produtividade da água em sistemas de irrigação por superfície foi de  $0,72 \text{ kg m}^{-3}$ . Na Síria, Pala et al. (2007) utilizaram dados de evapotranspiração estimados a partir do balanço hídrico em áreas cultivadas com trigo e introduzindo sistema de rotação de cultura trigo/grão-de-bico e verificou que com a aplicação de doses de nitrogênio de 30 e 90 Kg ha<sup>-1</sup> aumentou significativamente a eficiência no uso da água de 17-37% quando comparados às áreas de cultivos sem a aplicação desse nutriente.

Teixeira (2008) em sua pesquisa de doutorado, utilizou o SEBAL, imagens TM-Landsat 5 e dados de experimentos conduzidos na região semi-árida do sub-médio São Francisco com cultivos de uvas e manga para estimativa da produtividade da água. Os valores de produtividade da água estimados para a uva no segundo ciclo, ano de 2003, calculada em função da evapotranspiração variou entre  $1,70 \text{ kg m}^{-3}$  e  $4,0 \text{ kg m}^{-3}$ , com valor médio igual a  $2,80 \text{ kg m}^{-3}$ , enquanto que a produtividade da água estimada para a manga no período de 2003-2005 variou entre  $2,20 \text{ kg m}^{-3}$  e  $3,80 \text{ kg m}^{-3}$ , com valor médio igual  $2,80 \text{ kg m}^{-3}$  no primeiro ciclo, e entre  $3,40 \text{ kg m}^{-3}$  e  $5,00 \text{ kg m}^{-3}$ , com valor médio de  $4,00 \text{ kg m}^{-3}$ , obtido no segundo ciclo.

A seguir são apresentadas algumas medidas para incrementar a produtividade da água na agricultura irrigada.

- Utilização de sistemas de irrigação de maior eficiência;
- Aplicação da água de acordo com a fase de desenvolvimento de cada cultivo;
- Adoção de métodos de conservação de água, plantio direto e irrigação alternativa;
- Aumentar a eficiência nos sistemas de condução e distribuição da água;
- Sistematização dos solos para melhoria da uniformidade de aplicação da água e redução das vazões nos sistemas de irrigação por superfície;
- Utilização de cultivares com elevada produtividade em função da água utilizada;
- Adoção de culturas tolerantes sob condições de escassez ou não de disponibilidade de água;
- Reestruturação nos calendários agrícolas, associando-os com a disponibilidade de água e de mercado;
- Redução dos subsídios nos preços da água de irrigação e adoção de preços para a água que induzam à conservação.

Vários estudos sobre a produtividade da água têm sido realizados em várias áreas agrícolas do mundo, a exemplo da Índia, Paquistão, China, Egito, Marrocos, dentre outros, e, conforme Zwart & Bastiaanssen (2007) para realização destes estudos a técnica do sensoriamento remoto e os diversos modelos hidrológicos são ferramentas indispensáveis para quantificar a distribuição espacial da produtividade da água em grandes áreas.

## **2.10 - O agronegócio da cana-de-açúcar**

A cultura da cana-de-açúcar é um dos produtos mais rentáveis do agronegócio pela alta produtividade apresentada em menores áreas plantadas, exerce um papel de grande importância na economia de diversos países dos cinco continentes do globo, sendo de maior destaque nas economias da América Latina e do Caribe. O Brasil é, atualmente, o maior produtor mundial desta cultura, que ocupa uma área de 5,34 milhões de hectares, com produção na safra 2006/2007 estimada em 475,73 milhões de toneladas (CONAB, 2007).

De origem asiática, provavelmente de Nova Guiné, a cana-de-açúcar foi a primeira cultura introduzida no Brasil, estados de Pernambuco e São Paulo. Cultivada há quatro séculos no litoral nordestino, e, disseminou-se por quase todos os estados brasileiros, estabelecendo-se nos mais diferentes tipos de solos. Trata-se de uma cultura que tem um bom desenvolvimento entre as latitudes 35° Norte e Sul da linha do Equador. É uma cultura de clima tropical, exigindo de 1500 a 2500 mm de água durante o período de crescimento. O crescimento ótimo é alcançado com uma média diária de temperatura entre 22 e 30°C, sendo

que a temperatura mínima para um efetivo crescimento é de 20°C (Doorenbos & Kassam, 1979). A deficiência hídrica e nutricional além de temperaturas extremas e baixa radiação solar são algumas das principais limitações ao seu desenvolvimento (Bray, 1980).

De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB/2006), o crescimento da safra se deve às boas condições climáticas na região Nordeste. Mesmo devido as variações climáticas, os estados das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste continuam sendo os maiores produtores de cana, responsáveis por 86,3% da colheita do país. São Paulo é o mais importante, com 282,1 milhões de toneladas ou 59,9% em uma área de 3,3 milhões de hectares. Já as regiões Norte/Nordeste contribuem com 13,7% do total da produção. A área plantada de cana-de-açúcar no Brasil aumentou de 5,34 milhões de hectares em 2005/2006 para 6,2 milhões de hectares em 2006/2007, e este crescimento resulta da ocupação de áreas antes usadas para pecuária e plantio de grãos.

Além da relevância do cultivo irrigado da cana-de-açúcar no aumento da produtividade, da produção e do número de cortes por plantio (vida útil do canavial) e, como conseqüências, no aumento do lucro do produtor, existem os benefícios socioeconômicos indiretos, tais como o aumento do número de empregos na região, os quais somente serão duradouros se os cultivos irrigados tiverem sustentabilidade econômica, social e ambiental (Souza et al.,1997).

Taupier et al. (1999) asseguram que, em se tratando da alimentação, a cana-de-açúcar tem o maior rendimento em matéria verde e integra o maior número de megacalorias metabolizáveis que qualquer outra cultura, constituindo ainda o alimento energético para o ser humano mais completo e de consumo mais geral, esta gramínea é capaz de criar várias vezes mais energia convencional do que a empregada em obtê-la e, ao ser processada industrialmente, produz uma quantidade de energia excedente superior a produções realizadas sem tais recursos.

O assessor técnico da Comissão Nacional da Cana explica que a cana-de-açúcar influenciou diretamente nos valores do Produto Interno Bruto (PIB) do agronegócio, por causa da valorização do açúcar e do álcool combustível que foram responsáveis por boa parte das exportações em 2006, correspondendo a 53% do valor exportado entre janeiro e novembro.

A cana-de-açúcar, de longe, do ponto de vista econômico, energético e ambiental é a melhor alternativa para a produção de biocombustível. A produção e o uso de energia renovável assumem importância fundamental quando se associam meio ambiente e desenvolvimento, levando à valorização da biomassa para esse fim. A cana-de-açúcar é um

bom exemplo de biomassa e o uso do álcool combustível dela proveniente representa uma resposta rápida à necessidade de redução das emissões de gases do efeito estufa.

O Brasil e os Estados Unidos são líderes mundiais na produção de etanol, com Brasil tendo uma participação mundial de 50% nas exportações de etanol, principalmente para a Índia, o Japão e os Estados Unidos (Pimentel & Patzek, 2005). Com as leis americanas para banir o aditivo MTBE (metil-tércio-butil éter) na mistura de gasolina, em 1999, e a lei *Renewable Fuel Standard* (RFS), assinada pelo Presidente Bush, em agosto de 2005, a produção de álcool, que era de 5,0 bilhões de litros em 1999, passou para 16 bilhões de litros, em 2005. Pela lei RFS, os Estados Unidos deverão produzir 7,5 bilhões de galões (28 bilhões de litros), em 2008. Estima-se que, se os países da Europa, os Estados Unidos e o Japão adotassem uma mistura de 10% de etanol na gasolina, seria necessário um adicional de 60 bilhões de litros de álcool para 2007 (Shapouri et al., 2006). A cana-de-açúcar é, em si mesma, usina de enorme eficiência: cada tonelada tem potencial energético equivalente ao de 1,2 barril de petróleo.

O cenário futuro mostra que somente os países consumidores de energia como Estados Unidos, Japão e Europa, vão precisar importar mais de 10 bilhões de litros de etanol até 2011/12. Se uma tonelada de cana produz 88 litros de etanol, precisaria adicionar mais de 110 milhões de toneladas de cana para atender o mercado futuro, o que acrescentaria mais 1,2 milhão de hectares. A UNICA prevê um crescimento da produção de 6% a 7% anualmente, chegando a uma produção de 560 milhões de toneladas de cana, em 2010/11 (Hill et al., 2006).

De acordo com Scardua e Rosenfeld (1979), a necessidade hídrica da cana-de-açúcar é função do ciclo fenológico, estágio de desenvolvimento, variedade das condições climáticas locais e também da disponibilidade da água existente no solo, com um consumo máximo que varia de 2,8 a 8,6 mm.dia<sup>-1</sup>, mínimo de 0,5 a 4,8 mm.dia<sup>-1</sup> e médio de 2,5 a 5,8 mm.dia<sup>-1</sup>; cujos valores dos coeficientes de cultivo variaram de 0,5 a 1,10. Os mesmos autores verificaram que há redução na produtividade da cultura quando a força de retenção da água pelo solo for superior a 0,5 atm. O consumo hídrico diário da cana-de-açúcar nas principais regiões produtoras do país, dependendo da variedade, do estágio de desenvolvimento da cultura, da demanda evapotranspirométrica em função do mês e da região (variação temporal e espacial), em geral tem variado de 2,0 a 6,0 mm/dia (Bernardo, 2005).

Na maioria das regiões, a produtividade da cana-de-açúcar está bem abaixo desses valores e, no cultivo irrigado, é comum ultrapassar 100 ton ha<sup>-1</sup>. De acordo com Veiga et al. (2006), a produtividade da cana-de-açúcar no Brasil no período de 1970 a 2004, aumentou de forma significativa, variando de 46,23 ton ha<sup>-1</sup> na safra 1970/71 a 73,88 ton ha<sup>-1</sup> na safra

2004/2005. No estado do Rio de Janeiro, a produtividade, no período de 1990 a 2004, aumentou 10 ton ha<sup>-1</sup> e variou de 44,88 ton ha<sup>-1</sup>, na safra 1990/1991, a 54,88 ton ha<sup>-1</sup>, na safra 2004/2005. Em Petrolina a produtividade é de aproximadamente 100 ton ha<sup>-1</sup>.

Trabalhando nos tabuleiros costeiros Paraibanos, com variedades SP-79-1011, Dantas Neto et al. (2006) encontraram produtividade de até 104 ton ha<sup>-1</sup>, primeira soca, com lâmina total de água de 1164 mm, sendo 807 mm de precipitação efetiva e 357 mm com irrigação sistema pivô central, e, 305 kg de adubação de cobertura N e K<sub>2</sub>O na proporção 1 para 0,94, respectivamente.

## CAPÍTULO III

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 - MATERIAL

##### 3.1.1 - Caracterização da área de estudo

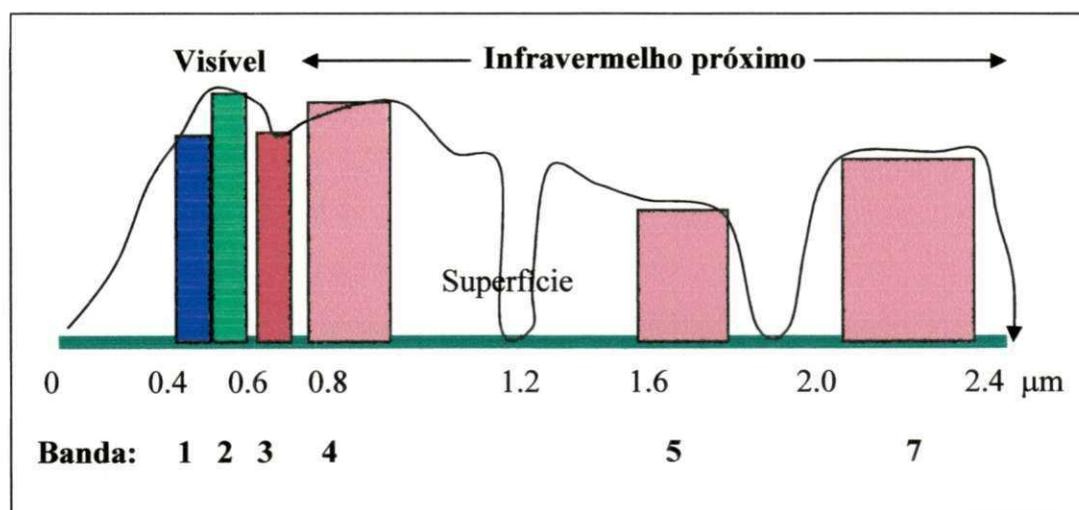
A área de estudo está situada na região semi-árida do Nordeste brasileiro, no submédio São Francisco, entre as coordenadas geográficas 8° 59' e 9° 50' de latitude Sul, 39° 29' e 42° 30' de longitude Oeste, a uma altitude média de 389 m. A área é pólo de desenvolvimento e destaque na agricultura irrigada, onde várias empresas do setor agrícola estão instaladas, incluso a Agroindústria do Vale do São Francisco S. A. - AGROVALE, em Juazeiro - BA, que possui área cultivada com cerca de 15.000 ha de cana-de-açúcar irrigada (irrigação plena); sendo 13.920 ha irrigadas por superfície (sulco), 1.029 ha irrigadas por aspersão (pivô central e linear) e 200 ha com irrigação localizada (gotejamento). A classe de solo predominante na área é o Vertissolo, com cerca de 9.000 ha; encontram-se, também, 4.500 ha de Cambissolo e 1.500 ha de Argissolo (AGROVALE, 2006).

A região do submédio São Francisco possui clima do tipo BSW<sub>h</sub>' (classificação de Köpper), ou seja, semi-árido quente, com precipitações irregulares e mal distribuídas, concentradas nos meses de novembro a abril, com média anual em torno de 540 mm. As variações de temperatura atingem máximas mensais de 40,4°C a 41,9°C nos meses de outubro e novembro e mínimas mensais de 22,1°C a 22,5°C em julho, com média anual de 26,5°C. A umidade relativa do ar média oscila em torno de 67,8%, ventos moderados com velocidade em torno de 4 m s<sup>-1</sup>, insolação anual de 3.000 horas e evaporação em torno de 2.080 mm ano<sup>-1</sup> (Galvão, 2003).

##### 3.1.2 - Imagens de satélite

As imagens utilizadas neste estudo foram adquiridas junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e correspondem a órbita/ponto 217/66, imageadas pelo Mapeador Temático - TM a bordo do Landsat 5, nos dias 12 de outubro (doa = 286) e 13 de novembro de 2004 (doa = 318), 15 de outubro de 2005 (doa = 288), 30 de julho de 2006 (doa = 211) e 22 de janeiro de 2007 (doa = 22). O TM-Landsat 5 opera em sete bandas espectrais, sendo

três na região do visível, três na região do infravermelho próximo e uma na região do infravermelho termal, conforme ilustrado na Figura 3.1. O resultado são imagens com dimensões de 185 km x 185 km, resolução espacial de 30 m, exceto na banda 6 (termal) que tem resolução de 120 m, e opera a uma altura da ordem de 705 km. As principais características das bandas e seus respectivos comprimentos de ondas das imagens obtidas pelo sensor TM-Landsat 5, encontram-se na Tabela 3.1.



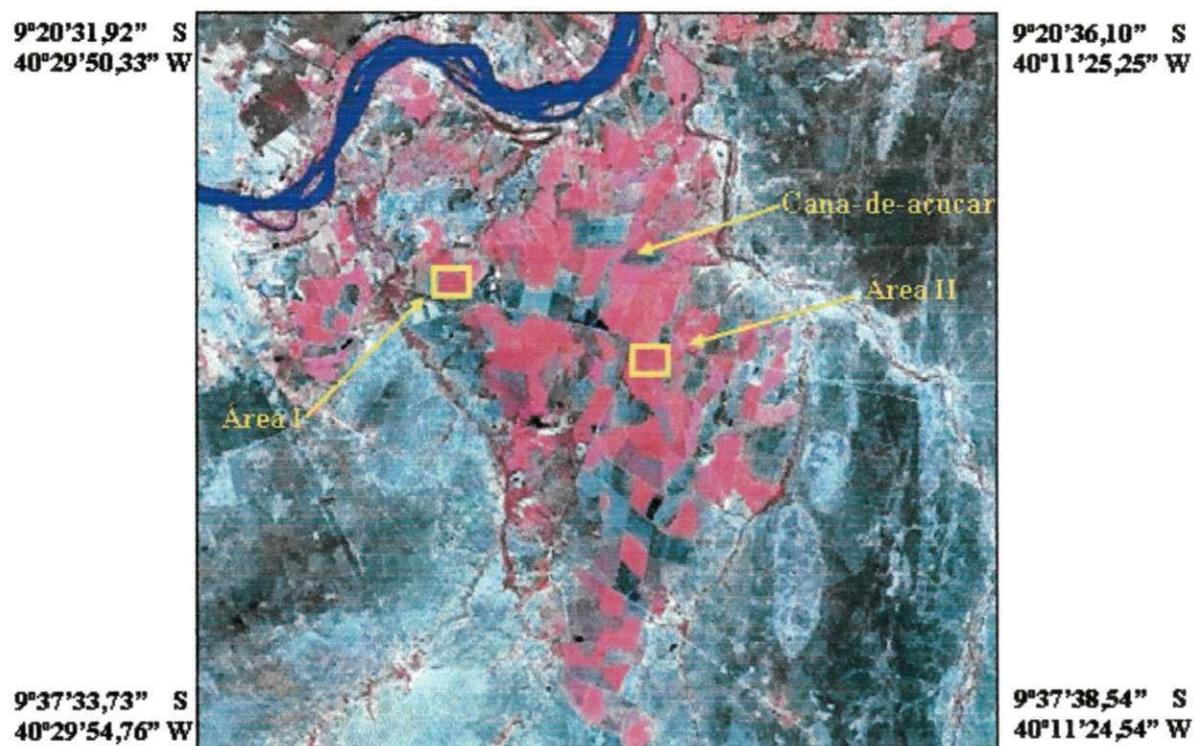
**Figura 3.1** - Espectro eletromagnético da radiação solar à superfície e posicionamento das bandas reflectivas do TM-Landsat 5.

Fonte: <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/metric/Ftcollins/workshop>.

**Tabela 3.1** - Características das imagens TM-Landsat 5.

Características	Sensor TM
Faixa espectral	Banda 1 - 0,45 a 0,52 $\mu\text{m}$
	Banda 2 - 0,52 a 0,60 $\mu\text{m}$
	Banda 3 - 0,63 a 0,69 $\mu\text{m}$
	Banda 4 - 0,76 a 0,90 $\mu\text{m}$
	Banda 5 - 1,55 a 1,75 $\mu\text{m}$
	Banda 6 - 10,4 a 12,50 $\mu\text{m}$
Resolução espacial	30 x 30 m
	120 x 120 m (banda 6)
Resolução radiométrica	8 bits (256 níveis de cinza)
Resolução temporal	16 dias
Dimensão da imagem	185 x 185 km
Número de pixel da imagem	38.020.000

Todas as bandas foram empilhadas em ordem crescente, utilizando o software ERDAS Imagine 8.7. Em seguida, foi feito um recorte das imagens, resultando em uma cena com área de aproximadamente 105.000 ha e coordenadas geográficas conforme ilustrada na Figura 3.2.



**Figura 3.2** - Imagem da área de estudo em combinação das bandas RGB 4, 3 e 2, imageada em 30.07.2006.

## 3.2 - MÉTODOS

### 3.2.1 - Evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>)

Tradicionalmente, a evapotranspiração real ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), que na prática é denominada evapotranspiração da cultura - ET<sub>c</sub> ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) de áreas agrícolas tem sido estimada através do produto da evapotranspiração de uma cultura de referência (ET<sub>ref</sub>) pelo coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), característico de cada cultura e do seu estágio de desenvolvimento, sendo computada pela seguinte equação (Allen et al., 1998; Allen et al., 2007a):

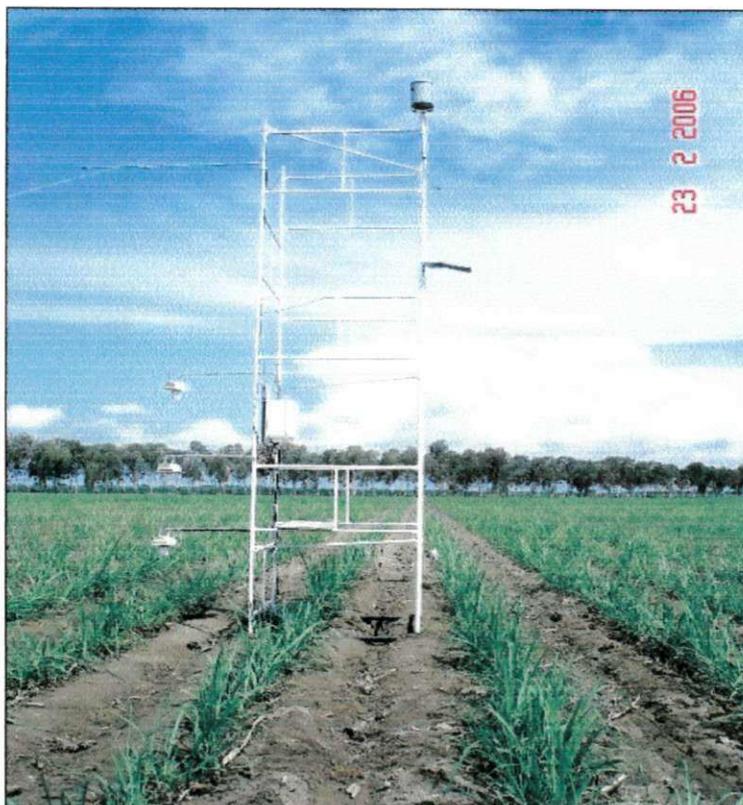
$$ET_c = K_c \cdot ET_r \quad (3.1)$$

Nesta pesquisa, a evapotranspiração da cana-de-açúcar foi estimada utilizando-se o modelo METRIC (*Mapping Evapotranspiration with high Resolution and Internalized Calibration*) que é uma variante do modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), e esses modelos utilizam as sete bandas espectrais do sensor TM-Landsat 5. Para a estimativa da biomassa fresca, da bioprodutividade e da produtividade da água da cana-de-açúcar, foi utilizado o mesmo procedimento de cálculo usado por Namayanga (2002), Bastiaassen & Ali (2003) e Mokhtari (2005), com algumas adaptações. Para validação do modelo SEBAL/METRIC foram utilizados os valores estimados nas imagens correspondentes aos dias 211 e 22, datadas de 30 de julho de 2006 e 22 de janeiro de 2007 respectivamente. Os valores horários e diários da evapotranspiração de referência utilizados foram determinados conforme método de Penman-Monteith e coletados na estação meteorológica automática instalada na área de estudo (Figura 3.3). Foi utilizado o método da razão de Bowen para determinação dos componentes do balanço de energia com dados coletados em uma torre micrometeorológica instalada no interior da área do experimento conduzido por pesquisadores da EMBRAPA no período de fevereiro de 2006 a maio de 2007 (Figura 3.4). Para medição do fluxo de calor no solo foram instalados dois fluxímetros na área experimental.

As coordenadas geográficas da área experimental são 9°29' S, 40°21' W e altitude igual a 395 m, a variedade da cana-de-açúcar utilizada foi a RB 92-579 irrigada por sulco.



**Figura 3.3** – Estação meteorológica da AGROVALE.



**Figura 3.4** - Torre micrometeorológica instalada na área experimental.

A elaboração dos modelos necessários à determinação de todas as variáveis utilizadas no cômputo da estimativa dos parâmetros mencionados, como também as diversas etapas de processamento das imagens para obtenção dos mesmos, foram feitas através do software ERDAS-Imagine 8.7. A Figura 3.5 apresenta um diagrama com a seqüência dos parâmetros necessários para obtenção da evapotranspiração real.

### **3.2.2 - Radiância espectral ( $L_{t,i}$ )**

Consiste na conversão do número digital (ND) de cada pixel da imagem em radiância espectral monocromática, para cada banda, medida ao nível da órbita do satélite TM - Landsat 5. Para as bandas reflectivas, ou seja, 1 2 3 4 5 e 7, as radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel por unidade de área, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, e para a banda 6, a radiância monocromática emitida por cada pixel. Utilizando a equação proposta por Markham & Baker (1987) tem-se que:

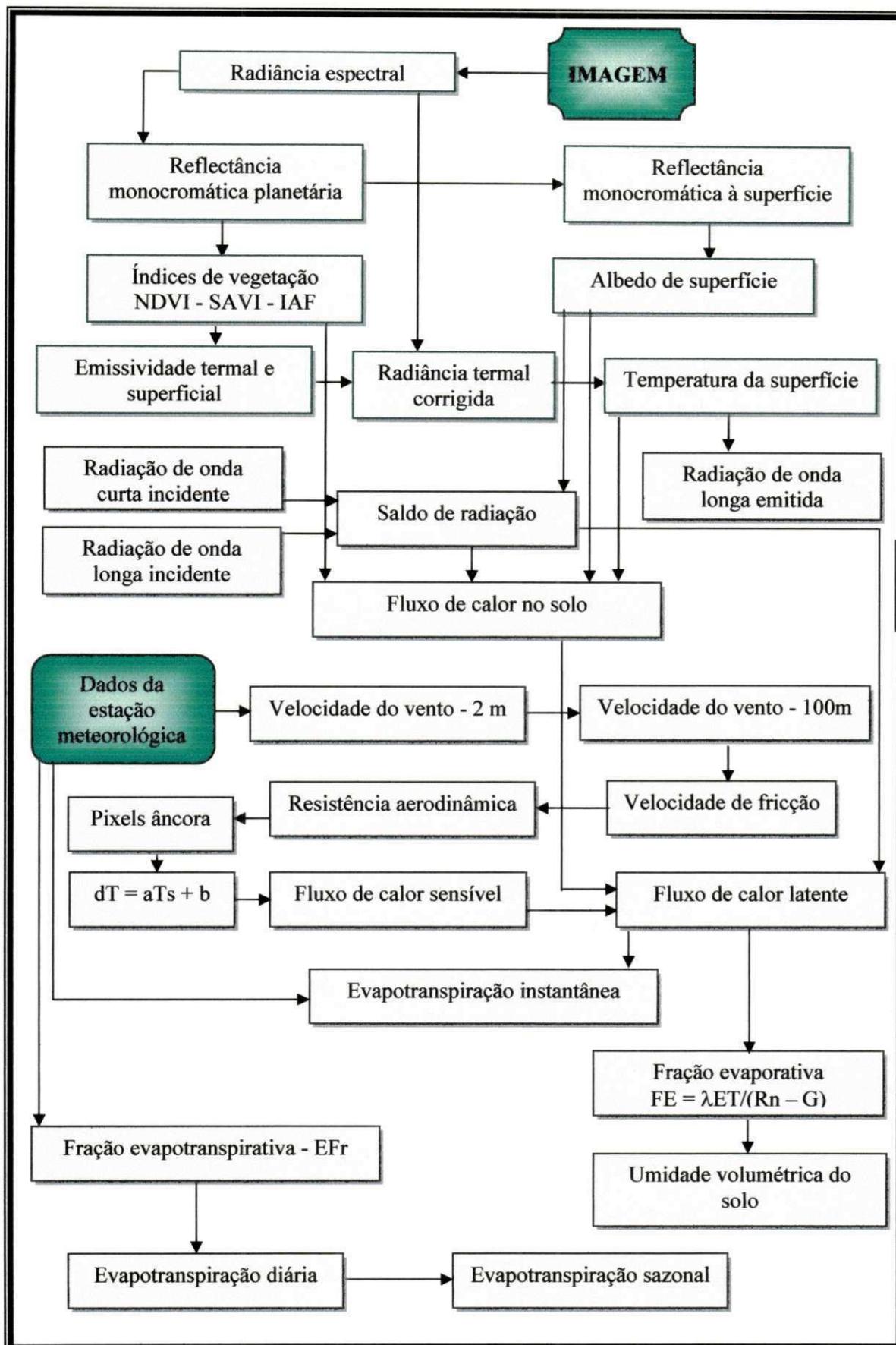


Figura 3.5 - Diagrama com as etapas de obtenção da evapotranspiração.

$$L_{t,i} = \left( \frac{L_{i,max} - L_{i,min}}{255} \right) * ND + L_{i,min} \quad (3.2)$$

onde  $L_{t,i}$  é a radiância espectral para cada banda ( $W m^{-2} ster^{-1} \mu m^{-1}$ ),  $L_{i,max}$  e  $L_{i,min}$  são as constantes de calibração para o TM-Landsat 5 (Tabela 3.2), ND o número digital do pixel considerado (número inteiro de 0 a 255) e  $i$  corresponde às bandas 1, 2,...,7 do TM-Landsat 5.

**Tabela 3.2** - Bandas espectrais do sensor TM-Landsat 5, faixa espectral e respectivos coeficientes de calibração, segundo Chander & Markhan (2003), para imagens obtidas após 4 de maio de 2003.

Bandas	Faixa espectral	Lmin ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )	Lmax ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ )	$k_{\lambda i}$
1	0,45 - 0,52	-1,52	193,0	1957
2	0,52 - 0,60	-2,84	365,0	1826
3	0,63 - 0,69	-1,17	264,0	1554
4	0,76 - 0,90	-1,51	221,0	1036
5	1,55 - 1,75	-0,37	30,2	215,0
6	10,4 - 12,50	1,2378	15,303	-
7	2,08 - 2,35	-0,15	16,5	80,67

### 3.2.3 - Reflectância monocromática planetária ( $\rho_{t,i}$ )

É a reflectância hemisférica de cada banda observada pelo satélite no topo da atmosfera, e é computada através da seguinte equação (Allen et al., 2007a):

$$\rho_{t,i} = \frac{\pi \cdot L_{t,i}}{k_{\lambda,i} \cos \theta_z dr} \quad (3.3)$$

onde  $\rho_{t,i}$  é a reflectância monocromática,  $L_{t,i}$  a radiância espectral de cada banda,  $k_{\lambda,i}$  a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$  - Tabela 3.2),  $\theta_z$  o ângulo zenital solar ( $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ),  $dr$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol, em unidade astronômica, variando de 0,97 a 1,03. O valor médio anual de  $dr$  é 1, e para sua determinação utilizou-se equação proposta por Duffie & Beckman (1980), modificada por Allen et al. (1998), qual seja:

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

onde  $doa$  é a ordem do dia no ano, com o argumento do cosseno em radianos.

O ângulo de elevação solar ( $\phi$ ) é o complemento do ângulo zenital e foi obtido a partir do cabeçalho de cada imagem.

A tabela a seguir apresenta os valores da ordem do dia no ano ( $doa$ ), o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol ( $dr$ ) e cosseno do ângulo zenital ( $\cos \theta_z$ ) das imagens utilizadas.

**Tabela 3.3** - Datas das imagens, ordem do dia no ano ( $doa$ ), inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol ( $dr$ ) e cosseno do ângulo zenital ( $\cos \theta_z$ ).

Data da imagem	doa	dr	cos $\theta_z$
12.10.2004	286	1,0069	0,8861
13.11.2004	318	1,0227	0,8855
15.10.2005	288	1,0080	0,8950
30.07.2006	211	0,9708	0,7537
22.01.2007	22	1,0306	0,8454

### 3.2.4 - Reflectância monocromática à superfície ( $\rho_{s,i}$ )

Definida como a razão entre a radiância hemisférica refletida corrigida atmosféricamente e a incidente, igualmente corrigidos os efeitos atmosféricos, pode ser obtida para cada banda  $i$ , segundo expressão (Allen et al., 2007a):

$$\rho_{s,i} = \frac{R_{out,S,i}}{R_{in,S,i}} = \frac{\rho_{toa,i} - \rho_{atm,i}}{\tau_{in,i} \cdot \tau_{out,i}} \quad (3.5)$$

onde  $\rho_{s,i}$  é a reflectância da superfície corrigida,  $\rho_{toa,i}$  a reflectância no topo da atmosfera,  $\rho_{atm,i}$  é a reflectância atmosférica da banda  $i$ , observada pelo satélite, originada do espalhamento da radiação na atmosfera,  $\tau_{in,i}$  é a transmitância atmosférica da radiação solar incidente em cada banda,  $\tau_{out,i}$  a transmitância atmosférica da radiação solar refletida da superfície para a banda  $i$ .

As funções de transmitância para  $\tau_{inc,i}$  e  $\tau_{out,i}$  são similares à função de transmitância de Majumdar et al. (1972) que foi adaptada pela FAO para o cálculo da evapotranspiração (Allen et al., 1998; ASCE-EWRI, 2005) e são obtidas segundo expressões:

$$\tau_{inc,i} = C_1 \exp \left[ \frac{C_2 P}{Kt \cdot \cos \theta_{hor}} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \theta_{hor}} \right] + C_5 \quad (3.6)$$

$$\tau_{out,i} = C_1 \exp \left[ \frac{C_2 P}{Kt \cdot \cos \eta} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \eta} \right] + C_5 \quad (3.7)$$

onde  $C_1 - C_5$  são constantes específicas para o TM-Landsat 5,  $\eta$  é o ângulo zenital do satélite, e como  $\eta$  do sensor TM é muito próximo de 0, o cosseno de  $\eta$  é aproximadamente igual a 1.  $P$  é a pressão atmosférica (kPa),  $W$  é a água precipitável na atmosfera (mm),  $\cos \theta_{hor}$  - ângulo zenital do sol, calculado através da equação (3.10),  $Kt$  é o coeficiente de turbidez atmosférica,  $0 < Kt \leq 1,0$ , sendo:  $Kt = 1,0$  para condições de ar puro e  $Kt = 0,5$  para condições de ar extremamente túrbido ou poluído (Allen et al., 1998).

O valor de  $W$  (mm) é calculado utilizando a pressão parcial de vapor d'água atmosférico  $e_a$  (kPa), medida ou estimada em uma estação meteorológica, em intervalo de tempo que compreende a passagem do TM-Landsat 5, segundo equação proposta por Garrison & Adler (1990):

$$W = 0,14 \cdot e_a \cdot P + 2,1 \quad (3.8)$$

Na ausência de medições na área de estudo, a pressão atmosférica ( $P$ ) pode ser calculada pela seguinte equação (Allen et al., 1998):

$$P = 101,3 \left( \frac{T_a - 0,0065 \cdot z}{T_a} \right)^{5,26} \quad (3.9)$$

onde  $T_a$  é a temperatura do ar (K) e  $z$  a altitude local (m). O valor de  $z$  utilizado neste trabalho foi de 398 m, considerado constante para todos os pixels da área estudada.

Para superfícies planas e horizontais, o  $\cos \theta_{\text{hor}}$  é calculado pela expressão (Allen et al., 2007a):

$$\cos \theta_{\text{hor}} = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\varphi) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\omega) \quad (3.10)$$

onde  $\delta$  é a declinação do Sol,  $\varphi$  é a latitude e  $\omega$  o ângulo horário, sendo  $\omega = 0$  ao meio dia,  $\omega$  é negativo pela manhã e positivo à tarde.

A reflectância originada da radiação espalhada pela atmosfera na direção do TM-Landsat 5 ( $\rho_{\text{atm},i}$ ) é computada conforme expressão (Allen et al., 2007a):

$$\rho_{\text{atm},i} = C_i(1 - \tau_{\text{in},i}) \quad (3.11)$$

onde  $C_i$  é a constante ajustada para cada banda do sensor TM-Landsat 5, Tabela 3.4.

### 3.2.5 - Albedo da superfície ( $\alpha_s$ )

Define-se albedo de superfície -  $\alpha_s$ , a porção da radiação total do espectro de onda curta incidente na superfície que é refletida pela mesma, sendo obtido pela seguinte equação (Allen et al., 2007a):

$$\alpha_s = \sum_{i=1}^n [\rho_{s,i} \omega_i] \quad (3.12)$$

onde  $\rho_{s,i}$  é a reflectância monocromática da superfície,  $n$  o número de bandas reflexivas do satélite e  $\omega_i$  é o coeficiente de ponderação para cada banda  $i$ .

**Tabela 3.4** - Valores das constantes  $C_1 - C_5$ ,  $C_i$  e  $\omega_i$  para imagens Landsat.

<b>Coefficiente</b>	<b>Banda 1</b>	<b>Banda 2</b>	<b>Banda 3</b>	<b>Banda 4</b>	<b>Banda 5</b>	<b>Banda 7</b>
$C_1$	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
$C_i$	0,640	0,310	0,286	0,189	0,274	-0,186
$\omega_i$	0,254	0,149	0,147	0,311	0,103	0,036

### 3.2.6 - Índices de vegetação

Índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais que indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo índice de área foliar, porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa fresca e radiação fotossinteticamente ativa.

Um índice de vegetação resulta da combinação da medida da radiação eletromagnética refletida pela vegetação, em algumas bandas do espectro eletromagnético, que guardam certa relação com a quantidade e o estado da vegetação na área onde foi feita a medida espectral (Moreira & Shimabukuro, 2004).

De todos os índices de vegetação encontrados na literatura, os mais comumente utilizados são: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (SAVI) e o Índice de Área Foliar (IAF).

O NDVI pode ser obtido a partir da energia solar refletida da superfície terrestre que é detectada pelo sensor orbital em intervalos de comprimento de ondas situados na região do visível e do infravermelho próximo, qual seja:

$$NDVI = \frac{\rho_{14} - \rho_{13}}{\rho_{14} + \rho_{13}} \quad (3.13)$$

onde  $\rho_{14}$  e  $\rho_{13}$  representam as reflectâncias das bandas 4 e 3 do TM-Landsat 5, respectivamente.

Este índice é um bom indicador da quantidade e da condição da vegetação verde. Os valores do NDVI variam de -1 a 1. Valores mais próximos de 1 corresponde a maior vigor vegetativo. Para áreas vegetadas varia entre 0 e 1, enquanto que para água, nuvens e neve os valores de NDVI são menores que zero.

À medida que os índices de vegetação foram sendo utilizados se verificou que a resposta espectral do solo em uma área com pouca cobertura vegetal poderia ser dominante sobre a resposta espectral da vegetação. Heute (1988) adicionou uma constante L à equação do NDVI, originando assim o Índice de Vegetação Ajustado do Solo (SAVI). A constante L é um fator de ajuste que depende das características do solo, varia gradualmente de zero, para dosséis com alta cobertura vegetal e 1 para dosséis com baixa cobertura vegetal. Observa-se que o valor de 0,5 para L é bastante indicado na literatura, mas neste estudo foi adotado o valor de 0,1 para L. Valor utilizado por Tasumi (2003). O SAVI é dado por:

$$\text{SAVI} = \frac{(1+L) \cdot (\rho_{t4} - \rho_{t3})}{(L + \rho_{t4} + \rho_{t3})} \quad (3.14)$$

O que define o Índice de Área Foliar - IAF ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) é a relação existente entre a área foliar de uma planta, que depende do número e do tamanho das folhas, e a área do terreno ocupado pela mesma. O índice de área foliar é um indicador da biomassa de cada pixel da imagem e da resistência do dossel podendo ser calculado pela seguinte equação empírica (Allen et al., 2002):

$$\text{IAF} = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - \text{SAVI}}{0,59}\right)}{0,91} \quad (3.15)$$

No METRIC, o valor máximo que se pode obter do IAF é 6,0 quando o SAVI > 0,687, por sua vez, o IAF = 0 quando o SAVI ≤ 0,0. De acordo com Bastiaassen (1998), a precisão na estimativa do IAF depende do local, das características do solo e do tipo de cultura. No entanto, para Allen et al. (2007a), no METRIC a incidência de erros no cálculo do IAF é baixa.

### 3.2.7 - Emissividade termal ( $\epsilon_{\text{NB}}$ ) e superficial ( $\epsilon_0$ )

A emissividade espectral é um número adimensional entre 0 e 1, definida como a relação entre a energia emitida por uma superfície e a energia emitida por um corpo negro à mesma temperatura. O valor da emissividade pode variar significativamente com o comprimento de onda, a rugosidade da superfície e a sua temperatura. Segundo Tasumi (2003), os valores da emissividade em aplicações de sensoriamento remoto podem mudar com o comprimento de onda; no entanto, se faz necessário utilizar valores adequados ao comprimento de onda.

Na pesquisa considera-se a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal- $\epsilon_{\text{NB}}$  do TM-Landsat 5, com faixa espectral de 10,4 a 12,5 $\mu\text{m}$ , que é utilizada no cálculo da temperatura de superfície. Para o cálculo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, utiliza-se a emissividade da banda larga- $\epsilon_0$ .

As emissividades  $\epsilon_{NB}$  e  $\epsilon_0$  são calculadas em função do IAF, segundo as seguintes equações:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \text{ IAF} \quad (3.16)$$

$$\epsilon_0 = 0,95 + 0,01 \text{ IAF} \quad (3.17)$$

Ambas as equações são válidas para  $0 \leq \text{IAF} \leq 3$  e de acordo com (Allen et al., 2002; Trezza, 2002; Tasumi, 2003),  $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,98$  para pixels com  $\text{IAF} > 3$ . Para corpos de água o  $\text{NDVI} \leq 0$ ; então  $\epsilon_{NB} = \epsilon_0 = 0,985$ .

### 3.2.8 - Temperatura da Superfície ( $T_s$ )

A radiância termal observada pelo sensor do satélite pode ser convertida em temperatura da superfície- $T_s$  (K) utilizando-se a equação de Planck invertida, ou seja, com solução para temperatura. Como cada pixel não se caracteriza como um corpo negro se faz necessário a introdução da emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal  $\epsilon_{NB}$  na equação original de Markham & Baker (1986), citado por Tasumi (2003):

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{R_c} + 1\right)} \quad (3.18)$$

onde  $T_s$  é a temperatura da superfície (K),  $R_c$  a radiância termal da superfície corrigida ( $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ),  $K_1$  e  $K_2$  são constantes para banda 6 do TM-Landsat 5, iguais a  $607,76 \text{ W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$  e  $1260,56 \text{ K}$  respectivamente e  $\epsilon_{NB}$  a emissividade na banda termal.

### 3.2.9 - Radiância termal da superfície corrigida ( $R_c$ )

A radiância termal corrigida é a radiância real emitida da superfície, corrigidos os efeitos atmosféricos. A radiância observada pelo sensor do satélite inclui não somente a emissão da superfície como também a radiação de onda longa da atmosfera e a radiação de onda longa da atmosfera que é refletida pela superfície. De acordo com Allen et al. (2007a), a radiância termal da superfície corrigida ( $R_c$ ) pode ser obtida através da equação proposta por Wukelic et al. (1989):

$$R_C = \frac{L_{t6} - R_P}{\tau_{NB}} - (1 - \varepsilon_{NB})R_{SKY} \quad (3.19)$$

onde  $R_C$  é a radiancia termal da superfície corrigida ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ),  $L_{t6}$  é a radiância espectral da banda 6 ( $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$ ),  $R_P$  a radiancia termal da atmosfera na faixa espectral de 10,4 – 12,5  $\mu m$  ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ),  $\tau_{NB}$  a transmissividade do ar na faixa espectral de 10,4 – 12,5  $\mu m$ ,  $\varepsilon_{NB}$  - emissividade termal, e  $R_{SKY}$  a radiação termal incidente para condições de céu claro ( $W m^{-2}$ ), qual seja:

$$R_{SKY} = (1,807 \times 10^{-10}) T_a^4 (1 - 0,26 \exp(-7,77 \times 10^{-4} (273,16 - T_a)^2)) \quad (3.20)$$

onde  $T_a$  é a temperatura do ar medida a 2m de altura no momento da passagem do satélite (K).

Os valores de  $R_P$  e  $\tau_{NB}$  não são fáceis de ser estimados, sendo necessário à utilização de modelos de transferência radiativa, além de radiossondagem. Na impossibilidade de obtenção dos valores dos referidos parâmetros, considerar:  $R_P = 0$  e  $\tau_{NB} = 1$  (Allen et al., 2002).

### 3.2.10 - Radiação de onda longa emitida ( $R_{L\uparrow}$ )

O cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel da superfície foi obtido através da equação de Stefan-Boltzman:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_S^4 \quad (3.21)$$

onde  $R_{L\uparrow}$  é a radiação de onda longa emitida ( $W m^{-2}$ ),  $\varepsilon_0$  a emissividade superficial,  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ ) e  $T_S$  a temperatura da superfície (K).

### 3.2.11 - Radiação de onda longa incidente ( $R_{L\downarrow}$ )

A radiação de onda longa emitida pela atmosfera em direção a superfície é também computada utilizando a equação de Stefan-Boltzman, ou seja:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (3.22)$$

onde  $T_a$  a Temperatura do ar medida a 2m de altura (K) e  $\epsilon_a$  a emissividade atmosférica, que segundo Bastiaanssen (1995), pode ser obtida por:

$$\epsilon_a = 0,85 \cdot (-\ln \tau_{sw})^{0,09} \quad (3.23)$$

onde  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica de onda curta (Equação 3.24).

Para condições de céu claro, Allen et al. (1998) apresentaram uma expressão para estimar  $\tau_{sw}$  que foi posteriormente modificada pela ASCE-EWRI (2005), que considera os efeitos do vapor d'água na absorção da radiação de onda curta e a presença de poluentes na atmosfera (Allen et al., 2005) resultando em:

$$\tau_{sw} = 0,35 + 0,627 \exp \left[ \frac{-0,00146P}{Kt \cdot \cos \theta_{hor}} - 0,075 \left( \frac{W}{\cos \theta_{hor}} \right)^{0,4} \right] \quad (3.24)$$

onde  $P$  é a pressão atmosférica (kPa),  $W$  a água precipitável na atmosfera (mm),  $\cos \theta_{hor}$  - ângulo zenital do sol para superfícies planas,  $Kt$  o coeficiente de turbidez.

### 3.2.12 - Radiação de onda curta incidente ( $R_{s\downarrow}$ )

Definida como o fluxo de radiação solar direta e difusa que alcança a superfície da terra, representa a principal fonte de energia no processo evaporativo. Para superfícies com pouca declividade,  $R_{s\downarrow}$  instantânea pode ser considerada constante em toda a área. Em condições de céu claro  $R_{s\downarrow}$  pode ser calculada segundo a equação (Bastiaanssen, 1995; Allen et al., 2002):

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} \cdot \cos \theta \cdot dr \cdot \tau_{sw} \quad (3.25)$$

onde  $R_{s\downarrow}$  é a radiação de onda curta incidente ( $W m^{-2}$ ),  $G_{sc}$  a constante solar ( $1367 W m^{-2}$ ),  $\theta$  é o ângulo zenital solar (rad),  $dr$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol,  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica (Equação 3.24)

### 3.2.13 - Saldo de radiação (Rn)

O saldo de radiação - Rn à superfície é obtido através da contabilidade entre os fluxos radiativos de onda longa e onda curta que chegam e deixam a superfície, representando a principal fonte de energia utilizada nos processos físico-químicos que ocorrem na superfície terrestre, como também um parâmetro muito usado nos diversos métodos para estimar as perdas de água para a atmosfera de superfícies vegetadas. Rn pode ser obtido através de medições diretas com saldo radiômetros e na presente pesquisa foi computado segundo expressão (Allen et al., 2002; Trezza, 2002; Tasumi, 2003; Allen et al., 2007a):

$$R_n = (1 - \alpha) R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_0) R_{L\downarrow} \quad (3.26)$$

onde Rn é o saldo de radiação de cada pixel à superfície ( $W m^{-2}$ ),  $\alpha$  o albedo de cada pixel,  $R_{S\downarrow}$  a radiação de onda curta incidente ( $W m^{-2}$ ),  $R_{L\downarrow}$  a radiação de onda longa incidente ( $W m^{-2}$ ),  $R_{L\uparrow}$  a radiação de onda longa emitida ( $W m^{-2}$ ),  $\epsilon_0$  é a emissividade superficial.

### 3.2.14 - Fluxo de calor no solo (G)

A temperatura no solo não é constante e se altera com a profundidade. A radiação incidente na superfície altera a temperatura da superfície. Qualquer diferença na temperatura entre as camadas do solo ou entre a superfície do solo e o ar irá causar um fluxo de calor.

O fluxo de calor no solo representa a entrada e a saída de energia no solo, e é um componente de grande importância para determinação do balanço de energia. O aquecimento radiativo modifica diretamente a temperatura da superfície e o gradiente termal da camada superficial do solo; por isso, o fluxo de calor no solo produzido por um gradiente de temperatura para qualquer profundidade pode ser representado pela seguinte equação (Loheide & Gorelick, 2005):

$$G = -K_{TS} \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (3.27)$$

onde G é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ),  $K_{TS}$  - condutividade termal do solo ( $W m^{-1} K^{-1}$ ),  $\partial T_s / \partial z$  é o gradiente de temperatura entre dois níveis de profundidade ( $K m^{-1}$ ).

Como o fluxo de calor no solo é um parâmetro obtido através de medidas na superfície ou estimado empiricamente, no SEBAL/METRIC a estimativa de G é feita através de uma relação empírica proposta por Bastiaanssen (2000), em função do albedo de superfície, da temperatura e do saldo de radiação, considerando qualquer tipo de solo, cobertura vegetal e valores próximos ao meio-dia, ou seja:

$$G = [T_s(0,0038 + 0,0074\alpha).(1 - 0,981NDVI^4)]R_n \quad (3.28)$$

onde G é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ),  $T_s$  a temperatura da superfície ( $^{\circ} C$ ),  $\alpha$  o albedo de cada pixel, NDVI o índice de vegetação da diferença normalizada e  $R_n$  o saldo de radiação ( $W m^{-2}$ ).

Para outros alvos tais como corpos de água, neve e áreas de várzeas em que os valores de NDVI são negativos, outros procedimentos são necessários para efeito de correção dos valores do fluxo de calor no solo.

Allen et al. (2007a) afirmam que os maiores valores de G/ $R_n$  da Equação (3.28) são observados em áreas de elevados valores de albedo e os menores valores em áreas com vegetação densa. Em aplicações do METRIC nos Estados Unidos o valor de  $G = 0,5R_n$  tem sido adotado para os corpos de água profundas, representando valores próximos ao meio-dia. No entanto, a profundidade e a turbidez dos corpos de água devem ser observados conforme a estação. G/ $R_n$  será menor que 0,5 para corpos de água pouco profundos e contendo material em suspensão. Nesta pesquisa adotou-se  $G = 0,3R_n$ , valor utilizado por Silva & Bezerra (2006) e Feitosa (2005).

### 3.2.15 - Fluxo de calor sensível (H)

O fluxo de calor sensível representa a transferência de energia para as camadas atmosféricas através dos processos de condução e convecção. Para Monteith (1972), o fluxo de calor sensível é expresso como a razão entre o gradiente vertical de temperatura do ar próximo à superfície e a resistência aerodinâmica a esse fluxo. Durante o dia a superfície terrestre se aquece mais que a atmosfera, de modo que o fluxo de calor sensível é ascendente e é descendente durante a noite, devido a temperatura da superfície terrestre ser menor que a da atmosfera. É um componente difícil de ser determinado com precisão e, de acordo com

Bastiaanssen et al. (1998), seu valor pode ser estimado através da equação da transferência aerodinâmica de calor.

$$H = \rho \cdot c_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (3.29)$$

onde  $H$  é o fluxo de calor sensível ( $W m^{-2}$ ),  $\rho$  a densidade do ar ( $kg m^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar ( $J kg^{-1} K^{-1}$ ) e  $r_{ah}$  a resistência aerodinâmica ao transporte de calor sensível ( $s m^{-1}$ ).

$$dT = T_2 - T_1 = b + aT_s \quad (3.30)$$

$dT$  - diferença de temperatura entre dois níveis de referência sobre a superfície.

O fluxo de calor sensível é função da velocidade do vento, da rugosidade da superfície e do gradiente de temperatura entre dois níveis próximos à superfície. Como as variáveis  $r_{ah}$  e  $dT$  não são conhecidas, no SEBAL/METRIC é necessário a escolha de dois pixels dentro da área de interesse, denominados “pixels âncoras” para efetivar o cômputo de  $H$  para cada pixel. Os mesmos proporcionam a determinação da variação de temperatura ( $dT$ ) entre dois níveis de referência e a resistência aerodinâmica ao transporte de calor ( $r_{ah}$ ) para todos os pixels da imagem.

A seqüência das etapas para a obtenção das variáveis necessárias para o cômputo de  $H$ , encontra-se discriminada a seguir e todos os dados e parâmetros instantâneos referentes ao pixel frio e ao pixel quente das imagens estudadas após o processo iterativo encontram-se nos Apêndices 1, 2, 3, 4 e 5.

### 3.2.15a - Coeficiente de rugosidade da superfície ( $z_{0m}$ )

Os dados de velocidade do vento  $u$  ( $m s^{-1}$ ) e altura média da vegetação  $h$  (m) são obtidos da estação meteorológica local. O primeiro passo consiste na obtenção do coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum  $z_{0m}$  da estação meteorológica em que foi medida  $u$ . Pode-se obtê-lo em função da altura média da vegetação circundante, segundo equação de Brutsaert (1982):

$$z_{0m} = 0,123h \quad (3.31)$$

onde  $z_{0m}$  é o coeficiente de rugosidade ao transporte de momentum (m) e  $h$  é altura da vegetação (m).

### 3.2.15b - Velocidade de fricção ( $u^*$ )

A velocidade de fricção  $u^*$  quantifica as flutuações turbulentas da velocidade do ar, e para sua determinação através do modelo se faz necessário a obtenção de pelo menos uma medida da velocidade do vento dentro da área de estudo no intervalo de tempo correspondente a passagem do satélite. Para a estimativa de  $u^*$  utilizou-se o perfil logaritmo do vento. Inicialmente, admite-se a atmosfera em condição de estabilidade neutra, o que corresponde a seguinte expressão para a velocidade do vento:

$$u_z = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right) \quad (3.32)$$

em que  $u_z$  é a velocidade do vento ( $m s^{-1}$ ) medida na estação meteorológica,  $z$  o nível em que foi feita a medida e  $z_{0m}$  o coeficiente de rugosidade.

Resolvendo a equação do perfil logaritmo para a velocidade de fricção  $u^*$ , tem-se:

$$u^* = \frac{ku_z}{\ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right)} \quad (3.33)$$

onde  $u^*$  é a velocidade de fricção ( $m s^{-1}$ ),  $k$  constante de von Karman (0,41),  $u_z$  velocidade do vento ( $m s^{-1}$ ),  $z$  altura em que foi medida a velocidade do vento (2,0 m) e  $z_{0m}$  o coeficiente de rugosidade (m).

Uma vez obtida a  $u^*$ , pode-se projetar a velocidade do vento em um nível tal que a mesma não seja afetada pela rugosidade da superfície. Esse nível é denominado de “blending height”. Para a área de estudo, considerou-se que esse nível era de 100 m. Logo, a velocidade do vento naquele nível ( $z = 100$  m) é dada por:

$$u_{100} = u^* \frac{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)}{k} \quad (3.34)$$

onde  $u_{100}$  é a velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) ao nível de  $z = 100$  m.

### 3.2.15c - Velocidade de fricção para cada pixel ( $u_*$ )

Assumindo  $u_{100}$  constante em toda a área estudada pode-se obter a velocidade de fricção  $u_*$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) para cada pixel pela equação (Allen et al., 2002; Bastiaanssen, 1998; Tasumi, 2003; Trezza, 2002):

$$u_* = \frac{ku_{100}}{\ln\left(\frac{100}{z_{0m}}\right)} \quad (3.35)$$

No SEBAL/METRIC a rugosidade da superfície  $z_{0m}$  é estimada para cada pixel de acordo com os tipos de utilização da superfície ou quantidade de vegetação. Em áreas de vegetação densa  $z_{0m}$  é descrito como uma pequena fração da altura da vegetação. Bastiaanssen (2000) sugeriu utilizar uma função para  $z_{0m}$  baseado no NDVI, posteriormente confirmada por Morse & Allen (2001), que para eles existe uma relação direta entre o NDVI e  $z_{0m}$ , podendo ser estimada através da seguinte expressão:

$$Z_{0m} = \exp(a * \text{NDVI}) + b \quad (3.36)$$

onde  $a = 3,157$  e  $b = 2,818$ .

### 3.2.15d - Resistência aerodinâmica ( $rah$ )

A resistência aerodinâmica ao transporte de calor e vapor de água de uma superfície evaporante e o ar sobre o dossel da cultura. Em superfícies cultivadas, pode ser definida a partir de medidas do perfil da velocidade do vento a uma altura de referência acima do solo. Admitindo-se a atmosfera em condição de estabilidade neutra e os valores de  $u^*$  obtidos em cada pixel, estima-se a resistência aerodinâmica  $rah$  ( $\text{s m}^{-1}$ ) através da seguinte equação (Allen et al., 2002):

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u^* \cdot k} \quad (3.37)$$

em que os níveis  $z_2$  e  $z_1$  podem ser considerados iguais a 2,0 e 0,1 m, respectivamente.

As condições de estabilidade da atmosfera têm um grande efeito sobre a resistência aerodinâmica ( $r_{ah}$ ) e devem ser consideradas no cálculo do fluxo de calor sensível (H). Para tanto, há que existir uma diferença de temperatura entre dois níveis na atmosfera. Como a temperatura do ar de cada pixel é desconhecida, a diferença de temperatura próxima a superfície  $dT$  (°C) para cada pixel é obtida através da linearidade entre  $dT$  e  $T_s$ . No SEBAL/METRIC é implicitamente suposto que as áreas quentes, com maior emitância termal, cria uma maior variação vertical de  $dT$  que as superfícies frias (Trezza, 2006).

$$dT = b + aT_s \quad (3.38)$$

onde **a** e **b** são coeficientes definidos através da escolha de dois pixels, denominados “âncora” e  $T_s$  é a temperatura da superfície (°C).

O local para seleção dos “pixels âncora” na imagem é de extrema importância, ou seja, no METRIC o pixel “frio” deve ser selecionado em uma área agrícola bem irrigada, em que neste pixel os valores de H e  $dT$  não são nulos e de acordo com Allen et al. (2002; 2007a), a taxa de evapotranspiração (ET) é 5% maior que a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência ( $ET_r$ ). No METRIC a cultura de referência utilizada foi a alfafa, e, portanto, neste pixel o fluxo de calor sensível é dado por:

$$H_{PF} = Rn_{PF} - G_{PF} - LE_{PF} \quad (3.39)$$

onde  $LE_{PF} = 1,05 \cdot ET_r$

$$e \quad dT_{PF} = \frac{H_{PF} \cdot r_{ah}}{\rho \cdot c_p} = \frac{(Rn - G - 1,05 \cdot ET_r)_{PF} \cdot r_{ah}}{\rho \cdot c_p} = b + aT_{s_{PF}} \quad (3.40)$$

A ETr é a evapotranspiração de uma cultura hipotética mantida sob condições hídricas ideais. Para Trezza (2002) a evapotranspiração de referência integra os efeitos dos parâmetros climáticos local no processo evapotranspirativo, de modo que a evapotranspiração no pixel frio será representativa para as condições climáticas de toda a área de estudo. Neste trabalho, os valores da evapotranspiração da grama (ET<sub>o</sub>) foram convertidos em evapotranspiração da alfafa (ETr), através de fator de conversão relacionado às condições climáticas.

Por outro lado, o pixel “quente” deve ser selecionado em uma área de solo exposto, desprovido de vegetação. Considerando-se que o processo evaporativo inexistente nesta área, assume-se que o fluxo de calor latente  $LE_{PQ}$  ( $W\ m^{-2}$ ) para este pixel é zero e o fluxo de calor sensível  $H_{PQ}$  ( $W\ m^{-2}$ ) é dado por:

$$H_{PQ} = Rn_{PQ} - G_{PQ} \quad (3.41)$$

$$e \quad dT_{PQ} = \frac{H_{PF} \cdot rah}{\rho \cdot c_p} = \frac{(Rn - G)_{PQ} \cdot rah}{\rho \cdot c_p} = b + aTs_{PQ} \quad (3.42)$$

A escolha desses pixels é algo subjetivo, porém necessária para a estimativa do balanço de energia. Neste trabalho, o pixel frio foi selecionado em uma área irrigada e cultivada com cana-de-açúcar e o pixel quente em área de solo exposto.

Através de um sistema com duas equações determina-se **a** e **b**, e posteriormente o valor de **H** em todos os pixels da imagem. No entanto, o valor de **H** obtido não é representativo para cada pixel, servindo apenas como valor inicial de um processo iterativo, que a partir deste, considera a condição de estabilidade em cada pixel.

### 3.2.15e - Correção da instabilidade atmosférica, Velocidade de fricção ( $u_{cor}^*$ ) e Resistência aerodinâmica ( $rah_{cor}$ )

Os efeitos turbulentos que aquecem a superfície afetam as condições atmosféricas e a resistência aerodinâmica. Para o cálculo do fluxo de calor sensível, utiliza-se o comprimento de Monin-Obukhov  $L$  (m) para definir as condições de estabilidade atmosférica, calculado em função dos fluxos de calor e de momentum através da seguinte equação (Bastiaanssen, 1995; Morse et al., 2000; Allen et al., 2002 e Silva & Bezerra, 2006):

$$L = -\frac{\rho \cdot c_p u^{*3} T_s}{kgH} \quad (3.43)$$

onde  $L$  é o comprimento de Monin-Obukhov (m),  $\rho$  a densidade do ar ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $c_p$  é o calor específico do ar ( $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ),  $k$  a constante de von Karman (0,41),  $u^*$  a velocidade de fricção ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $T_s$  é a temperatura da superfície (K),  $g$  é o módulo do campo gravitacional terrestre ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ) e  $H$  o fluxo de calor sensível ( $\text{W m}^{-2}$ ).

Os valores das correções de estabilidade para o transporte de momentum ( $\psi_m$ ) e de calor ( $\psi_h$ ) devem ser considerados de acordo com as condições atmosféricas. Para tanto, se utiliza das formulações usadas por (Bastiaanssen, 1995; Morse et al.; 2000; Bezerra, 2004 e Feitosa, 2005).

### Parâmetros de estabilidade de Monin-Obukhov

1. Para condição de instabilidade,  $L < 0$ , tem-se que:

$$\psi_{m(100)} = 2 \ln\left(\frac{1 + x_{(100m)}}{2}\right) + \ln\left(\frac{1 + x_{(100m)}^2}{2}\right) - 2 \arctg(x_{(100m)}) + 0,5\pi \quad (3.44)$$

$$\psi_{h(2m)} = 2 \ln\left(\frac{1 + x_{(2m)}^2}{2}\right) \quad (3.44a)$$

$$\psi_{h(0,1m)} = 2 \ln\left(\frac{1 + x_{(0,1m)}^2}{2}\right) \quad (3.44b)$$

onde:

$$x_{(100m)} = \left(1 - 16 \frac{100}{L}\right)^{0,25} \quad (3.45)$$

$$x_{(2m)} = \left(1 - 16 \frac{2}{L}\right)^{0,25} \quad (3.45a)$$

$$x_{(0,1m)} = \left(1 - 16 \frac{0,1}{L}\right)^{0,25} \quad (3.45b)$$

2. Para condição de estabilidade,  $L > 0$ :

$$\psi_{m(100m)} = -5 \left( \frac{100}{L} \right) \quad (3.46)$$

$$\psi_{h(2m)} = -5 \left( \frac{2}{L} \right) \quad (3.46a)$$

$$\psi_{h(0,1m)} = -5 \left( \frac{0,1}{L} \right) \quad (3.46b)$$

3. Para condição de neutralidade,  $L = 0$ , tem-se:  $\psi_m = 0$  e  $\psi_h = 0$ .

A velocidade de fricção corrigida ( $u_{*cor}$ ) pode ser estimada pela seguinte equação (Allen et al., 2002):

$$u_{*cor}^* = \frac{U_{100k}}{\ln \left( \frac{100}{z_{0m}} \right) - \psi_{m(100m)}} \quad (3.47)$$

onde  $U_{100}$  é a velocidade do vento a 100 m ( $m s^{-1}$ ),  $k$  a constante de von Karman (0,41),  $z_{0m}$  é o coeficiente de rugosidade de cada pixel (m) e  $\psi_{m(100m)}$  o fator de correção para estabilidade atmosférica ao transporte de momentum.

Com os valores corrigidos de  $u^*$ , calcula-se o valor corrigido da resistência aerodinâmica ao transporte de calor  $r_{ah_{cor}}$  ( $s m^{-1}$ ) pela seguinte equação (Bastiaanssen, 1995; Morse et al., 2000; Bezerra, 2004 e Feitosa, 2005):

$$r_{ah_{cor}} = \frac{\ln \left( \frac{z_2}{z_1} \right) - \psi_{h(z_2)} + \psi_{h(z_1)}}{u^* k} \quad (3.48)$$

onde  $r_{ah}$  é a resistência aerodinâmica ao transporte de calor corrigida ( $s m^{-1}$ ),  $z_2 = 2,0$  m e  $z_1 = 0,1$  m,  $\psi_{h(z_2)}$  é o fator de correção de estabilidade para o transporte de calor sensível a 2,0 m e  $\psi_{h(z_1)}$  o fator de correção da estabilidade para o transporte de calor sensível a 0,1 m.

De posse dos valores dessas variáveis, os novos valores dos coeficientes **a** e **b**, podem ser calculados e, em seguida, com o valor de  $r_{ah}$  corrigido, determina-se um novo valor para a

diferença de temperatura ( $dT$ ). Repete-se o processo iterativo até que seja alcançada a estabilidade do processo, o que ocorre quando as diferenças entre os coeficientes **a** e **b** estão dentro dos limites estabelecidos pelo pesquisador.

### 3.2.16 - Fluxo de calor latente ( $\lambda ET$ ), Fração evaporativa, Umidade volumétrica do solo, Evapotranspiração instantânea ( $ET_{inst}$ ) e Fração evapotranspirativa ( $E_{Fr}$ )

O fluxo de calor latente ( $W m^{-2}$ ) é a quantidade de calor necessária ao processo evaporativo ou evapotranspirativo. No SEBAL/METRIC, a  $ET$  é estimada como o resíduo da equação do balanço de energia a superfície para cada pixel, no momento da passagem do satélite, qual seja (Bastiaassen et al., 1998; Allen et al., 2002):

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad (3.49)$$

onde  $\lambda ET$  é o fluxo de calor latente instantâneo ( $W m^{-2}$ ),  $R_n$  o saldo de radiação à superfície ( $W m^{-2}$ ),  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $W m^{-2}$ ) e  $H$  o fluxo de calor sensível ( $W m^{-2}$ ).

Os valores do fluxo de calor latente computados no momento da passagem do satélite podem ser convertidos em valores de evapotranspiração horária, ou seja:

$$ET_{inst} = \frac{3600 \lambda ET}{\lambda} \quad (3.50)$$

onde  $ET_{inst}$  é a evapotranspiração instantânea ( $mm h^{-1}$ ), 3600 fator de conversão do tempo de segundo para hora e  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água ( $J kg^{-1}$ ), ou seja, o calor necessário para que um quilograma de água mude de fase e pode ser computado pela seguinte equação (Allen et al., 2007a; Trezza, 2002):

$$\lambda = [2,501 - 0,00236(T_s - 273,16)] \times 10^6 \quad (3.51)$$

e  $T_s$  é a temperatura da superfície em K.

No SEBAL a fração evaporativa é computada pela razão entre o fluxo de calor latente e a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo, conforme expressão utilizada por Bastiaanssen (2000):

$$EF = \frac{\lambda ET}{(R_n - G)} \quad (3.52)$$

A fração evaporativa é um bom indicador para descrever as condições de umidade do solo em escala regional (Ahmad & Bastiaanssen, 2003). Uma relação empírica entre a fração evaporativa e o conteúdo de umidade volumétrica do solo foi desenvolvida por Bastiaanssen et al. (2000) e posteriormente modificada por Scott et al. (2003), qual seja:

$$\theta = \exp[(EF - 1,2836)/0,4213] \quad (3.53)$$

No METRIC a fração da evapotranspiração de referência é definida como a razão entre a evapotranspiração instantânea de cada pixel e a evapotranspiração medida na superfície no momento da passagem do satélite.

$$EF_r = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad (3.54)$$

onde  $EF_r$  é a fração da evapotranspiração de referência (adimensional) e  $ET_r$  é o valor da evapotranspiração de uma cultura de referência, medido no momento da passagem do satélite ( $\text{mm h}^{-1}$ ).

De acordo com diversos autores, em dias de céu claro, sem nuvens, tem-se observado que a fração evaporativa instantânea permanece constante durante todo dia após a passagem do satélite, e estudos realizados por Tasumi (2003) em Idaho confirmam tal similaridade. Esta fração evapotranspirativa é um parâmetro utilizado para extrapolar a evapotranspiração instantânea para períodos diários, sazonais ou mensais, como também na estimativa da biomassa. De acordo com (Tasumi et al., 2005; Trezza, 2006; Allen et al., 2007a) em áreas cultivadas e em boas condições hídricas a fração da evapotranspiração de referência estimada a partir de dados remotos pode ser considerada como o coeficiente de cultivo **Kc**.

### 3.2.17 - Evapotranspiração diária ( $ET_{24}$ )

Para a estimativa da evapotranspiração real diária ( $ET_{24}$ ) assume-se que a fração da evapotranspiração de referência instantânea computada na imagem será adotada como um  $Kc_r$  médio, considerada constante durante todo o dia, e o valor da  $ET_{24}$  para cada pixel é igual a:

$$EFr = \frac{ET_h}{ET_{r_h}} = \frac{ET_{24}}{ET_{r_{24}}} \Rightarrow ET_{24} = EFr \cdot ET_{r_{24}} \quad (3.55)$$

onde  $ET_{24}$  é a evapotranspiração diária ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $ET_{r_{24}}$  a evapotranspiração de referência acumulada medida na estação durante todo o dia da passagem do satélite ( $\text{mm dia}^{-1}$ ).

Os dados da evapotranspiração de referência foram medidos em uma estação meteorológica automática em que os valores obtidos seguem a metodologia do boletim FAO-56, equação de Penman-Monteith.

$$ETr = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \left( \frac{900v_2}{T + 273} \right) (es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (3.56)$$

em que  $ETr$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ),  $Rn$  é o saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ),  $G$  o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ),  $u_2$  a velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $\gamma$  o fator psicométrico ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) e  $\Delta$  a tangente da curva de saturação do vapor da água ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

### 3.2.18 - Radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR), Uso eficiente da luz ( $\epsilon$ ), Biomassa fresca total diária ( $Bio_{\text{dia}}^{\text{tot}}$ ), Bioprodutividade ( $Y_B$ )

A disponibilidade da água é um fator chave para a determinação da bioprodutividade das culturas que é estimada em função da biomassa. A estimativa da bioprodutividade tem como princípio básico a radiação solar incidente na superfície que é absorvida pela clorofila no processo fotossintético e, conforme modelo desenvolvido por Monteith (1972) é proporcional à fração da radiação fotossinteticamente ativa acumulada ( $fPAR$ ) e do uso eficiente da luz, segundo expressão citada por Field et al., 1995; Namayanga, 2002; Bastiaanssen & Ali, 2003; Mokhtari, 2005 e Akbari et al., 2007.

Neste trabalho, todos os parâmetros utilizados para o cômputo da biomassa fresca total foram expressos em valores diários, correspondentes aos dias das imagens estudadas, segundo equação:

$$\text{Bio}_{\text{dia}}^{\text{tot}} = \text{APAR}_{24} \cdot \varepsilon \quad (3.57)$$

onde  $\text{Bio}_{\text{dia}}^{\text{tot}}$  é a biomassa fresca total referente ao dia da passagem do satélite ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $\text{APAR}_{24}$  a radiação fotossinteticamente ativa absorvida ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) e  $\varepsilon$  é o uso eficiente da luz ( $\text{g MJ}^{-1}$ ).

A radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) é função da radiação solar global e da interceptação da luz. O valor de APAR descreve o total da radiação disponível para a fotossíntese que é interceptada pelas folhas. Trata-se, no entanto, de um valor teórico, já que as folhas transmitem e refletem radiação solar, e somente uma fração da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é absorvida pelo dossel, que é a (APAR) usada na assimilação de carbono, ou seja (Namayanga, 2002; Bastiaanssen & Ali, 2003, Mokhtari, 2005 e Zwart & Bastiaanssen, 2007):

$$\text{APAR} = f \cdot \text{PAR} \quad (3.58)$$

A absorção da luz pode ser observada através de sensores remotos e quantificada em função do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), (Bastiaanssen & Ali, 2003):

$$f = -0,161 + 1,257 \cdot \text{NDVI} \quad (3.59)$$

A radiação solar disponível ao processo fotossintético é a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) e encontra-se na faixa espectral do visível ( $0,4 - 0,7 \mu\text{m}$ ) mais utilizável pelas plantas. PAR é, no entanto, uma fração da radiação incidente,  $K_{\downarrow 24}$ . Conforme Bastiaanssen & Ali (2003) um percentual utilizado para o cômputo da PAR média diária, encontra-se entre 45 e 50% da radiação incidente, qual seja:

$$\text{PAR} = 0,48 \cdot K_{\downarrow 24} \quad (3.60)$$

onde  $K_{\downarrow 24}$  é a radiação solar diária ( $\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ ).

O uso eficiente da luz  $\varepsilon$  varia em diferentes condições ambientais, e é constante em boas condições de umidade e temperatura. Este fator é ajustado à fração evaporativa (EF) e varia conforme o estágio de desenvolvimento da cultura (Farre et al., 2005, citado por Mokhtari, 2005).

$$\varepsilon = \varepsilon' \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot EF \quad (3.61)$$

onde  $\varepsilon'$  é o fator de conversão da produção de biomassa quando as condições ambientais são ótimas ( $\text{g MJ}^{-1}$ ),  $T_1$  e  $T_2$  são fatores de ajustes da temperatura e EF a fração evaporativa (equação 3.52).

Tanto a vegetação nativa como outros tipos de culturas apresentam diferentes usos da eficiência da luz ( $\varepsilon'$ ), com valores que variam entre  $2,5 \text{ g MJ}^{-1}$  e  $4,0 \text{ g MJ}^{-1}$  e são indicados para culturas dos grupos  $C_3$  e  $C_4$ , respectivamente. O valor de  $\varepsilon'$  utilizado neste trabalho foi de  $4,0 \text{ g MJ}^{-1}$ , referente a cultura da cana-de-açúcar (Bastiaanssen & Ali, 2003).

$T_1$  representa uma redução física do uso eficiente da luz quando há grandes oscilações da temperatura e  $T_2$  reduz a eficiência do uso da luz se a temperatura ambiente estiver acima ou abaixo de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , fator de grande relevância para regiões áridas e semi-áridas (Bastiaanssen & Ali, 2003; Tao et al., 2005).

$$T_1 = 0,8 + 0,02 \cdot T_{\text{opt}} - 0,0005 \cdot T_{\text{opt}}^2 \quad (3.62)$$

e

$$T_2 = 1,185 \cdot \frac{1}{1 + \exp(0,2 \cdot T_{\text{opt}} - 10 - T_{\text{med}})} \cdot \frac{1}{1 + \exp(-0,3 \cdot T_{\text{opt}} - 10 - T_{\text{med}})} \quad (3.63)$$

onde  $T_{\text{opt}}$  ( $^\circ\text{C}$ ) é a temperatura referente ao maior valor de NDVI observado no dia da passagem do satélite e  $T_{\text{med}}$  ( $^\circ\text{C}$ ) a temperatura média medida no dia da imagem.

A conversão da biomassa fresca em biomassa seca, neste trabalho denominada de bioprodutividade, varia com o índice de colheita e o conteúdo de água do produto durante a colheita, e é computada segundo expressão (Bastiaanssen & Ali, 2003):

$$Y_B = \frac{h_{\text{ind}}^{\text{dry}} \cdot \text{Bio}_{\text{tot}}}{1 - m_{\text{oi}}} \quad (3.64)$$

onde  $Y_B$  é a bioprodutividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ ),  $h_{\text{ind}}^{\text{dry}}$  o índice de colheita ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $\text{Bio}_{\text{tot}}$  a biomassa total ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e  $m_{\text{oi}}$  o fator de umidade do produto durante a colheita ( $\text{kg kg}^{-1}$ ).

Os valores de  $h_{\text{ind}}^{\text{dry}}$  e  $m_{\text{oi}}$  utilizados neste trabalho para a cultura da cana-de-açúcar foram 0,69 e 0,65 respectivamente (Bastiaassen & Ali, 2003).

Para o cômputo de  $K_{\downarrow 24}$  utilizou-se a metodologia proposta por Tasumi (2003), em que:

$$K_{\downarrow 24} = \text{Ra}_{24} \cdot \tau_{\text{sw}24} \quad (3.65)$$

onde  $\text{Ra}_{24}$  é a radiação extraterrestre diária ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ) e  $\tau_{\text{sw}24}$  é a transmitância para a radiação de onda curta diária, equação (3.24).

$$\text{Ra}_{24} = \frac{G_{\text{sc}}}{\pi} \cdot \text{dr} \cdot [\omega_s \text{sen}(\varphi)\text{sen}(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\text{sen}(\omega_s)] \quad (3.66)$$

onde  $\text{Ra}_{24}$  é a radiação solar incidente integrada para 24 horas ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ ),  $G_{\text{sc}}$  é a constante solar ( $\text{w m}^{-2}$ ),  $\text{dr}$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol, em unidade astronômica, calculado pela equação (3.6),  $\delta$  é a declinação do sol,  $\varphi$  é a latitude e  $\omega_s$  o ângulo horário, sendo  $\omega = 0$  ao meio-dia,  $\omega$  negativo pela manhã e positivo à tarde. Todas as funções trigonométricas são em radianos.

$$\omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (3.67)$$

### 3.2.19 - Produtividade da água ( $WP_{ET}$ )

Definida como a quantidade de água evapotranspirada para a produção de 1 kg de determinada cultura, podendo ser estimada em função da bioprodutividade e da evapotranspiração (Akbari et al., 2007; Zwart & Bastiaanssen, 2007).

$$WP_{ET} = \frac{Y_B}{ET} \quad (3.68)$$

em que  $WP_{ET}$  é a produtividade da água evapotranspirada ( $\text{kg m}^{-3}$ );  $Y_B$  a bioprodutividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), calculado em função da biomassa fresca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), e  $ET$  a evapotranspiração diária ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ ).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As imagens estudadas correspondem a dias de céu claro, característicos de maior disponibilidade de radiação solar, que é a principal fonte de energia para os processos biofísicos. Os mapas temáticos utilizados para análise estão representados em escalas de cores para melhor interpretação visual das alterações nos padrões e magnitude das mudanças temporais ocorridas na área de estudo. O modelo SEBAL/METRIC foi aplicado para toda a cena da Figura 3.2, em que se observam a área de caatinga, as áreas urbanas, parte do Rio São Francisco e as áreas cultivadas. No entanto, o foco principal deste estudo é a estimativa de parâmetros referentes à cana-de-açúcar, de modo que após a análise das imagens do NDVI foi feito um novo recorte na Figura 3.2, ficando assim a área cultivada com cana-de-açúcar isolada dos demais alvos para evitar que a resposta espectral de outras áreas cultivadas fosse confundida com as áreas de cana-de-açúcar irrigada. Foram selecionadas também duas subáreas; uma que é irrigada por pivô central, denominada de área I e outra que é irrigada por sulco, denominada de área II. As duas subáreas têm as mesmas dimensões e área igual a 137 ha, o que corresponde a 1522 pixels. Os valores horários e diários da evapotranspiração de referência utilizados, determinados pelo método de Penman-Monteith, foram coletados na estação meteorológica automática instalada na área de estudo. Para validação do modelo foram utilizados dados da  $ET_{inst}$ ,  $ET_{24}$ ,  $R_n$ ,  $G$ ,  $H$  e  $\lambda ET$  obtidos em um experimento conduzido dentro da área cultivada correspondentes aos dias 211 e 22 dos anos de 2006 e 2007, respectivamente.

Por outro lado, na estimativa da bioprodutividade e produtividade da água se utilizou somente a imagem do dia 30 de julho de 2006, tendo como pressuposto que a partir desta data dar-se-ia o início da colheita na área estudada.

Não se registrou nenhum evento de precipitação na área de estudo correspondente aos dias das imagens, no entanto a precipitação média registrada nos meses de outubro e novembro de 2004 foi de 8,8 mm e 24,7 mm, respectivamente. Durante o mês de outubro de 2005 não houve precipitação e nos meses de julho de 2006 e janeiro de 2007 a precipitação foi de 7,2 mm e 35,6 mm.

Os valores da transmitância atmosférica da radiação solar incidente ( $\tau_{in,i}$ ), da transmitância atmosférica da radiação solar refletida da superfície ( $\tau_{out,i}$ ) e da reflectância originada da radiação espalhada pela atmosfera na direção do sensor ( $\rho_{atm,i}$ ) de cada banda, necessárias para o cômputo da reflectância monocromática da superfície encontram-se na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** - Valores de  $\tau_{in}$ ,  $\tau_{out}$  e  $\rho_{atm}$  das imagens estudadas.

<b>Data da imagem: 12/10/2004</b>						
	<b>Banda 1</b>	<b>Banda 2</b>	<b>Banda 3</b>	<b>Banda 4</b>	<b>Banda 5</b>	<b>Banda 7</b>
$\tau_{in}$	0,9167	0,8956	0,9279	0,9239	0,9516	0,9283
$\tau_{out}$	0,9219	0,9099	0,9391	0,9360	0,9547	0,9312
$\rho_{ai}$	0,0533	0,0324	0,0206	0,0144	0,0132	-0,0133
<b>Data da imagem: 13/11/2004</b>						
	<b>Banda 1</b>	<b>Banda 2</b>	<b>Banda 3</b>	<b>Banda 4</b>	<b>Banda 5</b>	<b>Banda 7</b>
$\tau_{in}$	0,9161	0,8937	0,9262	0,9175	0,9480	0,9226
$\tau_{out}$	0,9218	0,9091	0,9382	0,9309	0,9518	0,9266
$\rho_{ai}$	0,0536	0,0329	0,0211	0,0156	0,01424	-0,0144
<b>Data da imagem: 15/10/2005</b>						
	<b>Banda 1</b>	<b>Banda 2</b>	<b>Banda 3</b>	<b>Banda 4</b>	<b>Banda 5</b>	<b>Banda 7</b>
$\tau_{in}$	0,9167	0,8957	0,9281	0,9247	0,9521	0,9291
$\tau_{out}$	0,9219	0,9101	0,9392	0,9367	0,9551	0,9318
$\rho_{ai}$	0,0533	0,0323	0,0206	0,0142	0,0131	-0,0132
<b>Data da imagem: 30/07/2006</b>						
	<b>Banda 1</b>	<b>Banda 2</b>	<b>Banda 3</b>	<b>Banda 4</b>	<b>Banda 5</b>	<b>Banda 7</b>
$\tau_{in}$	0,9048	0,8711	0,9086	0,8973	0,9403	0,9128
$\tau_{out}$	0,9218	0,9087	0,9379	0,9287	0,9506	0,9245
$\rho_{ai}$	0,0609	0,0399	0,0261	0,0194	0,0164	-0,0162
<b>Data da imagem: 22/01/2007</b>						
	<b>Banda 1</b>	<b>Banda 2</b>	<b>Banda 3</b>	<b>Banda 4</b>	<b>Banda 5</b>	<b>Banda 7</b>
$\tau_{in}$	0,9128	0,8872	0,9213	0,9159	0,9487	0,9247
$\tau_{out}$	0,9219	0,9097	0,9389	0,9347	0,9539	0,9299
$\rho_{ai}$	0,0558	0,0349	0,0225	0,0158	0,0140	-0,014

#### 4.1 - Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - NDVI

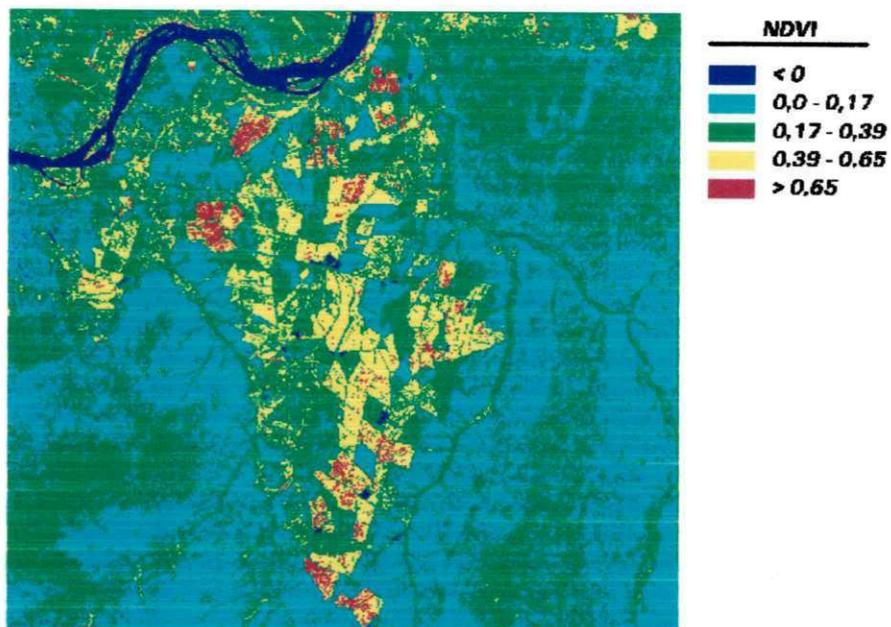
Os mapas temáticos de NDVI referentes aos anos de 2004, 2005, 2006 e 2007 estão representadas nas Figuras 4.1a a 4.5a e seus histogramas de frequência nas Figuras 4.1b a 4.5b. Os valores negativos de NDVI representados na tonalidade azul correspondem a parte do Rio São Francisco e outros corpos d'água distribuídos na cena estudada e em alguns pixels da área cultivada com cana-de-açúcar, localizada no centro das imagens.

Os valores positivos de NDVI indicam a presença de vegetação e teoricamente seus valores variam no intervalo de 0 a 1. Os menores valores de NDVI identificados nas figuras são inferiores a 0,17 e estão representados na tonalidade ciano, predominante no mapa temático do ano de 2005. Estes valores representam as áreas de Caatinga, com vegetação esparsa e presença de solo exposto, indicando que na maior parte da área estudada os valores de NDVI são baixos, conforme valores médios representados nas Figuras 4.1b a 4.5b por uma linha vertical vermelha. Os valores intermediários de NDVI variam entre 0,17 e 0,39, e estão representados na tonalidade verde com maior percentual observado na imagem de 2007. As áreas vegetadas e de cultivos estão representadas na tonalidade amarela e valores inferiores a 0,65. Os maiores valores de NDVI indicam o vigor da vegetação e estão representados nas imagens na tonalidade vermelha. Os altos índices de NDVI observados em todos os mapas, correspondem às características de uma vegetação densa, em pleno desenvolvimento e em boas condições hídricas, identificados nas áreas irrigadas com cana-de-açúcar.

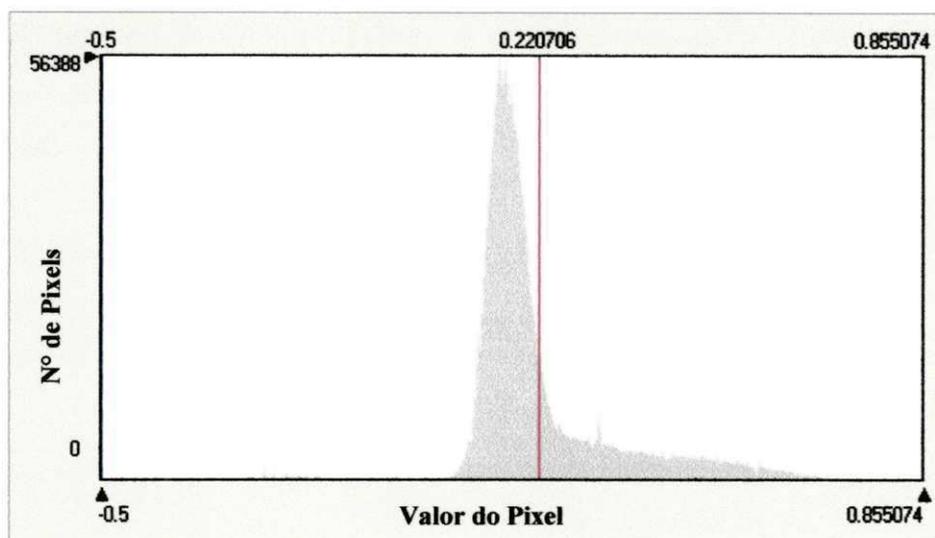
Analisando e comparando todas as figuras, verifica-se que não houve mudanças significativas na vegetação nativa entre os dias 286 e 318 do ano de 2004. Estudos prévios têm mostrado que o NDVI de vegetação nativa é relativamente constante durante o ano (Li et al., 1999). Os valores máximos de NDVI observados nos referidos mapas, correspondem a alguns pixels nas áreas irrigadas, da ordem de 0,85 e 0,82, respectivamente. Verifica-se no mapa temático do ano de 2005, dia 288, baixo percentual das áreas em tonalidade vermelha, correspondentes às áreas irrigadas, com valores máximos de NDVI da ordem de 0,80.

Os histogramas de frequência dos valores de NDVI dos dias estudados encontram-se nas Figuras 4.1b a 4.5b, em que se verifica uma maior concentração dos valores em torno da média nas figuras referentes aos anos de 2004 e 2005, e maior dispersão dos valores na Figura 4.5b, dia 22 do ano de 2007, apresentando duas modas, e a menor delas corresponde às áreas com baixa cobertura vegetal.

(a)

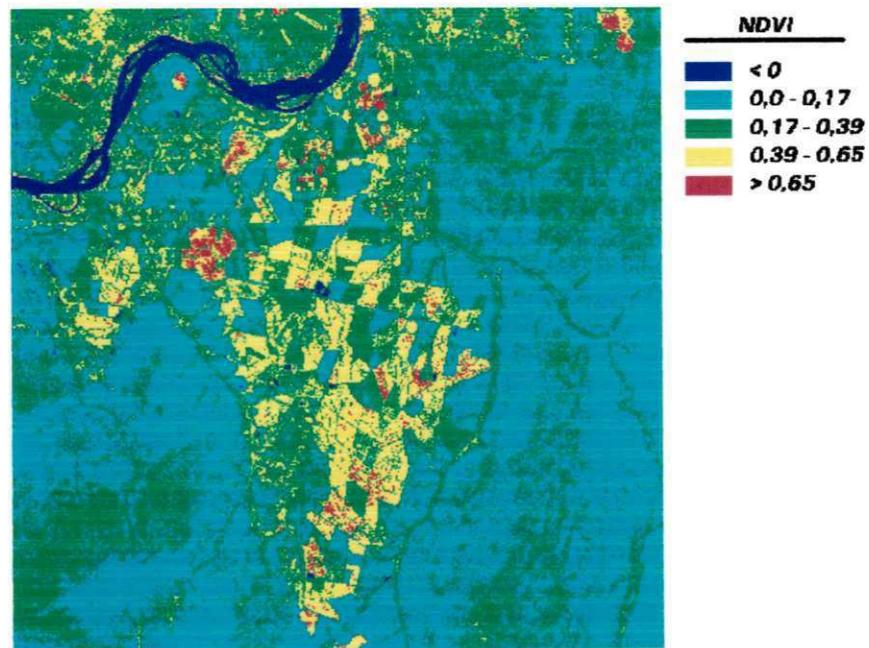


(b)

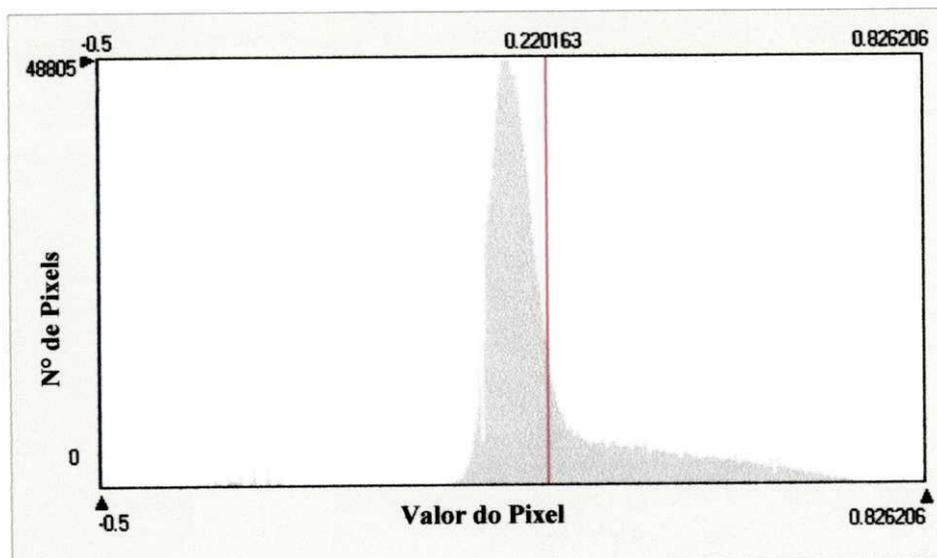


**Figura 4.1** - Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo (a) e histograma de frequência (b) para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.

(a)

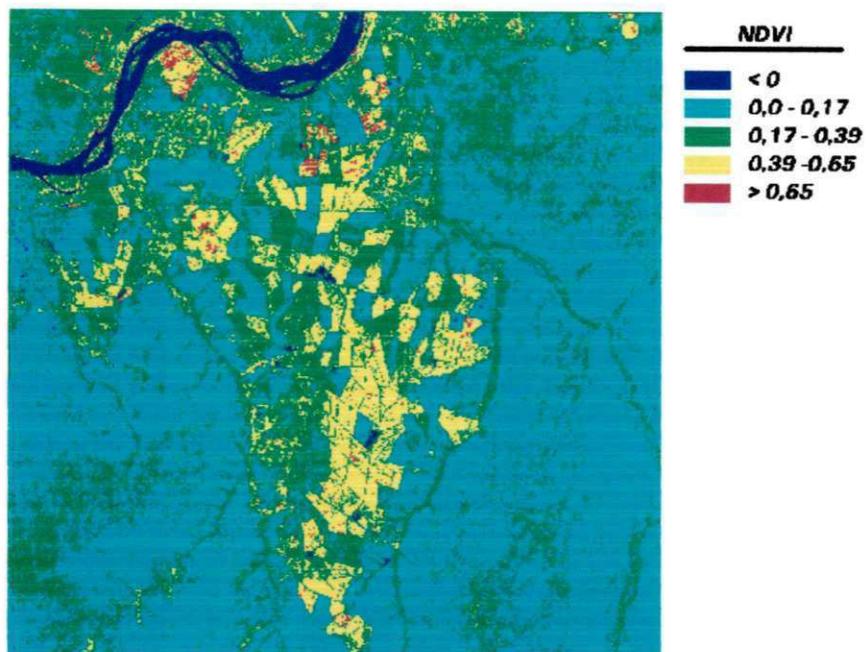


(b)

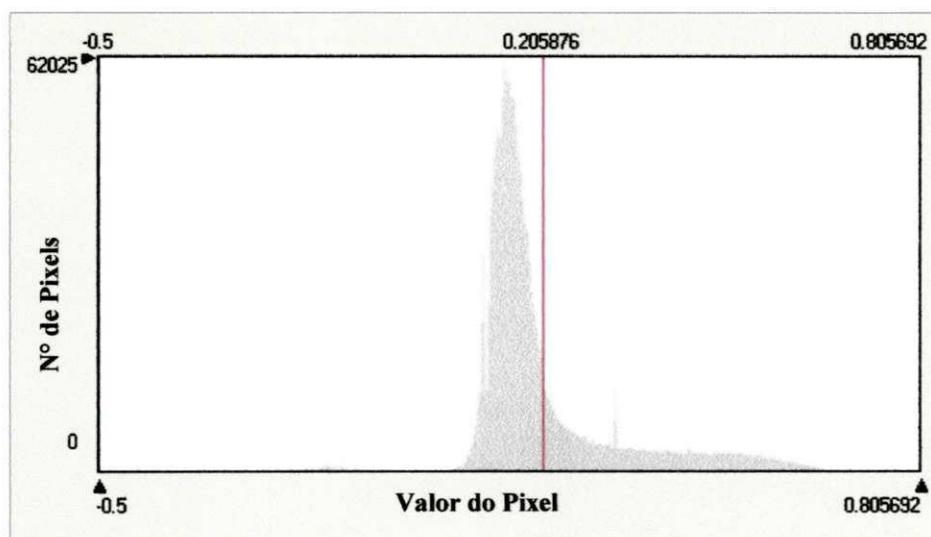


**Figura 4.2** - Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo (a) e histograma de frequência (b) para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.

(a)

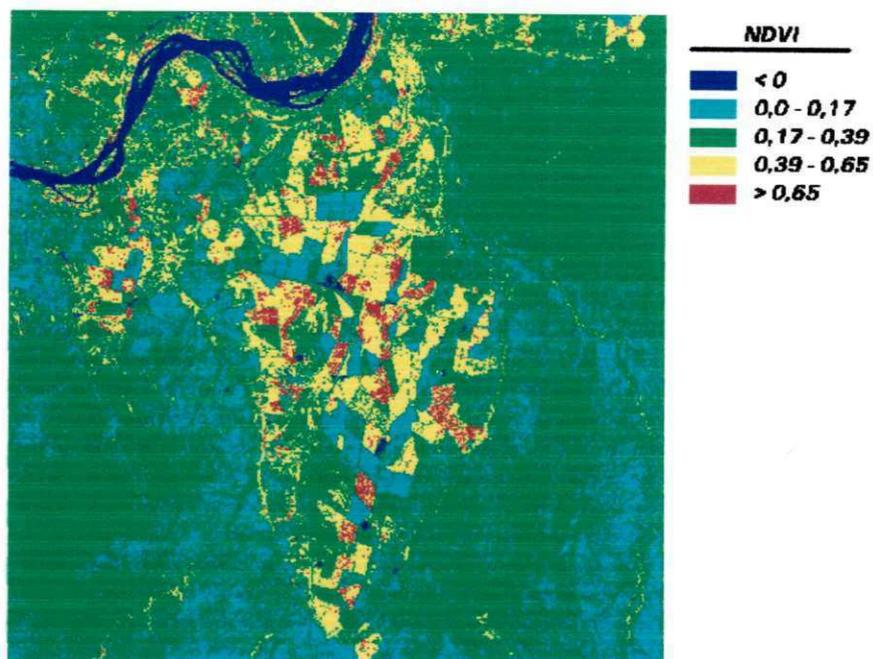


(b)

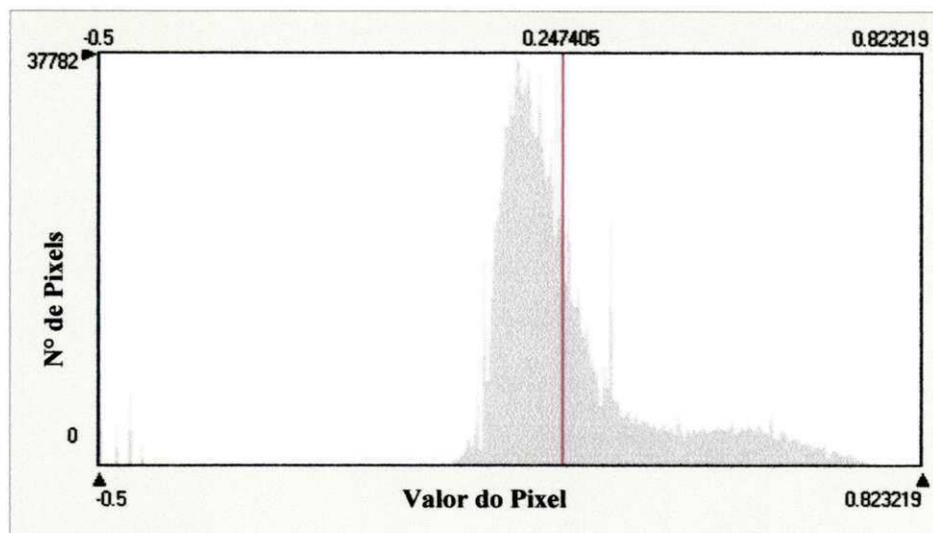


**Figura 4.3** - Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo (a) e histograma de frequência (b) para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 388.

(a)

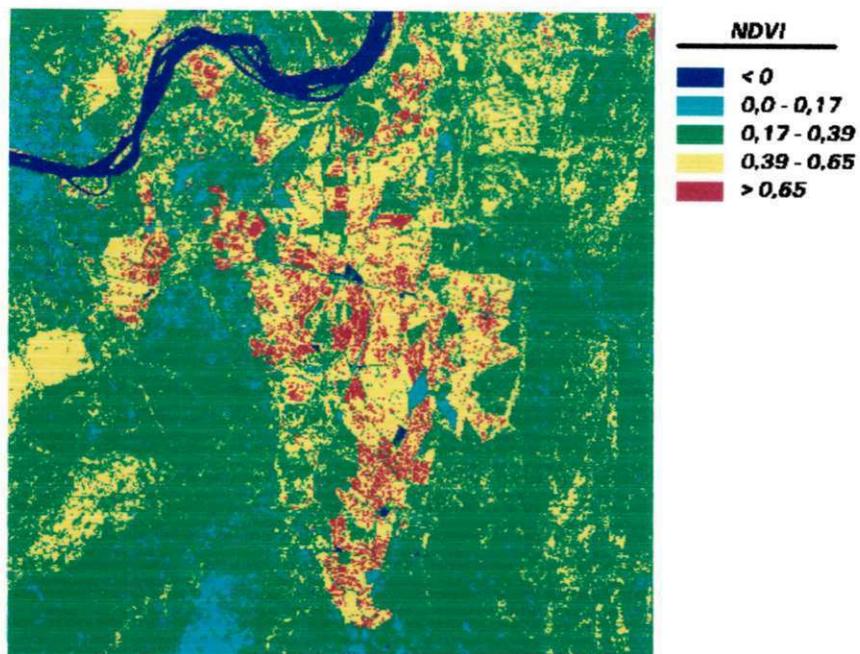


(b)

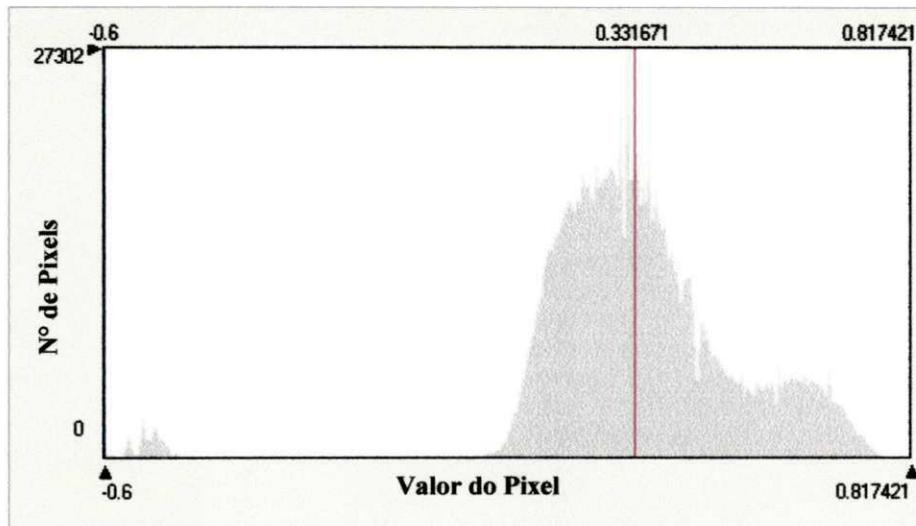


**Figura 4.4** - Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo (a) e histograma de frequência (b) para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.

(a)



(b)



**Figura 4.5** - Mapa temático do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) instantâneo (a) e histograma de frequência (b) para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.

No entanto, no mapa correspondente ao dia 22, do ano de 2007 observam-se maiores alterações em suas características e alta resposta espectral da vegetação, associadas a elevados valores de NDVI, evidenciando a área cultivada com cana-de-açúcar, em tonalidades amarela e vermelha, maior adensamento da vegetação na área da Caatinga e menor percentual de áreas de solo exposto, com maior valor médio de NDVI observado, da ordem de 0,33, conforme ilustrado no histograma de frequência da Figura 4.5b.

Observa-se também neste mapa grande percentual de áreas em tonalidades verde e amarela com valores de NDVI entre 0,17 e 0,65, apresentando, no entanto, maior cobertura vegetal nas áreas de caatinga, fato que pode estar relacionado aos altos índices pluviométricos observados na região nos meses anteriores à aquisição da imagem.

Para uma melhor avaliação do NDVI na área cultivada com cana-de-açúcar nos dias estudados, a Tabela 4.2 apresenta os valores máximos, médios e mínimos instantâneos do NDVI das subáreas selecionadas, área I que é irrigada por pivô central e área II irrigada por sulco. Observa-se que os valores de NDVI se mantiveram bastante regulares na área I, apresentando poucas variações em seus valores médios, isto indica que a cultura se encontrava no mesmo estágio vegetativo em todas as datas estudadas. Tal característica não foi identificada na área II, uma vez que nos mapas temáticos de 2004 o NDVI máximo observado foi de 0,43 e 0,46 respectivamente, podendo está associado às áreas com cana-de-açúcar em estágio inicial de desenvolvimento. Para os anos seguintes observou-se um aumento crescente nos valores máximos de NDVI, com maior valor da ordem de 0,76 para o dia 22/01/2007.

**Tabela 4.2** - NDVI máximo, médio e mínimo das áreas I e II.

Data da imagem	Área I			Área II		
	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo
12.10.2004	0,76	0,60	-0,19	0,43	0,14	0,06
13.11.2004	0,78	0,60	0,13	0,46	0,27	0,06
15.10.2005	0,73	0,53	0,09	0,63	0,26	0,06
30.07.2006	0,69	0,50	-0,17	0,74	0,56	0,16
22.01.2007	0,77	0,60	0,15	0,76	0,58	0,24

Silva et al. (2005), utilizando o algoritmo SEBAL e imagens TM-Landsat 5, em estudos sobre balanço de radiação em áreas dos Estados de Pernambuco e Bahia, obtiveram valores de NDVI nas áreas irrigadas de 0,75 para imagem de 2000 e de 0,78 em 2001. Valores similares de NDVI foram também obtidos na mesma região em outras pesquisas (Lopes, 2003; Di Pace, 2004; Feitosa, 2005).

Valor de NDVI igual a 0,75 também foi encontrado por Trezza (2006) quando aplicou o SEBAL em áreas irrigadas com arroz na Venezuela. Shilpakar (2003), utilizando técnicas de sensoriamento remoto e o modelo SEBAL em pesquisa realizada na bacia do Rio Rapti, no Nepal encontrou valores de NDVI entre 0,55 e 0,70 em áreas de floresta e de 0,65 em áreas cultivadas com milho. Nas áreas de solo exposto o valor de NDVI foi de 0,17; no entanto, nas áreas mais planas foram encontrados valores iguais e ainda menor que 0,06, tal diferença está relacionada a textura e à diferentes conteúdos de umidade no solo. Baixos valores de NDVI foram encontrados em áreas produtivas e irrigadas com arroz, trigo, cevada e milho em Esfahan, Irã, com valores máximos igual a 0,35, valor considerado baixo para áreas vegetadas, que segundo o autor pode ter acontecido devido a baixa intensidade das culturas, ou ainda, ao elevado grau de pousio em algum pixel detectado no momento do imageamento em razão da resolução espacial do sensor AVHRR-NOAA (Akbari et al, 2007). Valores de NDVI igual a 0,30 em áreas cultivadas com milho e de 0,35 em áreas cultivadas com beterraba foram obtidos por Moktari (2005) utilizando imagens ASTER e MODIS do dia 254 de 2005. Para o autor o NDVI é o índice mais importante para o mapeamento da agricultura em condições de seca.

Utilizando imagens decendiais de NDVI do sensor AVHRR-NOAA e aplicando o modelo CROPSYST (*Cropping Systems Simulation Model*) em áreas cultivadas com trigo na Itália, Moriondo et al. (2007) obtiveram valores máximos de NDVI iguais 0,73 e 0,80. Chen et al. (2006) utilizaram imagens de índices de vegetação com objetivo de avaliar a inter-relação das ilhas de calor urbano com a cobertura vegetal na região costeira do Sul da China, e, verificaram que o aumento de temperatura foi devido a rápidas mudanças ocorridas nos padrões da vegetação e uso do solo conseqüentes do acelerado processo de urbanização dos últimos anos. O NDVI foi usado para detectar a densidade da vegetação, e os autores observaram que para valores próximos a 0,60 ou maior, em que toda vegetação é identificada, existe uma correlação linear positiva entre o NDVI e a temperatura.

O NDVI é um índice comumente usado em dados remotos para dar uma indicação do vigor da vegetação, mas em alguns estudos este índice tem sido utilizado na estimativa do coeficiente de cultivo das culturas, na análise da degradação ambiental (Singh et al., 2006), e

inclusive, no monitoramento e identificação de áreas afetadas por gafanhotos na China (Ji et al., 2004).

Neste trabalho, o NDVI foi utilizado no cômputo da emissividade superficial, no cálculo de  $Z_{0m}$ , na estimativa do fluxo de calor no solo e na escolha dos pixels frio e quente, necessários para estimar a diferença de temperatura próxima a superfície, considerando que a cobertura vegetal estimada de NDVI é utilizada para dividir a temperatura da superfície entre os componentes de solo e vegetação em cada pixel.

#### 4.2 - Valores instantâneos dos componentes do balanço de energia

A Tabela 4.3 contém os valores da temperatura do ar medido na área, da água precipitável na atmosfera, do ângulo zenital do sol para superfícies planas, da emissividade atmosférica, da radiação termal incidente, da pressão atmosférica e da transmissividade atmosférica de onda curta para cada imagem estudada.

**Tabela 4.3** - Valores de  $T_a$  (°C),  $W$ (mm),  $P$ (kPa),  $R_{SKY}$ ,  $\cos \theta_{hor}$  e  $\tau_{SW}$  para cada imagem.

Data da imagem	$T_a$ (°C)	$\epsilon_a$	$R_{SKY}$	$W$ (mm)	$P$ (kPa)	$\cos \theta_{hor}$	$\tau_{SW}$
12.10.2004	27,6°	0,7560	1,279	26,3	96,81	0,8347	0,7619
13.11.2004	31,9°	0,7583	1,383	30,0	96,86	0,8275	0,7548
15.10.2005	27,5°	0,7556	1,265	25,8	96,80	0,8351	0,7629
30.07.2006	26,5°	0,7587	1,238	31,7	96,78	0,6772	0,7536
22.01.2007	29,6°	0,7564	1,319	27,3	96,83	0,7693	0,7608

Os parâmetros contidos na Tabela acima foram utilizados para o cálculo da radiação de onda curta e de onda longa incidente, conforme apresentados na Tabela 4.4. O maior valor de  $R_{S\downarrow}$  foi de  $940,8 \text{ W m}^{-2}$  e de  $R_{L\downarrow}$   $372,7 \text{ W m}^{-2}$  correspondentes às imagens de outubro de 2005 e novembro de 2004.

De acordo com Allen et al. (2002), os valores de  $R_{S\downarrow}$  podem variar de 200 a  $1000 \text{ W m}^{-2}$ , dependendo do horário, época do ano e do local da imagem.

**Tabela 4.4** - Radiação de onda curta incidente  $R_{S\downarrow}$  ( $W m^{-2}$ ) e radiação de onda longa incidente  $R_{L\downarrow}$  ( $W m^{-2}$ ) no instante da obtenção das imagens selecionadas para o estudo.

<b>Data da imagem</b>	<b><math>R_{S\downarrow}</math> (<math>W m^{-2}</math>)</b>	<b><math>R_{L\downarrow}</math> (<math>W m^{-2}</math>)</b>
12.10.2004	929,3	353,1
13.11.2004	934,5	372,7
15.10.2005	940,8	350,3
30.07.2006	753,8	347,0
22.01.2007	906,2	332,6

Na Tabela 4.5 encontram-se os valores da velocidade do vento medido na hora da passagem do satélite, da velocidade de fricção ( $u^*$ ) e da velocidade do vento a 100 m das imagens estudadas.

**Tabela 4.5** - Velocidade do vento medida na hora da passagem do satélite, velocidade de fricção ( $u^*$ ) e velocidade do vento a 100 m, das imagens estudadas.

<b>Data da imagem</b>	<b>Velocidade do vento a 2 m (<math>m.s^{-1}</math>)</b>	<b>Velocidade de fricção (<math>m.s^{-1}</math>)</b>	<b>Velocidade do vento a 100 m (<math>m.s^{-1}</math>)</b>
12.10.2004	4,18	0,3785	7,7912
13.11.2004	4,21	0,3866	7,9590
15.10.2005	4,58	0,4147	8,5368
30.07.2006	2,98	0,2698	5,5545
22.01.2007	1,88	0,1693	3,4855

Conforme mencionado no capítulo III os valores dos parâmetros contidos na Tabela 4.4 foram utilizados na estimativa do saldo de radiação ( $R_n$ ), que representa a energia que é particionada nos processos evapotranspirativo, no aquecimento do ar, da biomassa e do solo, além do processo fotossintético. Em todas as imagens estudadas os maiores valores de  $R_n$  foram identificados nos corpos d'água e nas áreas irrigadas por pivô central. Sempre que uma superfície estiver bem suprida de água, a maior parte da energia disponível será utilizada no processo evapotranspirativo, o que representa de 70% a 80% de  $R_n$ , e o percentual restante será distribuído entre o aquecimento das plantas, do ar e do solo. Nas áreas de solo exposto e de cultivos de baixa densidade foram identificados os menores valores de  $R_n$ . Os valores mais elevados de  $R_n$  foram identificados nas imagens do ano de 2004, com valores médios iguais a  $684,5 W m^{-2}$  e  $695,2 W m^{-2}$ . Observa-se que o menor valor médio de  $R_n$  obtido foi o do dia

211 de 2006, com valor igual a  $533,5 \text{ W m}^{-2}$ , e menores valores do desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV), conforme apresentado na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6** - Dados estatísticos do saldo de radiação ( $R_n$ ) instantâneo das imagens estudadas.

Data da imagem	Mínimo ( $\text{W m}^{-2}$ )	Máximo ( $\text{W m}^{-2}$ )	Média ( $\text{W m}^{-2}$ )	Mediana ( $\text{W m}^{-2}$ )	Moda ( $\text{W m}^{-2}$ )	DP ( $\text{W m}^{-2}$ )	CV (%)
12.10.2004	422,5	913,7	684,5	687,3	702,7	41,0	6,0
13.11.2004	525,9	901,9	695,2	697,7	718,3	41,9	6,0
15.10.2005	449,0	883,2	689,8	689,8	696,7	39,9	5,8
30.07.2006	353,9	689,5	533,0	533,5	532,2	26,4	4,9
22.01.2007	306,8	838,3	675,5	680,5	690,9	34,8	5,1

Em estudos conduzidos por Feitosa (2005) na mesma região, utilizando imagens TM - Landsat 5 dos dias 338 de 2000 e 277 de 2001 e o modelo SEBAL, o autor encontrou valores médios de  $R_n$  nestas datas de  $570,7 \text{ W m}^{-2}$  e  $551,5 \text{ W m}^{-2}$ . Trezza (2006) aplicou uma versão modificada do SEBAL com imagens TM-Landsat 5 em áreas irrigadas e cultivadas com arroz na Venezuela e encontrou valor de  $R_n$  correspondente ao pixel frio igual a  $602,6 \text{ W m}^{-2}$ .

Para a obtenção do fluxo de calor no solo ( $G$ ) utilizou-se relação empírica proposta por Bastiaansen (2000) na qual  $G$  é estimado em função do albedo de superfície, da temperatura, do saldo de radiação e NDVI. A Tabela 4.7 apresenta os dados estatísticos do fluxo de calor no solo da área cultivada com cana-de-açúcar para todas as imagens no momento da passagem do satélite. Os valores médios de  $G$  variam entre  $66,6 \text{ W m}^{-2}$  e  $91,9 \text{ W m}^{-2}$ , apresentando pequena diferença entre os valores médios dos dias 286 e 288 dos anos de 2004 e 2005 que foram iguais a  $83,9 \text{ W m}^{-2}$  e  $86,3 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente, e maior diferença entre os dias 318 e 22 dos anos de 2004 e 2007 da ordem de  $25,9 \text{ W m}^{-2}$ . Os maiores valores de  $G$  foram identificados na imagem do dia 318 de 2004 e pode estar relacionado às condições de umidade do solo e a cobertura vegetal da área em análise no dia da passagem do satélite. Em todas as imagens os maiores valores de  $G$  foram identificados nos corpos d'água e são iguais a 30% dos valores de  $R_n$ , conforme relatado no capítulo III. As áreas de cultivos mais densos são as que apresentam menores valores de  $G$ .

**Tabela 4.7** - Dados estatísticos do fluxo de calor no solo (G) instantâneo das imagens estudadas.

Data da imagem	Mínimo (W m <sup>-2</sup> )	Máximo (W m <sup>-2</sup> )	Média (W m <sup>-2</sup> )	Mediana (W m <sup>-2</sup> )	Moda (W m <sup>-2</sup> )	DP (W m <sup>-2</sup> )	CV (%)
12.10.2004	29,9	263,8	83,9	84,7	95,7	18,3	21,8
13.11.2004	39,7	270,6	91,9	93,8	106,5	17,3	18,8
15.10.2005	36,6	264,9	86,3	87,4	98,1	17,4	20,2
30.07.2006	37,0	200,9	71,1	72,3	76,8	11,7	16,5
22.01.2007	29,9	251,5	66,0	64,6	82,7	18,6	28,2

Valores máximos de G iguais a 86,2 W m<sup>-2</sup> e 109,8 W m<sup>-2</sup> foram obtidos por Bezerra (2004) na estimativa do balanço de energia utilizando o algoritmo SEBAL e imagens TM-Landsat 5, referentes aos dias 04 de dezembro de 2000 e 04 de outubro de 2001 em áreas cultivadas e irrigadas por pivô central. Bezerra (2006) utilizou a mesma metodologia na região do cariri cearense e obteve valor máximo de G em áreas com diferentes tipos de coberturas de solo igual a 247,38 W m<sup>-2</sup> no dia 288 do ano de 2005.

O fluxo de calor sensível (H) é um dos mais importantes componentes do balanço de energia e varia em função de um gradiente de temperatura próximo à superfície. No modelo utilizado neste estudo o gradiente de temperatura é determinado a partir da escolha de dois pixels: “frio” e “quente” e estes devem ser selecionados na imagem em locais que apresentem condições extremas de temperaturas. A maior e a menor temperatura é que identificam estes pixels, atribuindo-se que no pixel frio H seja mínimo e no pixel quente máximo. Para a escolha dos referidos pixels foram utilizadas as imagens da temperatura da superfície, do NDVI e do albedo de superfície. Os valores instantâneos dos parâmetros e fluxos correspondentes aos pixels frio e quente das imagens estudadas estão apresentados nos Apêndices 1, 2, 3, 4 e 5.

Os valores médios de H dos dias estudados situam-se entre 173,2 W m<sup>-2</sup> e 288,1 W m<sup>-2</sup>, o valor máximo de H foi identificado na imagem de novembro de 2004 e o valor mínimo na imagem do dia 286 de 2004. Os menores valores de H identificados nas imagens encontram-se nos corpos d’água, ao passo que os valores intermediários de H são identificados nas áreas irrigadas por pivô central ou com vegetação densa. As áreas desprovidas de vegetação são as que apresentam os maiores valores de H, pois o calor sensível destas áreas sofre influência do processo advectivo e acaba sendo transportado para as bordas das áreas irrigadas, aumentando as taxas de energia que irá contribuir para maiores índices de evapotranspiração.

Os dados estatísticos do fluxo de calor sensível (H) das imagens estudadas encontram-se na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8** - Dados estatísticos do fluxo de calor sensível (H) instantâneo das imagens estudadas.

Data da imagem	Mínimo (W m <sup>-2</sup> )	Máximo (W m <sup>-2</sup> )	Média (W m <sup>-2</sup> )	Mediana (W m <sup>-2</sup> )	Moda (W m <sup>-2</sup> )	DP (W m <sup>-2</sup> )	CV (%)
12.10.2004	6,2	410,4	235,6	241,5	290,4	66,9	28,4
13.11.2004	55,4	430,1	288,1	292,6	329,1	45,5	15,8
15.10.2005	71,1	400,0	267,2	272,8	297,2	42,1	15,8
30.07.2006	15,8	277,2	173,2	173,0	132,2	32,3	18,6
22.01.2007	57,5	323,2	177,0	174,7	161,3	22,7	12,8

Albhaisi (2004) utilizou técnicas de sensoriamento remoto e imagem do sensor CASI-ATM (Compact Airborne Spectrographic Imager – Airborne Thematic Mapper) na estimativa da evapotranspiração em áreas de várzea na região de Doode Bemde, na Bélgica e obteve valores de H entre 112 W m<sup>-2</sup> e 223 W m<sup>-2</sup>, correspondente aos locais de vegetação densa. Bezerra (2004) também utilizou técnicas de sensoriamento remoto e o SEBAL para determinar o balanço de energia em áreas irrigadas na região semi-árida do Nordeste brasileiro e obteve nas áreas irrigadas com pivô central valores médios de H iguais a 106,1 W m<sup>-2</sup> no dia 338 de 2000 e de 152,2 W m<sup>-2</sup> no dia 277 de 2001.

Na Tabela 4.9 estão apresentados os dados estatísticos do fluxo de calor latente estimado na área de cana-de-açúcar, que no modelo SEBAL/METRIC é calculado como um resíduo do balanço de energia à superfície em que a energia consumida no processo evapotranspirativo é calculada pela simples diferença entre o saldo de radiação (Rn), o fluxo de calor no solo (G) e o fluxo de calor sensível (H).

**Tabela 4.9** - Dados estatísticos do fluxo de calor latente ( $\lambda$ ET) instantâneo das imagens estudadas.

Data da imagem	Mínimo (W m <sup>-2</sup> )	Máximo (W m <sup>-2</sup> )	Média (W m <sup>-2</sup> )	Mediana (W m <sup>-2</sup> )	Moda (W m <sup>-2</sup> )	DP (W m <sup>-2</sup> )	CV (%)
12.10.2004	84,8	822,6	365,0	361,5	249,1	111,7	30,6
13.11.2004	47,2	743,8	314,4	311,1	240,4	93,1	29,6
15.10.2005	53,8	707,8	336,3	329,7	288,8	84,1	25,0
30.07.2006	76,9	623,7	288,7	292,6	328,9	56,5	19,6
22.01.2007	59,6	698,8	432,5	444,1	479,1	62,9	14,5

O maior e menor valor de  $\lambda ET$  foram iguais a  $822,6 \text{ W m}^{-2}$  e  $47,2 \text{ W m}^{-2}$  obtidos nas imagens dos dias 286 e 318 do ano de 2004. O maior valor médio foi identificado no dia 22 do ano de 2007. Os valores mais elevados de  $\lambda ET$  foram identificados nas áreas irrigadas por pivô central. Valor de  $\lambda ET$  igual a  $510,0 \text{ W m}^{-2}$  foi obtido por Trezza (2006) para o pixel frio em áreas cultivadas com arroz na Venezuela. Moran et al. (1989) citado por Bezerra (2004) avaliaram os componentes do balanço de energia pela combinação de imagens TM-Landsat 5 e dados meteorológicos e obtiveram um valor de  $\lambda ET$  em torno de  $650 \text{ W m}^{-2}$  em área cultivada com algodão para o dia 204 de 1985, de  $520 \text{ W m}^{-2}$  para a cultura do trigo, referente ao dia 95 do ano de 1986 e de  $680 \text{ W m}^{-2}$  para a cultura da alfafa no dia 175 do ano de 1986.

A fração evaporativa é um parâmetro chave nos modelos que utilizam dados de sensores remotos para expressar a partição da energia disponível ao processo evapotranspirativo. Para Bastiaanssen et al. (1999) a fração evaporativa expressa a razão da demanda evapotranspirativa real da cultura quando as condições de umidade atmosféricas estão em equilíbrio com as condições de umidade do solo. Os valores instantâneos de EF para cada pixel foram obtidos a partir da razão entre o resíduo do balanço de energia à superfície e a diferença entre o saldo de radiação e o fluxo de calor no solo. A Tabela 4.10 apresenta os dados estatísticos dos valores instantâneos de EF obtidos em todas as imagens estudadas.

**Tabela 4.10** - Dados estatísticos da fração evaporativa (EF) instantânea das imagens estudadas.

Data da imagem	Mínimo ( $\text{W m}^{-2}$ )	Máximo ( $\text{W m}^{-2}$ )	Média ( $\text{W m}^{-2}$ )	Mediana ( $\text{W m}^{-2}$ )	Moda ( $\text{W m}^{-2}$ )	DP ( $\text{W m}^{-2}$ )	CV (%)
12.10.2004	0,18	1,0	0,59	0,59	0,75	0,14	23,3
13.11.2004	0,11	0,91	0,51	0,51	0,60	0,11	21,6
15.10.2005	0,13	0,88	0,55	0,54	0,51	0,10	18,1
30.07.2006	0,26	0,97	0,62	0,63	0,70	0,09	14,5
22.01.2007	0,28	0,89	0,71	0,71	0,75	0,06	8,4

Observa-se na Tabela 4.10 que os valores máximos de EF foram identificados nas imagens dos dias 286 e 211 dos anos de 2004 e 2006, respectivamente. O maior valor médio foi identificado na imagem do dia 22 de 2007 e o menor valor médio no dia 318 da imagem de 2004. Valores de EF da ordem de 0,19 e 0,33 foram encontrados por Jin et al. (2005) em estudo sobre o processo evaporativo de uma bacia hidrográfica em Taiyuan, China. De acordo com Meulenberghs (2000), a fração evaporativa tem sido foco de várias investigações durante

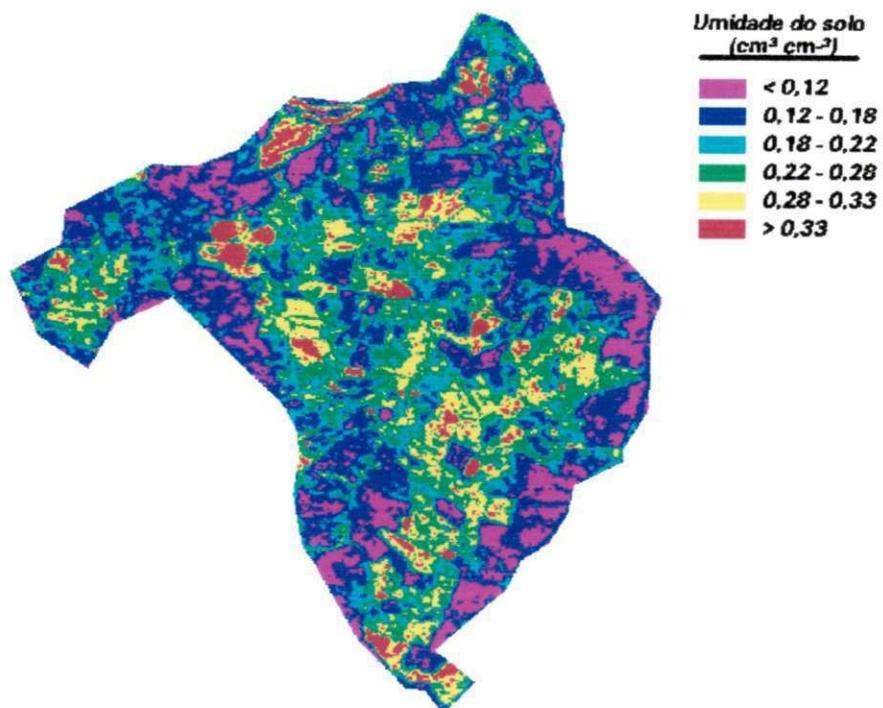
os últimos anos, podendo ser considerada como constante durante o dia, por apresentar menor variação que a razão de Bowen e está diretamente relacionada com variáveis tais como a umidade do solo, os tipos de vegetação ou topografia. Para ele poucas comparações de valores de EF entre diferentes locais têm sido feitas. Na estimativa da evapotranspiração e medidas de fluxos à superfície na Bélgica o autor adotou EF como um índice representativo para todo o território Belga. No entanto esta estimativa parece ser aceitável já que EF é praticamente estável em regiões de clima úmido, como é o caso da Bélgica, e, considerou também constante a cobertura vegetal por não variar muito nos países de clima temperado úmido.

O teor de umidade do solo, as variações de temperatura e estágio de desenvolvimento das culturas exercem forte influência sobre a EF, sendo esta uma medida de controle da superfície na partição dos fluxos turbulentos.

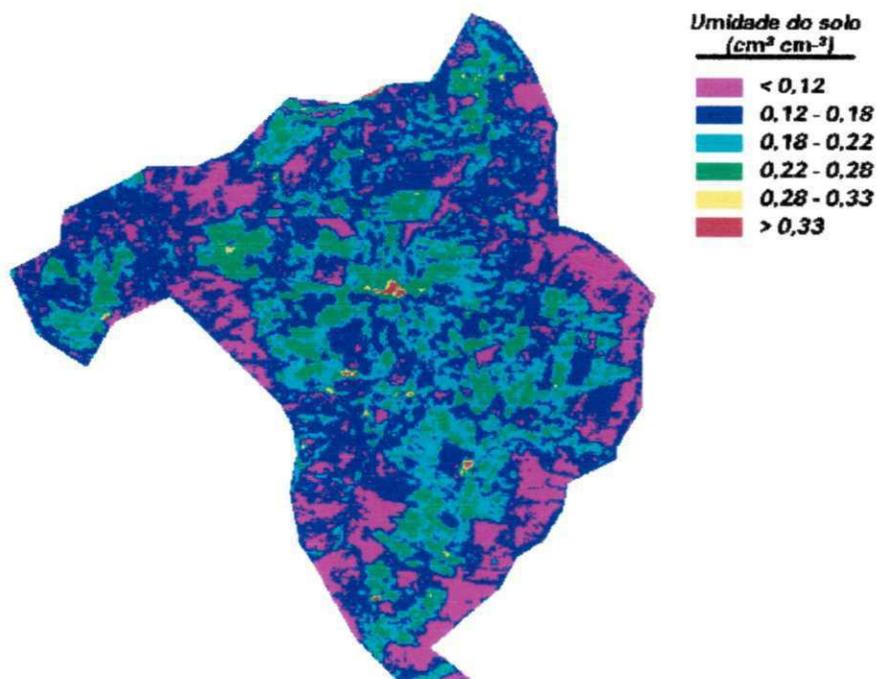
#### **4.3 - Umidade volumétrica do solo - $\theta_s$**

O teor de umidade do solo exerce uma forte influência sobre a fração evaporativa e se constitui no principal e limitante fator do processo evapotranspirativo. Neste estudo,  $\theta_s$  foi estimada a partir de uma relação empírica entre a fração evaporativa e o conteúdo de umidade do solo, pois segundo Bastiaanssen et al. (1997) a fração evaporativa é um bom indicador para descrever as condições de umidade do solo em escala regional. Tal relação foi proposta por Bastiaanssen et al. (2000), a partir de bons resultados de estimativa de fluxos à superfície e medidas do teor de umidade no solo com TDR (Time Domain Reflectometry) e validados nos anos seguintes em pesquisas realizadas na Espanha e Estados Unidos. Esta relação empírica pode ser aplicada em diversos tipos de solo e foi modificada e validada por Scott et al. (2003) em solos irrigados na bacia Lerma-Chapala no México. Os autores mostraram que sem qualquer modificação a relação poderia ser aplicada para descrever o teor de umidade de toda a zona radicular e não apenas entre 5 e 10 cm de profundidade, conforme proposto em outros estudos.

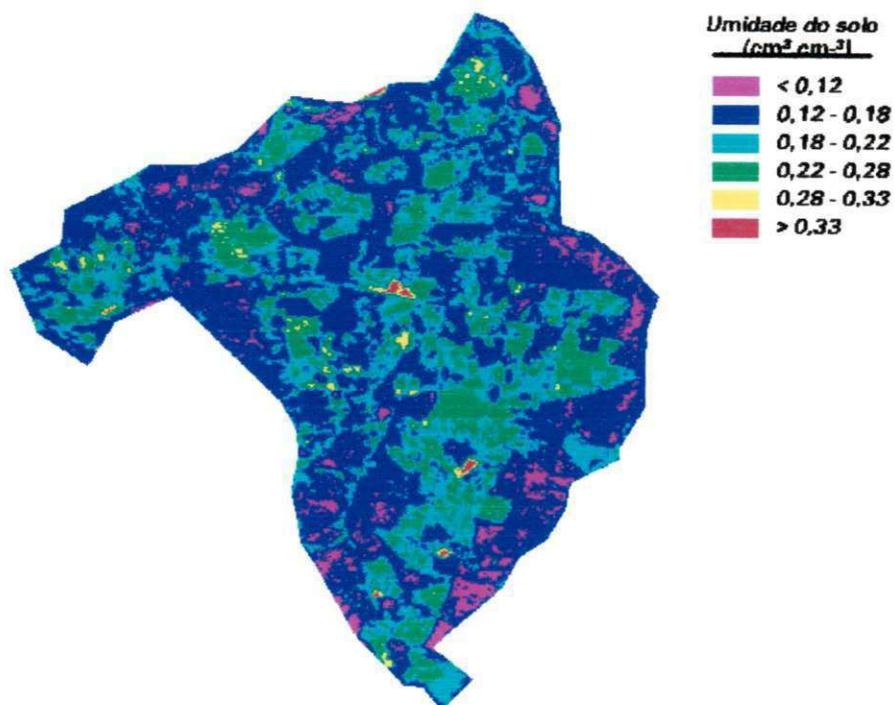
A umidade volumétrica do solo observada nos dias estudados encontra-se ilustrada nas Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10. Comparando-se os mapas temáticos do ano de 2004, verifica-se que os menores valores de  $\theta_s$  estão representados na tonalidade magenta e são inferiores a  $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Tais valores estão concentrados nas áreas que contornam a área plantada com cana-de-açúcar e corresponde às áreas de vegetação nativa e em alguns locais no interior da área cultivada onde o solo se encontra ligeiramente exposto. Os valores intermediários entre



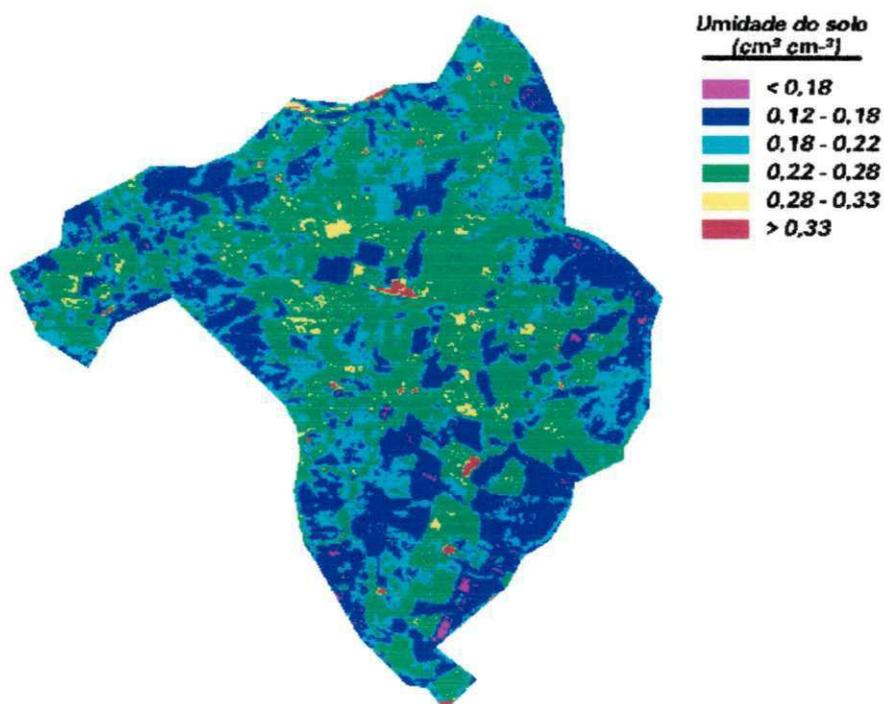
**Figura 4.6** - Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para o dia 12 de outubro de 2004,  $\text{doa} = 286$ .



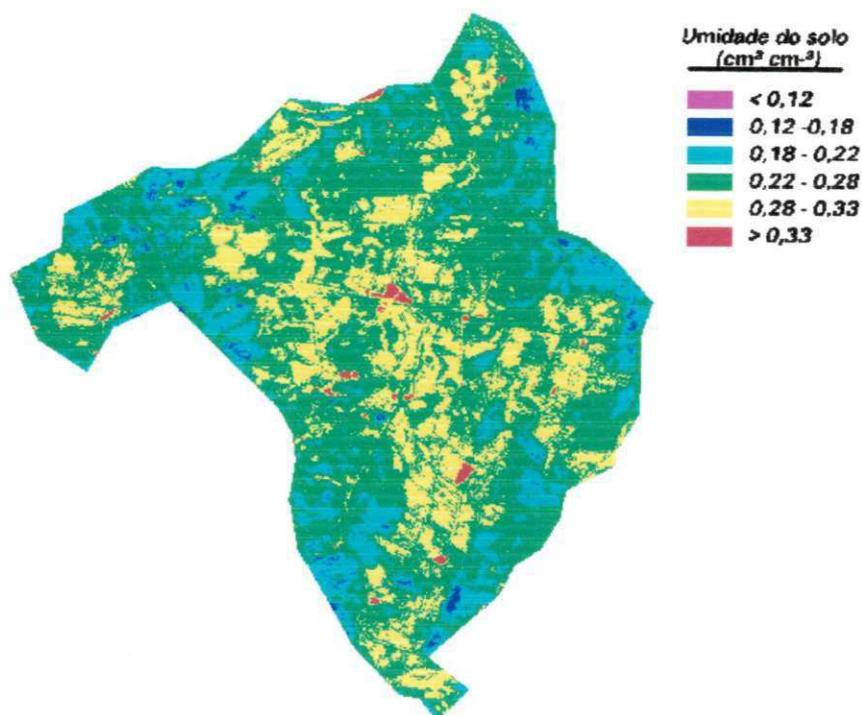
**Figura 4.7** - Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para o dia 13 de novembro de 2004,  $\text{doa} = 318$ .



**Figura 4.8** - Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para o dia 15 de outubro de 2005,  $\text{doa} = 288$ .



**Figura 4.9** - Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para o dia 22 de julho de 2006,  $\text{doa} = 211$ .



**Figura 4.10** - Mapa temático da umidade volumétrica do solo instantânea ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.

$0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  estão representados nas tonalidades, azul e ciano, com maior percentual dessas áreas identificado na Figura 4.7. As áreas em tonalidade amarela se apresentam em maior proporção no mapa temático do dia 286, com valores de  $\theta_s$  entre  $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , enquanto estas mesmas áreas estão representadas no mapa temático do dia 318 nas tonalidades azul e ciano e respectivos valores de  $\theta_s$  inferiores a  $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Na área da cana-de-açúcar, observa-se maior percentual de áreas na tonalidade vermelha no mapa temático do dia 286 e valores de  $\theta_s$  superiores a  $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

A Figura 4.8 referente ao mapa temático do dia 288 de 2005 foi a que apresentou maior percentual de áreas em tonalidade azul e valores de  $\theta_s$  entre  $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e poucas áreas na tonalidade magenta.

Nas áreas em que a cana se encontra mais densa  $\theta_s$  está representada nas tonalidades em verde e amarelo e valores entre  $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Os valores de  $\theta_s$  máximo, médio e mínimo observados neste dia são  $0,38 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  respectivamente. Observa-se também pouca concentração de áreas nas tonalidades magenta

com valores inferiores a  $0,12 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , que conforme a Figura 4.8 encontra-se nos extremos da área cultivada com cana-de-açúcar, como também poucos pixels na tonalidade vermelha. O valor médio de  $\theta_s$  obtido na Figura 4.9 referente ao dia 211 de 2006 é igual  $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , e, se encontra no intervalo de valores representado na Figura 4.9 na tonalidade ciano, enquanto que as áreas em tonalidade verde e amarelo, com valores entre  $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  correspondem àquelas áreas de maior adensamento da cana, pois a quantidade de umidade no solo está diretamente relacionada com o crescimento da vegetação.

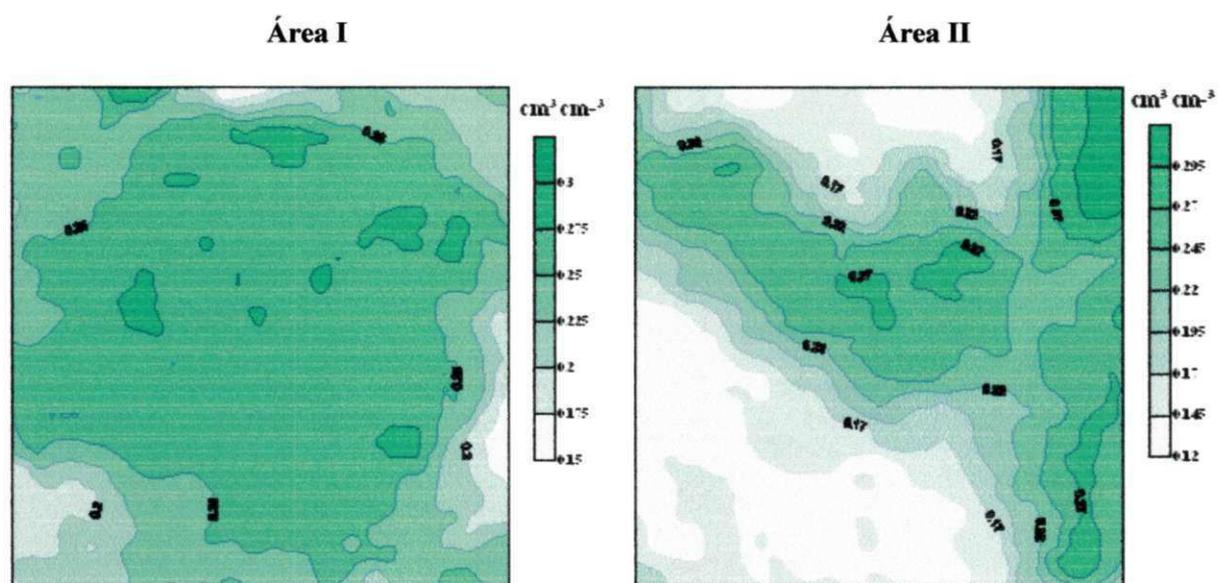
Observa-se no mapa temático do dia 22 do ano de 2007 (Fig. 4.10), que toda a área cultivada com cana-de-açúcar está representada nas tonalidades verde e amarelo. Nota-se claramente na figura a predominância do verde com valores de  $\theta_s$  que variam entre  $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e amarelo com valores máximos de  $\theta_s$  igual a  $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Observa-se que os valores intermediários entre  $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,22 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  encontram-se nos extremos da área cultivada com cana-de-açúcar. Os valores superiores a  $0,33 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  correspondem aos corpos d'água. Esta figura se apresenta bem diferente das demais figuras, evidenciando maior adensamento da vegetação e valores de  $\theta_s$  na área irrigada próximos ao valor médio, que é similar ao valor médio obtido no mapa temático do dia 211 de 2006. O valor mais elevado de  $\theta_s$  observado no dia 22 de 2007 é da ordem de  $0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ .

Ahmad & Bastiaanssen (2003) utilizaram 12 imagens do sensor AVHRR-NOAA dos anos de 1993 e 1994 e aplicaram o SEBAL em áreas irrigadas do Paquistão e obtiveram valores de  $\theta_s$  médio de  $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Os autores compararam tais resultados com medidas feitas em campo utilizando o método de Van Genuchten-Mualen e observaram um erro quadrado médio em tais estimativas em torno de  $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  em regiões tipicamente irrigadas, revelando que a maior parte das raízes ativas do algodão e trigo se encontrava nos primeiros 100 cm de profundidade. Com esses resultados o método não necessita de um procedimento de calibração, podendo ser totalmente aplicado sem dados de campo (Scott et al., 2003).

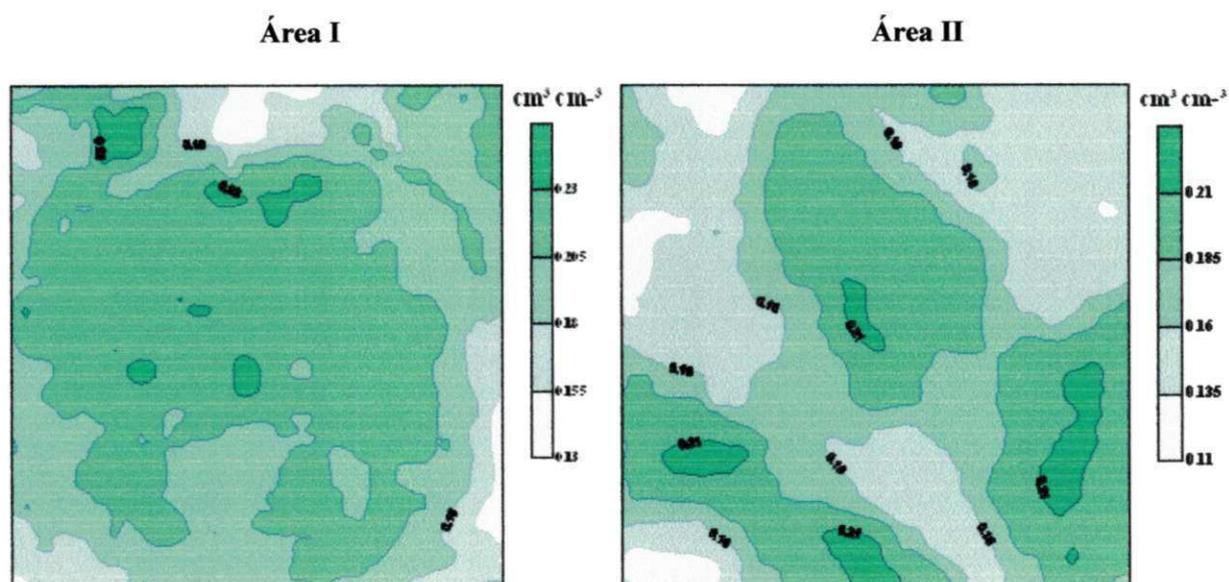
A maior variabilidade no movimento de água no solo ocorre na zona radicular das culturas e, em particular, nos primeiros 20 cm da superfície do solo em que as plantas extraem aproximadamente 62% da umidade. Em maiores profundidades, os fluxos se mantêm em equilíbrio dinâmico. Por outro lado, estudos revelam que nas áreas em que a irrigação é plena o teor de umidade não varia com a profundidade do solo. No caso da cana-de-açúcar, o crescimento vegetativo é diretamente proporcional à água transpirada, por isso, manter um

teor de umidade adequado no solo é de extrema importância durante a fase vegetativa, o que resulta em altas produções.

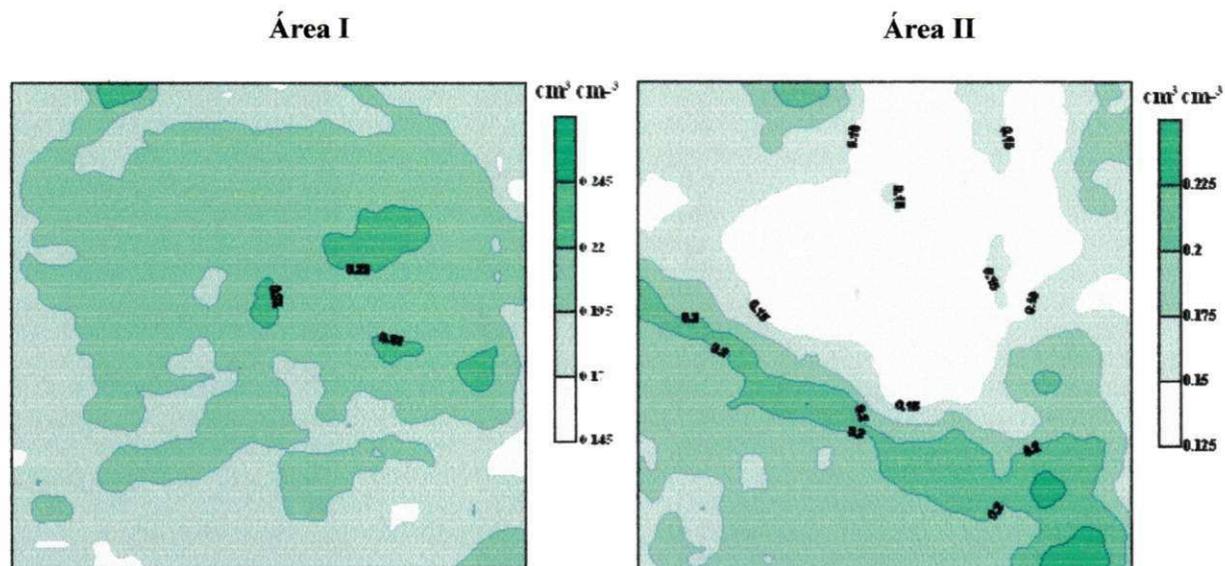
A distribuição espacial da umidade volumétrica do solo nas subáreas cultivadas com cana-de-açúcar e irrigadas por pivô central e por sulco encontra-se representada nas Figuras 4.11 (1-5) seguintes.



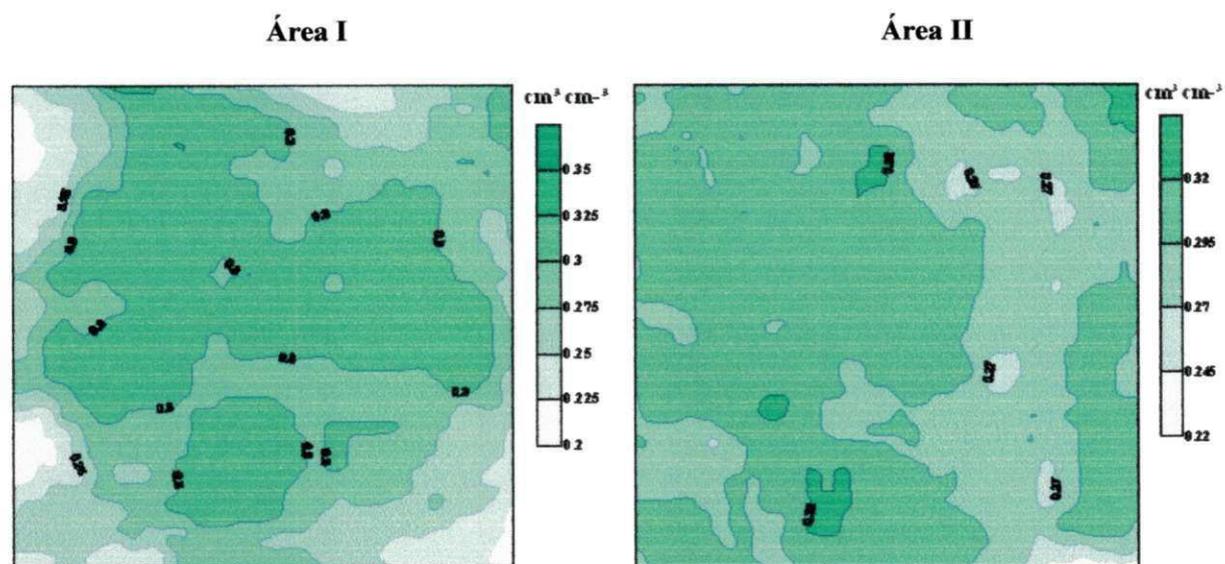
**Figura 4.11.1** - Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.



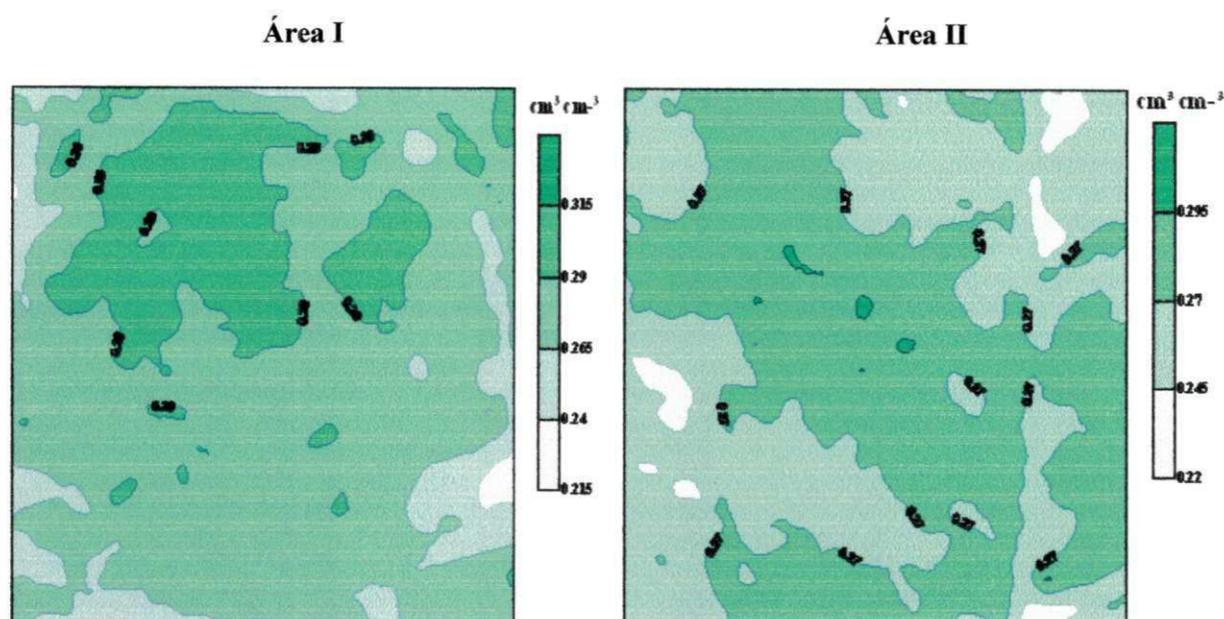
**Figura 4.11.2** - Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.



**Figura 4.11.3** - Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 15 de outubro de 2005,  $\text{doa} = 288$ .



**Figura 4.11.4** - Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 30 de julho de 2006,  $\text{doa} = 211$ .



**Figura 4.11.5** - Distribuição espacial da umidade volumétrica do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) das áreas irrigadas por pivô central e por sulco para o dia 22 de janeiro de 2007,  $\text{doa} = 22$ .

Analisando as figuras, observa-se claramente que os valores de  $\theta_s$  se apresentam mais homogêneos nas áreas I, provavelmente devido a melhor eficiência da irrigação, neste caso pivô central. Como a área irrigada é circular os menores valores de  $\theta_s$  são identificados nas partes extremas da área que não são alcançadas pelos emissores. Já nas áreas irrigadas por superfície, área II, a distribuição de  $\theta_s$  se mostra bastante variada ao longo dos dias estudados.

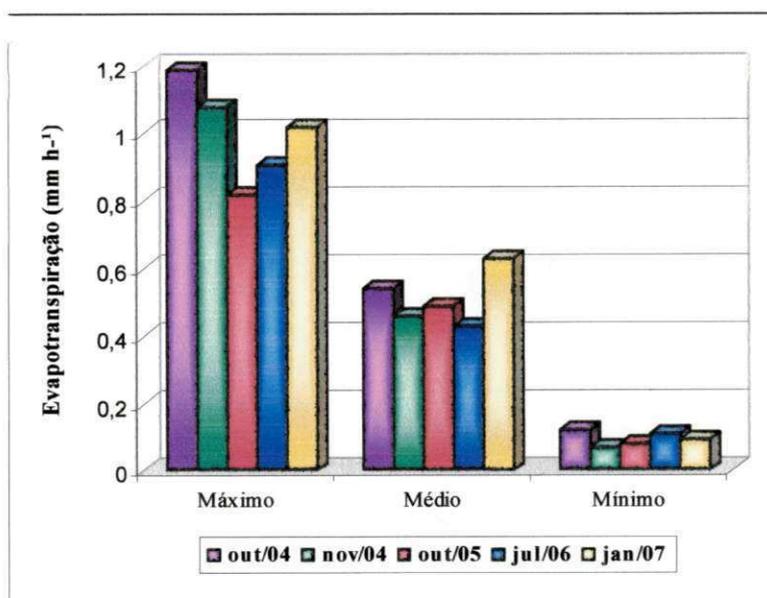
Os valores mais elevados de  $\theta_s$  foram registrados nos dias 211 e 22 dos anos de 2006 e 2007, respectivamente. O desenvolvimento do sistema radicular da cana como das demais culturas é fortemente afetado pela distribuição e disponibilidade da água no solo.

De modo geral, a umidade do solo é uma importante variável nos processos hidrológicos da superfície como infiltração, escoamento, evaporação e é controlada por interações complexas que envolvem o sistema solo-planta-atmosfera. Nas regiões semi-áridas, este parâmetro pode ser utilizado para o monitoramento de eventos de secas e disponibilidade de água para o desenvolvimento das culturas, notadamente àquelas altamente dependentes das técnicas de irrigação.

#### 4.4 - Evapotranspiração instantânea - $ET_{inst}$

A estimativa da evapotranspiração através de sensores remotos é feita a partir do balanço de energia à superfície em que os valores instantâneos de  $\lambda ET$  para cada pixel são então convertidos em valores horários de evapotranspiração ( $mm\ h^{-1}$ ). Dentre todas as imagens estudadas  $ET_{inst}$  variou entre  $0,07\ mm\ h^{-1}$  e  $1,19\ mm\ h^{-1}$  com os valores mínimos e máximos identificados nos dias 318 e 286 do ano de 2004. A Figura 4.12 apresenta os valores máximo, médio e mínimo da evapotranspiração obtidos na área cultivada com cana-de-açúcar no momento da passagem do satélite. As áreas de solo exposto e com pouca cobertura vegetal são as que apresentam os menores valores de  $ET_{inst}$ , ou seja; apresentam os menores valores de NDVI, identificados nas imagens nos extremos da área cultivada, que são pouco vegetadas, com menor valor de  $ET_{inst}$  observado no dia 318 de 2004.

Os maiores valores de  $ET_{inst}$  foram obtidos nas imagens dos dias 286 e 318 de 2004 e 22 de 2007 e os valores médios variam entre  $0,43\ mm\ h^{-1}$  e  $0,63\ mm\ h^{-1}$ , com o maior valor médio de  $ET_{inst}$  identificado na imagem do dia 22 de 2007 e menor valor médio na imagem do dia 211 de 2006. Os valores mais elevados correspondem aos corpos d'água e as áreas irrigadas, notadamente aquelas irrigadas por pivô central.



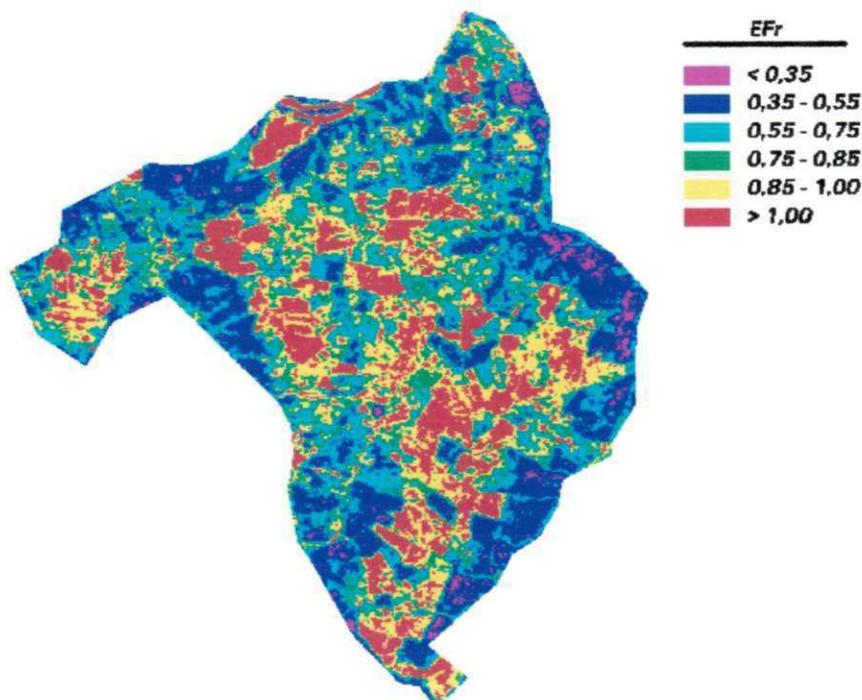
**Figura 4.12** - Valores máximo, médio e mínimo da evapotranspiração instantânea.

Tasumi et al. (2005) utilizaram imagens do sensor TM-Landsat 5 de 24/06/1990 e 29/07/1991 e aplicaram o METRIC na estimativa da evapotranspiração em áreas agrícolas de Kimberly, Idaho – USA, e obtiveram em cultivos de peras  $ET_{inst}$  da ordem de  $0,78 \text{ mm h}^{-1}$  e de  $0,79 \text{ mm h}^{-1}$  em área cultivada com alfafa.

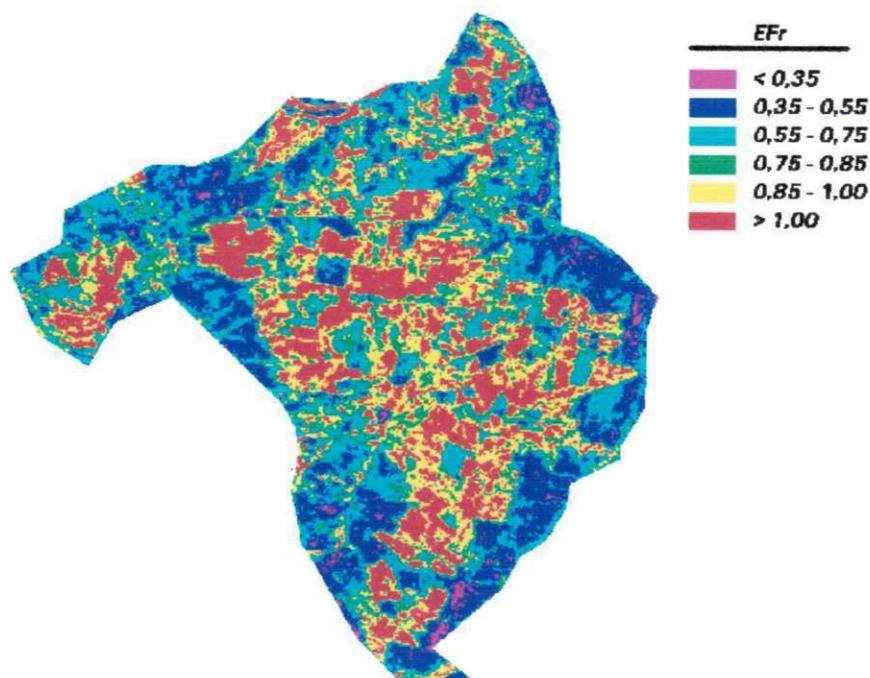
#### 4.5 - Fração evapotranspirativa - EFr

No METRIC a fração evapotranspirativa (EFr) é uma fração da evapotranspiração de referência computada para cada pixel e resulta da razão entre a evapotranspiração instantânea, estimada a partir do resíduo do balanço de energia à superfície, e a evapotranspiração de referência medida no momento da passagem do satélite (Allen et al., 2007a; Tasumi et al., 2005). Desse modo, a EFr é bastante similar ao coeficiente de cultivo (Kcr) e se constitui em um bom indicador da situação hidrológica das culturas, especialmente quando a cultura de referência utilizada na estimativa da evapotranspiração for a alfafa.

As Figuras 4.13, e 4.14 ilustram os mapas temáticos da EFr dos dias 286 e 318 do ano de 2004. Analisando as duas figuras observa-se que não houve grandes variações na classificação temática dos referidos mapas.



**Figura 4.13** - Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.

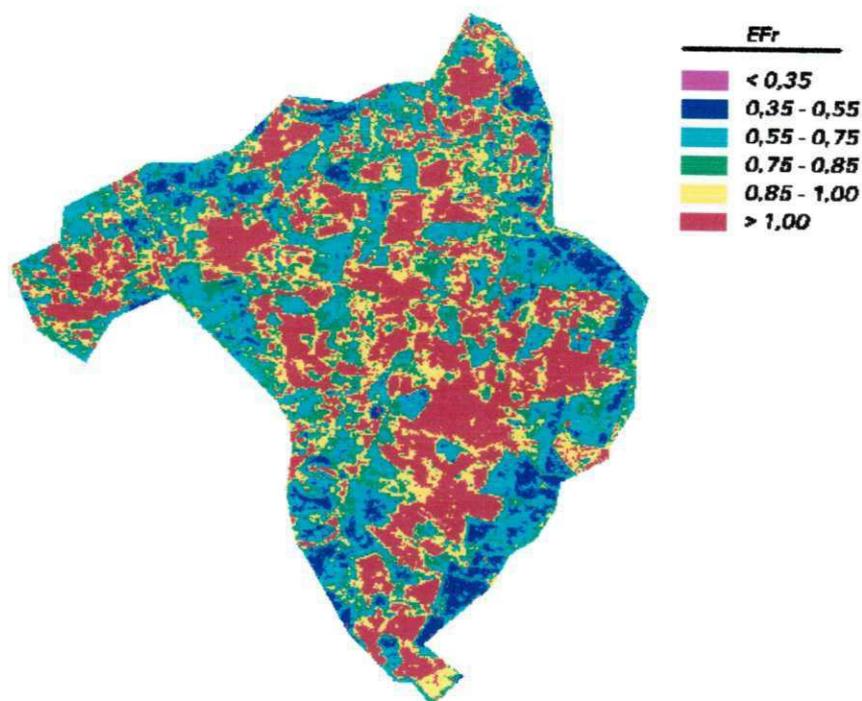


**Figura 4.14** - Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 13 de novembro de 2004, do ano = 318.

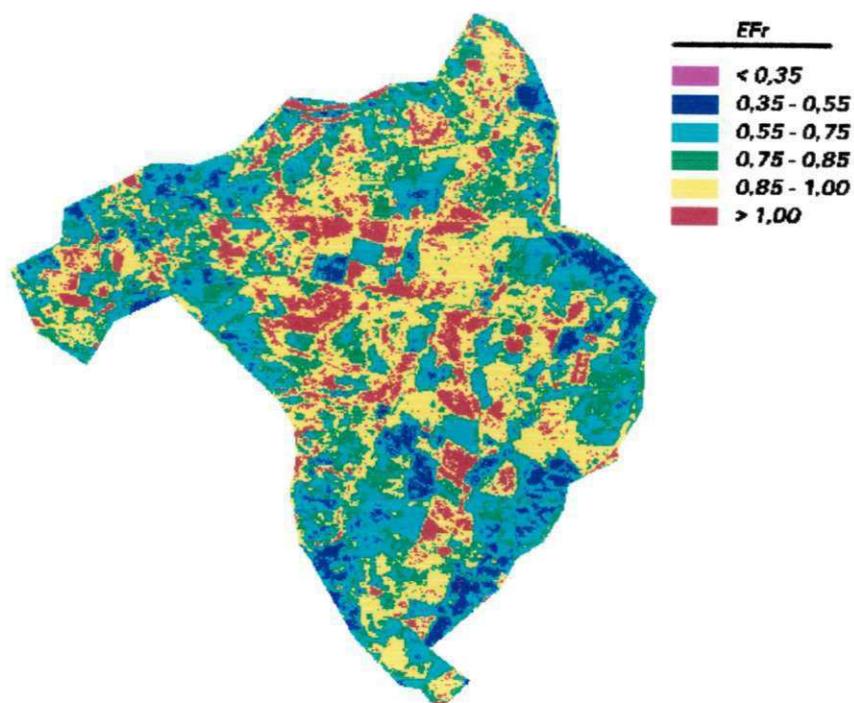
Os valores menores que 0,35, em tons magenta, representam as áreas totalmente desprovidas de vegetação, identificadas em alguns pixels nos extremos da área estudada. As áreas em tonalidade azul, com valores de EFr entre 0,35 e 0,55 representam as áreas pouco vegetadas, ou com solo exposto, com notável predominância dessa tonalidade na imagem do dia 286. Nota-se, no entanto, que na imagem do dia 318 as áreas com esta tonalidade apresentam-se mais dispersas.

Comparando as duas figuras verifica-se maior quantidade das áreas em tonalidade verde no mapa do dia 318, com valores de EFr que variam entre 0,75 e 0,85, evidenciando maior adensamento da cana-de-açúcar. Os valores médios de EFr observados nas imagens do ano de 2004 são iguais a 0,76 e 0,78 respectivamente, enquanto que os maiores valores são identificados nas áreas irrigadas por pivô central e estão representados na tonalidade vermelha, com maior percentual dessas áreas observados na imagem do dia 318.

As Figuras 4.15 e 4.16 apresentam os mapas temáticos referentes aos dias 288 do ano de 2005 e 211 do ano de 2006 em que as áreas de vegetação nativa e cultivadas, mas pouco densa, estão representadas na tonalidade verde e com maior concentração dessas áreas identificada na Figura 4.16, enquanto as áreas com tonalidade em vermelho evidencia

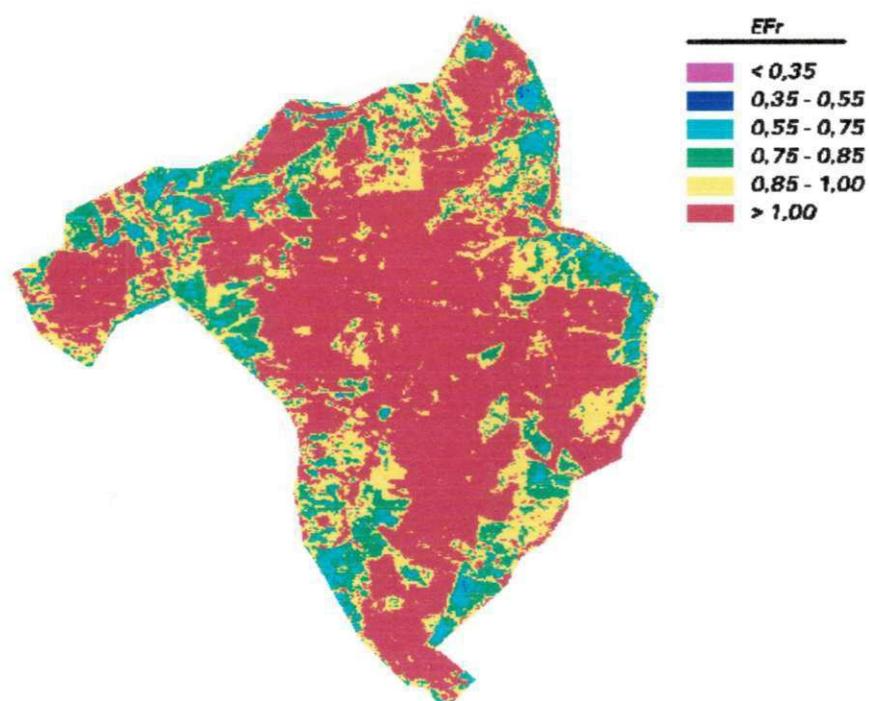


**Figura 4.15** - Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.



**Figura 4.16** - Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.

grande parte da área cultivada com cana-de-açúcar predominante na área da Figura 4.15 e apresentam valores maiores que a unidade. No entanto, na classificação da imagem do ano de 2007, representada na Figura 4.17, não se verifica áreas em tonalidade magenta e maior concentração dessas áreas em tonalidades verde e amarela que apresentam valores de EFr entre 0,75 e 1,00 e correspondem às áreas de vegetação nativa que contornam a área de cana-de-açúcar. As áreas cultivadas com cana-de-açúcar estão representadas na tonalidade vermelha e apresentam valores superiores a 1,0, revelando que naquele período o solo se encontrava em boas condições hídricas, visto que a disponibilidade de umidade no solo contribui para o processo evapotranspirativo (Gentine et al., 2007). Os valores médios de EFr referentes às imagens dos anos 2005, 2006 e 2007 foram iguais a 0,87, 0,82 e 1,00 respectivamente. Os maiores valores de EFr obtidos nas imagens estudadas, encontram-se em alguns pontos nos corpos d'água e nas áreas de cana-de-açúcar irrigada por pivô central, sendo identificados nas figuras supracitadas na cor vermelha. Estudos revelam que valores de EFr iguais a zero são encontrados naqueles pixels em que a temperatura da superfície é extrema, característica de áreas de deserto, e os valores que excedem a unidade, que neste estudo são identificados em todas as imagens, representam as áreas em boas condições de umidade ou que foram irrigadas momentos antes da passagem do satélite.

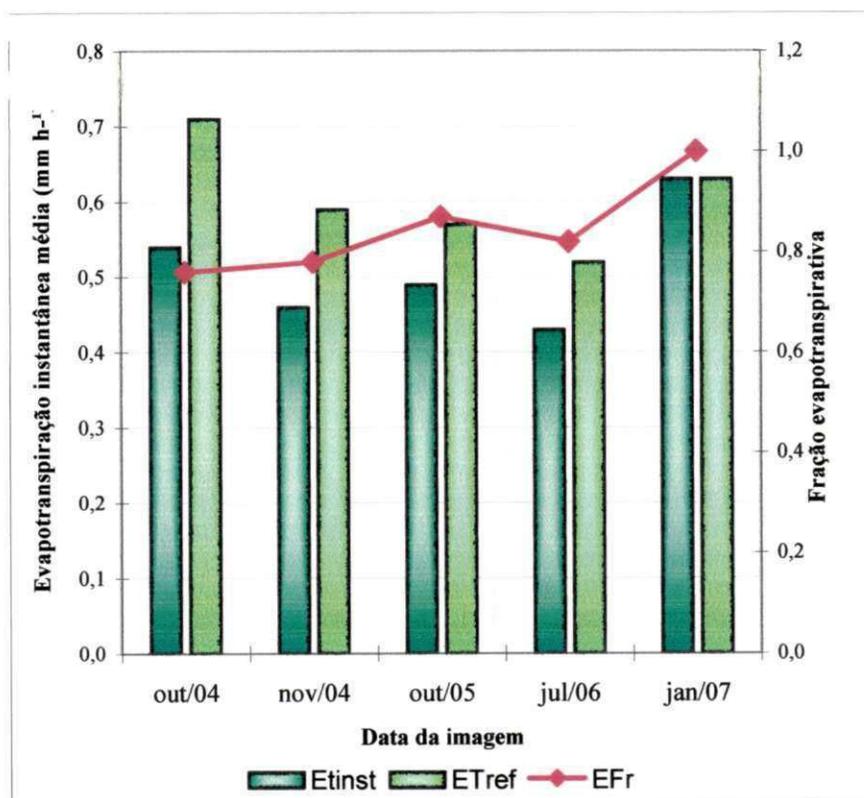


**Figura 4.17** - Mapa temático da fração evapotranspirativa (EFr) instantânea para o dia 22 de janeiro de 2007,  $doa = 22$ .

Os valores médios da evapotranspiração real e da fração da evapotranspiração de referência estimada no momento da passagem do satélite, da área cultivada com cana-de-açúcar, assim como da evapotranspiração de referência medida, encontram-se na Figura 4.18.

Analisando a referida figura, verifica-se que os valores da fração evapotranspirativa média (E<sub>Fr</sub>) dos dias estudados, estiveram entre 0,76 e 1,0, com o menor valor observado na imagem de julho de 2006 e maior valor na imagem de janeiro de 2007. Os valores da evapotranspiração média instantânea variaram de 0,43 a 0,63 mm h<sup>-1</sup>, com o menor e maior valor observado nas imagens de julho de 2006 e janeiro de 2007, respectivamente.

Os valores da evapotranspiração de referência medidos no momento do imageamento foram iguais a 0,71 mm h<sup>-1</sup> e 0,59 mm h<sup>-1</sup>, referentes às imagens dos dias 286 e 318 do ano de 2004 e 0,57 mm h<sup>-1</sup>, 0,52 mm h<sup>-1</sup> e 0,63 mm h<sup>-1</sup> para os dias 288 do ano de 2005, 211 do ano de 2006 e 22 do ano de 2007, respectivamente. Observando-se os valores instantâneos da evapotranspiração estimada e da evapotranspiração de referência medida, verifica-se pouca variação entre eles, com amplitude máxima de 0,17 mm h<sup>-1</sup> observado na imagem de outubro de 2004. Esta pequena variação pode estar relacionada com as condições hídricas da área nestas datas.



**Figura 4.18** - Valores médios instantâneos da evapotranspiração (mm h<sup>-1</sup>), fração evapotranspirativa e evapotranspiração de referência (mm h<sup>-1</sup>) da área de cana-de-açúcar.

Como os índices de vegetação evidenciam a resposta espectral da cobertura vegetal, os mesmos são utilizados para avaliação e monitoramento das condições e características das áreas vegetadas e o NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) tem sido o índice mais utilizado no mapeamento das variações espaciais e temporais da cobertura vegetal. Várias pesquisas e aplicações do sensoriamento remoto têm utilizado o NDVI na estimativa do coeficiente de cultivo. A relação entre o NDVI e  $K_c$  possibilita o mapeamento da variabilidade do  $K_c$ , em que na maioria desses estudos estimam inicialmente o coeficiente de transpiração ou  $K_c$  “basal”, uma vez que os índices de vegetação são pouco impactados pela evaporação do solo (Tasumi et al., 2005).

A fração da evapotranspiração de referência estimada por sensores remotos representa a condição em tempo real das culturas. Os valores de  $K_c$  das culturas durante o estágio inicial de desenvolvimento estão sujeitos aos efeitos das frequências de umedecimento pela irrigação ou precipitação. Inman-Bamber & McGlinchey (2003) utilizaram o método da razão de Bowen para estimar o consumo hídrico e o coeficiente de cultivo para cana-de-açúcar irrigada em Kalamia e Swaziland. Durante o experimento os autores obtiveram valores de  $K_c$  variando entre 0,5 e 1,5, com o maior valor observado após um evento de precipitação em 30 de outubro de 2000, mantendo-se mais estável com valores médio da ordem de 1,3. Valores máximos de  $K_c$  para a cana-de-açúcar entre 1,1 e 1,2 foram encontrados por Watanabe et al. (2004) na região Nordeste da Tailândia no mês de junho, utilizando também o método da razão de Bowen.

Segundo Dorembos & Pruitt (1977), os coeficientes de cultivo ( $K_c$ ) para a cana-de-açúcar variam consideravelmente em função do clima e da variedade da cana, principalmente durante as fases, inicial e de desenvolvimento. O valor máximo de  $K_c$  recomendado para cana-de-açúcar é de 1,25 em condições de ventos fracos a moderados e de 1,30 para locais de ventos fortes e regiões de clima árido.

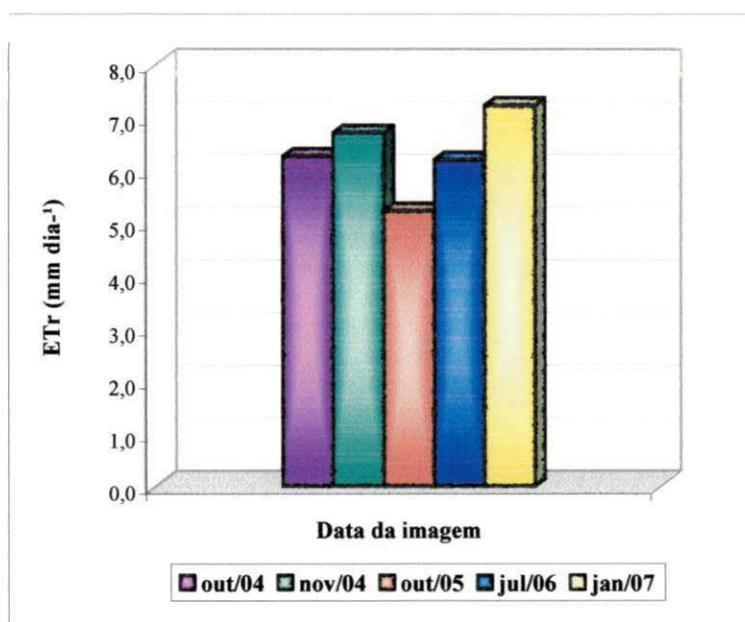
#### **4.6 - Evapotranspiração real diária - ET**

A evapotranspiração real diária é um dos parâmetros mais difíceis de ser medido no campo e se constitui como fator dominante do balanço hídrico e importante parâmetro para quantificar a necessidade hídrica das culturas e o uso eficiente da água nos projetos de irrigação. Neste estudo, a ET diária foi estimada a partir dos valores da fração da evapotranspiração de referência obtida por dados remotos e a evapotranspiração de referência medida na estação meteorológica, seguindo a metodologia de Penman-Monteith - ASCE-

EWRI, 2005. Os valores horários da evapotranspiração de referência de cada dia estudado foram integrados para um período diário, e estes foram fornecidos pela Embrapa/CPATSA e AGROVALE e estão apresentados na Figura 4.19.

Observa-se na referida figura que os maiores valores da evapotranspiração de referência medida são iguais a  $6,72 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $7,24 \text{ mm dia}^{-1}$ , correspondentes aos dias 318 e 22 dos anos 2004 e 2007, e o menor valor medido foi registrado no dia 288 de 2005 como sendo igual a  $5,23 \text{ mm dia}^{-1}$ .

As Figuras 4.20, 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 ilustram a distribuição espacial da evapotranspiração real diária dos dias estudados. Geralmente os menores valores de ET são encontrados nas áreas com pouca ou nenhuma vegetação onde se identifica os menores índices de umidade no solo.

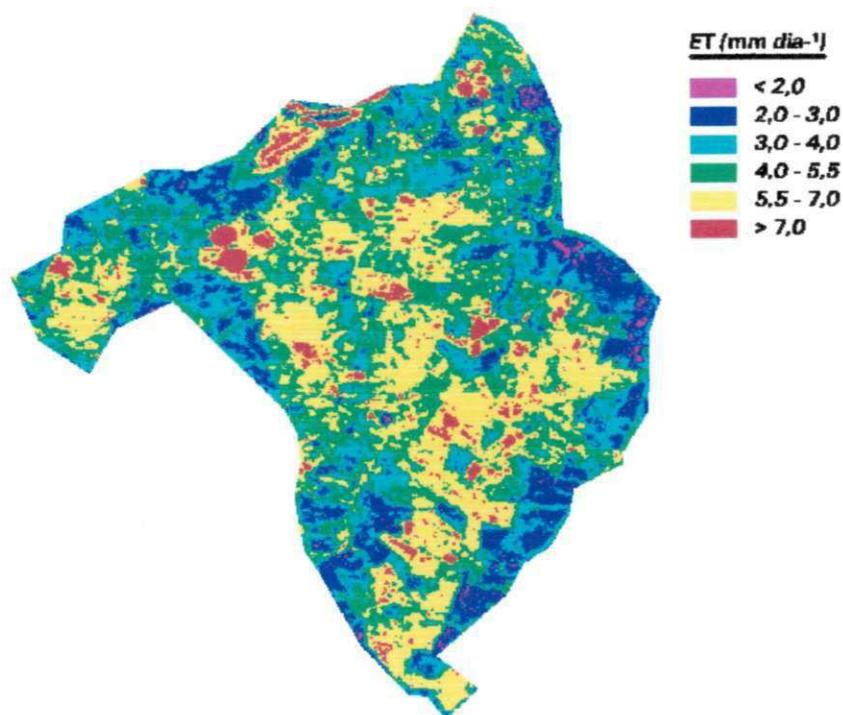


**Figura 4.19** - Evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) dos dias estudados.

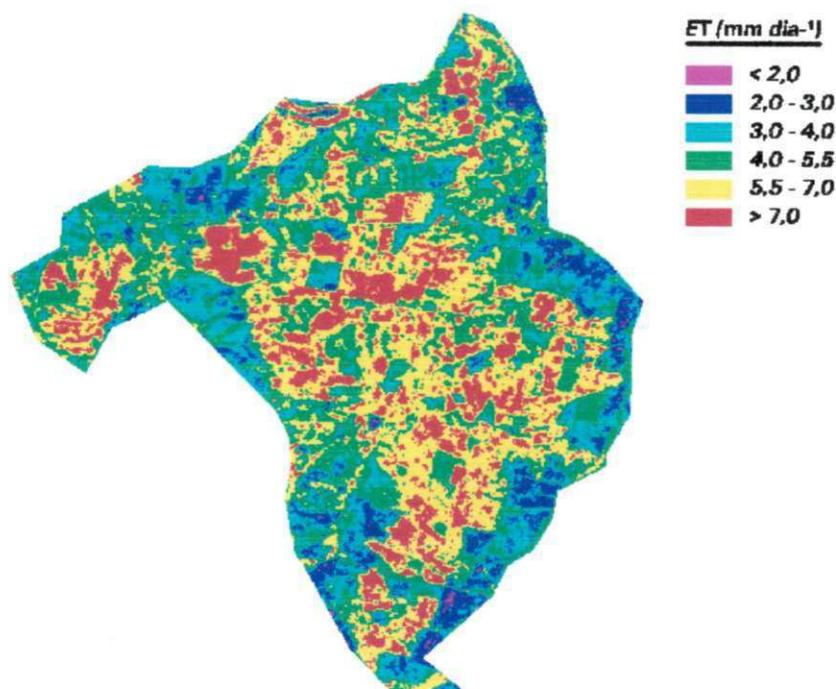
Nas imagens estudadas essas áreas se encontram nos extremos da área cultivada com a cana-de-açúcar e são identificadas nas tonalidades magenta e azul em que se observa maior predominância das mesmas nos mapas temáticos do ano de 2004, com valores de ET inferiores a  $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , com maior percentual das áreas em tonalidade magenta identificado na imagem do dia 286. Ainda com relação aos mapas temáticos de 2004 observa-se que os valores intermediários de ET variam entre  $3,0 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$  e estão representados

na tonalidade ciano e são identificados nas áreas extremas e nas áreas de cultivos em que a cana se encontra na fase inicial de desenvolvimento, ou em locais em que o solo se encontra descoberto devido as práticas de manejo. O valor médio de ET estimado para toda a área das Figuras 4.20 e 4.21 foi de  $4,74 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $5,28 \text{ mm dia}^{-1}$ .

Com objetivos de estimar a evapotranspiração de áreas de cultivos e vegetação nativa na bacia do Rio Rapti, no Nepal, Shilpakar (2003) aplicou o algoritmo SEBAL e imagens Landsat de 24 de outubro e 27 de dezembro de 2001 e 01 de março de 2002 e obteve valores médios de ET iguais a  $3,2 \text{ mm dia}^{-1}$ ,  $1,8 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $2,92 \text{ mm dia}^{-1}$ , respectivamente. Feitosa (2005) também utilizou imagens Landsat e o algoritmo SEBAL na estimativa do balanço de energia à superfície na área do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho e obteve no dia 04 de outubro de 2001 valor médio de ET igual a  $2,2 \text{ mm dia}^{-1}$ .



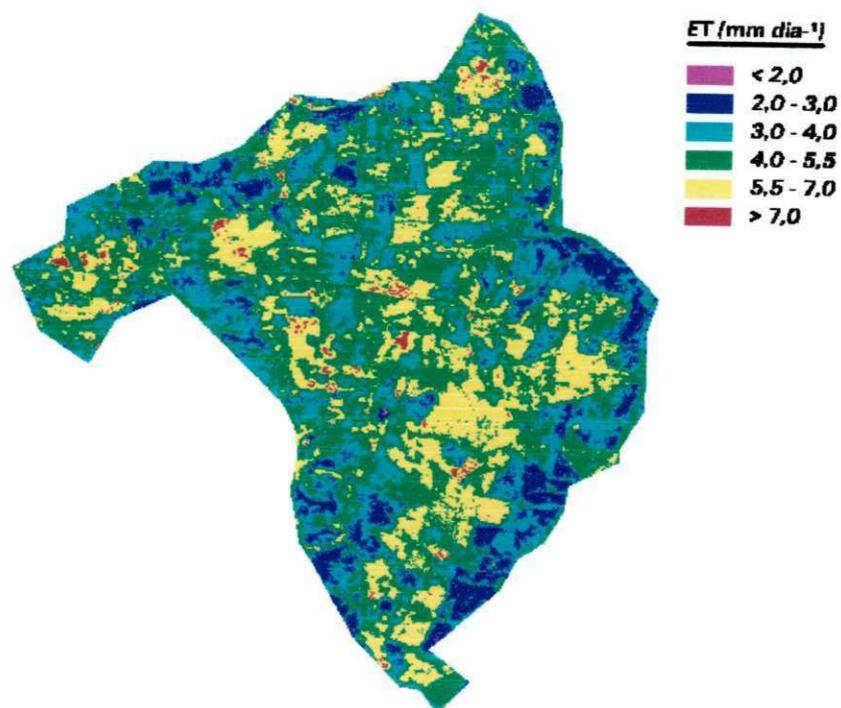
**Figura 4.20** - Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 12 de outubro de 2004,  $doa = 286$ .



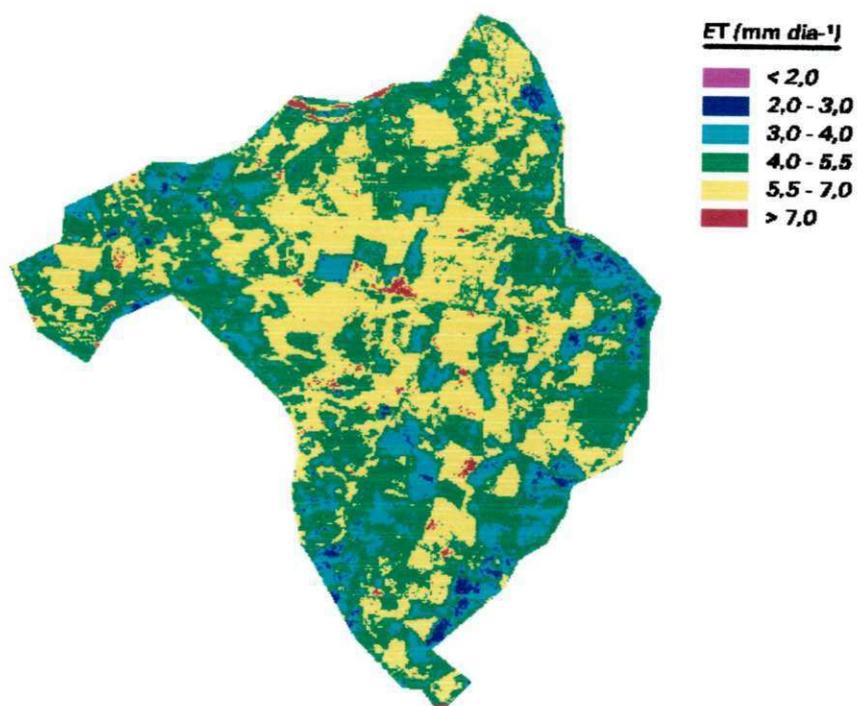
**Figura 4.21** - Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.

Analisando as Figuras 4.22 e 4.23, que representam as imagens da evapotranspiração dos dias 288 do ano de 2005 e 211 do ano de 2006, observa-se que o padrão de tonalidade destas imagens apresenta-se bastante semelhante com maior percentual das áreas em azul identificado no mapa temático do dia 288 de 2005. Percebe-se uma menor concentração das áreas em tonalidade ciano e aquelas áreas em tonalidade magenta praticamente não aparecem nas figuras citadas, e correspondem as áreas extremas, com solo exposto e vegetação nativa com valores estimados de ET inferiores a  $2,0 \text{ mm dia}^{-1}$ . Observa-se na área cultivada com cana-de-açúcar maior predominância dos valores de ET entre  $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $5,5 \text{ mm dia}^{-1}$  na Figura 4.22, representados na tonalidade verde e na Figura 4.23 estas áreas são identificadas na tonalidade amarela e valores de ET que variam entre  $5,5 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $7,0 \text{ mm dia}^{-1}$ . Os valores médios de ET estimados para os dias 288 de 2005 e 211 de 2006 foram iguais a  $4,54 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $5,01 \text{ mm dia}^{-1}$  respectivamente.

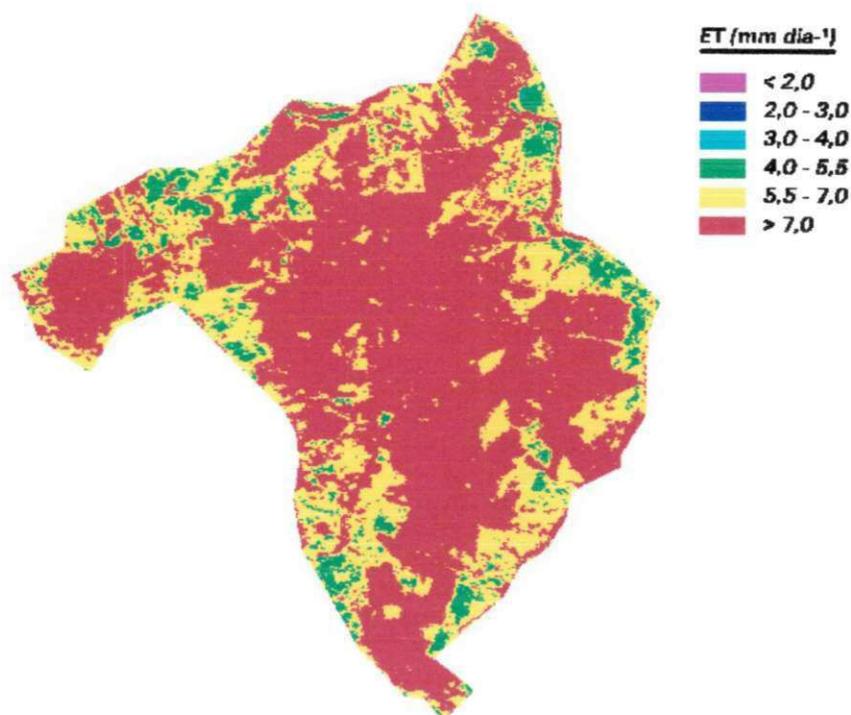
A imagem da evapotranspiração do dia 22 de 2007, ilustrada na Figura 4.25, apresenta um padrão de tonalidades bem diferenciado daqueles apresentados nas outras figuras, ou seja; não se verifica áreas em tonalidades magenta, azul e ciano. Os valores de ET, inferiores a  $5,5 \text{ mm dia}^{-1}$ , são observados em poucos locais nos extremos da área.



**Figura 4.22** - Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.



**Figura 4.23** - Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.



**Figura 4.24** - Mapa temático da evapotranspiração real para o dia 22 de janeiro de 2007, do  $a = 22$ .

Os valores de ET entre  $5,5 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $7,0 \text{ mm dia}^{-1}$  estão representados na tonalidade amarela, identificados nos extremos da área e em alguns pixels no interior da área cultivada com cana-de-açúcar. Os maiores valores de ET são identificados em todas as figuras na tonalidade avermelhada, e são predominantes na imagem do dia 22 de 2007, com valores de ET igual e superior a  $7,0 \text{ mm dia}^{-1}$ , com valor médio igual a  $7,28 \text{ mm dia}^{-1}$ .

Em todas as imagens, os maiores valores de ET foram identificados nos corpos d'água e nas áreas irrigadas em que o sensor detecta os pontos com água no momento da sua passagem. O mapa temático do dia 288 do ano de 2005 foi o que apresentou os menores valores de ET, mas neste mesmo dia se registrou os maiores índices de temperatura, enquanto que os maiores valores de ET foram identificados na imagem do dia 22 de 2007.

Tasumi & Allen (2007) aplicaram o METRIC e imagens Landsat 7 em áreas agrícolas do Magic Valley, região Sudoeste de Idaho e obtiveram valores máximos de ET de  $7,34 \text{ mm dia}^{-1}$  para o dia 14 de agosto de 2000 e verificaram que os valores de ET se mantiveram bastante constantes dentro da área cultivada e tal comportamento está relacionado ao teor de umidade do solo e a uniformidade da irrigação. Gowda et al. (2008) também utilizaram o METRIC e imagens TM Landsat 5 de 27 de junho e 29 de julho, ambas do ano de 2005 para o

mapeamento da evapotranspiração de áreas irrigadas e cultivadas com milho e algodão sob condições advectivas no Texas, USA. Os valores de ET estimados pelo modelo METRIC foram validados com os valores de ET obtidos a partir do método do balanço hídrico, e os autores identificaram que a maior magnitude de erro entre os métodos utilizados foi identificada nas áreas que apresentavam o menor índice de biomassa e maior percentual de solo exposto. Os maiores valores de ET obtidos pelo METRIC foram observados nas áreas irrigadas e cultivadas com milho e iguais a  $13,7 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $9,5 \text{ mm dia}^{-1}$ .

Os mapas temáticos de ET dos dias estudados apresentaram a mesma tendência espectral dos mapas de NDVI e da fração evapotranspirativa na área de cana-de-açúcar, em que os valores mais elevados desses parâmetros correspondem aos mais altos índices evapotranspirativos. Toda a área cultivada com cana-de-açúcar é irrigada e se observa que nas datas estudadas a quantidade da cobertura do dossel varia devido a diferentes períodos de colheitas e fases de desenvolvimento, com início no período de estabelecimento e final na maturação.

Considerando o valor médio de ET para cada dia estudado e a área total cultivada com cana-de-açúcar, cerca de 15000 ha, é possível estimar o volume total evapotranspirado na área de cana-de-açúcar, conforme valores apresentados na Tabela 4.11.

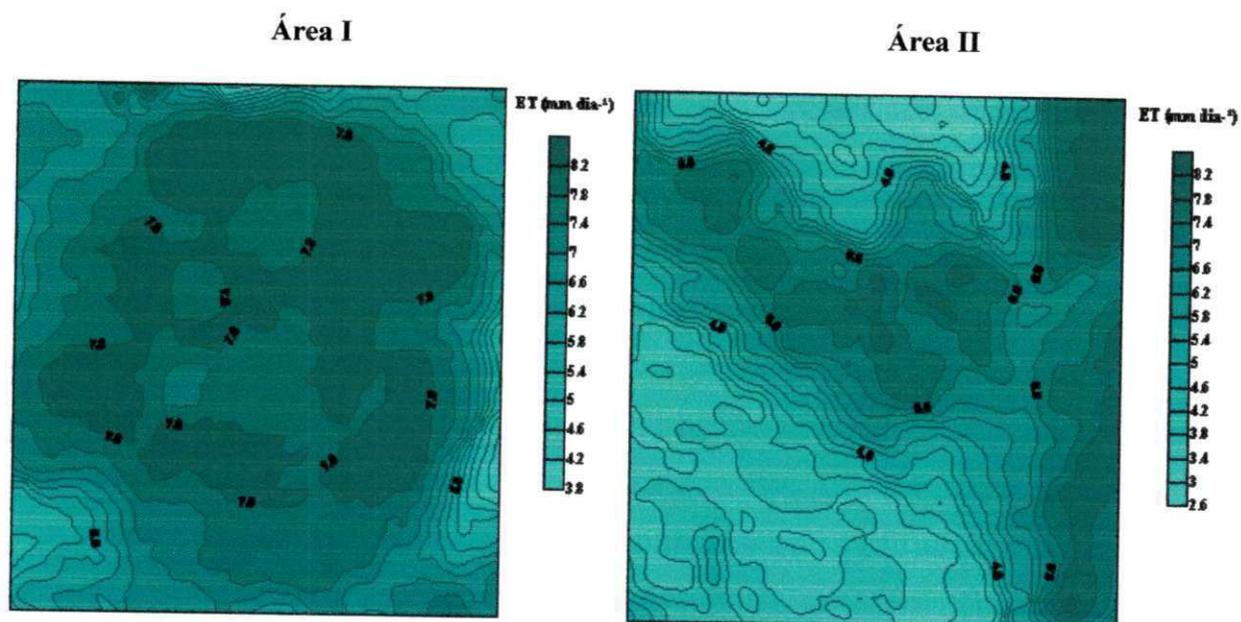
**Tabela 4.11** - Evapotranspiração total da área irrigada com cana-de-açúcar.

<b>Data da imagem</b>	<b>ET médio (mm dia<sup>-1</sup>)</b>	<b>ET total (m<sup>3</sup> x 10<sup>3</sup>)</b>
12.10.2004	4,75	702,5
13.11.2004	5,28	792,0
15.10.2005	4,55	682,5
30.07.2006	5,08	762,0
22.01.2007	7,28	1092,0

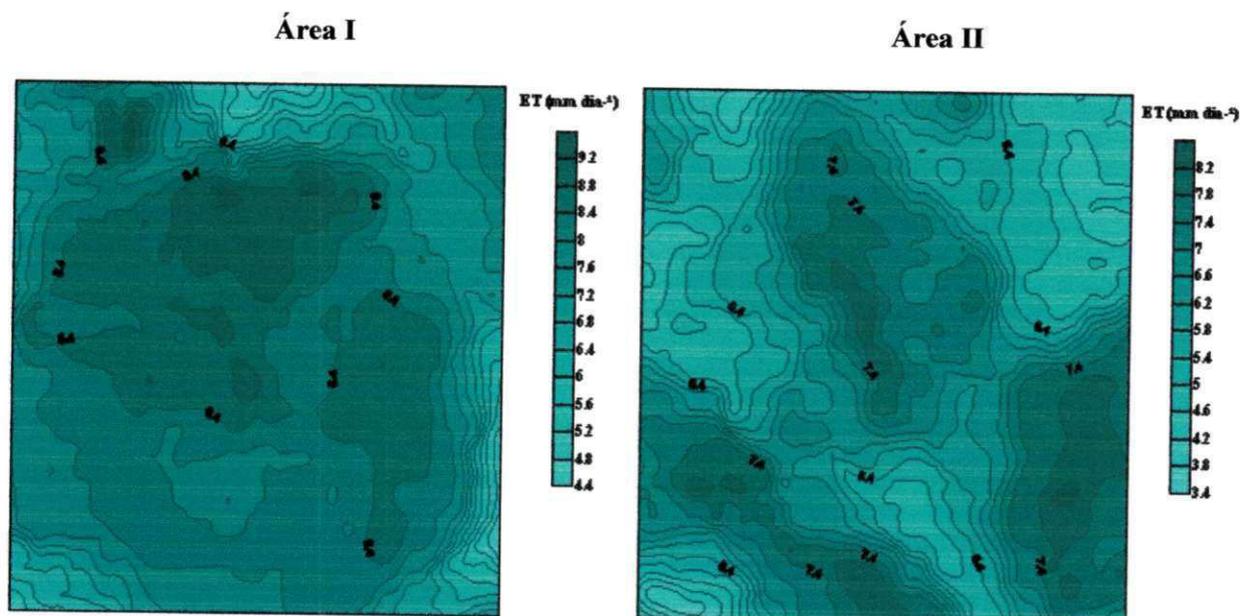
Os valores contidos na Tabela acima representam uma informação básica para o manejo da água nos sistemas de irrigação. Na área estudada a evapotranspiração real da cultura é estimada em função da evapotranspiração de referência e diferentes valores do coeficiente de cultivo,  $K_c$ , correspondente a diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar, seguindo indicação do manual 56, FAO.

As duas subáreas selecionadas possuem áreas iguais e diferentes sistemas de irrigação, ou seja, a área I é irrigada por pivô central e a área II irrigada por sulco, conforme

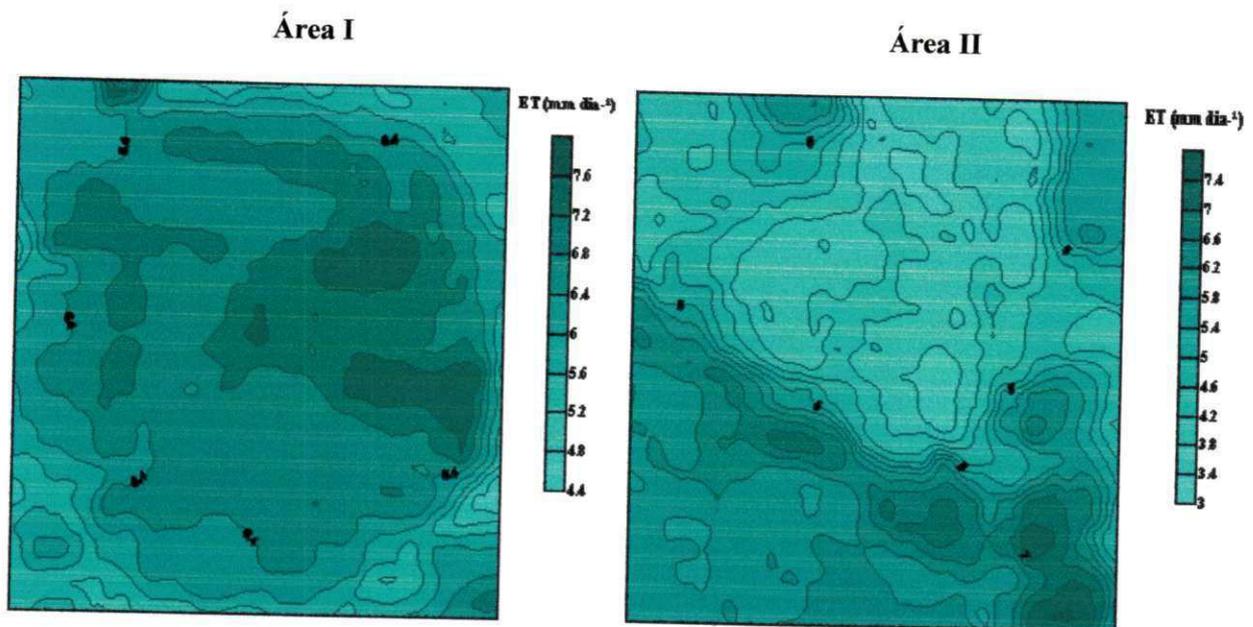
apresentadas nas Figuras 4.25(1-5) para melhor observação da variação espacial da evapotranspiração nestas áreas.



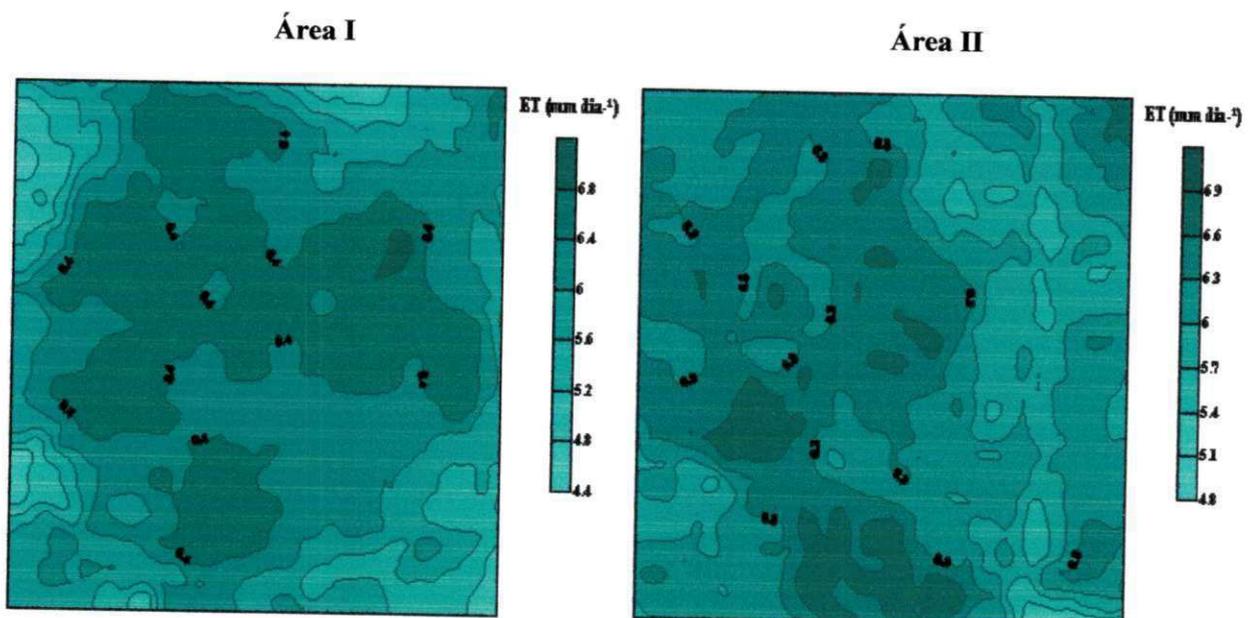
**Figura 4.25.1** - Variação espacial da evapotranspiração real para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.



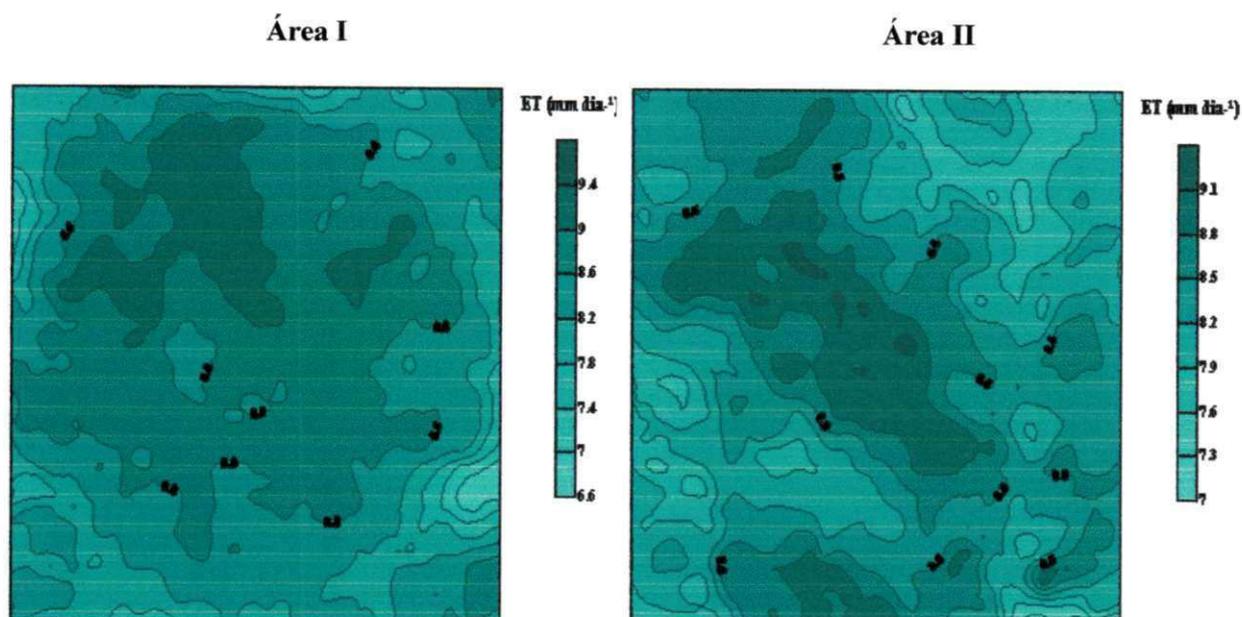
**Figura 4.25.2** - Variação espacial da evapotranspiração real para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.



**Figura 4.25.3** - Variação espacial da evapotranspiração real para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288.



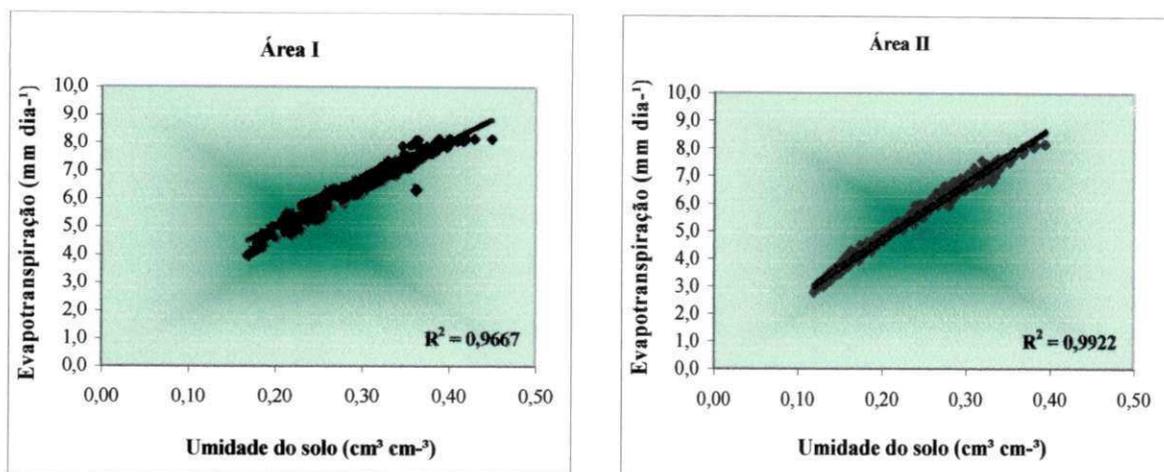
**Figura 4.25.4** - Variação espacial da evapotranspiração real para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.



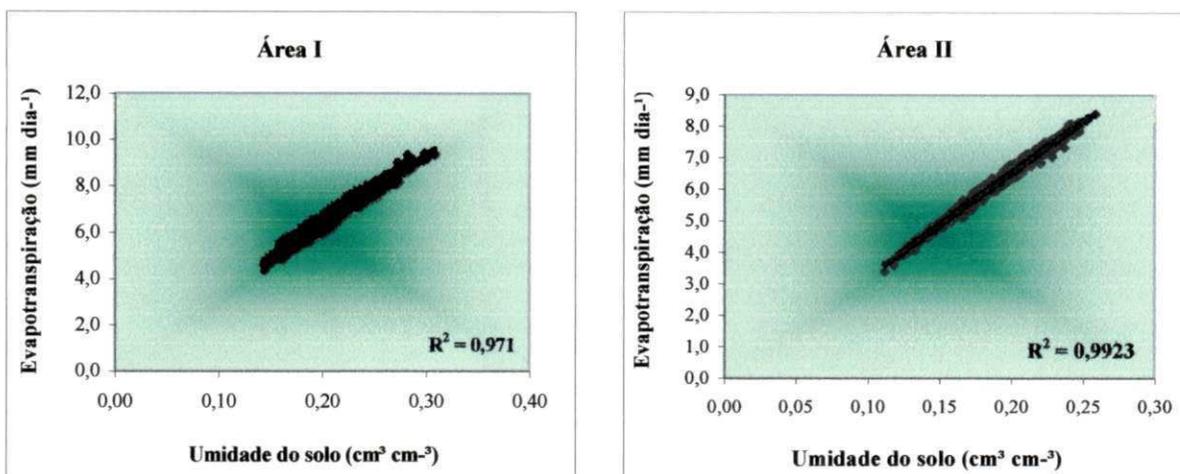
**Figura 4.25.5** - Variação espacial da evapotranspiração real para o dia 22 de janeiro de 2007,  $doa = 22$ .

Analisando as referidas figuras, observa-se claramente maior uniformidade dos valores de ET nas parcelas das áreas I, que são irrigadas por pivô central. Os valores de ET nas parcelas das áreas II apresentam-se bastante variados. Os menores valores de ET são apresentados nas tonalidades mais claras e identificados nas figuras nos pontos extremos das áreas, como já previsto, devido a baixa uniformidade da irrigação. Este fato também foi elucidado por Allen et al. (2007a) em aplicações do METRIC em áreas irrigadas na Califórnia.

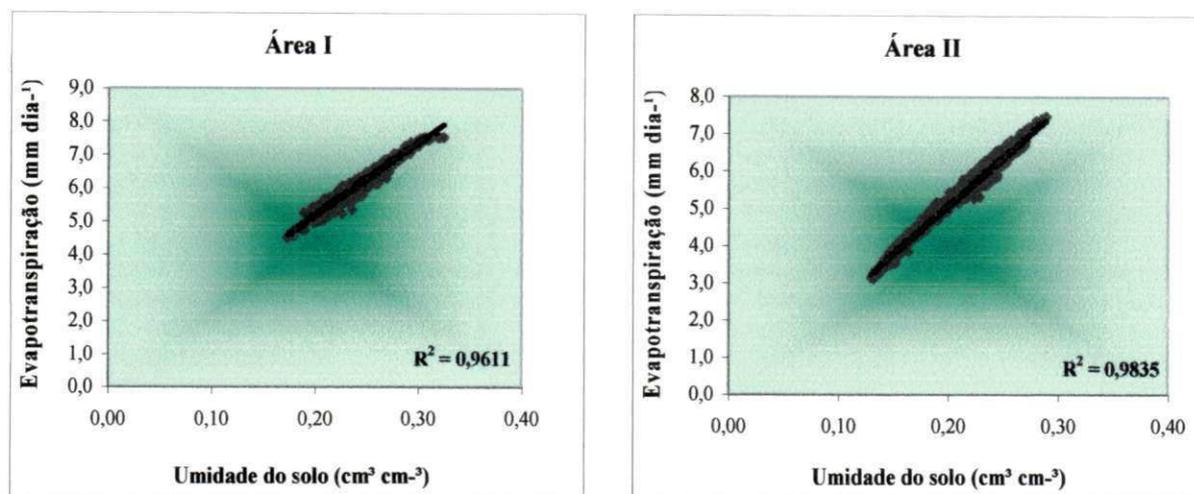
A evapotranspiração das áreas vegetadas e ou cultivadas depende fortemente da disponibilidade hídrica, pois esta é controlada pelo teor de umidade do solo e a capacidade de transpiração das plantas. Neste sentido, encontra-se ilustradas nas Figuras 4.26(1-5) a correlação entre a evapotranspiração real e a umidade volumétrica do solo das subáreas irrigadas por pivô central e por sulco. De acordo com as figuras abaixo se observa uma relação linear crescente entre a evapotranspiração real e a umidade volumétrica do solo para todos os dias estudados e elevados coeficiente de correlação, com menores valores de  $R^2$  identificado na Figura 4.26.5.



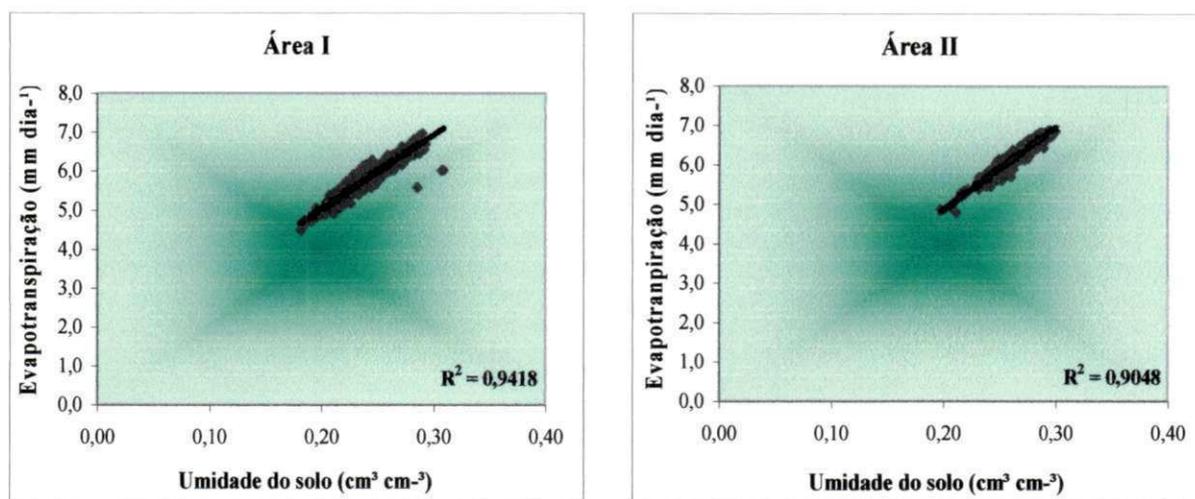
**Figura 4.26.1** - Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para dia 12 de outubro de 2004,  $doa = 286$ .



**Figura 4.26.2** - Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para dia 13 de novembro de 2004,  $doa = 318$ .



**Figura 4.26.3** - Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para dia 15 de outubro de 2005, doa = 286.



**Figura 4.26.4** - Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.

apresentado na Tabela 4.15. A estimativa do carbono a partir de dados remotos pode contribuir positivamente para atenuar o aquecimento global (Brown, 1997; Namayanga, 2002). A biomassa seca se destaca entre as diferentes fontes de energias renováveis que não causam aumento do dióxido de carbono na atmosfera

**Tabela 4.15** - Quantidade de carbono estimada na área.

<b>Data da Imagem</b>	<b>Carbono médio (Kg ha<sup>-1</sup>)</b>	<b>Área total de cana (ha)</b>	<b>Carbono total (Kg)</b>
30.07.2006	83,3	15.000	1.249.500

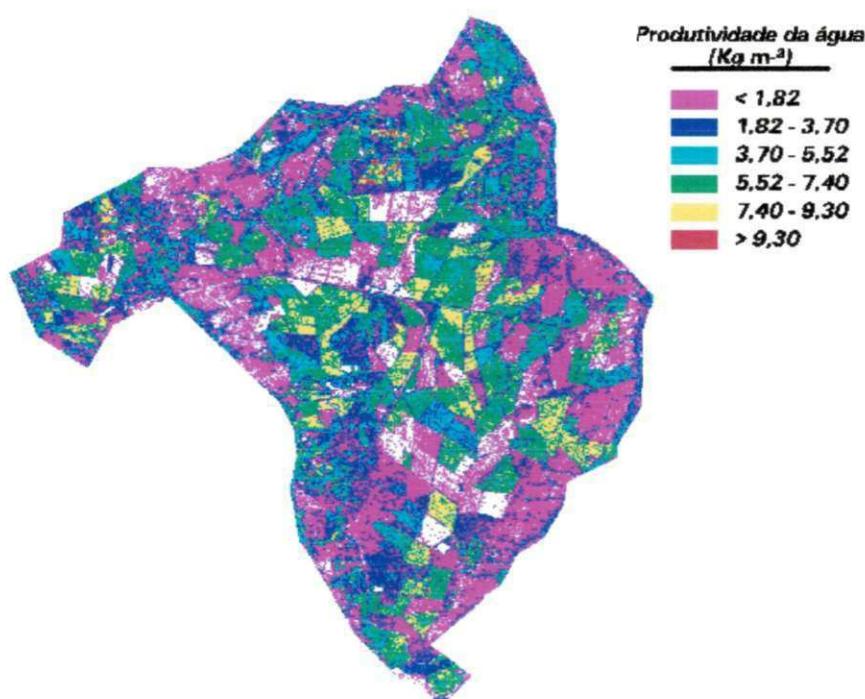
Mundialmente a cana-de-açúcar é a cultura de maior produção de biomassa totalmente aproveitada, além da produção do açúcar e do álcool combustível, tendo como destaque o Brasil como maior produtor. Na área estudada, a introdução da tecnologia e práticas culturais adequadas, como cultivares de alto rendimento, plantios adensados e irrigação, são resultados da alta produção de biomassa com rendimento médio em 2006 da ordem de 91,2 ton ha<sup>-1</sup> (AGROVALE, 2006).

#### **4.10 - Produtividade da água – WP<sub>ET</sub>**

A produtividade de água é um bom indicador para avaliar a eficiência da água utilizada nos cultivos irrigados e pode ser determinado em termos de valores físicos, econômicos ou sociais. Neste trabalho a WP foi estimada em função da bioprodutividade e da água consumida pela cultura no processo evapotranspirativo. A distribuição espacial da produtividade da água da área de cana-de-açúcar da imagem do dia 211 de 2006 está ilustrada na Figura 4.36. As áreas em tonalidade branca correspondem aos corpos d'água, as áreas com solo exposto e as áreas de cana com baixa densidade. Os valores de WP compreendidos entre 1,82 kg m<sup>-3</sup> e 3,70 kg m<sup>-3</sup> estão representados na tonalidade azul, enquanto as áreas em tonalidade verde apresentam valores entre 5,52 kg m<sup>-3</sup> e 7,40 kg m<sup>-3</sup> e se apresentam em maior percentual na figura. As áreas em que foram identificados os valores mais elevados de WP correspondem às áreas em tonalidade vermelha e com valores de WP próximos a 9,30 kg m<sup>-3</sup> identificados em poucos pixels distribuídos na área. Bastiaanssen et al. (2003) avaliaram a produtividade do trigo, algodão, arroz e cana-de-açúcar durante os anos de 1993 e 1994 no Paquistão. Os autores utilizaram dados do sensor AVHRR-NOAA e o modelo SEBAL e estimaram a produtividade da água das referidas culturas, com valor médio de WP para cana-

de-açúcar de  $4,97 \text{ kg m}^{-3}$ , correspondendo a uma produtividade de  $47,9 \text{ ton ha}^{-1}$ . Verificaram que o consumo de água nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar e algodão foi superior às áreas cultivadas com arroz. Outras pesquisas, também conduzidas no Paquistão, revelam que os índices mais elevados da produtividade da água foram identificados nos cultivos de arroz e cana-de-açúcar.

Immerzeel et al. (2008) utilizaram imagens Modis do período de outubro de 2004 a maio de 2005 para avaliar a produtividade da água em bacia hidrográfica no Sul da Índia e validaram o modelo SEBAL com dados simulados pelo modelo SWAT e obtiveram valores de WP iguais a  $1,3 \text{ kg m}^{-3}$  para o sorgo e trigo e de  $2,9 \text{ kg m}^{-3}$  para cana-de-açúcar.



**Figura 4.36** - Imagem temática da produtividade da água para o dia 30 de julho de 2006, do a = 211.

Segundo dados da FAO, a produtividade da água na região de Punjab é muito baixa devido aos baixos índices de produtividade e eficiência dos sistemas de irrigação. No Paquistão a eficiência dos sistemas de irrigação é somente cerca de 40% e os produtores ainda utilizam sistemas tradicionais de irrigação ou cultivos em áreas inadequadas.

Um dos maiores desafios da agricultura irrigada é elevar os níveis de produção e diminuir a quantidade de água utilizada. Entretanto, a produtividade da água varia de região para região e entre culturas, estando diretamente relacionada a diversos fatores como:

condições agroclimáticas, sistemas de irrigação utilizados, práticas culturais e o manejo sustentável da água. Diversos e importantes estudos sobre a produtividade da água têm sido conduzidos em todo o mundo, e, em especial nos locais em que a água já é escassa e cara.

Segundo Liu et al. (2008), 83% dos países africanos, 64% dos países da América do Norte, 50% dos países da Oceania, 40% dos países europeus, 38% dos países da América do Sul e 33% dos da Ásia têm a possibilidade de duplicar seus níveis de produtividade de água a partir de um bom manejo da água e utilização de fertilizantes.

O valor médio de WP estimado pelo modelo SEBAL/METRIC nesta data nas subáreas I e II foi de cerca de  $5,38 \text{ kg m}^{-3}$  e de  $6,24 \text{ kg m}^{-3}$ , respectivamente. Conforme informações obtidas na área (comunicação pessoal) a produtividade da água nas últimas safras se mantém em torno de  $7,14 \text{ kg m}^{-3}$  nas áreas irrigadas por pivô central e de  $4,90 \text{ kg m}^{-3}$  nas áreas irrigadas por superfície.

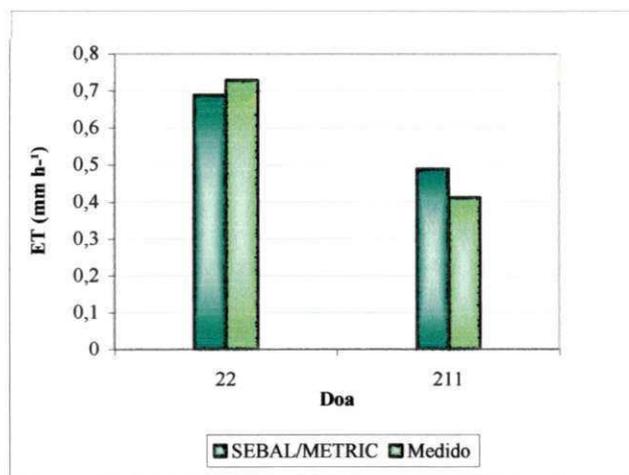
#### **4.11 – Algoritmo SEBAL/METRIC - validação**

O SEBAL tem sido aplicado e validado em diversos países e o METRIC em várias regiões dos Estados Unidos, principalmente em Idaho, região com maior concentração de área irrigada. O algoritmo foi utilizado para estimar a evapotranspiração real mensal e sazonal de áreas agrícolas irrigadas e matas ciliares, servindo também como parâmetro para monitorar e regular os direitos de uso de águas superficiais, sub-superficiais e avaliar os níveis de depleção de aquíferos.

Neste estudo foram utilizadas cinco imagens do sensor TM-Landsat 5, mas para validação do modelo foram selecionadas às correspondentes aos dias 211 e 22, datadas de 30 de julho de 2006 e 22 de janeiro de 2007, respectivamente, e dados de superfície medidos dentro da área cultivada com cana-de-açúcar e valores da evapotranspiração real obtidos através do método da razão de Bowen.

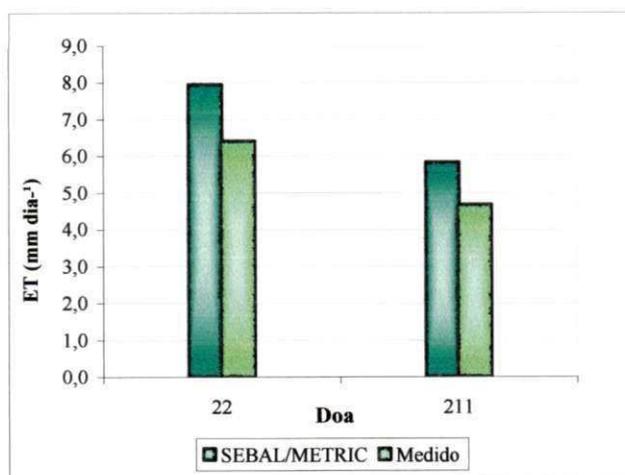
Com vistas a uma melhor interpretação do desempenho de métodos utilizados para estimativa da evapotranspiração real, o índice de concordância de Wilmott (id), se constitui em um bom parâmetro, pois este índice define a precisão entre os valores estimados e medidos. Os valores instantâneos da evapotranspiração estimados pelo SEBAL/METRIC e medidos na superfície estão apresentados na Figura 4.37, onde se verifica que o dia 211 apresentou pouca diferença entre os valores estimados e medidos, quando comparados com os valores obtidos no dia 22.

O erro relativo médio e absoluto calculados para o dia 22 foi de -8,22% e 0,06 mm h<sup>-1</sup> respectivamente, enquanto que para o dia 211 o erro relativo médio foi de 1,21% e o erro absoluto igual a 0,005 mm h<sup>-1</sup>. O valor negativo observado no erro relativo indica que a evapotranspiração estimada pelo modelo foi menor que o valor medido pelo método da razão de Bowen.



**Figura 4.37** – Evapotranspiração instantânea (mm h<sup>-1</sup>) estimada pelo METRIC e medida na área cultivada com cana-de-açúcar.

A Figura 4.38 apresenta os valores da evapotranspiração diária estimada pelo METRIC e medida na superfície.

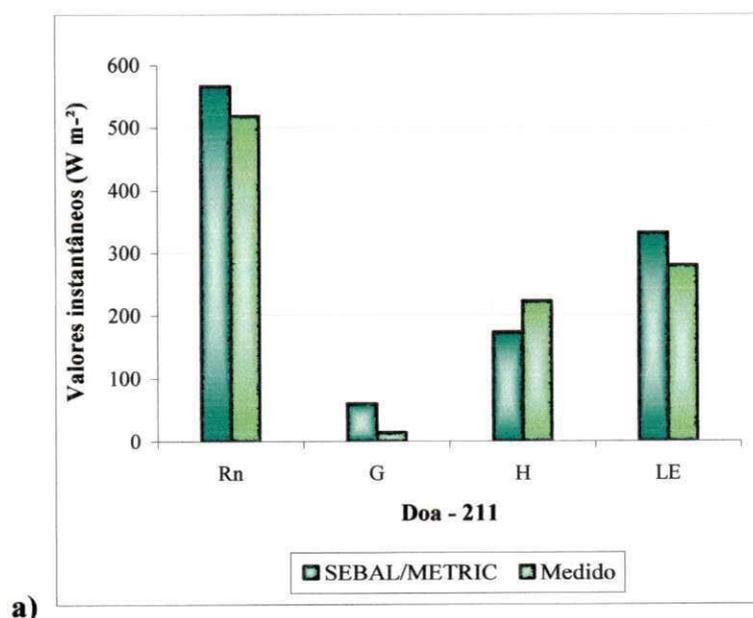


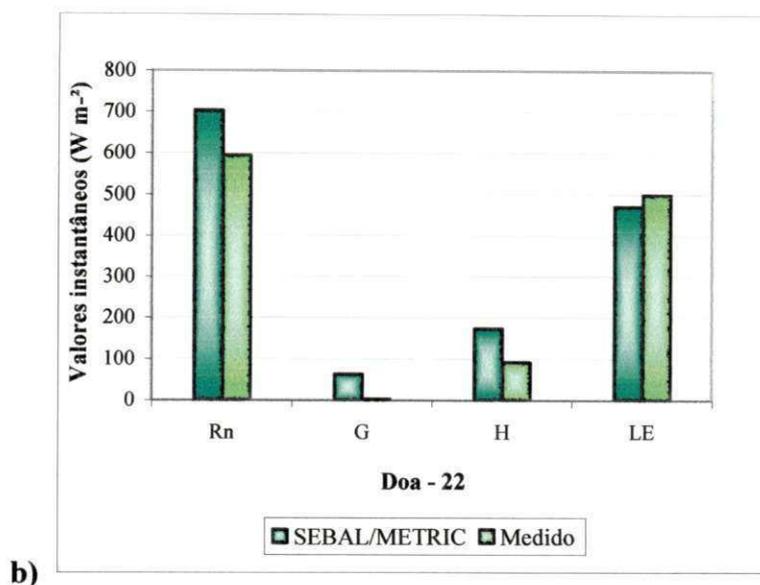
**Figura 4.38** – Evapotranspiração diária (mm dia<sup>-1</sup>) estimada pelo METRIC e medida na área cultivada com cana-de-açúcar.

Os valores da evapotranspiração diária estimados pelo SEBAL/METRIC e medidos pelo método da razão de Bowen referente aos dias 22 e 211 apresentaram boa concordância, sobretudo os valores do dia 211. A evapotranspiração diária estimada pelo modelo foi de 7,96 mm para o dia 22 e de 5,85 mm para o dia 211 ao passo que o valor medido na área cultivada foi de 6,43 mm e 4,70 mm respectivamente, com erro relativo médio de 24,49 % para a estimativa do dia 211 e de 23,79% para o dia 22 e erro absoluto de 1,15 mm dia<sup>-1</sup> e 1,53 mm dia<sup>-1</sup>. O valor do coeficiente de Willmott obtido na estimativa da evapotranspiração instantânea foi de 0,96, e para a evapotranspiração diária foi 0,98, indicando, no entanto, uma boa precisão do método.

Nas primeiras aplicações do METRIC em Idaho, Allen et al. (2005) utilizando imagens do sensor TM-Landsat 5 e dados de lisímetros no período de abril a setembro de 1989, em área cultivada com beterraba, encontraram uma diferença sazonal da evapotranspiração estimada pelo METRIC e medida nos lisímetros de 4% somente. Os autores atribuem tal valor à redução de possíveis erros na estimativa de cada componente, tais como a incidência de umidade da superfície pela irrigação, na estimativa do saldo de radiação, fluxo de calor no solo ou fluxo de calor latente e na diferença de temperatura próxima a superfície.

Os valores instantâneos do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor no solo (G), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor latente (LE) estimados pelo METRIC e medidos pelo método da razão de Bowen na área de cana-de-açúcar nos dias 22 e 211 encontram-se nas Figuras 4.39(a-b).



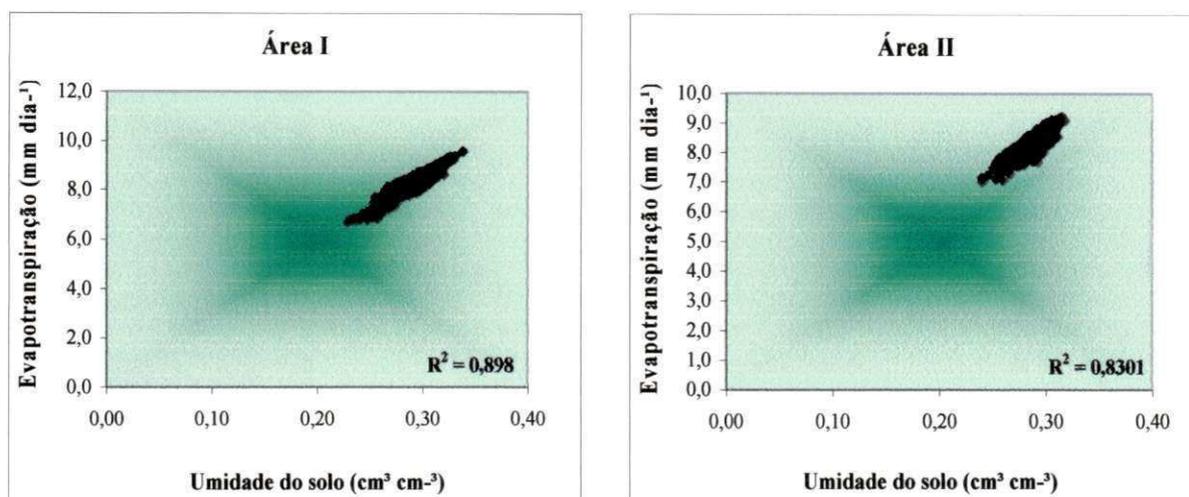


**Figura 4.39** - Valores instantâneos dos componentes do Balanço de Radiação estimados pelo METRIC e medidos na área cultivada com cana-de-açúcar em 30 de julho de 2006 (a) e 22 de janeiro de 2007 (b).

Observando-se as duas figuras, verifica-se que o Rn para as duas datas apresentou resultados bastante satisfatórios, com erros relativos da ordem de 9,20% para o dia 211 e 18,47% para o dia 22. De modo contrário os resultados de H apresentaram diferenças significativas entre os valores estimados pelo SEBAL/METRIC e os valores medidos, com erro relativo elevado nas duas datas, e o melhor resultado obtido para LE foi do dia 211.

Com relação a G, esta foi a componente em que se verificou a maior discrepância entre os valores estimados e medidos. Os valores medidos na superfície foram muito baixos, com destaque para o dia 22 em que o valor medido em campo foi de 2,88 W m<sup>-2</sup>, correspondendo a menos de 0,5% do valor medido de Rn. Para Allen et al. (1998), durante o dia G corresponde a 10% de Rn e a 50% desta durante o período noturno. Por outro lado, os baixos valores de G não devem ser considerados um problema, pois a influência dos valores medidos de G é representativa apenas para uma pequena área do solo, sendo, no entanto, incompatível com a resolução dos satélites (Bastiaansen et al., 1998, citados por Feitosa, 2005).

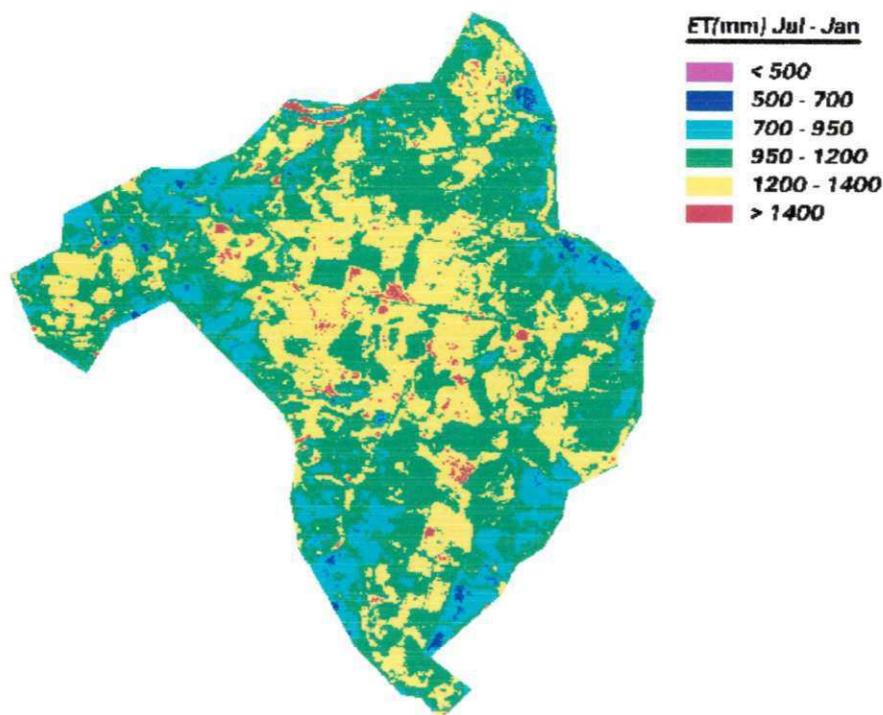
O fluxo de calor no solo depende da condição da superfície, ou seja: se está úmida ou seca, vegetada ou com solo exposto, e por isso as medidas feitas na superfície não devem ser



**Figura 4.26.5** - Correlação entre evapotranspiração real e umidade do solo para o dia 22 de janeiro de 2007,  $doa = 22$ .

#### 4.7 - Evapotranspiração sazonal ( $ET_{SAZ}$ )

A extrapolação da ET estimada no dia da passagem do satélite para períodos mensais ou mais longos é de grande importância na agricultura, pois permite quantificar o consumo de água total utilizado por uma cultura durante toda a sua fase vegetativa. Neste estudo a ET sazonal da área cultivada com cana-de-açúcar foi estimada para o período de 30 de julho de 2006 até 22 de janeiro de 2007, utilizando-se da média entre as imagens de  $E_{Fr}$  dos referidos dias e valores de  $ET_{ref}$  diários durante este período. O mapa temático da ET entre as imagens de 2006 e 2007 encontra-se ilustrado na Figura 4.27. Os menores valores de  $ET_{SAZ}$  são inferiores a 500 mm e estão representados na tonalidade magenta. As áreas de solo exposto identificadas na figura nas tonalidades azul e ciano encontram-se nos extremos da área de estudo com valores de  $ET_{SAZ}$  entre 500 mm e 900 mm, com maior percentual das áreas em tonalidade ciano. As áreas de vegetação nativa estão representadas na figura na tonalidade verde e valor máximo de  $ET_{SAZ}$  igual a 1200 mm, já as áreas em tonalidade amarela, predominante na área cultivada, evidenciam os plantios de cana-de-açúcar e apresentam valores que variam de 1200 a 1400 mm.



**Figura 4.27** – Mapa temático da evapotranspiração sazonal da área cultivada com cana-de-açúcar (julho/2006 a janeiro/2007).

Os maiores valores de  $ET_{SAZ}$  superiores a 1400 mm encontram-se representados na tonalidade vermelha e são identificados nos corpos d'água, nas áreas irrigadas por pivô central e em algumas áreas irrigadas por superfície.

Os dados estatísticos da  $ET_{SAZ}$  obtidos nas áreas I e II encontram-se na Tabela 4.12, onde se verifica que os valores são bastante similares nas duas subáreas, apresentando menor coeficiente de variação na área II que é irrigada por sulco.

**Tabela 4.12** - Dados estatísticos da  $ET_{SAZ}$  das áreas I e II.

Área	Mínimo ( $W m^{-2}$ )	Máximo ( $W m^{-2}$ )	Média ( $W m^{-2}$ )	Mediana ( $W m^{-2}$ )	Moda ( $W m^{-2}$ )	DP ( $W m^{-2}$ )	CV (%)
I	1066,6	1495,1	1331,2	1346,1	1396,3	74,8	5,6
II	1113,9	1491,4	1328,7	1330,1	1322,2	52,8	3,9

#### 4.8 - Biomassa fresca diária - $Bio_{dia}^{tot}$

A produção de biomassa fresca pelas culturas é obtida em função da energia disponível necessária aos processos de fotossíntese e transpiração e foi estimada a partir de

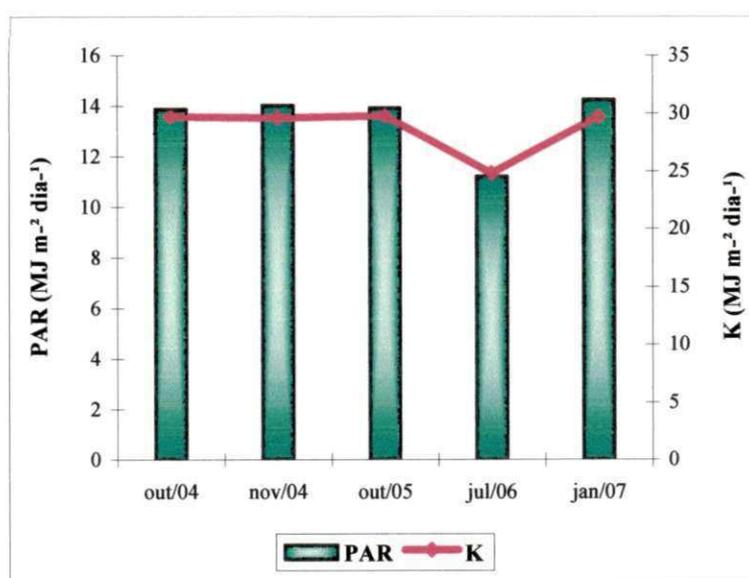
um percentual da radiação solar que alcança a superfície terrestre e é utilizada pela vegetação no processo fotossintético (APAR) e o uso eficiente da radiação ( $\epsilon$ ) para a conversão da energia radiante em energia química.

Os valores de  $T_{opt}$ (°C),  $T_{med}$  (°C),  $T_1$ ,  $T_2$  utilizados no cálculo de  $\epsilon$  e  $\tau_{sw}$  no cálculo de  $K_{\downarrow 24}$  das imagens estudadas estão apresentados na Tabela 4.13.

**Tabela 4.13** - Valores de  $T_{opt}$ (°C),  $T_{med}$  (°C),  $T_1$ ,  $T_2$ , e  $\tau_{sw}$  das imagens estudadas.

Data da Imagem	$T_{opt}$ (°C)	$T_{med}$ (°C)	$T_1$	$T_2$	$\tau_{sw}$
12.10.2004	24,9	28,6	0,9877	0,8694	0,7540
13.11.2004	28,3	31,6	0,9657	0,8787	0,7480
15.10.2005	25,2	28,5	0,9865	0,8806	0,7549
30.07.2006	23,2	26,0	0,9948	0,8968	0,7463
22.01.2007	23,6	29,2	0,9915	0,8112	0,7517

Os valores da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) dos dias estudados foram estimados em função da radiação solar incidente e estão representados na Figura 4.28, com menor e maior valor de PAR, identificados nos dias 211 e 22 dos anos de 2006 e 2007, respectivamente.



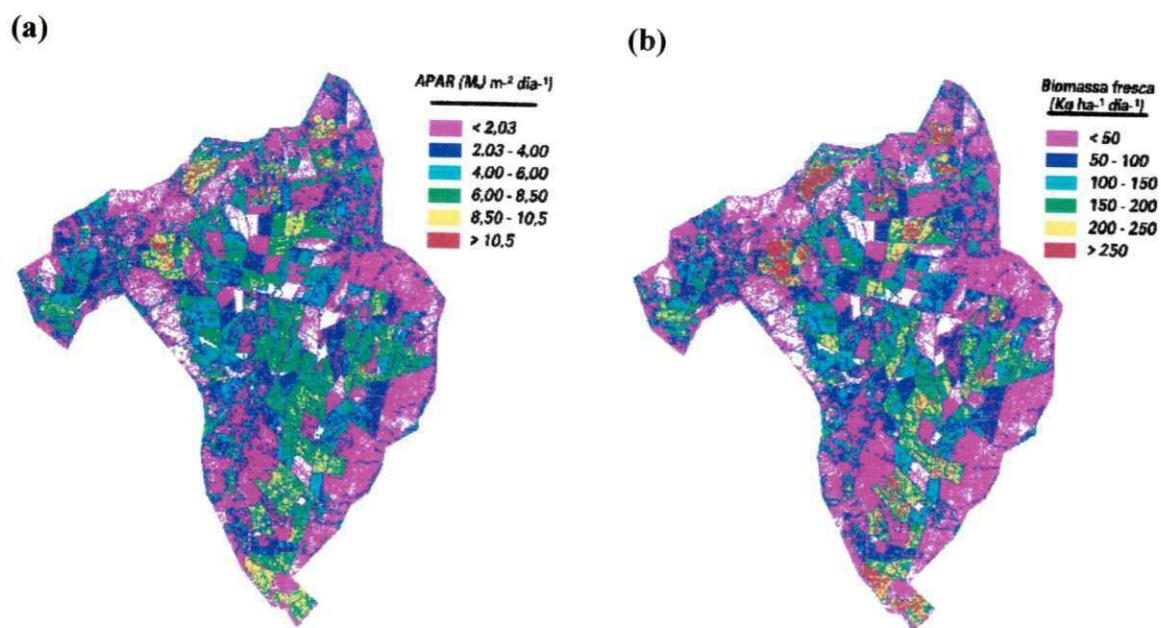
**Figura 4.28** – Radiação fotossinteticamente ativa (PAR) dos dias estudados.

Os valores máximo, médio e mínimo da fração da radiação solar incidente útil para a fotossíntese e que realmente é absorvida pela vegetação ( $f$ ) e o uso eficiente da luz ( $\epsilon$ ) da área cultivada com cana-de-açúcar, encontram-se na Tabela 4.14. A magnitude do NDVI está relacionada ao nível de atividade fotossintética das culturas, de modo que  $f$  foi estimada em função do NDVI, pois tanto  $f$  quanto  $\epsilon$  variam no tempo e no espaço.

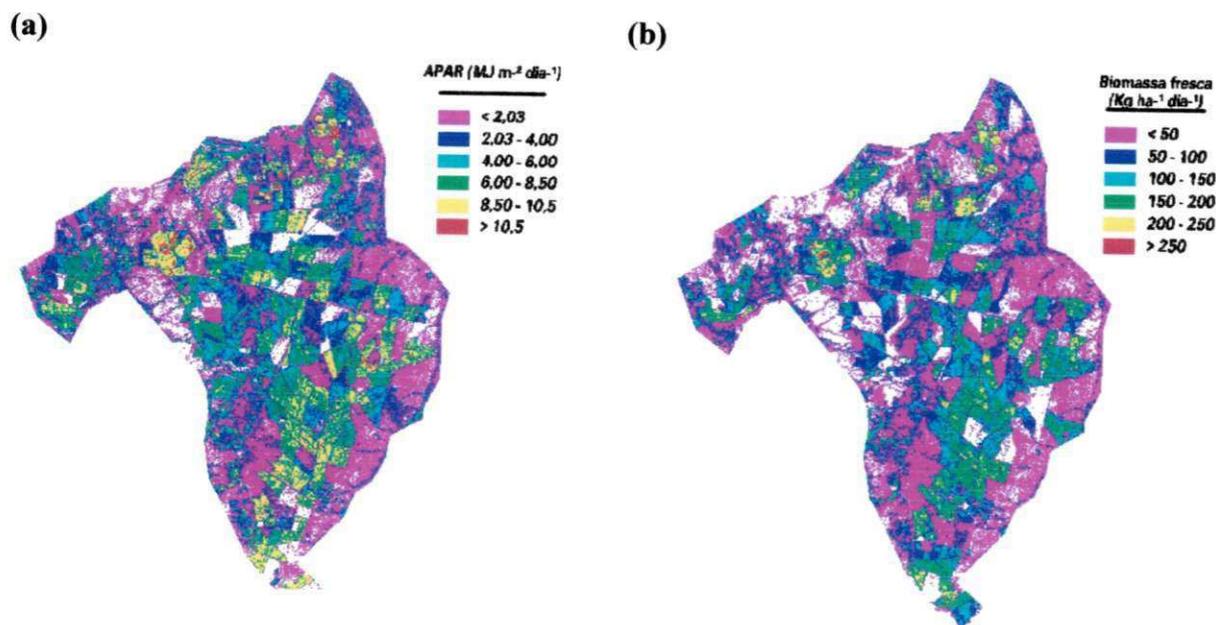
**Tabela 4.14** - Valores máximo, médio e mínimo de  $f$  e  $\epsilon$  das imagens estudadas.

Data da imagem	$f$			$\epsilon$ (g MJ <sup>-1</sup> )		
	Máximo	Médio	Mínimo	Máximo	Médio	Mínimo
12.10.2004	0,91	0,23	-0,78	3,44	2,06	0,63
13.11.2004	0,87	0,23	-0,79	3,04	1,71	0,38
15.10.2005	0,85	0,20	-0,79	3,08	1,92	0,46
30.07.2006	0,87	0,27	-0,79	3,48	2,21	0,91
22.01.2007	0,86	0,39	-0,78	2,50	3,18	0,98

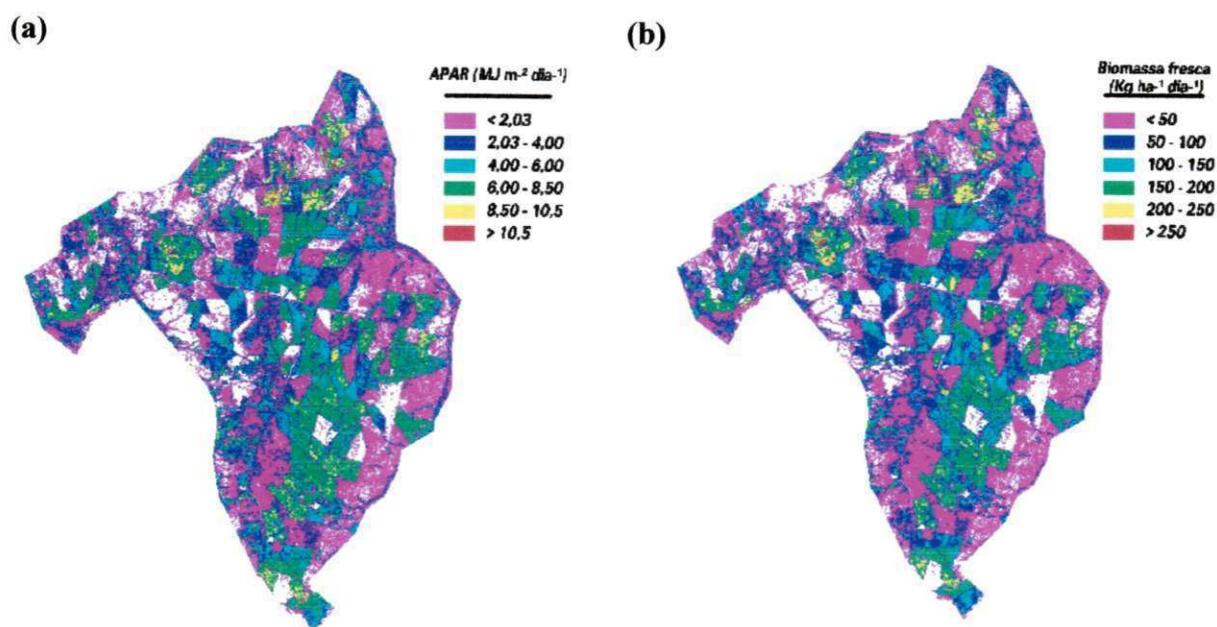
A radiação fotossinteticamente ativa absorvida (APAR) e a biomassa fresca da área cultivada com cana-de-açúcar estimadas para os dias estudados encontram-se ilustradas nas Figuras 4.29 a 4.33(a-b). As áreas em tonalidade branca visualizada em todas as imagens de APAR e biomassa fresca correspondem aos corpos d'água e aos locais em que o solo se encontrava desprovido de vegetação, identificadas dentro da área cultivada com cana-de-açúcar e nas áreas em seu entorno. Os menores valores de APAR, inferiores a 2,03 MJ m<sup>-2</sup> e da biomassa fresca, inferiores a 50 Kg ha<sup>-1</sup> são identificados em todas as figuras na tonalidade magenta e se encontram nas áreas extremas e em alguns pixels no centro da área cultivada com cana-de-açúcar. Os baixos valores de biomassa fresca estão relacionados a baixos valores de APAR. As áreas em tonalidade ciano e verde representam os valores intermediários de APAR e da biomassa fresca, os valores de APAR identificados nestas tonalidades apresentaram valores entre 4,0 MJ m<sup>-2</sup> e 8,5 MJ m<sup>-2</sup> e a biomassa fresca apresentou valores nestas tonalidades entre 100 Kg ha<sup>-1</sup> e 200 Kg ha<sup>-1</sup>. Os valores de APAR entre 8,5 e 10,5 MJ m<sup>-2</sup> identificados nas figuras na tonalidade amarela apresentam-se em maior percentual na Figura 4.30. Os valores mais elevados de APAR e biomassa fresca estão representados nos mapas temáticos na tonalidade vermelha. Os valores médios diários de APAR e biomassa fresca estimados nos mapas temáticos do ano de 2004 foram de 3,3 MJ m<sup>-2</sup> e 3,4 MJ m<sup>-2</sup>, e, de 77,9 Kg ha<sup>-1</sup> e 69,8 Kg ha<sup>-1</sup>, referentes aos dias 286 e 384.



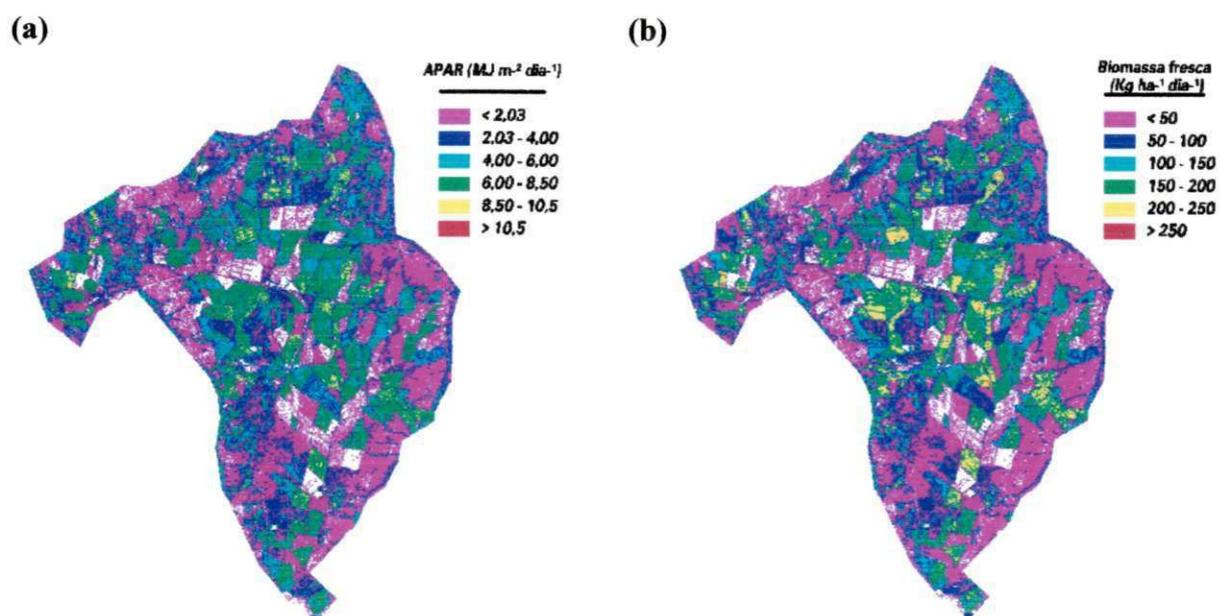
**Figura 4.29** - Imagem temática da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (a) e biomassa fresca total (b) para o dia 12 de outubro de 2004,  $\text{doa} = 286$ .



**Figura 4.30** - Imagem temática da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (a) e biomassa fresca total (b) para o dia 13 de novembro de 2004,  $\text{doa} = 318$ .



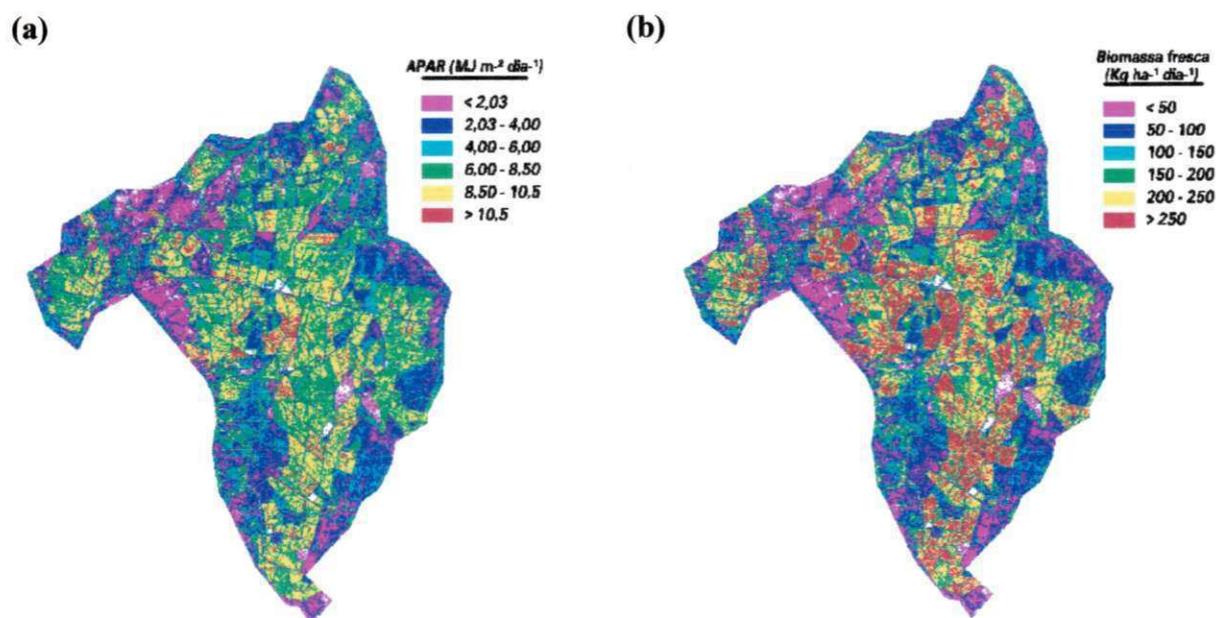
**Figura 4.31** - Imagem temática da radiação fotossinteticamente ativa absorvida **(a)** e biomassa fresca total **(b)** para o dia 15 de outubro de 2005,  $doa = 288$ .



**Figura 4.32** - Imagem temática da radiação fotossinteticamente ativa absorvida **(a)** e biomassa fresca total **(b)** para o dia 30 de julho de 2006,  $doa = 211$ .

Verifica-se na Figura 4.31, referente ao dia 288 do ano de 2005, pouquíssimas áreas nas tonalidades amarela e vermelha dentro da área cultivada com cana-de-açúcar e maior concentração de áreas em tonalidades azul e verde. O valor máximo de APAR identificado nesta data foi de  $12,2 \text{ MJ m}^{-2}$  o que corresponde a um valor máximo de biomassa fresca igual a  $294,91 \text{ Kg ha}^{-1}$ . Já no mapa temático do ano de 2006, representado na Figura 4.32, observa-se uma maior concentração das áreas em tonalidade verde e valores médios estimados de APAR da ordem de  $3,26 \text{ MJ m}^{-2}$  e de  $77,2 \text{ Kg ha}^{-1}$  para biomassa fresca.

Os mapas temáticos de APAR e biomassa fresca referentes ao dia 22 do ano de 2007 encontram-se ilustradas na Figura 4.33(a-b) e apresenta um comportamento espectral bem diferenciado dos demais mapas, ou seja; nesta data foram identificadas poucas áreas com solo exposto, e, observa-se também menor percentual das áreas na tonalidade magenta. Com relação aos valores intermediários é notável a predominância da tonalidade verde no mapa temático de APAR. Nesta data também se observa maior percentual das áreas em tonalidade vermelha na Figura 4.33b que corresponde aos valores mais elevados de biomassa fresca. Os valores médios de APAR e biomassa fresca estimados no dia 22 do ano de 2007 foram iguais a  $5,7 \text{ MJ m}^{-2}$  e  $145,7 \text{ Kg ha}^{-1}$ . O aumento do dossel no decorrer do ciclo da cana-de-açúcar aumenta também a eficiência do uso da radiação e eleva a quantidade de biomassa.



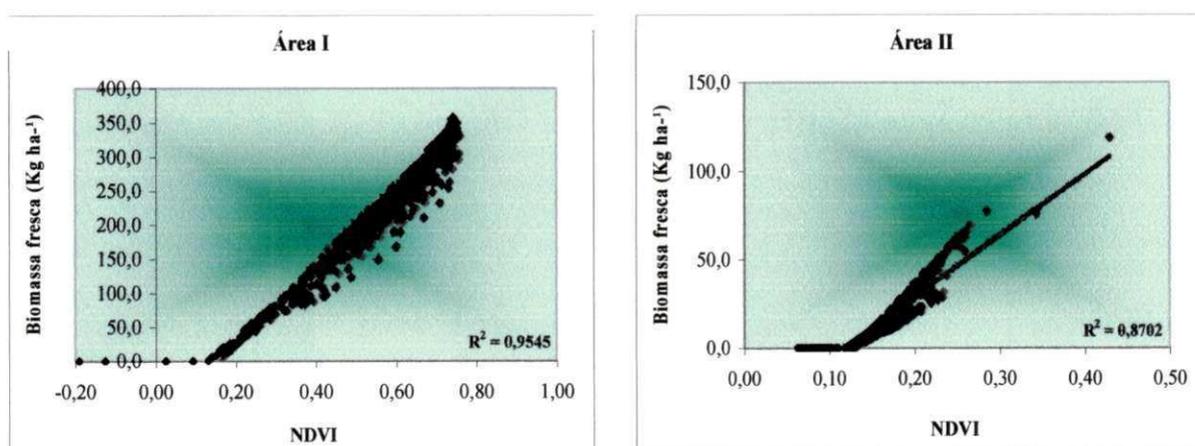
**Figura 4.33** - Imagem temática da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (a) e biomassa fresca total (b) para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.

Dentre todos os dias estudados, a imagem do dia 22 de 2007 foi a que apresentou maiores valores médios de APAR e biomassa fresca, iguais a  $12,4 \text{ MJ m}^{-2}$  e  $330,0 \text{ Kg ha}^{-1}$ , evidenciando, no entanto, maior percentual de cobertura vegetal nesta data.

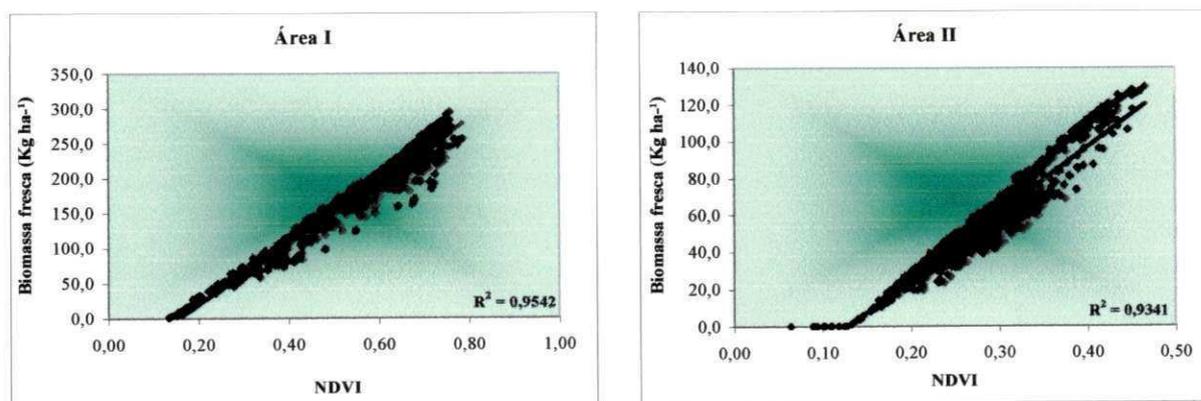
Valor médio de biomassa igual a  $100 \text{ Kg ha}^{-1}$  foi obtido por Akbari et al. (2007) em estudo conduzido em áreas irrigadas de Esfahan no Iran, utilizando o modelo SEBAL e imagens AVHRR-NOAA referentes ao mês de maio de 1995. Mokhtari (2005), em sua pesquisa de doutorado, também no Iran, utilizou o mesmo modelo e imagens Aster e Modis, com vistas a avaliar os impactos da seca em áreas cultivadas com milho e beterraba a partir da biomassa estimada.

Os valores diários da biomassa fresca estimados na área cultivada com cana-de-açúcar apresentaram a mesma tendência dos níveis de NDVI,  $\theta_s$  e ET em todas as imagens estudadas, revelando que elevados valores desses parâmetros contribuem para a obtenção de elevados valores da biomassa fresca e estão diretamente relacionados às boas condições de radiação, umidade no solo e eficiência das práticas de manejo.

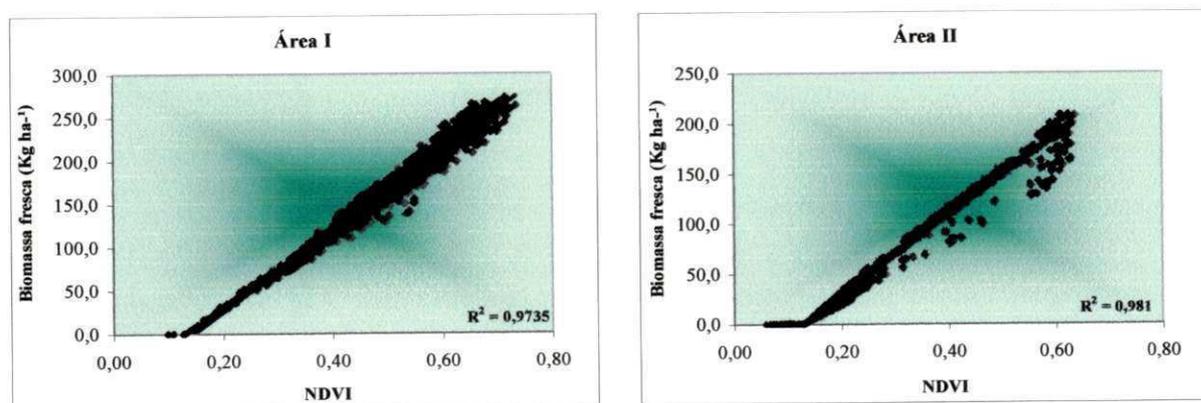
Em áreas vegetadas a variabilidade espacial da biomassa é bastante influenciada pela variabilidade do NDVI, e este índice, além de indicar o vigor e a densidade da vegetação possibilita estimar as taxas fotossintéticas e transpirativas das plantas. O NDVI tem sido utilizado em diversas pesquisas que usam dados remotos como um indicador da produção de biomassa fresca (Bala et al., 2007). A relação entre NDVI e biomassa fresca dos dias estudados referentes às subáreas de cana-de-açúcar irrigadas por pivô central e por sulco estão apresentadas nas Figuras 4.34(1-5).



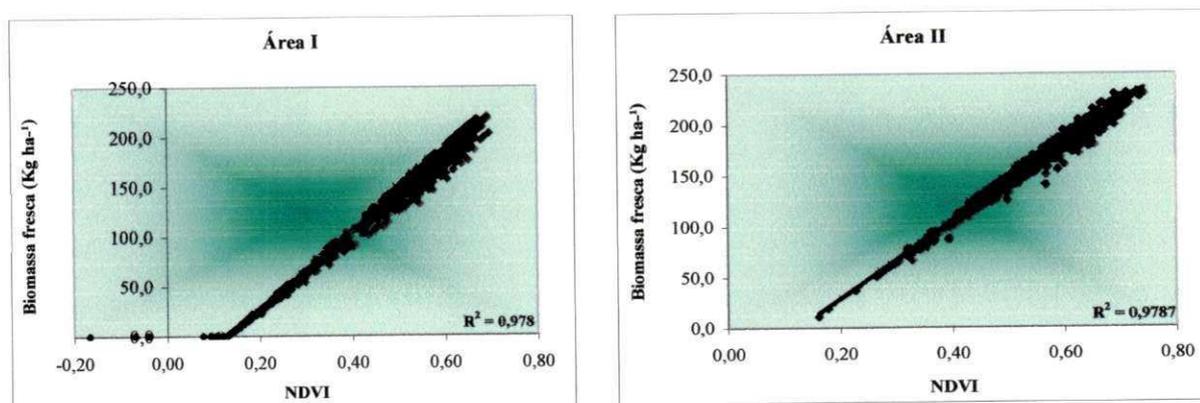
**Figura 4.34.1** – Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 12 de outubro de 2004, doa = 286.



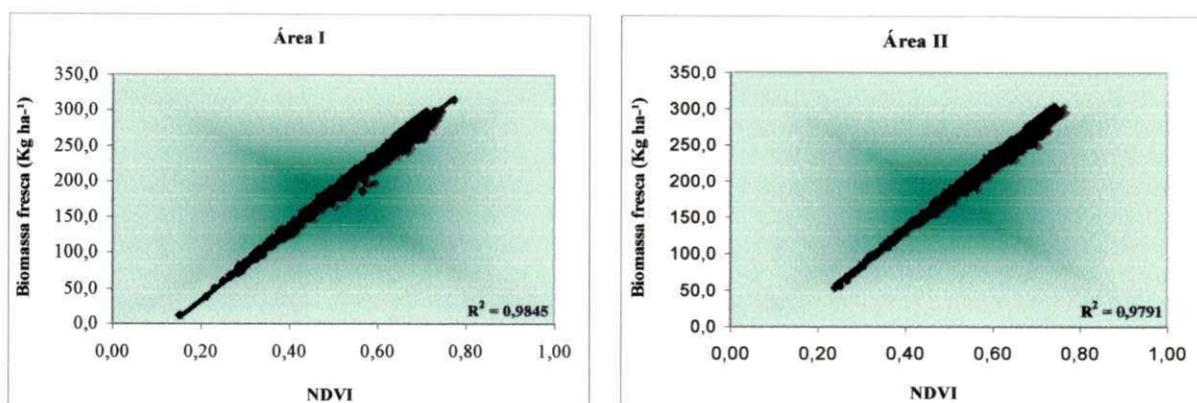
**Figura 4.34.2** - Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 13 de novembro de 2004, doa = 318.



**Figura 4.34.3** – Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 15 de outubro de 2005, doa = 288



**Figura 4.34.4** – Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.



**Figura 4.34.5** - Relação entre NDVI e biomassa fresca para o dia 22 de janeiro de 2007, doa = 22.

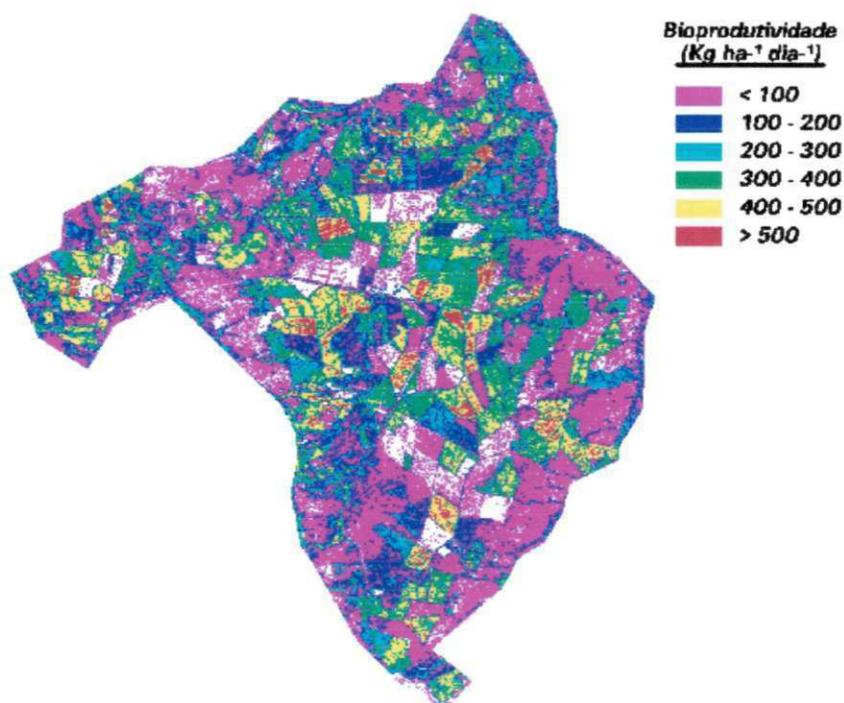
Analisando as Figuras observa-se uma relação linear crescente entre NDVI e a biomassa fresca, ou seja, os valores mais elevados de NDVI indicam maior quantidade de biomassa fresca e a relação entre estas variáveis apresentam elevados coeficientes de determinação em todas as datas estudadas, com menor valor de  $R^2$  igual a 0,8702, identificado na área II da Figura 4.34.1.

#### 4.9 - Bioprodutividade - $Y_B$

A bioprodutividade é o resultado da biomassa sobre o solo que é convertido no produto final da cultura, e, é estimada em função de um índice de colheita e do teor de umidade do produto durante a época da colheita, servindo como um dos parâmetros na determinação da produtividade da água de culturas irrigadas. No caso da cana-de-açúcar, o material colhido no campo é composto de um terço de caldo, um terço de fibras e um terço de folhas. As fibras, que dão origem ao bagaço e a palha são obtidas do colmo e das folhas, enquanto que do caldo são gerados o açúcar e o etanol.

A Figura 4.35 apresenta a imagem da bioprodutividade da área cultivada com cana-de-açúcar para o dia 211 do ano de 2006 em que as áreas na cor branca, identificadas em alguns pixels localizados nos extremos da área cultivada, representam as áreas de solo exposto e vegetação rala, como também em alguns talhões dentro da área de cana-de-açúcar. Nestes talhões a cana se encontrava na fase inicial de desenvolvimento, apresentando baixos valores de NDVI. As áreas em tonalidade magenta apresentam valores da bioprodutividade inferiores

a  $100 \text{ Kg ha}^{-1}$ . Os valores intermediários da bioprodutividade estão representados nas tonalidades azul, ciano e verde com valores que variam entre  $100 \text{ Kg ha}^{-1}$  e  $400 \text{ Kg ha}^{-1}$ , respectivamente. Conforme se observa na Figura 4.35, as áreas que apresentam os maiores valores da bioprodutividade, da ordem de  $500 \text{ Kg ha}^{-1}$ , correspondendo ao período de maturação da cana, estão representadas na tonalidade vermelha com maior percentual identificado nas áreas irrigadas por sulco. O valor médio da bioprodutividade estimado nesta data foi de  $178,9 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ . A bioprodutividade média para cana-de-açúcar obtida em estudos conduzidos por Bastiaanssen & Ali (2003) no Paquistão durante o período de 1993-1994 foi de  $131,13 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , valor considerado baixo na opinião dos autores, e, está relacionado aos baixos índices de colheitas, influenciados por fatores como: problemas de salinidade, tipo de cultivar e práticas de manejo inadequadas.



**Figura 4.35** - Imagem temática da bioprodutividade para o dia 30 de julho de 2006, doa = 211.

Em grandes áreas cultivadas, a variabilidade temporal e espacial exerce forte influência não somente na estimativa da biomassa, mas também na quantidade de carbono seqüestrado. O valor máximo de carbono seqüestrado estimado no dia 211 de 2006 na área de cana-de-açúcar foi igual a  $285,7 \text{ Kg ha}^{-1}$ , e o valor médio foi de  $82,3 \text{ Kg ha}^{-1}$ , conforme

extrapoladas para toda a área. Em áreas de solo exposto G poderia ser tão elevado como  $0,3R_n$  e assumir valores de até  $0,1R_n$  para superfícies vegetadas (Sarwar & Bill, 2003).

Os baixos valores de G obtidos podem estar relacionados com o teor de umidade do solo, devido a área ser irrigada diariamente, como também a altura da cultura no dia em que esses componentes foram medidos.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As informações captadas por sensores remotos e a aplicação do modelo SEBAL/METRIC na área de cana-de-açúcar permitiu a estimativa de importantes parâmetros, em especial da evapotranspiração real, com resultados bastante satisfatórios, o que vem a encorajar e despertar o interesse de profissionais para a utilização desta técnica no monitoramento da água utilizada em grandes áreas irrigadas de forma rápida e eficaz, assegurando a sustentabilidade de tal recurso.

Os valores da evapotranspiração diária estimados na área da cana-de-açúcar pelo modelo SEBAL/METRIC nos dias 211 de 2006 e 22 de 2007 foram comparados com os valores medidos em superfície pelo método da razão de Bowen e apresentaram boa concordância e valores iguais a  $5,85 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $7,96 \text{ mm dia}^{-1}$  contra  $4,70 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $6,43 \text{ mm dia}^{-1}$  e magnitude de  $1,15 \text{ mm dia}^{-1}$  e  $1,53 \text{ mm dia}^{-1}$ , respectivamente.

A distribuição espacial da evapotranspiração estimada dentro da área de cana-de-açúcar entre os meses de julho de 2006 e janeiro de 2007 variou entre 304,2 mm e 1600 mm, com valores de ET entre 950 mm e 1200 mm predominantes na área.

Dos fluxos instantâneos estimados pelo modelo SEBAL/METRIC e aqueles medidos em campo nos dias 211 de 2006 e 22 de 2007,  $R_n$  e  $LE$  apresentaram bons resultados com erro relativo da ordem de 9,20% para  $R_n$  no dia 211 de 2006 e de 5,62% para  $LE$  no dia 22 de 2007.

Os valores instantâneos da umidade volumétrica do solo não apresentaram distorções entre os dias estudados, verificando-se uma maior variabilidade na distribuição espacial nas áreas irrigadas por superfície.

O maior percentual de áreas com valores da produtividade da água estimada pelo modelo para o dia 211 de 2006 encontra-se entre  $5,52 \text{ kg m}^{-3}$  e  $7,40 \text{ kg m}^{-3}$  corroborando com os valores registrados na área nas últimas safras, com maiores índices de produtividade da água obtidos nas áreas irrigadas por pivô central.

Em todas as datas estudadas os valores mais elevados da biomassa fresca se encontram nas áreas irrigadas por pivô central e em 50% das áreas irrigadas por sulco. O mesmo comportamento foi encontrado para os níveis de NDVI,  $\theta_s$  e ET que podem estar diretamente relacionados às boas condições de radiação, ao total de água aplicada no solo e a eficácia das práticas de manejo dentro da área.

Para futuros estudos conduzidos na área estudada recomenda-se que:

Seja feito o mapeamento da umidade volumétrica do solo ou utilizado dados de outros experimentos para que os mesmos possam ser validados com os valores estimados neste trabalho;

A evapotranspiração seja estimada durante cada fase de desenvolvimento da cana-de-açúcar, utilizando-se imagens de NDVI para estudos de coeficiente de cultivo e monitoramento mais eficiente dos níveis de biomassa fresca e carbono seqüestrado como também avaliação dos níveis de produtividade da água na área.

## CAPÍTULO VI

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGROINDÚSTRIA DO VALE DO SÃO FRANCISCO (AGROVALE) Relatório técnico. Juazeiro-BA, 2006.

ABDELGHANI, C.; HOEDJES, J. C. B.; RODRIQUEZ, J. C.; WATTS, C. J.; GARATUZA, J.; JACOB, F.; KERR, Y. H. **Using remotely sensed data to estimate area-averaged daily surface fluxes over a semi-arid mixed agricultural land.** *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, p.330-342, 2008.

AHMAD, M. D.; BASTIAANSSEN, W. G. M. **Retrieving soil moisture storage in the unsaturated zone using satellite imagery and bi-annual phreatic surface fluctuations.** *Irrigation and Drainage Systems*, v.17, p.141-161, 2003.

AKBARI, M.; TOOMANIAN, N.; DROOGERS, P.; BASTIAANSSEN, W.; GIESKE, A. **Monitoring irrigation performance in Esfahan, Iran, using NOAA satellite imagery.** *Journal of Agricultural Water Management*, v. 88, p. 99-109, 2006.

ALBHAISI, M. **Estimation of evapotranspiration by hyperspectral remote sensing and GIS of Doode Bemde wetland, Belgium.** 2004. Dissertation presented for the degree of Master of Science in Physical Land Resources. Universiteit Gent; Vrije Universiteit Brussel. Belgium,

ALLEN, R. G. **Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation.** *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 122, p. 97-106, 1996.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56.** Rome-Italy, 1998.

ALLEN, R. G. **Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study.** *Journal of Hydrology*, v 229, p.27-41, 2000.

ALLEN, R. G. ; TASUMI, M.; TREZZA, R. **SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advanced Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0,** 2002.

ALLEN, R. G.; MORSE, A.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSSEN, W. G. M.; WRIGHT, J. L.; KRAMER, W. **Evapotranspiration from a satellite-BASED surface energy balance for the Snake Plain Aquifer in Idaho.** IN: USCID Conference, USCID, Denver, 2002.

ALLEN, R. G; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R. **A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning.** *Irrigation and Drainage Systems*, v. 19, p. 251-268, 2005.

ALLEN, R. G; TASUMI, M.; TREZZA, R. **Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 133, n. 4, ASCE, p.380-394, 2007a.

ALLEN, R. G; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSEN, W. G. M.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. **Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 133, n.4, ASCE, p.395-406. 2007b.

ANDREOLI, C. V. Companhia de Saneamento do Paraná. **Mananciais de abastecimento: planejamento e gestão: estudo de caso do Altíssimo Iguaçu**. Curitiba: SANEPAR, 2003. 494 p.

ASCE – EWRI. **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. ASCE-EWRI Standardization of reference Evapotranspiration Task Committee Rep., ASCE Reston, Va, 2005.

AZEVEDO, H. M. **Funções de resposta da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L., variedade SP-79 1011) a níveis de irrigação e nitrogênio**. 2002, 113p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB.

BALA, S. K.; ALI, M.; ISLAM, A. K. M. S. Estimation of potato yield in Munshigonj using remote sensing and GIS techniques. IN: International Conference on Water & Flood Management. Dhaka, Bangladesh. 2007.

INMAN-BAMBER, N. G. & McGLINCHEY, M. G. **Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements**. Field Crops Research, v. 83. p. 125-138, 2003.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climate**. 1995, 272 p. PhD. Dis., CIP Data Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; DROOGERS, P.; BRUIN, H. A. R. de; MENENTI, M. **Area-average estimates of evaporation, wetness indicators and top soil moisture during two golden days in EFEDA**. Agricultural Meteorology, 87, p. 119-137, 1997.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Remote sensing in water resources management: The state of the art**. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. 220 p, 1998.

BASTIAANSEN, 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, 1998.

BASTIAANSEN, W. G. M.; CHEMIN, Y.; AHMAD, M. D.; ASIF, S. Patterns of crop evaporation the Indus basin recognized from the NOAA-AVHRR satellite. IN 2<sup>nd</sup> Inter-Regional Conference on Environment-Water, 1999.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; MOLDEN, D. J.; MAKIN, I. W. **Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications.** *Agricultural Water Management*, v. 46, p. 137-155, 2000.

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

BASTIAANSSEN, W. G. M; ALI, S. **A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus basin, Paquistan.** *Agricultural, Ecosystems and Environment*, v. 94, p. 321-340, 2003.

BASTIAANSSEN, W. G. M; CHANDRAPALA, L. **Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use.** *Agricultural Water Management*, v. 58(2), p.171-192, 2003.

BASTIAANSSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; TAHIR, Z. **Upscaling water productivity in irrigated agriculture using remote-sensing and GIS technologies.** *Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement* (Eds J. W. Kikne, R. Barker and D. Molden) CAB International, 2003.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração.** Porto Alegre: IPAGRO, Boletim Técnico. 95p. 1981.

BERNARDO S. **Irrigação e Produtividade.** IN: Manuel Alves Faria (ed.), *Manejo de Irrigação.* Lavras - MG. UFLA/SBEA, p. 117 – 132,1998.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação.** 7ª ed. Viçosa-MG: Imprensa Universitária, 611p, 2005.

BEZERRA, M. V. C. **Balanço de energia em áreas irrigadas utilizando técnicas de sensoriamento remoto.** 2004, 108p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia.)Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB.

BEZERRA, B. G. **Balanço de energia e evapotranspiração em áreas com diferentes tipos de cobertura de solo no cariri cearense através do algoritmo SEBAL.** 2006, 147 p. il.: Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB.

BOWMAN, J.A.; SIMMONS, F.W.; KIMPEL, B.C. **Irrigation in Midwest: Lessons from Illinois.** *Journal of Irrigation and Drainage Division*, New York, v.117, n.5, p.700-15, 1991.

BRAY, S.C. **A cultura da cana-de-açúcar no vale do Paranapanema: um estudo de geografia agrária.** 1980, 304p.Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo.

BRISTOT, G. **Estimativa da necessidade de irrigação suplementar para algumas culturas no Estado da Paraíba.** 1999, 105 p.: il. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande-PB.

BROWN, L. R. **Plan B 2.0: rescuing a planet under stress and a civilization in trouble.** NY: W.W. Norton & Co. 2006.

BROWN, S. **Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests-A Primer** FAO, Rome-Italy. 1997

BRUTSAERT, W. H. **Evaporation into the atmosphere**. Reidel, Boston, Massachusetts, 212p. 1982.

CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. **Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial**. *Bragantia*, v. 59, n. 2, p. 127-137. Campinas, 2000.

CAMPBELL SCIENTIFIC, INC. **Bowen ratio instrumentation instruction manual**. Revision 4/98. 23p.

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.

CHEN, X. L.; ZHAO, H. M.; LI, P., X.; YIN, Z. Y. **Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes**. *Remote Sensing of Environment*, v.104, p.133-146, 2006.

CHRISTOFIDIS, D. **Recursos hídricos e irrigação no Brasil**. Brasília: CDS – UNB, 1999.

CHRISTOFIDIS, D. **Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos**. *Irrigação e Tecnologia Moderna*. Brasília: ABID, n. 54, p. 46-55, 2002.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA (CODEVASF). Disponível em: <http://www.codevasf.gov.br/Codevasf> , acesso em 12/05/2006.

COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; OLIVEIRA, S. L. **Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água**. *Revista socioeconomia*, v. 7, n. 1, 2005.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://oglobo.oglobo.com/economia/mat/2006> , acesso em 20/12/2006.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/safra/BoletimCana-Novembro2006-07pdf> , acesso em 20/06/2007.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. da C.; FARIAS, C. H. de A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. de. **Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura**. *Revista Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 10, n. 2, p.283-288, 2006.

DAS, K. D. **Use of Remote sensing technique in scheduling irrigation**. *Division of Agricultural Physics. Indian agricultural research institute*. New Delhi – India. 1991. Disponível em <http://www.gisdevelopment.net> – acesso em 09/06/2007.

DI PACE, F. T. **Estimativa do balanço de radiação à superfície terrestre utilizando imagens TM-Landsat 5 e modelo de elevação digital.** 2004, 120p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB.

DOORENBOS, J & KASSAN, A. H. **Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos.** (Riego e Drenaje). Boletín N. 33. Roma, 1979, FAO, 212p.

DOORENBOS, J. & PRUIT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements.** Rome: FAO, 1977. 179p. (FAO - Irrigation and Drainage Paper, 24).

DROOGERS, P., BASTIAANSEN, W.G.M. **Irrigation performance using hydrological and remote sensing modelling.** Journal of Irrigation and Drainage, v. 128, p.11-18, 2002.

DUFFIE, J. A. and W. BECKMAN. **Solar Engineering of Thermal Processes.** John Wiley and Sons, New York, p. 1-109, 1980.

ERDAS IMAGINE-8,7. Leica Geosystems GIS & Mapping, LLC. 2003.

FAO – enfoques: **Incrementar la productividad del agua.** Março/2003. disponível em <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0303sp2.htm> - acesso em 20/06/2007.

FARRE, I.; OIJEN VAN, M.; LEFFELAAR, P. A.; FACI, J. M. **Análisis of maize growth for different irrigation strategies in northeastern Spain.** European Journal of Agronomy, v. 12(3-4), p.225-238, 2005.

FEITOSA, J. R. P. **Uso de técnica do sensoriamento remoto e imagens Landsat-TM e NOAA-AVHRR na estimativa do balanço de energia à superfície.** 2005, 164p.il. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB.

FERREIRA, A. G. **Meteorologia prática.** São Paulo: Oficina de Textos. 188p, 2006.

FIELD, C. B.; RANDERSON, J. T.; MALMSTROM, C. M. **Global net primary production: combining ecology and remote sensing.** Remote Sensing of Environment, 51(1), p. 74-88, 1995.

FINCH, D. A.; BAILEY, W. G.; McARTHUR, L. J. B; NASITWITWI, M. **Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment.** Agricultural and Forest Meteorology, 122 p.229-238, 2004.

FOLHES, M. T. **Modelagem da evapotranspiração para a gestão hídrica de perímetros irrigados com base em sensores remotos.** 2007. 189p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) INPE, São José dos Campos – SP.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H.; OLIVEIRA, D. **Correlação entre o índice de vegetação global e elementos agrometeorológicos no Estado do Rio Grande do Sul.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 4, n.2, p. 111-116, 1996. INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais. Satélites meteorológicos. Disponível em: <http://satelite.cptec.inpe.br/pesquisa/indicevegetacao> - acesso em 16/08/2006.

GALVÃO, A. **O desempenho da valexport no polo de Juazeiro/Petrolina.** Irrigação e Tecnologia Moderna. Brasília: ABID, n. 60, p. 44-49, 2003.

GARRISON, J.D.; ADLER, G. P. **Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components.** Solar Energy. v. 44, 4. p.225-241, 1990.

GENTINE, P.; ENTEKHABI, D.; CHEHBOUNI, A.; BOULET, G.; DUCHEMIN, B. **Analysis of evaporative fraction diurnal behavior.** Agricultural and Forest Meteorology, v. 143, p.13-29, 2007.

GINESTE, D. M. **Um estudo diagnóstico do consumo de água pela Irrigação na bacia do Rio Miringuava, região Metropolitana de Curitiba, 2004.**53p. Monografia. Curitiba-PR.

GIONGO, P. R. **Estimativa do balance de radiação com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície.** 2008, 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife-PE.

GOWDA, P. H.; CHÁVEZ, J. L.; HOWELL, T. A.; MAREK, T. M.; NEW, L. N. **Surface energy balance based evapotranspiration mapping in the Texas high plains.** Sensors, v.8, p.5186-5201, 2008.

GUIMARÃES, M; A. J. DOURADO; A. C. COUTINHO. Utilização de dados TM-Landsat para o mapeamento e monitoramento da cobertura vegetal. **In: Anais do Gisbrasil 2000: Show de Geotecnologias, 6. A era da informação geográfica.** Salvador – BH CD-ROM. Curitiba: Fator GIS. 8p.

HAFEEZ, M. M.; CHEMIM, Y.; VAN DE GIESEN N.; BOUMAN B. A. M. Field evapotranspiration in Central Luzon, Philippines, using different sensors: Landsat 7 ETM<sup>+</sup>, Terra Modis and Aster. **In: Symposium on Geospatial theory, Processing and Applications.** Ottawa, Canada. 2002.

HAFEEZ, M.; KHAN, S.; SONG, K.; RABBANI, U. **Spatial mapping of actual evapotranspiration and soil moisture in the Murrumbidgee catchment: examples from national airborne field experimentation.** CSIRO Land and Water Division, Austrália. 2006.

HEUTE, A. R. **A soil-adjusted vegetation index (SAVI).** Remote Sensing of Environment, New York, v. 25, n. 3, p.295-309, 1988.

HILL, R. W. Using evapotranspiration data to schedule irrigation of forages. **In: Proceedings, Western Alfalfa and Forage Conference.** December, 2002, Sparks, NV, UC Cooperative Extension, University of California.

HILL, J.; NELSON, E.; TILMAN, D. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels. **PNAS**, v. 103, p.11206-11210, 2006.

IMMERZEEL, W. W.; GAUR, A.; SWART, S. J. **Integrating remote sensing and a process-based hydrological model to evaluate water use and productivity in a south Indian catchment.** Agricultural Water Management, V. 95, p. 11-24, 2008.

INMAN-BAMBER, N. G.; McGLINCHEY, M. G. **Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements.** Field Crops Research, v. 83, p.125-138, 2003.

JI, R.; XIE, B. Y.; LI, D. M.; LI, Z.; ZHANG, X. **Use of MODIS data to monitor the oriental migratory locust plague.** Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 104, p.615-620, 2004.

JIN, X.; WAN, L.; SU, Z. **Research on evaporation of Taiyuan basin area by using remote sensing.** Hydrology and Earth System Sciences Discussions, v. 2, p.209-227, 2005.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera.** São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

KIJNE, J.; BARKER, R.; MOLDEN, D. **Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement.** Comprehensive assessment of Water Management in Agriculture, Series No. 1, CABI press, Wallingford, UK, 352 p. 2003.

LI, Y. H.; DONG, B.; YU, F. Improving irrigation management of paddy fields for sustainable increases in water productivity. **In: Emerging Technologies for Sustainable Land Use and Water Management.** Lausanne, Switzerland. 1999.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation.** Third edition, John Wiley & Sons Inc, New York., 750 p. 1995.

LIMA, C. R. A. **Evapotranspiração e coeficiente de cultura em dois ciclos de produção do maracujazeiro amarelo.** 2004, 71p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) ESALQ. Piracicaba-SP.

LIRA, V. M. de. **Avaliação pluviométrica e ambiental na microbacia do alto Rio Sucuru em Sumé-PB.** 2006, 47p. Monografia (Especialização em Gestão e Manejo Ambiental em Sistemas Agrícolas) Lavras-MG.

LIU, J; ZEHNDER, A. J. B.; H. YANG. **Drops for crops: modelling crop water productivity on a global scale.** Global Nest Journal, v. 10, n. 3. p. 295-300. 2008.

LOHEIDE, S. P.; GORELICK, S. M. **A local-scale high resolution evapotranspiration mapping algorithm (ETMA) with hydroecological applications at riparian meadow restoration sites.** Remote Sensing of Environment, v. 98, p.182-200, 2005.

LOPES, G. M. **Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat5-TM.** 2003, 80p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB.

MAIA NETO, R. F. **Água para o desenvolvimento sustentável. A Água em Revista,** Belo Horizonte, n. 9, p.21-32, 1997.

MAJUMDAR, N. C.; MATHUR, B. L.; KAUSHIK, S. B. **Prediction of direct solar radiation for low atmosphere turbidity.** Solar Energy, v. 13. p.383-394, 1972.

MANNOCCI, F.; MECARELLI, P. Optimization analysis of deficit irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Division*, New York, v. 120, n. 3, p. 484-503, 1994.

MARKHAM, B. L. & BAKER, J. L. **Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at satellite temperatures.** EOSAT Landsat Technical Notes 1:3-8, Earth Observation Satellite Company, Lanham, Md. 1986.

MARKHAM, B. L. & BAKER, J. L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, v. 8, n. 3, p.517-523, 1987.

MEDEIROS, S. S.; **Indicadores para gerenciamento do uso da água no perímetro irrigado de Pirapora – MG.** 2002, 109 p.:il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG.

MEIRELES, M. **Estimativa da evapotranspiração real pelo emprego do algoritmo SEBAL e imagem Landsat 5 – TM na bacia do Acaraú – CE.** 2007, 89p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE.

MENEZES, S. J. M. C. de. 2006, 103p.il.: Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG.

MEULENBERGHS, F. G. **Evapotranspiration and surface heat fluxes over Belgium: outcome and perspectives.** *Agronomie*, v. 20. p. 857-868, 2000.

MOHAMED, Y.; BASTIAANSEN, W. G. M.; SAVENIJE, H. H. G. **Spatial variability of evaporation and moisture storage in the swamps of the upper Nile studied by remote sensing techniques.** *Journal Hydrology*, v. 277. p. 116-124, 2004.

MOKHTARI, M. H. **Agricultural drought impact assessment using remote sensing. (A case study Borkhar district – Iran).** 2005, 1379. Thesis submitted to the International Institute for Geo-information Science and Earth Observation in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Geo-Information Science and Earth Observation, Specialisation. ITC – The Netherlands.

MOLDEN, D.; SAKTHIVADIVEL, R.; HABIB, Z. **Basin-level use and productivity of water: examples from South Asia.** Research Report 49. Colombo, Sri Lanka. International Water Management Institute (IWMI). 24 p, 2001.

MONTEITH, J. L. **Solar radiation and productivity in tropical ecosystems.** *Journal of Applied Ecology*, v. 9. p.747-766, 1972.

MORAIS, D. S. L.; JORDÃO, B. Q. **Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana.** *Revista Saúde Pública*, v. 36, n. 3, São Paulo, 2002.

MORAN, M. S.; JACKSON, R. D.; RAYMOND, L. H.; GAY, L. W.; SLATER, P. N. **Mapping surface energy balance components by combining Thematic Mapper and ground-based meteorological data.** *Remote Sensing of Environment*, v. 30. p.77-87, 1989.

MOREIRA, M. A.; SHIMABUKURO, Y. E. Cálculo do índice de vegetação a partir do sensor AVHRR Capítulo 4, p. 80-101. In: Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e TIROS-N / Coordenador Nelson Jesus Ferreira. São Paulo, Oficina de Textos, 2004.

MORIONDO, M.; MASELLI, F.; BINDI, M. **A simple model of regional wheat yield based on NDVI data.** European Journal Agronomy, v. 26. p. 266-274, 2007.

MORSE, A.; TASUMI, M.; ALLEN, R. G. & KRAMBER, W. J. **Application of the SEBAL Methodology for Estimating Consumptive Use of Water and Streamflow Depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing – Final Report.** Idaho Department of Water Resources – University of Idaho, 2000.

MORSE, A.; ALLEN, R. G. **Application of the SEBAL methodology for estimating evapotranspiration and consumptive use of water through remote sensing.** Phase IV: Refinements in an Operational System. University of Idaho. 46 p, 2004.

MOURA, M. S. B. **Validação do consumo hídrico da goiabeira a nível de propriedade na região do submédio São Francisco.** 2005, 120 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB.

NAMAYANGA, L. N. **Estimating terrestrial carbon sequestered in above ground woody biomass from remotely sensed data.** (The use of SEBAL and CASA algorithms in a semi-arid area of Serowe-Botswana). 2002. Thesis presented for the Master of Science Degree in Environmental Systems Analysis and Management - International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede-The Netherlands.

NASCIMENTO, E. B. do. **A agricultura na região metropolitana de Curitiba.** Metrópolis em Revista, Curitiba: COMEC, v. 2, n. 1 p. 43-46, 2000.

OLIVEIRA, A. S. de.; PAZ, V. P. de.; D'ANGIOLELLA, G. L. B.; PEREIRA, F. A. D. de. **Programação da irrigação pelo método do balanço de água no solo. II aplicação – culturas anuais.** Bahia Agrícola., v. 7, n. 1. 2005.

PALA, M.; RYAN, J.; ZHANG, H.; SINGH, M.; HARRIS, H. C. **Water use efficiency of wheat based rotation systems in a Mediterranean environment.** Agricultural Water Management, v. 93. p. 36-44, 2007.

PARODI, G. N. **AHVRR Hidrological analysis system. Algorithms and Theory – version 1.3,** ITC - Netherlands, 76 p. 2002.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. G. F.; MENDONÇA, F. C. **Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande-PB, v. 4, n. 3, p.465-472, 2000.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração.** Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), São Paulo, 183 p. 1997.

PIMENTEL, D.; PATZEK, P. **Ethanol production using corn, switchgrass and wood; Biodiesel production using soybean and sunflower.** Natural Resources Research, v. 14, n. 1, p. 65-76, 2005.

PROJETO ÁGUA. **Ecosistemas aquáticos**. [www.rantac.com.br/cardeal/ProjetoAgua.htm](http://www.rantac.com.br/cardeal/ProjetoAgua.htm). 1998. – acesso em março/2007.

RAMIRES, G. M.; ZULLO JUNIOR, J.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S. **Comparação de dados dos satélites Ikonos-II e Landsat/ETM<sup>+</sup> no estudo de áreas cafeeiras**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 41, n. 4, p.661-666, 2006.

REBOUÇAS, A. C. **Água doce no mundo e no Brasil (Cap. 1)**. In: **Águas doces no Brasil**, Instituto de Estudos Avançados, p.1-36. USP, São Paulo, 1999.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, 2004, 478p.

SARWAR, A; BILL, R. **Estimation of surface heat fluxes in the Indus basin using ASTER imagery**. Pakistan Journal of Water Resources, v .7(1) p. 53-61, 2003.

SAUSEN, T. M. **Sensoriamento remoto: meio ambiente e ciências atmosféricas**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPI). 2005. <http://www.inpe.br>, acesso em 12/02/2007.

SCARDUA, R. & ROSENFELD, V. **Irrigação de cana-de-açúcar**. In: PARANHOS, S. B. (coord.) cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas, Fundação Cargill, v.1, cap. 3, p. 373-431. 1987

SCOTT, C. A.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. ud D. **Mapping root zone soil moisture using remotely sensed optical imagery**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. p. 326-335, 2003.

SENTELHAS, P. C. Agrometeorologia aplicada à irrigação. Seção I-2. In: **Série Engenharia Agrícola – Irrigação**, volume 1. Editores: Jarbas Honório de Miranda e Regina Célia de Matos Pires. Piracicaba, FUNEP. 703 p. 2003.

SHAPOURI, H.; SALASSI, M.; FAIRBANKS, J.N. **The economic feasibility of ethanol production from sugar in the United States**. Report of the USDA, p. 62p. 2006.

SHILPAKAR, R. L. Geo-information procedure for water accounting: A case of the East Rapti River Basin, Nepal. February, 2003, 92p. . (Master of Science Thesis), The Netherlands. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation.

SILVA, B. B. & BEZERRA, M. V. C. Determinação dos componentes do balanço de energia à superfície com técnicas de sensoriamento remoto e dados de superfície. **Anais: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil. De 16-21 abril 2005, INPE, p. 3325-3332. <http://marte.dpi.inpe.br>/acesso em 20/02/2007.

SILVA, B. B. & 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. p. 174-186. 2006.

SILVA PAZ, V. P. da.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. In: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n.3, p.465-473. Campina Grande-PB, 2000.

SILVA, B. B.; LOPES, G. M.; AZEVEDO, P. V. de; **Balço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM.** Revista Brasileira de Meteorologia, v.20, n.3, p.243-252, 2005.

SINGH, D.; MEIRELLES, M. S. P.; COSTA, G. A.; HERLIN, I.; BERROIR, J. P.; SILVA, E. F. **Environmental degradation analysis using NOAA/AVHRR data.** Advances in Space Research, v.37, p.720-727, 2006.

SOUSA, V. F.de; AGUIAR NETO, A. de O ; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; BASTOS E. A. de P.; DANTAS NETO, J. **Manejo de irrigação através de balanço de água no solo.** Teresina-PI; EMBRAPA CPAMN, 1997. 36p.(EMBRAPA – CPAMN , Documentos, 23).

TAO, F.; YOKOSAWA, M.; ZHANG, Z.; XU, Y.; HAYASHI, Y. **Remote sensing of crop production in China by production efficiency models: models comparisons, estimates und uncertainties.** Ecological Modelling, 183(4): p.385-396, 2005.

TASUMI, M. **Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery.** 2003, 357 p. Dissertation presented for the degree of Doctor of Philosophy (Ph.D) with a Major in Biological and Agricultural Engineering. College of Graduate Studies, University of Idaho.

TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; WRIGHT, J. L. **Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves.** Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. p.94-109, 2005a.

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. 335-376, 2005b.

TAUPIER, L.O.G.; RODRIGUES, G. G. **A cana-de-açúcar.** In: ICIDCA. Manual dos derivados de cana-de-açúcar: diversificação, matéria-primas, derivadas do bagaço, derivados do melaço, outros derivados, resíduos, energia. Brasília: ABIPTI,1999. Cap. 2.1, p. 21-27.

TEIXEIRA, A. H. C.de. **Measurements and modelling of evapotranspiration to assess agricultural water productivity in basins with changing land use patterns: A case study in the Sao Francisco River basin, Brazil.** 2008, 238p. Phd thesis. The Netherlands Research School for the Socio-Economic and Natural Sciences of the Environment. Wageningen.

TELLES, D. Capítulo 9: Água na Agricultura e Pecuária. In: REBOUÇAS, Aldo da Cunha; BRAGA, Benedito; TUNDISI, J. G **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação.** São Paulo: Ed. Escrituras, 1999. p.305-337.

THORNTHWAITE, C. W. **An approach toward a rational classification of climate.** Geographical Review, v. 38 (1). p. 55-94, 1948.

TREZZA, R. **Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control.** 2002, 319 p. Dissertation presented for degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Biological and Agricultural Engineering. Utah State University.

TREZZA, R. **Evapotranspiration from a remote sensing model for water management in an irrigation system in Venezuela.** Interciencia, junio, año/v. 31, n. 006. Asociación Interciencia Caracas, Venezuela, 2006. p. 417-423.

UNICA: [http://www.unica.com.br/pages/agroindustria\\_alta.asp](http://www.unica.com.br/pages/agroindustria_alta.asp) - acesso em 26/01/2007.

VAN DAM, J. C.; SINGH, R.; BESSEMBINDER, J. J. E.; LEFFELAAR, P. A.; BASTIAANSEN, W. G. M.; JHORAR, R. K.; KROES, J. G.; DROOGERS, P. **Assessing options to increase water productivity in irrigated river basins using remote sensing and modeling tools.** Water Resources Development. v. 22, n. 1. p. 115-133, 2006.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e climatologia.** Versão Digital. 522p. Recife-PE. 2005.

VEIGA, C.F.M.; VIEIRA, J.R.; MORGADO, I.V. Diagnóstico da cadeia produtiva da cana-de-açúcar do estado do Rio de Janeiro: Relatório de Pesquisa, Rio de Janeiro: FAERJ: SEBRAE/RJ, 2006, 107p.

XING, Z.; CHOW, L.; MENG, F.; REES, H. W.; STEVENS, L.; MONTEITH, J. **Validation evapotranspiration equations using Bowen ratio in New Brunswick, Maritime, Canada.** Sensors, 8, p.412-428, 2008.

ZWART, S. J.; BASTIAANSEN, W. G. M. **Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize.** Agricultural Water Management, v. 69, p.115-133, 2004

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, v. 89, p.287-296, 2007.

## CAPÍTULO VII

## 7. APÊNDICES

**Apêndice 1** - Valores instantâneos dos parâmetros e fluxos dos pixels frio e quente no dia 286 de 2004 - Passagem do satélite: 9:32 hs.

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Pixel frio</b>	<b>Pixel quente</b>
Latitude	UTM	352727,0	360074,0
Longitude	UTM	8957975,0	8949065,0
Altitude	m	386	385
Albedo	-	0,20	0,18
NDVI	-	0,64	0,14
SAVI	-	0,58	0,13
IAF	-	1,93	0,05
TS	K	290,2	306,1
Z <sub>0m</sub>	m	0,46	0,09
rah	s m <sup>-1</sup>	12,8	16,6
u*	s m <sup>-1</sup>	0,57	0,44
dT	°C	1,20	5,16
Rn	W m <sup>-2</sup>	693,1	620,5
G	W m <sup>-2</sup>	52,2	105,4
H	W m <sup>-2</sup>	108,5	359,4
λET	W m <sup>-2</sup>	532,4	155,65
EF	-	0,83	0,30
EFr	-	1,10	0,33
θ <sub>s</sub>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0,34	0,09
ET <sub>24</sub>	mm dia <sup>-1</sup>	0,83	2,04

**Apêndice 3** - Valores instantâneos dos parâmetros e fluxos dos pixels frio e quente no dia 288 de 2005 - Passagem do satélite: 9:32 hs

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Pixel frio</b>	<b>Pixel quente</b>
Latitude	UTM	351082,0	350396,0
Longitude	UTM	8959753,0	8939113,0
Altitude	m	381	410
Albedo	-	0,20	0,17
NDVI	-	0,74	0,14
SAVI	-	0,68	0,12
IAF	-	4,62	0,05
TS	K	290,1	308,5
$z_{0m}$	m	0,63	0,09
rah	$s\ m^{-1}$	11,0	15,1
$u^*$	$s\ m^{-1}$	0,66	0,48
dT	°C	1,91	4,92
Rn	$W\ m^{-2}$	700,3	619,6
G	$W\ m^{-2}$	43,9	111,9
H	$W\ m^{-2}$	200,8	375,6
$\lambda ET$	$W\ m^{-2}$	455,5	132,0
EF	-	0,69	0,26
EFr	-	1,17	0,34
$\theta_s$	$cm^3\ cm^{-3}$	0,25	0,08
<b>ET<sub>24</sub></b>	<b>mm dia<sup>-1</sup></b>	<b>6,11</b>	<b>1,08</b>

**Apêndice 4** - Valores instantâneos dos parâmetros e fluxos dos pixels frio e quente no dia 211 de 2006 - Passagem do satélite: 9:41 hs

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Pixel frio</b>	<b>Pixel quente</b>
Latitude	UTM	340082,0	349592,0
Longitude	UTM	8954263,0	8940553,0
Altitude	m	382	402
Albedo	-	0,17	0,15
NDVI	-	0,73	0,13
SAVI	-	0,65	0,11
IAF	-	2,87	0,09
TS	K	296,2	307,4
Z <sub>0m</sub>	m	0,60	0,09
rah	s m <sup>-1</sup>	17,0	23,4
u*	s m <sup>-1</sup>	0,43	0,31
dT	°C	1,46	4,98
Rn	W m <sup>-2</sup>	545,0	484,7
G	W m <sup>-2</sup>	44,9	82,3
H	W m <sup>-2</sup>	97,3	241,4
λET	W m <sup>-2</sup>	402,8	161,0
EF	-	0,80	0,40
EFr	-	1,14	0,46
θ <sub>s</sub>	cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	0,32	0,12
ET <sub>24</sub>	mm dia <sup>-1</sup>	7,07	2,86

**Apêndice 5** - Valores instantâneos dos parâmetros e fluxos dos pixels frio e quente no dia 22 de 2007 - Passagem do satélite: 9:43 hs

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Pixel frio</b>	<b>Pixel quente</b>
Latitude	UTM	348676,0	354166,0
Longitude	UTM	8955473,0	8940953,0
Altitude	m	395	407
Albedo	-	0,15	0,15
NDVI	-	0,70	0,15
SAVI	-	0,61	0,13
IAF	-	2,20	0,05
TS	K	287,9	305,1
$z_{0m}$	m	0,54	0,09
rah	$s\ m^{-1}$	23,4	32,6
$u_*$	$s\ m^{-1}$	0,31	0,22
dT	°C	2,90	6,78
Rn	$W\ m^{-2}$	713,5	615,3
G	$W\ m^{-2}$	39,8	97,1
H	$W\ m^{-2}$	143,1	240,1
$\lambda ET$	$W\ m^{-2}$	530,6	278,0
EF	-	0,78	0,54
EFr	-	1,23	0,65
$\theta_s$	$cm^3\ cm^{-3}$	0,31	0,17
$ET_{24}$	$mm\ dia^{-1}$	8,89	4,74