



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA**



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CALIBRAÇÃO DO SEBAL/METRIC E MAPEAMENTO DO  
SALDO DE RADIAÇÃO COM IMAGENS LANDSAT 5 – TM E  
MODELO DE ELEVAÇÃO DIGITAL**

**RAFAEL DA COSTA FERREIRA**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA**

Campina Grande – PB

Fevereiro - 2008

**RAFAEL DA COSTA FERREIRA**

**CALIBRAÇÃO DO SEBAL/METRIC E MAPEAMENTO DO  
SALDO DE RADIAÇÃO COM IMAGENS LANDSAT 5 – TM E  
MODELO DE ELEVAÇÃO DIGITAL**

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Meteorologia da  
Universidade Federal de Campina Grande  
em cumprimento às exigências para a  
obtenção de grau de Mestre.

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

Sub-área: **Sensoriamento Remoto Aplicado**

ORIENTADOR: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Campina Grande – PB

Fevereiro - 2008

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA  
CENTRAL DA UFCG**

F383c

2009 Ferreira, Rafael da Costa

Calibração do Sebal/Metric e mapeamento do saldo de radiação com imagens  
Landsat 5 – TM e modelo de elevação digital/ Campina Grande, 2009.

91 f: il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia – Universidade  
Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof. .Dr. Bernardo Barbosa da Silva.

1. sebal. 2. Balanço de radiação. 3. METRIC. I. Título.

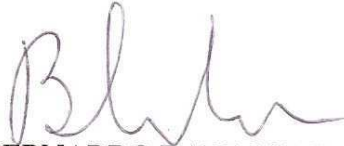
CDU – 528.8(043)

RAFAEL DA COSTA FERREIRA

CALIBRAÇÃO DO SEBAL/METRIC E MAPEAMENTO DO SALDO DE RADIAÇÃO  
COM IMAGENS LANDSAT 5 – TM E MODELO DE ELEVAÇÃO DIGITAL

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 05/03/2009

BANCA EXAMINADORA



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



Prof. Dra. CELIA CAMPOS BRAGA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Prof. Dr. JUAREZ DANTAS DE SOUZA  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Universidade Estadual da Paraíba



## **DEDICATÓRIA**

Dedico a meus Pais, João Medeiros Ferreira e Maria de Lourdes da Costa Ferreira por todo apoio, estímulo, atenção e compreensão. Aos meus irmãos Jefferson e Simone por toda a força e confiança depositada.

## AGRADECIMENTOS

A CAPES, pela bolsa de Mestrado concedida durante toda a vigência do curso.

Ao CNPq, pelo financiamento das pesquisas nas quais foram coletados os dados necessários a realização do trabalho.

Ao prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha, do Departamento de Ciências Atmosféricas da USP, pela concessão dos dados experimentais coletados na bacia do Mogi-Guaçu.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da UFCG pela oportunidade e a todos os professores que contribuem com o mesmo, em especial ao prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva por todo empenho e atenção durante o curso e na orientação deste trabalho.

Aos colegas e amigos do Programa de Pós-Graduação, em especial a Ednaldo, Alexandra, Gabriel, Ivone, Soetânia, Valéria, Bergson, Saulo, Marcos, Carlos, Argemiro, enfim, a todos que de alguma forma contribuíram com essa conquista.

A minha grande amiga e companheira Jeanine, por todos os momentos agradáveis, alguém a quem sempre vou agradecer e lembrar.

Aos professores da UFERSA, em especial aos professores Dr. José Espínola Sobrinho e Dr. Francisco Solon Dantas Neto, que contribuíram, orientaram e apoiaram, não só durante a graduação, disseminando conhecimentos que vou levar por toda a vida.

Aos meus pais, João Medeiros Ferreira e Maria de Lourdes da Costa Ferreira, e irmãos, Jefferson e Simone, pela confiança, apoio, atenção e carinho.

A todos que de alguma forma contribuíram com esse desfecho, a minha completa e sincera gratidão.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>vi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>vii</b>
<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2 - REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>11</b>
2.1 - A Bacia do Mogi Guaçu .....	11
2.1.1 - A cultura da cana-de-açúcar.....	11
2.2- A Bacia do Baixo Jaguaribe.....	12
2.2.1- A cultura da banana .....	12
2.3 - O Balanço de radiação .....	14
2.3.1 - Fatores que afetam o saldo de radiação .....	16
2.4 – Sensoriamento Remoto .....	17
2.4.1 – Algoritmo SEBAL/METRIC .....	20
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.1 – Localização do estudo e base de dados .....	22
3.2- Processamento das imagens.....	25
3.2.1- Calibração radiométrica.....	26
3.2.2- Reflectância Planetária Monocromática .....	27
3.2.3- Reflectância da superfície ou reflectância corrigida.....	28
3.2.4 – Albedo da Superfície.....	29
3.2.5 - Índices de Vegetação .....	29
3.2.6– Emissividades.....	30
3.2.7- Temperatura da Superfície.....	30
3.2.8 - Radiação de Onda Longa Emitida .....	30
3.2.9-Radiação de onda curta incidente .....	30
3.2.10-Radiação de onda longa incidente.....	31



3.2.11-Balanco de radiação .....	31
3.3 - Calibração do algoritmo SEBAL/METRIC.....	32
<b>4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>35</b>
4.1 - Identificação dos alvos em estudo .....	35
4.2 - Calibração do Algoritmo SEBAL/METRIC.....	36
4.2.1-Condições de clima subtropical-úmido do Brasil .....	36
4.2.2 - Condições do clima semi-árido brasileiro.....	40
4.3-Validação dos Resultados do METRIC Aplicado a Imagens Landsat5 - TM. ....	43
4.3.1-Condições de clima subtropical-úmido do Brasil .....	43
4.3.2-Condições de clima semi-árido Brasileiro .....	50
4.4- Componentes do Balanco de Radiação sobre as Bacias Hidrográficas do Mogi Guaçu e do Baixo Jaguaribe.....	52
4.4.1-Albedo.....	52
4.4.5- Temperatura da superfície.....	60
4.4.6- Saldo de Radiação.....	68
<b>5 – CONCLUSÕES .....</b>	<b>77</b>
<b>6 – SUGESTÕES .....</b>	<b>78</b>
<b>7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Posicionamento da bacia hidrológica do Mogi Guaçu no Estado de SP – Brasil. ....	22
Figura 2: Localização da região onde se insere a área experimental de Quixeré, no Estado do CE – Brasil. ....	22
Figura 3: Fluxograma para o cálculo do balanço de radiação mediante o SEBAL/METRIC aplicado a imagens de satélite. ....	25
Figura 4: Imagem TM – Landsat 5 em composição falsa cor RGB (red, green and blue) das bandas 2, 3 e 4 referente à área de estudo, com os alvos bioma cerrado e área cultivada com cana-de-açúcar. ....	35
Figura 5: Imagem TM – Landsat 5 em composição falsa cor RGB (red, green and blue) das bandas 2, 3 e 4 referente à bacia do Baixo Jaguaribe, com os alvo área cultivada com Bananeiras na Fazenda Frutacor.....	36
Figura6: Comportamento da radiação de onda curta incidente observada para os alvos Cerrado e cana-de-açúcar inseridos na bacia doMogi Guaçu nos dias imageados. ....	49
Figura 7: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 22/02/05. ....	54
Figura 8: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 11/04/05. ....	55
Figura 9: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 29/05/05. ....	56
Figura 10: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 14/06/05. ....	57
Figura 11: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 01/08/05. ....	58
Figura 12: Albedo da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 23/07/06..	59

- Figura 13: Albedo da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 08/08/06..59
- Figura 14: Albedo da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 24/08/06..60
- Figura 15: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 22/02/05. ....62
- Figura 16: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 11/04/05. ....63
- Figura 17: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 29/05/05. ....64
- Figura 18: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 14/06/05. ....65
- Figura 19: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 01/08/05. ....66
- Figura 20: Temperatura da superfície da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 23/07/06.....67
- Figura 21: Temperatura da superfície da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 08/08/06.....67
- Figura 22: Temperatura da superfície da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 24/08/06.....68
- Figura 23: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 22/02/05. ....70
- Figura 24: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 11/04/05. ....71
- Figura 25: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 29/05/05. ....72

Figura 26: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 14/06/05. .....	73
Figura 27: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 01/08/05. .....	74
Figura 28: Saldo de Radiação da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 23/07/06.....	75
Figura 29: Saldo de Radiação da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 08/08/06.....	75
Figura 30: Saldo de Radiação da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 24/08/06.....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Evolução dos principais países produtores na produção mundial da banana... 13	13
Tabela 2: Características espectrais e espaciais do sensor TM e suas aplicações..... 19	19
Tabela 3: Constantes de calibração radiométrica para o Landsat 5 - TM e irradiância solar espectral no topo da atmosfera. .... 26	26
Tabela 4: Coeficientes $C_1$ a $C_5$ e $W_i$ (fração da radiação solar incidente) para imagens Landsat. .... 29	29
Tabela 5: Coeficientes da emissividade por método de determinação para a bacia do Mogi Guaçu e erro médio sobre emissividade atmosférica e radiação de onda longa incidente para os dias utilizados no processo de validação ( $n = 5527$ )..... 38	38
Tabela 6: Erro percentual na estimativa da radiação de onda longa incidente como função da emissividade atmosférica e valores observados. .... 39	39
Tabela 7: Coeficientes da emissividade por método de determinação para a bacia do Baixo Jaguaribe e erro médio sobre emissividade atmosférica e radiação de onda longa incidente para os dias utilizados no processo de validação ( $n = 15271$ )..... 40	40
Tabela 8: Erro percentual na estimativa da radiação de onda longa incidente como função da emissividade atmosférica estimada e das observações..... 42	42
Tabela 9: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda longa incidente sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5..... 44	44
Tabela 10: Análise dos resultados da estimativa do albedo da superfície sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5. .... 45	45
Tabela 11: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda curta incidente a superfície ( $W.m^{-2}$ ) sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5. .... 45	45

Tabela 12: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda longa emitida pela superfície ( $W.m^{-2}$ ) sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5. ....	46
Tabela 13: Análise dos resultados da estimativa do saldo de radiação a superfície ( $W.m^{-2}$ ) sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5.....	46
Tabela 14: Equações resultantes de regressão linear para a estimativa do albedo pelo METRIC sobre a cana de açúcar na bacia do Mogi Guaçu. ....	47
Tabela 15: Análise dos resultados da estimativa do saldo de radiação a superfície ( $W.m^{-2}$ ) sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5.....	47
Tabela 16: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda longa incidente sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM - Landsat 5. ....	50
Tabela 17: Análise dos resultados da estimativa do albedo da superfície sobre a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM - Landsat 5. ....	51
Tabela 18: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda curta incidente a superfície ( $W m^{-2}$ ) sobre a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5. ....	51
Tabela 19: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda longa emitida pela superfície ( $W m^{-2}$ ) sobre a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5. ....	51
Tabela 20: Análise dos resultados da estimativa do saldo de radiação a superfície ( $W m^{-2}$ ) sobre a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5.....	52

## **RESUMO**

A intensa aplicação do algoritmo SEBAL/METRIC na previsão dos componentes do balanço de energia requer a calibração do maior número de suas equações para melhorar e garantir a precisão de suas estimativas. Nesse sentido, o estudo propôs a calibração, validação e o mapeamento do saldo de radiação mediante o SEBAL/METRIC aplicado a imagens Landsat 5 – TM, em dois ambientes de características distintas, de climas sub-tropical úmido e semi-árido brasileiros, vigentes nas bacias hidrográficas do Mogi Guaçu – SP e do Baixo Jaguaribe – CE, respectivamente. Para o Processo de calibração foram utilizados os métodos de regressão linear e o de tentativa-erro baseado na seleção dos resultados em função do erro médio, erro absoluto médio e na relação entre estes. No mapeamento do saldo de radiação foram utilizadas 5 imagens TM - Landsat 5 para a bacia do Mogi Guaçu e 3 para a bacia do Baixo Jaguaribe. Os dados utilizados no processo de validação foram adquiridos de três estações micrometeorológicas, sendo duas instaladas na bacia do Mogi Guaçu, no Bioma cerrado e em área cultivada com a cana-de-açúcar e uma em cultivo irrigado com a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe. Os resultados obtidos no processo de calibração foram considerados muito satisfatórios, com estimativas do saldo de radiação muito próximo aos dados observados, promovendo melhoria significativa e êxito ao objetivo proposto. No mapeamento do saldo de radiação sobre os dois ambientes estudados, foi detectada eventual variação deste componente sobre a bacia do Mogi Guaçu ao longo do período analisado, com resultados que corroboram com a literatura.

**Palavras chave: Balanço de Radiação, SEBAL, METRIC**

**ABSTRACT**

The intense application of the SEBAL / METRIC algorithm for determination of the energy balance components at surface requires the calibration of some equations to get better precision of their estimates. In that sense, the study proposed the calibration and mapping of the radiation balance by applying SEBAL / METRIC to Landsat 5 – TM images, in two atmospheres with different characteristics: a humid sub-tropical and semi-arid climates both in Brazil, corresponding respectively to Mogi Guaçu - SP and Low Jaguaribe - CE basins. For the calibration process the methods of linear regression and the one of attempt-mistake based on the selection of the results in function of the medium error, absolute medium error and in the relationship among these were used. In the mapping of the radiation balance five TM – Landsat 5 images for Mogi Guaçu basin and three for the Baixo Jaguaribe basin were used. The data used in the validation process were collected in three micrometeorological stations, being two installed in Mogi Guaçu basin (one in Cerrado Bioma and other one in sugarcane crop) and in Low Jaguaribe basin (irrigated banana crop). The results obtained in the calibration process were considered very satisfactory, with estimates values of net radiation close to the observed data, promoting significant improvement and success to the proposed objective. In the mapping of net radiation on the two studied atmospheres, eventual variation of this component was detected on Mogi Guaçu's basin along the analyzed period, with results that corroborate with the literature.

**Key-Words: balance of radiation, SEBAL, METRIC**



## 1 - INTRODUÇÃO

A bacia do Mogi Guaçu-SP é caracterizada pela presença de diversas indústrias e pela ocupação das margens do rio que dar nome a bacia pelo sistema agropecuário, com ênfase na agroindústria canavieira, que ocupa uma área de mais de 3000 km<sup>2</sup>, cerca de 20% da área total da bacia. Mesma relevância é dada a cultura da banana na Bacia do Baixo Jaguaribe, localizada no Estado do Ceará, no Semiárido brasileiro, Estado responsável por 13% da produção do Nordeste e 5% da produção nacional (IBGE, 2008).

O estudo do comportamento da radiação solar sobre áreas irrigadas é de fundamental importância. A eficiência do processo de transformação da energia radiante em química no sistema de produção agrícola se repercute na produtividade e na qualidade da produção sendo dependente da posição geográfica, época do ano e da cultura utilizada em cada região.

O balanço de radiação em bacias hidrográficas é essencial ao conhecimento e entendimento dos processos físico-químicos que ocorrem na camada limite planetária. Sua importância abrange diversas áreas do conhecimento, tais como: meteorologia, climatologia, hidrologia e agronomia, sendo aplicado dentre outros na previsão do tempo e clima, modelagem atmosférica, gestão dos recursos hídricos, fisiologia vegetal e irrigação (Silva et al., 2006).

O saldo de radiação representa a fração de energia disponível ao metabolismo vegetal, aquecimento do ar, do solo e processo evapotranspirativo, este último elemento fundamental ao manejo racional dos recursos hídricos de bacias hidrográficas e projetos de irrigação.

Diversos estudos são inviabilizados pela inexistência ou descontinuidade na coleta de dados sobre radiação no Brasil. Essa é agravada por erros instrumentais advindos da baixa sensibilidade dos sensores e da falta de calibração dos mesmos que compromete a precisão das medições radiométricas. Ademais, o saldo de radiação usualmente não é medido em estações meteorológicas, mas apenas em campanhas experimentais em cultivos agrícolas e/ou biomas de grande interesse internacional (Cerrado, Amazônia, Pantanal e Caatinga). Por sua vez, estimar os componentes do balanço de radiação a partir de dados pontuais está atrelada a erros, proporcionais a

distância entre os pontos de coleta de dados. Nesse sentido, a utilização de algoritmos aplicados a imagens de sensores orbitais que venham suprir essa necessidade apresenta-se de grande importância ambiental. Desta forma, o emprego de técnicas de sensoriamento remoto apresenta-se como um campo promissor, com a vantagem da determinação dos componentes do balanço de radiação com grande cobertura espacial de forma rápida e precisa.

Na última década um grande esforço tem sido despendido com vistas ao desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto que possibilitem a detecção de alterações que possam ocorrer em diversos biomas terrestres e na gestão sustentável dos naturais e mais especificamente, dos recursos hídricos destinados a produção de alimentos. Nesse sentido, o algoritmo SEBAL e suas variantes vêm alcançando resultados satisfatórios sendo usado em diferentes regiões do globo. Não obstante a requisição de poucos dados de superfície para sua implantação, o modelo pode ser calibrado para cada região para garantir maior precisão dos resultados.

As medições do balanço de radiação a superfície via imagens de satélite é influenciado diretamente pelo estado da atmosfera, mas também pela inclinação da superfície e sentido da inclinação. Um modelo proposto por Allen et al. (2006) para o cálculo dos componentes instantâneos e diários do balanço de radiação em superfícies inclinadas e adaptado ao SEBAL/METRIC (Allen et al., 2007a), vem suprir essa carência, elevando a precisão dos resultados em áreas com topografia muito heterogênea.

No Brasil, registros do balanço de radiação sobre regiões de relevo acidentado são ainda muito escassos. No estudo de bacias hidrográficas, a irregularidade do terreno pode comprometer substancialmente os resultados do balanço, particularmente em áreas com acentuada declividade. Di Pace et al. (2008) verificaram que a aplicação do modelo de elevação digital no cálculo da emissividade, IVDN (Índice de vegetação por diferença normalizada), albedo e temperatura da superfície, é suficiente para produzir variações consideráveis no cálculo do saldo de radiação, ou seja, estimativas destes parâmetros considerando o relevo são muito diferentes daquelas em que as elevações da superfície, nas áreas de acidentado relevo, são desprezadas.

Não obstante o SEBAL/METRIC requerer poucos dados de superfície para que, com imagens orbitais, possa ser empregado, a disponibilidade de dados complementares

para fins de calibração de algumas das expressões que integram o algoritmo, resulta em aumento da precisão dos diferentes elementos constituintes do balanço de radiação e energia.

Diante do exposto, este trabalho tem o objetivo de calibrar e validar o SEBAL/METRIC para fins de determinação dos componentes do balanço de radiação através de técnicas de sensoriamento remoto aplicado a imagens TM - Landsat 5 e utilizando um modelo de elevação digital para ambientes de clima subtropical úmido e semi-árido brasileiros, vigentes nas bacias do Mogi Guaçu e Baixo Jaguaribe nos Estados de São Paulo e Ceará, respectivamente.

## **2 - REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 - A Bacia do Mogi Guaçu**

A bacia do Rio Mogi Guaçu localiza-se no estado de São Paulo, compreendida entre as latitudes 21° 45' e 22° 45'S e longitudes 46° 15' e 47° 45'W, com uma área de aproximadamente 15.200 km<sup>2</sup>. É caracterizada pela presença de diversas indústrias e pela ocupação das margens do rio que dar nome a bacia por um intenso sistema agropecuário, com ênfase na agroindústria canavieira, que ocupa uma área de mais de 3000 km<sup>2</sup>, de acordo com dados do IBGE (2008).

De acordo com Oliveira et al. (2008) a bacia hidrográfica do Mogi Guaçu é uma bacia de oitava ordem, com 20.193 canais e área total de drenagem de 15.200 km<sup>2</sup>. Apresenta limites com as bacias do Pardo; Piracicaba/Capivari /Jundiaí; Baixo Pardo / Grande; Tietê / Jacaré/; Turvo / Grande; e Tietê / Batalha. Sua área de drenagem abrange totalmente ou parcialmente 28 municípios: Aguai, Águas de Lindóia, Américo Brasiliense, Araras, Barrinha, Conchal, Descalvado, Dumont, Espírito Santo do Pinhal, Estiva Gerbi, Guariba, Guatapará, Itapira, Jaboticabal, Leme, Lindóia, Mogi Guaçu, Motuca, Pirassununga, Porto Ferreira, Pradópolis, Rincão, Santa Cruz da Conceição, Santa Cruz das Palmeiras, Santa Lúcia, Santa Rita do Passa Quatro, Santo Antônio do Jardim, Taquaral.

#### **2.1.1 - A cultura da cana-de-açúcar**

De acordo com os dados do IBGE (2008), a produção nacional da cana-de-açúcar é superior a 450 milhões de toneladas por ano, concentrando 58,8% dessa produção no estado de São Paulo, que apresenta uma produtividade média de 81,9 ton ha<sup>-1</sup> contra 74,4 ton ha<sup>-1</sup> na média nacional, dados esses referentes a safra de 2006. Em decorrência do bom momento da economia brasileira no período de 2006 a 2008, houve um crescimento em torno de 8% ao ano na produção nacional.

A bacia do Mogi Guaçu compreende uma área de produção de aproximadamente 305.000 ha, o que representa 9,3% da área de produção de cana-de-açúcar do Estado de São Paulo, com uma produtividade média de quase 85 ton ha<sup>-1</sup>(IBGE, 2008).

A produção de cana-de-açúcar no Estado de São Paulo movimentava mais de R\$ 9,5 bilhões por ano, o que representa algo em torno de 1,3% do PIB Estadual, o maior do País. A bacia do Mogi Guaçu é responsável pela produção de mais de 25 milhões de

toneladas por ano, representando algo em torno de 9,6% da produção do Estado e 5,6% da produção nacional, movimentando mais de R\$ 860 milhões.

## **2.2- A Bacia do Baixo Jaguaribe**

A bacia do Baixo Jaguaribe está localizada no estado do Ceará, inserida no Semiárido brasileiro, entre as latitudes 4° 24' 46'' e 5° 27' 47'' sul e longitudes 37° 34' 55'' e 38° 39' 29'', abrangendo uma área com cerca de 5.000 Km<sup>2</sup>, tendo como principal atividade agrícola a fruticultura tropical.

A prática da fruticultura tropical irrigada na região Nordeste do Brasil tem a vantagem de apresentar elevado fotoperíodo e conseqüente elevada atividade fotossintética, o que reduz o ciclo das culturas e eleva a produtividade quando comparado com outras regiões do País. A baixa pluviosidade anual possibilita ainda controle hídrico e o manejo adequado da irrigação, que quando realizado de forma eficaz permite a obtenção de produtos de elevada qualidade e redução aos ataques de patógenos, reduzindo os riscos no processo produtivo.

A banana é a fruta mais consumida in natura no mundo, cujo cultivo se concentra nos países de clima tropical. Em 2006, a produção mundial foi de aproximadamente 71,6 milhões de toneladas (FAO, 2008). Por este motivo e por sua popularidade, é considerada a mais importante fruta tropical, com elevado valor nutritivo, o alimento é energético e funciona como fonte de vitaminas (A e C) e minerais (Fe e K) (Rangel, 2008).

### **2.2.1- A cultura da banana**

O Brasil é o segundo produtor mundial de banana, com produção aproximada de 7,1 milhões de toneladas em 2006, em uma área cultivada de 504 mil hectares, cujo rendimento é de 14 ton ha<sup>-1</sup>, considerada baixa ao ser comparada com a produtividade de outros países como a Costa Rica, com 55 ton ha<sup>-1</sup> também em 2006 (FAO, 2008). Segundo MOREIRA (1999), a produtividade média da banana do tipo Cavendish alcança 70 ton ha<sup>-1</sup>, enquanto a prata dificilmente ultrapassa 30 ton ha<sup>-1</sup>. Esses dados revelam a necessidade de estudos e investimentos no setor, do modo de garantir a manutenção dos empreendimentos agrícolas e a sustentabilidade do sistema produtivo.

Analisando os dados de produtividade dos quatro maiores produtores mundiais desta cultura (FAO, 2008), observa-se um crescimento de aproximadamente 40%, 20%,

64% e 32% de 1991 a 2006, respectivamente para a Índia, Brasil, China e Equador. Esse crescimento na produtividade, somado ao crescimento da área de produção explica a elevação da produção destes países, com exceção do Brasil. Neste, o crescimento da área de produção é insignificante (2,6%) quando comparada a elevação da produtividade (20%), embora ainda muito baixa (14 ton ha<sup>-1</sup>) em relação aos demais produtores: Índia (29 ton ha<sup>-1</sup>), China (25 ton ha<sup>-1</sup>) e Equador (28 ton ha<sup>-1</sup>). Ao comparar a área de produção desses países, 404, 504, 280 e 221 mil ha, para Índia, Brasil, China e Equador, respectivamente, revela-se um enorme potencial ao desenvolvimento no sistema de produção agrícola no Brasil, podendo chegar facilmente à condição de maior produtor mundial deste bem alimentício. Na Tabela 1 está representada a evolução destes países em termos de área de produção, quantidade e produtividade. Esses dados sustentam mais uma vez a necessidade de estudos e investimentos no agronegócio brasileiro da banana.

Tabela1: Evolução dos principais países produtores na produção mundial da banana

Variável	Índia				Brasil			
	1991	2001	2006	Cresc. %	1991	2001	2006	Cresc. %
Área (mil ha)	378,6	470	404	6,7	491	510	504	2,6
Produtividade (ton/ha)	20,7	30,2	28,9	39,6	11,7	12,1	14	19,7
Produção (10 <sup>6</sup> ton.)	7,8	14,2	11,7	50,0	5,8	6,1	7,1	22,4
Variável	China				Equador			
	1991	2001	2006	Cresc. %	1991	2001	2006	Cresc. %
Área (mil ha)	142	254	279,5	96,8	168,5	229	221	31,2
Produtividade (ton/ha)	15,3	21,6	25,2	64,7	20,9	26,5	27,6	32,1
Produção (10 <sup>6</sup> ton.)	2,2	5,5	7,1	222,7	3,5	6,1	6,1	74,3

Segundo dados da FAO (2008).

Fioravanço (2003), estudando o mercado mundial da banana, mostra a redução da participação brasileira de 1991-92 para 2001-02, caindo do segundo lugar, com 11,8%, para a terceira posição, com 8,9% em termos de produção. O estudo mostra claramente essa perda de importância da bananicultura brasileira e explica, em parte, porque o País baixou do primeiro lugar no *ranking* dos maiores produtores, posição historicamente sustentada, para o terceiro lugar. De acordo com os dados do estudo, a análise do crescimento da produção dos quatro maiores produtores nesse período, Índia (95%), Equador (101%), Brasil (6,2%) e China (128%) dá sustentabilidade ao estudo. Frisa-se, ainda, um dado alarmante do estudo, o crescimento da produção brasileira nesse período ocorreu em função do aumento da área de produção (3,87% ao ano) acompanhada da queda na produtividade (0,33% ao ano). Esse estudo foi baseado em

dados da FAO (2003). No entanto, de acordo com a atualização dos dados (FAO, 2008), o Brasil não perdeu sua histórica posição, mas esteve praticamente empatado em termos de produção com o Equador. Os novos dados não reduzem o prestígio do trabalho, e o alarme da situação brasileira ressaltada continua válido. Atualmente, o Brasil tem a sua posição (segundo produtor mundial) ameaçada pela China, apresentando produções semelhantes, mas acumulando um crescimento de 64% em produtividade, 236% em produção (1991 a 2006), e na sua participação no mercado mundial de 4% para 10%, ultrapassando o Equador e se igualando ao Brasil (FAO, 2008).

De acordo com dados do IBGE (2008), a região Nordeste apresentava uma área de produção da bananeira de aproximadamente 214.000 ha, que representa cerca de 45% da área de produção nacional. Os estados que mais se destacam na produção são a Bahia e o Ceará, com 45% e 13%, respectivamente. A produção nessa região é caracterizada pela baixa produtividade, de cerca de 14 ton ha<sup>-1</sup> na Bahia e 10 ton ha<sup>-1</sup> no Ceará. O Estado do Rio Grande do Norte, embora com apenas 6% da área de cultivo do NE, apresenta uma produtividade de cerca de 27 ton ha<sup>-1</sup>. Cita-se como causa dessa baixa produtividade o manejo hídrico e nutricional inadequado e, segundo Weber et al. (2006), a opção dos produtores pelo plantio de cultivares do subgrupo Prata. Segundo Moreira (1999), a produtividade média da banana do tipo Cavendish alcança 70 ton ha<sup>-1</sup>, enquanto a prata dificilmente ultrapassa 30 ton ha<sup>-1</sup>.

### 2.3 - O Balanço de radiação

O balanço de radiação compreende a quantificação dos fluxos radiativos incidente, absorvido, emitido e refletido por um dado volume de controle a superfície sob a forma de radiação de onda curta e de onda longa. O balanço radiativo pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Rn = \underbrace{(R_{OC_i} \downarrow - R_{OC_r} \uparrow)}_A + \underbrace{(R_{OL_i} \downarrow - R_{OL_r} \uparrow - R_{OL_e} \uparrow)}_B \quad (1)$$

onde:  $Rn$  = Saldo de radiação;  $R_{OC_i} \downarrow$  = Radiação de onda curta incidente;  $R_{OC_r} \uparrow$  = Radiação de onda curta refletida (albedo);  $R_{OL_i} \downarrow$  = Radiação de onda longa incidente;  $R_{OL_r} \uparrow$  = Radiação de onda longa refletida;  $R_{OL_e} \uparrow$  = Radiação de onda longa emitida.

Na Equação 1, o termo “A” do lado direito representa o saldo de radiação de onda curta e o termo “B”, o balanço de radiação de onda longa. Os termos que

representam o saldo de radiação de onda curta são geralmente medidos por piranômetros com a cúpula voltada para cima (radiação de onda curta incidente) e para baixo (radiação de onda curta refletida), respectivamente. Porém, são equipamentos de elevado custo, utilizados principalmente em pesquisas. A estimativa do saldo de radiação de onda curta pode ser efetuada apenas em função da radiação solar incidente ( $R_{OC_i} \downarrow$ ) quando se tem conhecimento do albedo da superfície. Em alguns estudos com cultivos irrigados são obtidas expressões que relacionam a radiação refletida com a radiação solar incidente (Azevedo et al., 1990)

A reflectividade da superfície para onda curta (albedo da superfície), indispensável na estimativa do saldo de radiação de onda curta, é dependente de características da atmosfera, do ângulo zenital solar, da vegetação e do solo na qual a vegetação está inserida, tais como: cor da vegetação, grau de cobertura do solo pela vegetação (índice de vegetação), arquitetura foliar, tipo de solo, umidade do ar e do solo, presença de nuvens, ângulo de incidência dos raios solares (Azevedo et al., 1990).

A radiação de onda longa incidente ( $R_{OL_i} \downarrow$ ) se origina substancialmente nos primeiros metros da atmosfera e pode ser obtida mediante a equação de Stefan-Boltzman com uma emissividade atmosférica representativa dessa camada inicial da atmosfera (Campbell & Diak, 2005). No entanto, o grande desafio é determinar corretamente a emissividade atmosférica. O método de Prata (1996) é considerado como um dos mais precisos (Diak et al., 2000), mas em aplicações em sensoriamento remoto, Bastiaansen et al. (1998) apresentam um modelo que tem sido aplicado em várias áreas irrigadas do planeta e foi recentemente calibrado por Teixeira et al. (2008a). Os dois últimos termos da Equação 1, a radiação de onda longa emitida ( $R_{OL_e} \uparrow$ ) e refletida ( $R_{OL_r} \uparrow$ ), podem ser obtidos por medições através de pirgeômetros com a cúpula voltada para a superfície, ou estimada por equações empíricas e nesse caso o termo que representa a radiação de onda longa refletida ( $R_{OL_r} \uparrow$ ) muitas vezes é desprezado por ser considerado muito pequeno em relação à radiação de onda longa incidente ( $R_{OL_i} \downarrow$ ).

A radiação solar interceptada por um cultivo e, ainda, o saldo do balanço de radiação na cultura, desempenham um papel fundamental no microclima em que as plantas crescem, determinando qual a energia disponível para os processos fisiológicos associados com a produção de biomassa e a evapotranspiração (Hayashi et al., 2002).



O saldo de radiação de uma superfície cultivada ( $R_n$ ) constitui-se em uma variável fundamental na modelagem dos fluxos de propriedades físicas (massa e energia) na camada limite planetária (Cunha et al., 1993). Este é utilizado nos processos de aquecimento do ar e do solo; transferência da água, na forma de vapor, da superfície para a atmosfera através da evapotranspiração; e metabolismo das plantas, especialmente a fotossíntese (Azevedo et al., 1990).

Apesar da importância deste elemento, os dados disponíveis sobre radiação solar são muito limitados no Brasil. A maioria refere-se a médias climatológicas, onde é fornecida a insolação diária e não a radiação incidente (Leivas, 2008). No entanto, a implantação de estações meteorológicas automáticas em todo o território nacional tende a mudar essa situação. Entretanto, há necessidade de calibração sistemática e substituição dos instrumentos com o passar dos anos, de forma a proporcionar aos diversos usuários informações regulares e confiáveis.

Desta forma, o sensoriamento remoto pode vir a suprir essa necessidade de dados. Vale salientar, que é preferível a utilização de dados de sensoriamento remoto ao uso de dados de superfície quando se tem conhecimento da falta de calibração desses equipamentos, ou não se tem conhecimento a respeito da calibração dos mesmos.

O método mais simples de obtenção da radiação solar incidente em determinado local é através da interpolação dos dados das estações meteorológicas próximas ao local desejado (Leivas, 2008). Contudo, os erros advindos da utilização desses métodos se elevam com a distância entre as estações e com características intrínsecas a determinados locais, tais como a altitude. Nesse sentido, a utilização de dados de sensores orbitais para medida ou estimativa dos componentes do balanço de radiação incidente, contempla a vantagem do cômputo desses elementos pixel a pixel, abrangendo uma grande cobertura espacial e absorvendo as características superficiais de cada ponto.

### **2.3.1 - Fatores que afetam o saldo de radiação**

De acordo com Galvão & Fisch (2000), ao penetrar na atmosfera, a radiação solar sofre uma série de processos que a modificam. Uma considerável porção da radiação incidente é refletida pelas nuvens e espalhada difusamente pela atmosfera. Outras perdas ocorrem devido à absorção de radiação pelo ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono. Mesmo assim, uma parte significativa atinge diretamente a

superfície da Terra, sendo uma porção refletida e outra absorvida pela mesma. Um percentual da parte absorvida é reemitido como radiação termal, enquanto o restante aquece a superfície e o ar logo acima dela ou fornece energia para a evapotranspiração.

Sobre a magnitude do saldo de radiação interferem diversos fatores relacionados com os componentes de onda curta e onda longa. Dentre estes, destacam-se latitude, altitude, época do ano, cobertura de nuvens, composição espectral da radiação incidente, propriedades espectrais da cultura, grau de cobertura do solo pela cultura, disponibilidade hídrica no solo, temperatura da superfície e da atmosfera (Cunha et al., 1996), além da inclinação e direção da inclinação, ou declividade da superfície.

## **2.4 – Sensoriamento Remoto**

De acordo com Swain e Davis (1978) e Lillesand e Kiefer (1993) Sensoriamento Remoto é definido como a técnica e arte que permite a aquisição de informações sobre um objeto, área ou fenômeno, pela análise de dados coletados de tal forma que não haja contato direto com os mesmos. De modo que, quando essas informações são coletadas por sensores a bordo de satélites, denomina-se sensoriamento remoto orbital, que tem como resultado imagens baseadas na resposta espectral dos alvos imageados.

Segundo Huete (1988), essa resposta espectral ou a composição espectral do fluxo radiante proveniente da superfície da terra produz informações sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas da superfície da terra.

De um modo geral, os sensores ópticos medem a radiância em diferentes intervalos de comprimento de onda do espectro eletromagnético, denominados bandas ou canais espectrais (Leivas, 2008). Desta forma, a irradiância de uma porção da superfície da terra que está sendo coberta (dentro de um campo de visada) no instante da passagem do satélite é medida por sensores a bordo do satélite, registradas e transformadas em sinal digital. Esse sinal é, em seguida, associado a diferentes tonalidades de cinza, gerando uma imagem na qual a cada pixel se corresponde um número digital (ND).

Desta forma, uma imagem espectral é composta de células ou pixels dispostos em uma superfície bidimensional, definidos por coordenadas espaciais, ou geométricas, aos quais são atribuídos números digitais correspondente ao valor radiométrico médio registrado pela respectiva área coberta pelo pixel em um determinado instante.

Vale salientar que o processo de observação e obtenção dessas informações está relacionado, mais frequentemente, a quatro parâmetros: resolução espacial, espectral, temporal e geométrica (Moreira, 2003). O primeiro diz respeito à densidade de pixels associada a uma determinada área representada na imagem, definindo o grau de precisão e de detalhamento de objetos a superfície. O segundo, de acordo com Leivas (2008), define a caracterização da curva de resposta espectral, onde a resposta da banda é a média do comprimento de onda do intervalo considerado. De forma que a melhor resolução espectral diz respeito a um grande número de bandas associadas a pequenos intervalos de comprimentos de onda.

O tempo transcorrido entre duas passagens sucessivas sobre o mesmo ponto da Terra determina a resolução temporal de uma imagem. A maior resolução temporal do satélite permite o melhor acompanhamento dos fenômenos com rápidas mudanças (Leivas, 2008).

A resolução radiométrica corresponde à capacidade de distinguir alvos com diferentes radiâncias. Esta resolução define o intervalo e o número de valores discretos de brilho necessários para representar as medidas de brilho (radiância) em uma imagem, de forma que o maior número de níveis de cinza de uma imagem corresponde a uma maior resolução radiométrica.

O desenvolvimento tecnológico tem promovido uma redução dos custos de processamento das imagens, que teve reflexos sobre a computação gráfica, na qual se baseia o processamento digital de imagens, tornando o processamento de imagens de sensoriamento remoto mais acessível (Crosta, 1992). Na última década, o baixo custo de aquisição de imagens promoveu uma revolução no setor, sendo gerados diversos algoritmos para o monitoramento meteorológico, agrônomico e hídrico principalmente. No entanto, esses algoritmos precisam ser calibrados para as mais diferentes regiões da superfície da terra, sobre o risco de erro no cômputo das variáveis na camada limite planetária.

Desta forma, diversos algoritmos foram desenvolvidos e têm sido aplicados no sentido de proporcionar maior sustentabilidade no uso da água junto à agricultura irrigada. O SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) desenvolvido por Bastiaanssen (1995), o S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index), desenvolvido por Roerink et al. (2000), o SEBS (Surface Energy Balance System),

desenvolvido por Su (2001, 2002) e mais recentemente o METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration), desenvolvido por Allen et al. (2007a, b), visam a determinação da evapotranspiração real de culturas, vegetação nativa e de bacias hidrográficas em função da estimativa dos diferentes componentes do balanço de energia à superfície.

O satélite Landsat 5 foi lançado em 1984, portando o sensor TM. Do programa Landsat, composto por 7 satélites cujo objetivo principal foi a aquisição de dados espaciais e temporais da superfície da Terra de forma global, contínua e repetitiva, o Landsat 5 é o único satélite ainda em atividade. O mesmo é caracterizado por órbita quase polar, heliossíncrona, posicionado a 705 km de altitude, cruzando o Equador de norte para sul, implicando em uma órbita descendente, imageando cada região às 9 horas e 45 minutos local, com um tempo de percurso de 98,2 minutos e realizando 14 órbitas por dias, com tempo de revisita de 16 dias (Garcia, 1982).

O sensor TM (Thematic Mapper) a bordo do Landsat 5 opera em 7 canais ou bandas espectrais, sendo 3 na faixa do visível, 3 na do infravermelho e um canal termal. O sensor gera imagens de 185 km de largura com resolução espacial de 30 m na faixa do visível e infravermelho e de 120 m na banda termal. Na Tabela 2 é apresentado uma caracterização dos canais espectrais do sensor TM do Landsat 5.

Tabela 2: Características espectrais e espaciais do sensor TM e suas aplicações

<b>Banda</b>	<b>Faixa Espectral (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Região do Espectro</b>	<b>Resolução Espacial (<math>\text{m} \times \text{m}</math>)</b>	<b>Principais Aplicações</b>
1	0,45–0,52	Azul	30	Altamente absorvida por corpos d'água e sensível a pluma e fumaças oriundas de queimadas e atividades industriais
2	0,52–0,60	Verde	30	Altamente absorvida por corpos d'água, porém apresenta sensibilidade a sedimentos em suspensão
3	0,60–0,69	Vermelho	30	Apresenta bom contraste entre diferentes tipos de cobertura vegetal, permitindo diferenciação entre espécies e identificação de áreas agrícolas
4	0,76–0,90	IV Próximo	30	Apresenta sensibilidade a rugosidade do dossel florestal. Permite o mapeamento de áreas de queimadas e áreas agrícolas
5	1,55–1,75	IV Médio	30	Sensível ao teor de umidade da vegetação, sendo bastante útil no monitoramento de estresses hídricos de culturas
6	10,4–12,5	IV Termal	120	Apresenta sensibilidade quanto aos fenômenos relativos aos contrastes térmicos, sendo usado para a determinação da temperatura da superfície
7	2,08–2,35	IV Médio	30	Altamente sensível à morfologia de terrenos, permitindo obter informações sobre Geomorfologia, Solos e Geologia

Fonte: Engesat (2001) e Moreira (2003)

### 2.4.1 – Algoritmo SEBAL/METRIC

De acordo com Silva et al. (2005a) um dado indispensável à utilização do sensoriamento remoto com a finalidade de determinação da evapotranspiração é o saldo de radiação, principal fonte de energia a ser repartida no aquecimento do solo, do ar e no processo de evapotranspiração. Para a estimativa do saldo de radiação faz-se necessário a estimativa de dois parâmetros muito importantes: o albedo e a temperatura da superfície. Com esse objetivo, o algoritmo SEBAL/METRIC tem sido utilizado para estimar, de forma simples e eficaz, o albedo e a temperatura da superfície com imagens Landsat 5 (Bastiaanssen et al., 1998a,b; Granger, 2000; Boegh et al., 2002; Silva et al., 2005a; Silva et al., 2005b; Silva et al., 2006; Bezerra, 2004; Bezerra et al., 2008; Borges, 2008, Teixeira et al., 2008b) e AVHRR-NOAA (Song & Gao, 1999; Liang, 2001).

O SEBAL é um dos mais destacados algoritmos do sensoriamento remoto, muito utilizado em estudos dos fluxos de calor latente e sensível à superfície (Bastiaanssen et al., 1998a,b; Bastiaanssen, 2000; Morse et al., 2000; Allen et al., 2002a) fazendo uso de imagens de satélite e poucos dados de superfície, o que torna o processo efetivo e econômico, com a vantagem de proporcionar resultados com grande cobertura espacial.

O algoritmo SEBAL/METRIC (Allen et al., 2007a) foi desenvolvido para o cômputo dos componentes do balanço de energia. A determinação do saldo de radiação por este modelo é baseado em estimativas e medidas a superfície e por imagens de satélite, computado pela soma entre o balanço de radiação de onda curta e de onda longa, pixel a pixel conforme a expressão:

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

onde:  $R_{S\downarrow}$  é a radiação de onda curta incidente;  $\alpha$  o albedo corrigido para cada pixel;  $R_{L\downarrow}$  a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel;  $R_{L\uparrow}$  a radiação de onda longa emitida por cada pixel e  $\varepsilon_o$  é a emissividade de cada pixel.

A determinação do SEBAL/METRIC requer um conjunto de equações empíricas que foram calibradas em diversas regiões do planeta. Portanto, para o uso intensivo/sistemático do SEBAL/METRIC se faz necessário a calibração do maior número dessas equações, o que irá conferir aos resultados maior precisão e

sustentabilidade. Teixeira et al. (2008a) calibraram as equações para o cômputo dos componentes balanço de energia utilizando o SEBAL e imagens Landsat 5 na região de Petrolina, Nordeste do Brasil, melhorando consideravelmente a precisão dos resultados. Nesse processo, obtiveram como multiplicador e expoente da equação da emissividade atmosférica proposta por Bastiaansen et al. (1998) 0,942 e 0,103, respectivamente.

### 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 – Localização do estudo e base de dados

A bacia do Mogi Guaçu localiza-se no estado de São Paulo e está compreendida entre as latitudes  $21^{\circ}45'S$  e  $22^{\circ}45'S$  e longitudes  $46^{\circ}15'W$  e  $47^{\circ}45'W$ , contemplando uma área de  $15.200\text{ km}^2$  (Figura 1).

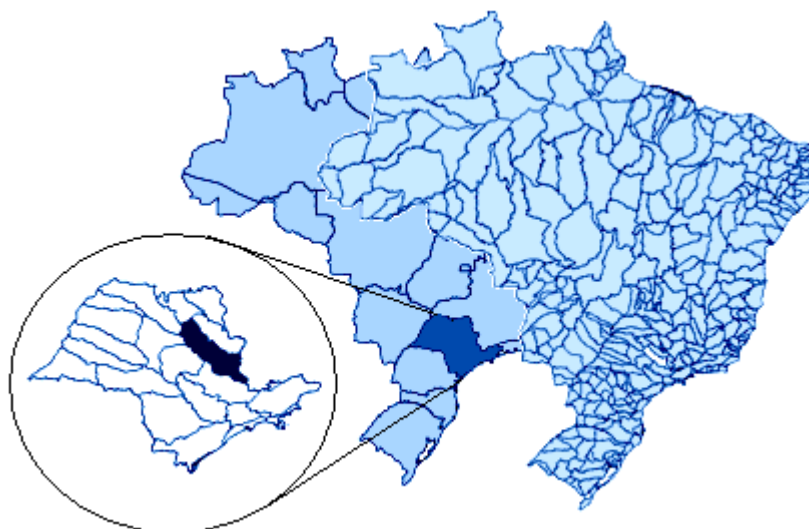


Figura 1: Posicionamento da bacia hidrológica do Mogi Guaçu no Estado de SP – Brasil

A bacia do Baixo Jaguaribe está localizada no estado do Ceará, compreendida entre as latitudes  $4^{\circ} 24' 46''S$  e  $5^{\circ} 27' 47''S$  e longitudes  $37^{\circ} 34' 55''W$  e  $38^{\circ} 39' 29''W$ , podendo ser visualizada na Figura 2.

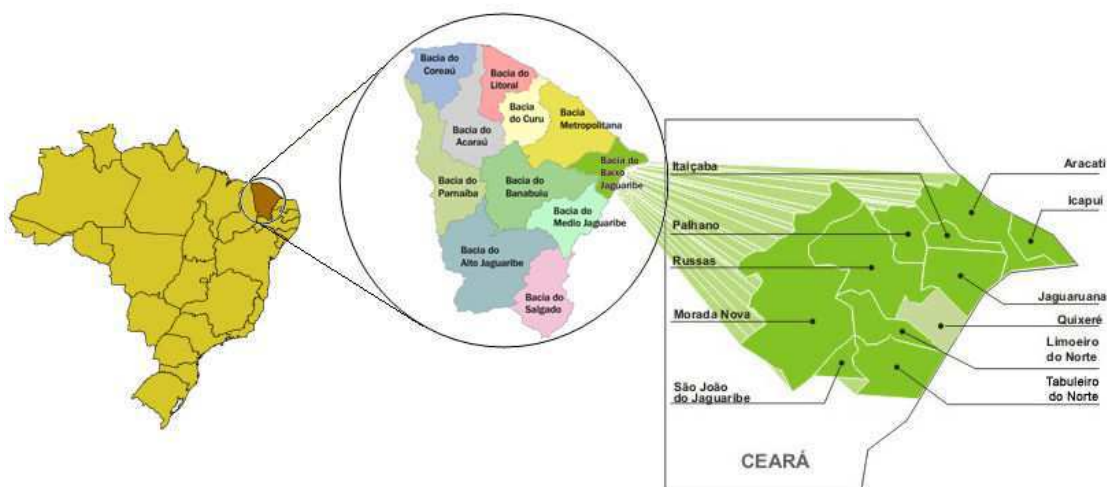


Figura 2: Localização da região onde se insere a área experimental de Quixeré, no Estado do CE – Brasil

Foram utilizadas 5 imagens Landsat 5 – TM para a bacia do Mogi Guaçu, de ponto 220 e órbita 75, geradas no período de jan 2005 a jan 2006 e 3 imagens para a região de Quixeré - CE de ponto 216 e órbita 64, geradas no ano de 2006. Para o cálculo da inclinação da superfície (slope) e do sentido desta (aspecto) foi utilizado um modelo de elevação digital da superfície (DEM) obtida no arquivo do banco de dados da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Foi utilizado um mapa vetorial de contorno da bacia, em formato shapefile (.shp) para o devido recorte.

Os dados de superfície foram coletados em três estações micrometeorológicas, sendo duas delas localizadas na bacia do Mogi Guaçu no estado de São Paulo e uma na bacia do Baixo Jaguaribe, no estado do Ceará.

A primeira estação foi instalada na bacia do Mogi Guaçu (latitude 21,619° S e longitude 47,632°W) no bioma Cerrado, na Gleba Pé de Gigante, Santa Rita do Passa Quatro - SP. A área é considerada de interesse ecológico no Parque Estadual Vassununga e consta de aproximadamente 1.060 ha, com uma altura média da vegetação de 10 m.

A segunda estação micrometeorológica foi instalada a 21,637°S e 47,790°W, na bacia do Mogi Guaçu, em um cultivo de cana-de-açúcar, na Fazenda São José do Pulador, da Usina Santa Rita. A fazenda localiza-se no município de Luiz Antônio - SP e a estação foi instalada em um talhão com cerca de 350 ha, a um espaçamento entre linhas de 1,5 m.

A implantação e coleta dos dados destas duas primeiras estações foram de responsabilidade do professor Dr. Humberto Ribeiro da Rocha, do Departamento de Ciências Atmosféricas (IAG/USP), sendo estes cedidos para o presente estudo.

O terceiro experimento foi desenvolvido na Fazenda Frutacor, em uma área 250 ha, mais precisamente em talhão de 3,0 ha ocupada com a cultivar Pacovan Apodi, com porte de 6,0 a 7,0 m, espaçada em fileiras duplas (4,0 x 2,0 x 2,4 m), transplantada em setembro de 2000. O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, com 3 gotejadores por planta cuja vazão de 3,5 L/h. A torre micrometeorológica foi instalada no centro da área a 5°4'35''S, 37°51'54''W e a 131m de altitude, inserida na cidade de Quixeré – CE, no Semiárido brasileiro, inserida na sub-bacia do Baixo Jaguaribe.

Os instrumentos da terceira estação, Quixeré, foram instalados a 8,0 metros de altura e são eles: um saldo radiômetro CNR1 (Kipp & Zonen, Delft, Holanda), através



do qual são medidos os quatro componentes do balanço de radiação; uma probe HMP45C (Vaissala, Finlândia), destinada a medidas de umidade relativa do ar e temperatura do ar; um analisador de CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O LI-7500 (LI-COR, Lincoln, EUA), para obtenção da concentração de vapor d'água e de gás carbônico; um anemômetro sônico 3D CSAT3 (Campbell Scientific Inc., Logan, EUA), posicionado na direção predominante do vento (sudeste), medindo as três componentes da velocidade do vento e a temperatura virtual sônica; e dois fluxímetros HFP01SC (Hukseflux Thermal Sensors, Delft, Holanda), posicionado a 0,02 m de profundidade do solo, dos quais foi extraída a média para medida do fluxo de calor no solo. Para armazenamento dos dados utilizou-se um sistema de aquisição de dados (Datalogger) CR23X (Campbell Scientific Inc., Logan, EUA), programado para coletar dados de 10 Hz de frequência e extrair médias e covariâncias a cada 10 min durante o período de 02/09/2005 a 08/02/2006, sendo modificado posteriormente para o intervalo de tempo de 20 min 08/02/2006 e 30 min 03/03/2006.

Para as duas primeiras estações micrometeorológicas, as bases instrumentais foram armadas a 21 m e a 8 m aproximadamente para as áreas do cerrado e da cana-de-açúcar, respectivamente, compostas de: uma probe HMP45C para obtenção da temperatura e umidade do ar; um pluviômetro (Hydrological Services) e um anemômetro (RM Young) para medição da velocidade e direção do vento; um barômetro (Vaissala PTB101B) e 2 pirômetros (Li-Cor 200X da Li-Cor) para determinação da pressão e radiação de onda curta incidente e refletida, respectivamente; 2 fotorradiômetros para medida da radiação fotossinteticamente ativa incidente e refletida (Li-cor Quantum LI 190 para o cerrado e PAR Lite Kipp & Zonen para a cana-de-açúcar); um saldo radiômetro (REBS) e fluxímetros (REBS HFT3) para o cômputo do saldo de radiação e fluxo de calor no solo (instalado a 2 cm de profundidade); um anemômetro sônico (GILL R2-A) para medida do fluxo de calor latente e sensível e um analisador de CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O LI-7500 para medir os fluxos de CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O na atmosfera e dataloggers programados para o armazenamento das médias a cada 10 min.

### 3.2- Processamento das imagens

Para o processamento das imagens foi utilizado o software ERDAS Imagine 8.7. O balanço de radiação foi computado de acordo com a metodologia proposta por Allen et al. (2007a), detalhada a seguir. O procedimento é esquematizado na Figura 3.

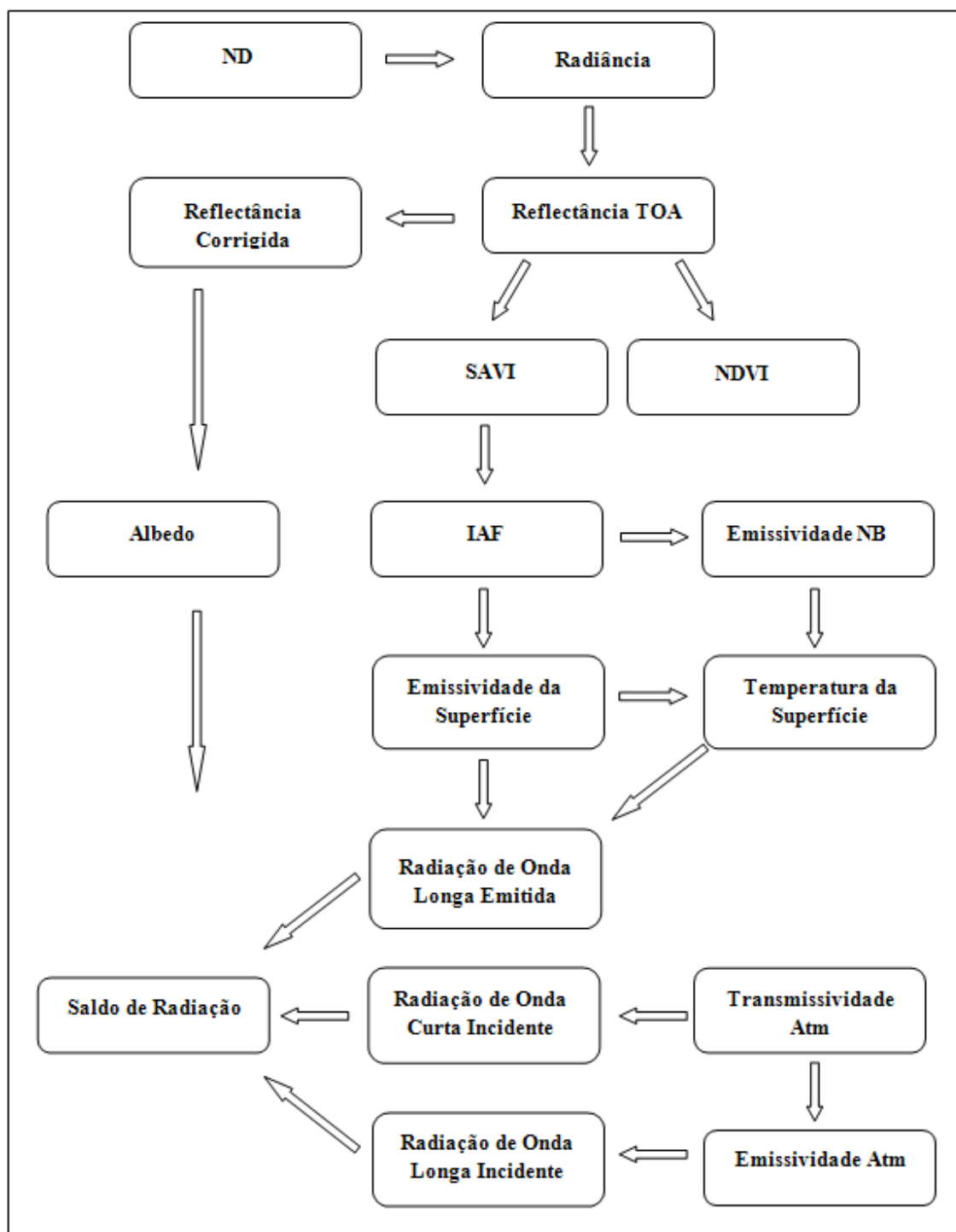


Figura 3: Fluxograma para o cálculo do balanço de radiação mediante o SEBAL/METRIC aplicado a imagens de satélite

O procedimento para determinação dos componentes do balanço de radiação segundo o SEBAL/METRIC, mostrado na Figura 3, é detalhado a seguir.

### 3.2.1- Calibração radiométrica

As imagens Landsat são geradas pelo Mapeador Temático, em diferentes faixas espectrais. Os dados de radiância da superfície são posteriormente transformados em níveis de cinza, sendo necessário aplicar a calibração radiométrica a cada sensor para transformação dos níveis de cinza, definido aqui como número digital da imagem, em radiância espectral monocromática. Portanto, a calibração radiométrica é o processo em que número digital de cada imagem (ND) é convertido em radiância espectral de cada banda ( $L_{\lambda i}$ ), obtido pela seguinte expressão:

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} \times ND \quad (3)$$

onde:  $L_{\lambda i}$  = Radiância espectral monocromática ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m$ );  $a_i$  e  $b_i$  = são coeficientes de calibração representando as radiâncias espectrais mínima e máxima ( $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m$ ), respectivamente (Tabela 3); e  $ND$  = Intensidade do pixel, correspondente à  $i$ -ésima banda espectral.

Tabela 3: Constantes de calibração radiométrica para o Landsat5-TM e irradiância solar espectral no topo da atmosfera

Banda	Espectro	Lmin (a <sub>i</sub> )	Lmax (b <sub>i</sub> )	ESUM (K)
1	0,45 – 0,52	-1,52	193	1957
2	0,52 – 0,60	-2,84	365	1826
3	0,63 – 0,69	-1,17	264	1554
4	0,76 – 0,90	-1,51	221	1036
5	1,55 – 1,75	-0,37	30,2	215
6	10,4 – 12,5	1,2378	15,303	
7	2,08 – 2,35	-0,15	16,5	80,67

Essas radiâncias representam a energia solar refletida por cada pixel, por unidade de área projetada na direção perpendicular aos raios solares, de tempo, de ângulo sólido e de comprimento de onda, medida ao nível do satélite Landsat 5.

### 3.2.2- Reflectância Planetária Monocromática

A determinação da reflectividade é obtida da forma proposta por Bastiaanssen (1995):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{\pi * L_{\lambda i} * d^2}{K_{\lambda} * \cos\theta} \quad (4)$$

onde:  $\rho_{\lambda i}$  = reflectância planetária de cada banda;  $K_{\lambda}$  = irradiância solar espectral no topo da atmosfera, apresentada na Tabela 1;  $L_{\lambda}$  = radiância espectral de cada banda e  $d^2$  = correção da constante solar provocada pela excentricidade terrestre, dada por:

$$d^2 = \frac{1}{1 + 0,033 * \cos\left(\frac{Dj * 2\pi}{365}\right)} \quad (5)$$

em que: Dj = dia sequencial do ano e  $\cos(\theta)$  = cosseno do ângulo de incidência da radiação solar, com respeito a superfície inclinada, determinado pela expressão:

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi)\text{cos}(s) \\ & - \text{sen}(\delta)\text{cos}(\phi)\text{sen}(s)\text{cos}(\gamma) \\ & + \text{cos}(\delta)\text{cos}(\phi)\text{cos}(s)\text{cos}(\omega) \\ & + \text{cos}(\delta)\text{sen}(\phi)\text{sen}(s)\text{cos}(\gamma)\text{cos}(\omega) \\ & + \text{cos}(\delta)\text{sen}(\gamma)\text{sen}(s)\text{sen}(\omega) \end{aligned} \quad (6)$$

em que:  $\delta$  = declinação do Sol no dia da passagem do satélite;  $\phi$  = latitude do ponto central da imagem;  $s$  = inclinação da superfície, computado pixel a pixel;  $\gamma$  = aspecto ou orientação da inclinação do pixel a pixel e  $\omega$  = ângulo horário solar.

Definindo-se:

$$a = \text{sen}(\delta)\text{cos}(\phi)\text{sen}(s)\text{cos}(\gamma) - \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi)\text{cos}(s) \quad (7)$$

$$b = \text{cos}(\delta)\text{cos}(\phi)\text{cos}(s) + \text{cos}(\delta)\text{sen}(\phi)\text{sen}(s)\text{cos}(\gamma) \quad (8)$$

$$c = \text{cos}(\delta)\text{sen}(\gamma)\text{sen}(s) \quad (9)$$

A Equação 6 pode ser reescrita como:

$$\cos(\theta) = -a + b\cos(\omega) + c\text{sen}(\omega) \quad (10)$$

Para uma superfície plana e horizontal, que apresenta declividade nula ( $s = 0$ ) o  $\cos(\theta)$  é dado por:

$$\cos(\theta) = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (11)$$

onde  $h$  representa o ângulo horário solar.

De posse do ângulo de elevação do sol ( $E$ ), o ângulo zenital solar para uma superfície plana e horizontal pode ser calculado como diferença entre o ângulo de culminação solar e o ângulo da elevação, para uma superfície plana, como se segue:

$$\cos(\theta) = \cos(90^\circ - E) \quad (12)$$

### 3.2.3- Reflectância da superfície ou reflectância corrigida

A reflectividade a superfície ( $\rho_{s,i}$ ) nos informa uma fração da energia incidente, refletida pela superfície para cada banda no momento da passagem do satélite.

$$\rho_{s,i} = \frac{R_{ref,s,i}}{R_{inc,s,i}} = \frac{\rho_{\lambda i} - \rho_{a i}}{\tau_{inc,i} * \tau_{ref,i}} \quad (13)$$

onde:  $\tau_{inc,i}$  = Transmissividade atmosférica para a radiação incidente, dado pela Equação 14;  $\tau_{ref,i}$  = Transmissividade atmosférica para a radiação refletida pela superfície, dado pela Equação 15 e  $\rho_{a,i}$  = representa a fração da radiação refletida em direção ao espaço e/ou espalhada (distribuída em diversas direções). Dado pela Equação 16:

$$\tau_{inc,i} = C_1 * \exp \left[ \frac{C_2 P}{K_t \cos \theta} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \theta} \right] + C_5 \quad (14)$$

$$\tau_{ref,i} = C_1 * \exp \left[ \frac{C_2 P}{K_t \cos \eta} - \frac{C_3 W + C_4}{\cos \eta} \right] + C_5 \quad (15)$$

onde:  $\eta$  = ângulo de visão do sensor a bordo do satélite relativo a perpendicular a superfície horizontal, dado zero com ângulo de visão ao nadir e  $\frac{\pi}{2}$  para um ângulo de visão horizontal. O Landsat tem o ângulo de visão ao nadir, o que implica em  $\cos \eta = 1$ .  $K_t$  = Coeficiente de turbidez atmosférica, variando de  $0 < K_t \leq 1$ , sendo aplicado 1 para céu claro e 0 para turbidez extrema.

$$\rho_{a,i} = C_b (1 - \tau_{inc,i}) \quad (16)$$

onde:  $C_b$  = Correção das diferenças entre  $\tau_{in,b}$  e  $\tau_{out,b}$ .

Os coeficientes  $C_1, C_2, \dots, C_5$  e  $C_b$  para o Landsat 5 estão presentes em Allen et al. (2007a) e Tasumi et al. (2007), apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Coeficientes  $C_1$  a  $C_5$  e  $W_i$  (fração da radiação solar incidente) para imagens Landsat

Coeficientes	Banda1	Banda2	Banda3	Banda4	Banda5	Banda7
$C_1$	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
$C_4$	0,088	0,0437	0,0875	0,1355	0,0560	0,0155
$C_5$	0,0789	-1,2697	0,1014	0,6621	0,7757	0,639
$C_b$	0,640	0,310	0,286	0,189	0,274	-0,186
$W_i$	0,254	0,149	0,147	0,311	0,103	0,036

### 3.2.4 – Albedo da Superfície

Para cômputo do albedo corrigido, ou albedo da superfície, aplicou-se a equação:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n [\rho_{s,i} w_i] \quad (17)$$

onde  $w_i$  representa a fração da radiação solar incidente a superfície para cada banda espectral, apresentados na Tabela 4.

### 3.2.5 - Índices de Vegetação

O índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI) é definido pela razão da diferença pela soma das reflectividades dos canais do infravermelho próximo ( $\rho_{IV}$ ) e vermelho ( $\rho_V$ ) (Ponzoni & Shimabukuro, 2007), qual seja:

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (18)$$

que para o Landsat 5 correspondem respectivamente às reflectividades das bandas 3 e 4.

O cálculo do índice de área foliar se baseou em equação empírica obtida por Allen et al. (2002a):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (19)$$

onde o SAVI é definido como índice de vegetação com ajuste do solo, proposto por Huete (1988), dado por:

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_4 - \rho_3)}{(L + \rho_4 + \rho_3)} \quad (20)$$

onde L é uma constante, encontrando bons resultados quando utilizado valor igual a 0,3.

### 3.2.6– Emissividades

De acordo com Allen et al. (2002a), as emissividades para um corpo negro ( $\varepsilon_{NB}$ ) e para a superfície ( $\varepsilon_o$ ) podem ser obtidas para NDVI > 0 e IAF < 3, segundo expressões:

$$\varepsilon_o = 0,95 + 0,01 * IAF \quad (21)$$

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331 * IAF \quad (22)$$

Sendo que para pixels com  $IAF \geq 3$ ,  $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_o = 0,98$ .

### 3.2.7- Temperatura da Superfície

No cômputo da temperatura da superfície –  $T_s$  foi utilizada a expressão:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB}K_1}{R_c} + 1\right)} \quad (23)$$

onde:  $K_1 = 607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$  e  $K_2 = 1260,56 \text{ K}$  são constantes de radiação relativos à banda termal do Landsat 5 –TM;  $R_c$  é a radiância termal da superfície corrigida através da radiância espectral monocromática da banda termal (6) do Landsat. Para condições de céu claro, típicas do semi-árido, o  $R_c = L_{\lambda,6}$ .

### 3.2.8 - Radiação de Onda Longa Emitida

Foi calculado conforme a expressão:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_o * \sigma * T_s^4 \quad (24)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) e  $T_s$  é a temperatura da superfície (K).

### 3.2.9 - Radiação de onda curta incidente

Para o cômputo da radiação de onda curta incidente aplicou-se a seguinte expressão:

$$R_{S\downarrow} = \frac{S * \cos \theta * \tau_{SW}}{d^2} \quad (25)$$

onde S é a constante solar ( $1367 \text{ Wm}^{-2}$ ),  $\theta$  é ângulo zenital solar,  $d^2$  é o inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e  $\tau_{SW}$  é a transmissividade atmosférica, computada como função da pressão (Equação 26) e da quantidade do vapor de água presente na atmosfera, mm (Equação 33), conforme a equação:

$$\tau_{SW} = 0,35 + 0,627 * \exp \left[ \frac{-0,00146 * P}{K_t \cos \theta_{hr}} - 0,075 \left( \frac{W}{\cos \theta_{hr}} \right)^{0,4} \right] \quad (26)$$

em que  $P$  = Pressão atmosférica;  $W$  = quantidade de vapor de água na atmosfera;  $K_t$  = coeficiente de turbidez,  $K_t = 1$  para céu claro e  $K_t = 0$  para extrema turbidez.

A pressão atmosférica pode ser calculada como função da altitude ( $z$ ):

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 * z}{293} \right)^{5,26} \quad (27)$$

A quantidade de vapor de água na atmosfera é função da pressão atmosférica e da pressão de vapor no ar ( $e_a$ ), calculada a partir de dados oriundos de uma estação meteorológica local.

$$W = 0,14 * e_a P_{ar} + 2,1 \quad (28)$$

### 3.2.10 - Radiação de onda longa incidente

A radiação de onda longa foi estimada pela seguinte expressão:

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a * \sigma * T_a^4 \quad (29)$$

onde:  $\varepsilon_a$ : é a emissividade atmosférica, dada pela Equação 36, calibrada para as condições experimentais.

### 3.2.11 - Balanço de radiação

O saldo ou balanço de radiação é computado pela relação entre o balanço de radiação de onda curta e de onda longa discutido no capítulo revisão de literatura, conforme a expressão:

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o)R_{L\downarrow} \quad (30)$$



### 3.3 - Calibração do algoritmo SEBAL/METRIC

Para o cômputo da radiação de onda longa incidente através do SEBAL/METRIC (Equação 29) é indispensável a determinação da emissividade atmosférica, com sua equação original apresentada por Bastiaanssen (1995) (Equação 31), que no oeste do Egito obteve para os coeficientes “a” e “b” valores, 1,08 e 0,265 respectivamente. No entanto, os coeficientes da emissividade atmosférica são intrínsecos a cada região, devendo ser computados. Allen et al.(2002a) determinaram esses coeficientes para a região semiárida de Idaho, EUA, encontrando valores iguais a 0,85 e 0,09, respectivamente e Teixeira et al.(2008a), no semiárido brasileiro, encontraram valores iguais a 0,942 e 0,103. Até então, os coeficientes de Allen et al. (2002a) têm sido utilizados para as condições semiáridas do Brasil e até mesmo para todo o território nacional.

$$\varepsilon_a = a * (-\ln\tau_{sw})^b \quad (31)$$

Onde:  $\tau_{sw}$  é a transmissividade atmosférica; “a” e “b” são coeficientes da equação.

Nesse processo de ajuste ou calibração, foram utilizados dados observados a superfície, sobre a cultura da cana-de-açúcar, para a bacia do Mogi Guaçu e em pomar banana para a bacia do Baixo Jaguaribe.

A seguir é apresentado o procedimento de determinação dos coeficientes da emissividade.

A partir dos dados de latitude, longitude, dia sequencial do ano, temperatura do ar e radiação de onda longa incidente a superfície foram determinados por “regressão linear” e pelo método de “tentativa-erro” os coeficientes da emissividade. Neste último, fez-se variar os coeficientes “a” e “b” (Equação 31), sendo a seleção destes função dos menores erros. Para tanto, foram utilizados os erros médio, absoluto e a relação entre estes (erro médio x absoluto). Os coeficientes foram gerados com uma precisão de 3 casas decimais, no intuito de minimizar o erro.

Para calibração na Bacia do Mogi Guaçu foram utilizados 291 dias de dados coletados a cada 0,5 hora sobre a cultura da cana-de-açúcar, o que implica em um total de quase 15.000, e em seguida aplicados a uma planilha eletrônica desenvolvida aqui para este fim. Para o semiárido do Nordeste foram utilizados 359 dias de dados coletados em intervalos de tempo variados, de 10 min, 20 min ou 30 min.

A transmissividade atmosférica para fins de calibração, foi calculada pela definição (Equação 32), como uma relação entre as radiações de onda curta incidente a superfície ( $R_{S\downarrow}$ ) e no topo da atmosfera ( $R_{S\downarrow TOA}$ ), integradas para o intervalo de tempo de armazenamento dos dados (0,1667, 0,333 ou 0,5 hora), variando de acordo com o ângulo horário solar ou interpolada para o momento da passagem do satélite, produzindo dados instantâneos.

$$\tau_{swatm} = \frac{R_{S\downarrow}}{R_{S\downarrow TOA}} \quad (32)$$

A radiação no topo da atmosfera foi estimada em função da constante solar corrigida pelo fator de excentricidade da órbita terrestre, conforme a Equação 33, sendo integrada entre os ângulos horários respectivos aos intervalos entre cada tomada de dados a superfície (Equação 34).

$$R_{S\downarrow TOA} = \frac{S * \cos \theta}{d^2} \quad (33)$$

$$\int_{\omega_1}^{\omega_2} R_{S\downarrow TOA} = \left[ \frac{12 * S}{\pi * d^2} ((\omega_2 - \omega_1)(\sin \varphi \sin \delta) + (\sin \omega_2 - \sin \omega_1)(\cos \varphi \cos \delta)) \right] * 60 * I \quad (34)$$

onde  $\omega_2$  e  $\omega_1$  são ângulos horários solar a determinados instantes;  $S$  é a constante solar ( $0,082 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{min}^{-1}$ ) e  $I$  o intervalo de tempo entre os instantes 1 e 2.

A determinação dos ângulos horários instantâneos foi realizada conforme o manual da FAO (Allen et al., 1998), dados por:

$$\omega_1 = \omega - \frac{\pi * I}{24} \quad (35)$$

$$\omega_2 = \omega + \frac{\pi * I}{24} \quad (36)$$

em que  $\omega$  é o ângulo horário solar no momento em que ocorre o ponto médio do período considerado, determinado por:

$$\omega = \frac{\pi}{12} [(t + 0,06667(L_z - L_m) + S_c) - 12] \quad (37)$$

onde:  $t$  é o tempo médio para o período considerado;  $L_z$  é a longitude do centro da zona do tempo local (graus a oeste de Greenwich);  $L_m$  a longitude da zona de medição (graus a oeste de Greenwich) e  $S_c$  é a correção estacional para o tempo solar:

$$S_c = 0,1645 \operatorname{sen}(2DJ) - 0,1255 \operatorname{cos}(DJ) - 0,025 \operatorname{sen}(DJ) \quad (38)$$

Finalmente, a emissividade atmosférica para o processo de calibração foi determinada pela expressão:

$$\varepsilon_a = \frac{R_{OLi}}{\sigma * T_{ar}^4} \quad (39)$$

onde  $R_{OLi}$  é a radiação de onda longa incidente observada.

Os 10 últimos dias de dados foram utilizados para validação dos coeficientes obtidos anteriormente, sendo avaliados para tanto o erro médio (EM), absoluto médio (EAM) e o erro quadrático médio (RMSE) para a emissividade ( $E_a$ ) e para a radiação de onda longa incidente (RLinc), comparados posteriormente aos coeficientes determinados por Allen et al. (2000), Teixeira et al. (2008a) e Bastiaansen (1995), assim como aos dados observados.

Determinados estes coeficientes, o algoritmo SEBAL/METRIC foi aplicado a imagens TM - Landsat 5 para o cômputo dos componentes do balanço de radiação para as bacias do Mogi Guaçu e Baixo Jaguaribe.

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 - Identificação dos alvos de estudo

A imagem visualizada na Figura 4 revela a bacia hidrográfica do Mogi Guaçu , com destaque sobre os alvos bioma cerrado, no Parque Estadual Vassununga e na Fazenda São José do Pulador da Usina Santa Rita, em área cultivada com a cultura da cana-de-açúcar. A imagem é apresentada em uma composição falsa cor RGB formada pelos canais 4, 3 e 2 do Landsat TM – 5. Mesma composição foi aplicada a imagem da bacia do Baixo Jaguaribe (Figura 5), com destaque sobre o cultivo de bananeiras irrigadas.

As áreas de coloração vermelha representam superfícies vegetadas com índice de vegetação proporcional a tonalidade da coloração. As diferentes tonalidades de verde figuram áreas também vegetadas, mas com menor desenvolvimento vegetativo, característico da vegetação nativa. As de coloração azul claro (cyan) revelam áreas de solo exposto.

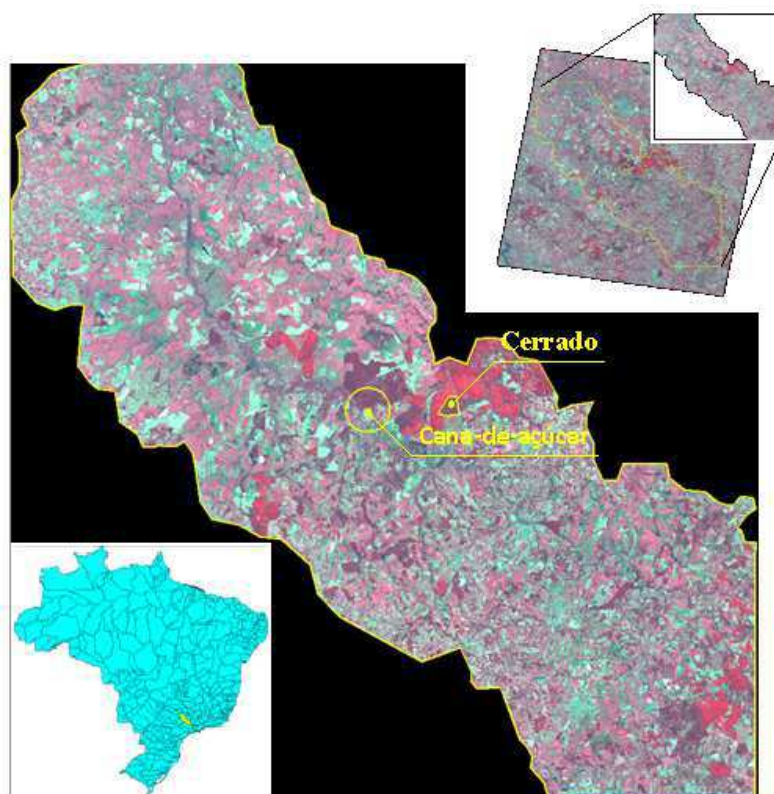


Figura 4: Imagem TM – Landsat 5 em composição falsa cor RGB (red, green and blue) das bandas 2, 3 e 4 referente à área de estudo, com os alvos bioma cerrado e área cultivada com cana-de-açúcar

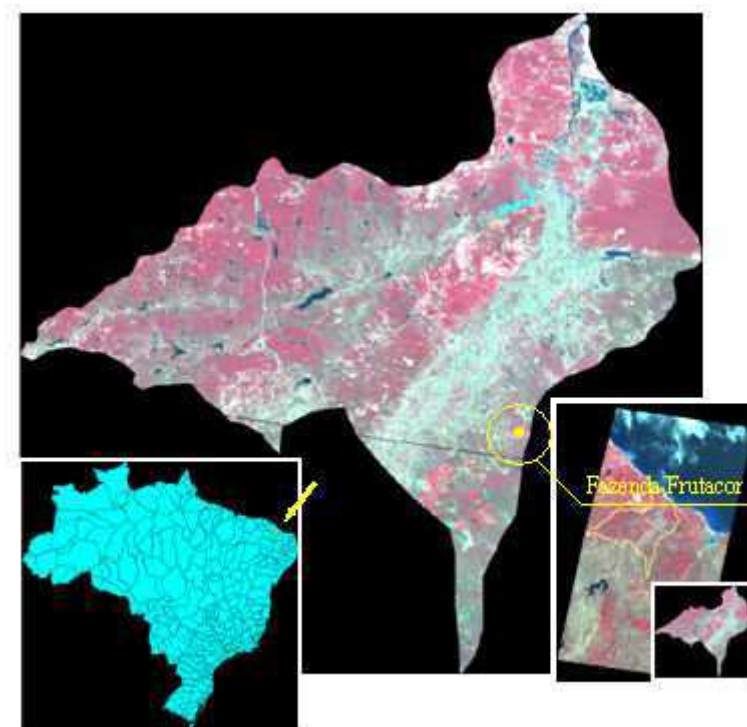


Figura 5: Imagem TM – Landsat 5 em composição falsa cor RGB (red, green and blue) das bandas 2, 3 e 4 referente à bacia do Baixo Jaguaribe, com a área cultivada com Bananeiras na Fazenda Frutacor

## 4.2 - Calibração do Algoritmo SEBAL/METRIC

### 4.2.1 - Condições de clima subtropical-úmido do Brasil

O algoritmo SEBAL/METRIC foi desenvolvido para o cômputo dos componentes do balanço de energia para dia de céu claro. Sua calibração foi efetuada para o semiárido do Egito (Bastiaansen, 1995), para o semiárido dos EUA (Allen et al., 2000) e para o semiárido de Brasil na região de Petrolina – PE (Teixeira et al., 2008a). Sua aplicação em regiões subtropicais úmidas é atrelada a uma grande variabilidade das condições atmosféricas, o que torna difícil sua calibração.

Foram utilizados dois métodos para estimativa dos coeficientes da emissividade atmosférica: regressão linear e tentativa-erro com seleção dos coeficientes baseada no erro médio, erro absoluto médio e na relação entre o erro médio e o erro absoluto médio, sendo posteriormente comparados com valores dos coeficientes sugeridos por Allen et al. (2000) e Bastiaansen (1995). Para tanto, foram utilizados dados instantâneos e

integrados para o intervalo de tempo entre as tomadas das médias dos dados pelo sistema de aquisição de dados.

Na Tabela 5 observa-se que o erro médio e médio absoluto para emissividade e radiação de onda longa incidente apresentou melhores resultados para os coeficientes sugeridos para a região de Idaho por Allen et al. (2000) quando comparados aos coeficientes de Bastiaansen (1995) e Teixeira et al. (2008a), para o oeste do Egito, aplicados as condições atmosféricas do clima subtropical-úmido para região de São Paulo, na bacia do Mogi Guaçu. O erro absoluto médio (EAM) sobre a radiação de onda longa incidente em relação aos dados observados obtido por estes coeficientes foram respectivamente iguais a 4,7%, 15,3% e 4,9%.

Para o primeiro método analisado, o de regressão linear a partir dos dados instantâneos, observa-se na Tabela 5 um EM sobre a radiação de onda longa incidente observada inferior aos obtidos por todos os coeficientes analisados. No entanto, considerando o erro absoluto, que analisa apenas os desvios em relação às observações, desprezando o sentido destes desvios, observaram-se resultados também satisfatórios, mas superiores aos coeficientes determinados por Allen et al. (2000) para a região de Idaho nos EUA.

Para o método de regressão linear a partir dos dados integrados para o intervalo de tempo entre as coletas de dados, foram encontrados os coeficientes 0,817 e 0,135 iguais a “a” e “b”, respectivamente. O erro médio obtido após a filtragem dos resultados sobre a emissividade atmosférica instantânea, assim como sobre a RLinc instantânea, foram superiores aos coeficientes sugeridos por Allen et al. (2000) e bem próximos aos encontrados por Teixeira et al. (2008a) para a região de Petrolina, Brasil (Tabela 5).

Os piores resultados na análise do EAM e do EM em relação a emissividade atmosférica e radiação de onda longa observados foram alcançados pelos coeficientes obtidos pelo método tentativa-erro como função do erro absoluto médio sobre a emissividade atmosférica. Porém, quando a seleção se baseou na relação entre o EM e EAM sobre a emissividade atmosférica foram obtidos os melhores resultados para o EAM sobre ambas as variáveis em relação aos valores observados (Tabela 5).

Com um erro sobre a radiação de onda longa incidente observada de 3,3%, inferior aos coeficientes determinados por Allen et al. (2000) na região de Idaho, os coeficientes 0,014 e 0,820 iguais a “a” e “b”, respectivamente podem ser considerados

os melhores coeficientes da equação sugerida por Bastiaanssen (1995), para estimativa da emissividade atmosférica no cálculo da radiação de onda longa incidente para a região de clima subtropical úmido vigentes na bacia do Mogi-Guaçu, necessitando de uma análise estatística para sua comprovação (Tabela 5).

Tabela 5: Coeficientes da emissividade por método de determinação para a bacia do Mogi Guaçu e erro médio sobre emissividade atmosférica e radiação de onda longa incidente para os dias utilizados no processo de validação (n = 5527)

Métodos de ajuste	Coef.		Emissividade		Rad_Lon_inc		Características dos Coeficientes
	b	a	EM %	EAM %	EM %	EAM %	
Allen	0,090	0,850	-8,772	11,416	-1,704	4,656	Subestima a Ea e Superestima a Rlinc
Bastiaansen	0,265	1,080	4,878	20,518	13,960	15,277	Superestima a Ea e a Rlinc
Teixeira	0,103	0,942	0,367	15,087	8,165	8,606	Superestima a Ea e a Rlinc
Reg_Dados Inst.	0,108	0,871	-7,507	11,628	-0,259	4,871	Subestima a Ea e a Rlinc
Reg_Dados Integ.	0,135	0,817	-14,645	15,354	-7,794	8,872	Subestima a Ea e a Rlinc
Tent_Erro (EAM)	0,150	0,812	-15,914	16,514	-9,088	10,064	Subestima a Ea e a Rlinc
Tent_Erro (EM*EAM)	0,014	0,820	-7,839	10,025	-1,070	3,286	Subestima a Ea e a Rlinc

Na Tabela 5 são apresentadas características dos coeficientes da emissividade atmosférica obtida a partir da análise do EM sobre a emissividade atmosférica e radiação de onda longa incidente observados. Em geral, os coeficientes sugeridos por Bastiaansen (1995) e Teixeira et al. (2008a) superestimam os resultados quando aplicados às condições atmosféricas vigentes na bacia do Mogi Guaçu, com magnitude muito superior pelos coeficientes apresentados por Bastiaansen (1995). Os coeficientes resultantes dos métodos regressão linear e tentativa-erro subestimam os resultados, com destaque aos métodos da regressão linear a partir dos dados instantâneos e tentativa-erro baseado na seleção dos resultados como função da relação EM e EAM, com estimativas que tendem a neutralidade, uma vantagem na estimativa de valores diários, também observada para os coeficientes de Allen et al. (2000).

Na Tabela 6 são apresentados os resultados do erro sobre a radiação de onda longa incidente no momento da passagem do satélite em relação aos valores observados

nos dias imageados. Observam-se resultados semelhantes aos relatados anteriormente com exceção dos obtidos pelos coeficientes sugeridos por Bastiaanssen (1995). Destaque para os coeficientes de Allen et al. (2000), aos obtidos por regressão linear a partir de dados instantâneos e de tentativa-erro relacionando EM e EAM. Este último, com erros semelhantes aos observados na Tabela 5, ganhando mais uma vez destaque, apresentando o menor erro médio quadrático (RMSE).

Tabela 6: Erro percentual na estimativa da radiação de onda longa incidente como função da emissividade atmosférica e valores observados

	Coef. da Ea		Rad_ longa inc (W m <sup>-2</sup> )					Média	
			1/ago	14/jun	29/mai	11/abr	22/fev		
Allen	0,090	0,850	334,9	335,7	320,5	341,2	346,3	<b>335,7</b>	
Bastiaanssen	0,265	1,080	359,5	365,5	343,1	364,3	364,0	<b>359,3</b>	
Teixeira	1,103	0,942	366,5	367,8	350,7	373,3	378,4	<b>367,3</b>	
Reg_Dados Inst.	0,108	0,871	337,3	338,5	322,7	343,5	348,0	<b>338,0</b>	
Reg_Dados Integ.	0,135	0,817	308,2	310,1	194,8	313,6	317,0	<b>288,7</b>	
Tent_Erro (EAM)	0,150	0,812	302,0	304,1	288,7	307,1	310,0	<b>302,4</b>	
Tent_Erro (EM*EAM)	0,014	0,820	347,7	346,3	333,1	355,1	362,8	<b>349,0</b>	
<b>Observados</b>			<b>321,7</b>	<b>331,9</b>	<b>329,4</b>	<b>365,5</b>	<b>356,8</b>	<b>341,1</b>	
	Erro %								RMSE
Allen	0,090	0,850	4,1	1,1	2,7	6,6	2,9	<b>3,5</b>	13,9
Bastiaanssen	0,265	1,080	11,8	10,1	4,2	0,3	2,0	<b>5,7</b>	23,7
Teixeira	1,103	0,942	13,9	10,8	6,5	2,1	6,1	<b>7,9</b>	29,2
Reg_Dados Inst.	0,108	0,871	4,8	2,0	2,0	6,0	2,5	<b>3,5</b>	13,4
Reg_Dados Integ.	0,135	0,817	4,2	6,6	40,9	14,2	11,2	<b>15,4</b>	67,9
Tent_Erro (EAM)	0,150	0,812	6,1	8,4	12,4	16,0	13,1	<b>11,2</b>	41,0
Tent_Erro (EM*EAM)	0,014	0,820	8,1	4,3	1,1	2,8	1,7	<b>3,6</b>	14,4



#### 4.2.2 - Condições do clima Semiárido brasileiro

Para as condições do Semiárido do Brasil os coeficientes, por método de determinação, submetido à análise de erro (EM e EAM) em relação aos valores observados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Coeficientes da emissividade por método de determinação para a bacia do Baixo Jaguaribe e erro médio sobre emissividade atmosférica e radiação de onda longa incidente para os dias utilizados no processo de validação (n = 15271)

Métodos de ajuste	Coef. da Ea		Emissividade		Rad_Lon_inc		Características dos Coeficientes
	b	a	EM %	EAM %	EM %	EAM %	
Allen	0,090	0,850	-7,290	8,224	-7,290	8,224	Subestima a Ea e a Rlinc
Bastiaansen	0,265	1,080	10,776	23,102	10,776	23,102	Superestima a Ea e a Rlinc
Teixeira	0,103	0,942	2,176	8,153	2,176	8,153	Superestima a Ea e a Rlinc
Reg. Integ.	0,020	0,888	0,107	4,564	0,107	4,564	Superestima a Ea e a Rlinc
Reg_Inst.	0,050	0,899	-0,145	4,996	-0,145	4,996	Subestima a Ea e a Rlinc
Tent_Erro (EAM)	0,020	0,884	-0,344	4,553	-0,344	4,553	Subestima a Ea e a Rlinc
Tent_Erro (EM*EAM)	0,371	1,000	0,008	22,756	0,008	22,756	Neutro

Ao analisar-se a Tabela 7, se verifica que os coeficientes sugeridos por Allen et al. (2000) apresentam melhores resultados em relação aos sugeridos por Bastiaansen (1995). Quando comparados os resultados obtidos pelos coeficientes de Allen et al. (2000) aos de Teixeira et al. (2008a), observam-se grandes semelhanças em relação ao EAM, porém com melhores resultados para Teixeira et al. (2008a) no que se refere ao EM.

Os coeficientes obtidos pelos processos de regressões e os de tentativa-erro em função do EAM, apresentaram resultados muito próximos, com um EM sobre a radiação de onda longa incidente e sobre a emissividade atmosférica observada muito próxima de zero e um EAM inferior a 5%, revelando melhoria das estimativas do saldo de radiação e da emissividade atmosférica para a região da bacia do Baixo Jaguaribe, em relação aos coeficientes sugeridos por Allen et al. (2000) e Teixeira et al (2008a), com um EAM superior a 8% (Tabela 7).

Para os coeficientes obtidos pelo método tentativa-erro como função da relação entre o EM e EAM, observa-se um EM, em relação aos dados observados, muito próximo a zero. No entanto, como já explicado anteriormente, a sub e super-estimativa dos parâmetros tendem a neutralizar o valor médio, o que não ocorre com o EAM, que neste caso pode ser considerado elevado quando comparado aos demais resultados (Tabela 7). Os erros muito elevados impossibilitam a utilização destes coeficientes na estimativa da RLinc para a região.

Verifica-se ainda na Tabela 7 que as estimativas dos coeficientes de Allen et al. (2002), obtidos por regressão linear a partir dos dados instantâneos e tentativa-erro (EAM), subestimam a emissividade atmosférica e a radiação de onda longa incidente, com uma magnitude muito superior para Allen et al. (2000) e tendendo a neutralidade para os dois últimos citados. Os resultados obtidos por Bastiaanssen (1995), Teixeira et al. (2008a) e regressão linear obtida dos dados integrados para o intervalo de tempo entre sucessivas leituras superestima a emissividade e a radiação de onda longa incidente, com magnitude muito superior para Bastiaanssen (1995) e tendendo a neutralidade para a regressão para o período de tempo integrado. Os resultados obtidos por Teixeira et al. (2008a) e Allen et al. (2000) obtiveram magnitude semelhante. O mesmo ocorreu para os métodos em destaque (Tabela 7).

Na Tabela 8 são apresentados os resultados do erro sobre a radiação de onda longa incidente no momento da passagem do satélite em relação aos valores observados nos dias imageados na bacia do Baixo Jaguaribe. Observam-se resultados semelhantes aos relatados anteriormente, com exceção dos obtidos pelos coeficientes sugeridos por Bastiaanssen (1995), mesma ocorrência verificada na bacia do Mogi Guaçu. Destaque para os coeficientes obtidos por regressão linear e tentativa-erro (EAM), com erros inferiores aos apresentados na Tabela 7 e muito inferiores aos apresentados por Allen et al. (2000) e Teixeira et al. (2008a). Este último, tentativa-erro (EAM), ganhando destaque, apresentando o menor erro médio quadrático (RMSE) em relação a radiação de onda longa incidente observada.

Desta forma, pode-se inferir que os coeficientes da equação sugerida por Bastiaanssen (1995) para a determinação da emissividade atmosférica no cômputo da radiação de onda longa incidente iguais a 0,02 para multiplicador (“a”) e 0,884 para o expoente (“b”) são os mais adequados.

Tabela 8: Erro percentual na estimativa da radiação de onda longa incidente como função da emissividade atmosférica estimada e das observações

	Coef. da Ea		Rad. longa inc (W.m-2)				Média	Máx	RMSE
	b	a	1/ago	14/jun	29/mai				
Allen	0,090	0,850	333,4	339,9	345,5	<b>339,6</b>			
Bastiaansen	0,265	1,080	337,3	360,6	353,0	<b>350,3</b>			
Teixeira	0,103	0,942	363,3	371,6	376,8	<b>370,6</b>			
Reg. Integ.	0,020	0,888	381,6	381,6	393,9	<b>385,7</b>			
Reg_Inst.	0,050	0,899	371,5	374,6	384,1	<b>376,7</b>			
Tent_Erro (EAM)	0,020	0,884	379,9	379,9	392,1	<b>384,0</b>			
Tent_Erro (EM*EAM)	0,371	1,000	272,0	299,3	286,4	<b>285,9</b>			
<b>Observado</b>			<b>376,5</b>	<b>386,3</b>	<b>383</b>	<b>381,9</b>			
			Erro %						
Allen	0,090	0,850	11,4	12,0	9,8	11,1	12,0	<b>42,5</b>	
Bastiaansen	0,265	1,080	10,4	6,7	7,8	8,3	10,4	<b>32,1</b>	
Teixeira	0,103	0,942	3,5	3,8	1,6	3,0	3,8	<b>12,0</b>	
Reg. Integ.	0,020	0,888	1,4	1,2	2,8	1,8	2,8	<b>7,5</b>	
Reg_Inst.	0,050	0,899	1,3	3,0	0,3	1,5	3,0	<b>7,4</b>	
Tent_Erro (EAM)	0,020	0,884	0,9	1,7	2,4	1,6	2,4	<b>6,7</b>	
Tent_Erro (EM*EAM)	0,371	1,000	27,8	22,5	25,2	25,2	27,8	<b>96,3</b>	

### **4.3 - Validação dos Resultados do METRIC Aplicado a Imagens Landsat 5 - TM**

Visando uma maior segurança na sua aplicação o Algoritmo SEBAL/METRIC tem sido validado em diversas regiões. Bastiaanssen et al. (1998b) fizeram sua validação em região deserto-oásis em 9 de julho de 1991, na bacia do rio Heihe, na China, chegando a componentes do balanço de energia muito satisfatórios do ponto de vista de precisão. Bezerra (2006) e Bezerra et al. (2008) validaram os componentes do balanço de energia resultantes da aplicação do SEBAL para uma região de clima sub-úmido, na reserva florestal da Chapada do Araripe, localizada na cidade da Barbalha, inserida no estado do Ceará-Brasil, encontrando resultados também satisfatórios. Procedimento também realizado por Feitosa (2005), encontrando resultados considerados satisfatórios.

Os resultados do balanço de radiação foram obtidos para dois ambientes de acordo com as calibrações da equação da emissividade sugeridas por Allen et al. (2000) e aqui determinadas, sendo utilizados 2 pontos de coletas de dados para a bacia do Mogi Guaçu, sobre o cerrado e cana-de-açúcar e 1 ponto no Semiárido brasileiro, sobre a cultura da banana. Além destas calibrações são sugeridas, ao longo do estudo, equações para correção do albedo da superfície para as duas regiões em estudo.

#### **4.3.1 - Condições de clima subtropical-úmido do Brasil**

Os resultados do saldo de radiação para o clima subtropical úmido no momento da passagem do satélite são apresentados nas tabelas a seguir. Na Tabela 9 observa-se pouca diferenciação entre o erro absoluto médio sobre o saldo de radiação entre os coeficientes apresentados por Bastiaansen (1995) e os coeficientes obtidos no processo de calibração. No entanto, os resultados apresentados pelos coeficientes determinados por Allen et al. (2000) apresentaram os melhores resultados para estimativa da radiação de onda longa incidente, com erros inferiores a 4%. Esses resultados mostram a precisão do SEBAL/METRIC na estimativa deste parâmetro à superfície, não necessitando de calibrações. A grande variabilidade climática na região torna difícil o processo de calibração, necessitando de uma maior quantidade de dados, que contemple algumas repetições a cada estação climática homogênea para a obtenção de coeficientes de calibração mais precisos, possibilitando melhoria na estimativa deste componente.

Os coeficientes determinados por Teixeira et al. (2008a) para o Semiárido do Brasil apresentaram resultados insatisfatórios em termos de melhoria de precisão, comparado com os resultados apresentados pela aplicação do coeficientes determinados por Allen et al. (2000), mostrando variações impostas pelas condições climáticas na precisão da estimativa deste componente, mostrando a peculiaridade destes coeficientes a cada região e evidenciando a elevada precisão do algoritmo SEBAL/METRIC na estimativa da radiação de onda longa incidente para esta região.

Os resultados apresentados na Tabela 9 diferem dos observados na Tabela 6, consequência da estimativa da transmissividade atmosférica mediante o SEBAL/METRIC para estimativa da emissividade atmosférica e da radiação de onda longa incidente apresentada na Tabela 9. Resultado que mostra a precisão no cômputo da transmissividade pelo METRIC aplicado as condições ambientais vigentes na bacia do Mogi Guaçu.

Tabela 9: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda longa incidente sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat5

		<b>Rad. Longa Incidente W m<sup>-2</sup></b>								
	<b>Coef.da Emiss.</b>	<b>1/ago</b>	<b>14/jun</b>	<b>29/mai</b>	<b>11/abr</b>	<b>22/fev</b>	<b>Média</b>			
Allen	0,09	0,85	333,52	329,75	327,99	357,48	351,67	<b>340,08</b>		
Bastiaansen	0,265	1,080	348,83	349,68	345,66	373,93	363,39	<b>356,30</b>		
Teixeira	1,103	0,942	364,31	360,57	358,48	390,49	383,79	<b>371,53</b>		
Tent_Erro (EM*EAM)	0,014	0,820	350,12	344,10	343,19	375,30	371,12	<b>356,77</b>		
<b>Observados</b>			<b>321,7</b>	<b>331,9</b>	<b>329,4</b>	<b>365,5</b>	<b>356,8</b>	<b>341,06</b>		
		<b>Erro %</b>							<b>RMSE</b>	
Allen	0,09	0,85	3,67	0,65	0,43	2,19	1,44	<b>1,68</b>	6,88	
Bastiaansen	0,265	1,080	8,43	5,36	4,93	2,31	1,85	<b>4,58</b>	16,91	
Teixeira	1,103	0,942	13,25	8,64	8,83	6,84	7,56	<b>9,02</b>	31,10	
Tent_Erro (EM*EAM)	0,014	0,820	8,83	3,68	4,19	2,68	4,01	<b>4,68</b>	17,02	

Na Tabela 10 observa-se o erro na estimativa do albedo sobre a cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu para os dias imageados em 2005. Verifica-se um erro médio absoluto do albedo estimado pelo METRIC de 12,2%, com máximo de aproximadamente 20% para o dia 11 de abril desse ano. Uma grande vantagem do METRIC é a possibilidade e facilidade de aplicação de correções na estimativa das

variáveis que compõem o balanço de radiação a superfície, precisando apenas de mais de um ponto de tomada de dados na mesma imagem gerando novos coeficientes de regressão linear.

Na Tabela 11 observa-se o erro na estimativa da radiação de onda curta incidente mediante o METRIC aplicada a imagens TM – Landsat 5, com EAM igual a 4,8% e máximo inferior a 7%, para o dia 14 de junho. Sobre a radiação de onda longa emitida pela superfície o EAM encontrado foi de 6,3%, que provavelmente são decorrentes de erros na estimativa da temperatura da superfície, variável de difícil determinação (Tabela 12).

Analisando a Figura 6, que apresenta o comportamento diário da radiação de onda curta incidente para os alvos cana-de-açúcar e Cerrado, verifica-se uma diferença considerável entre os valores ao longo do dia, o que não é justificável devido a proximidade entre os alvos. Essa variação pode ser atribuída à provável presença de impurezas sobre a cúpula do piranômetro, o que explicaria o elevado erro encontrado na estimativa da radiação de onda curta a superfície sobre a cultura da cana-de-açúcar para o dia 14 de junho (DJ=165). Desta forma, as estimativas dos componentes do balanço de radiação em função do METRIC aplicado a imagens de satélite para os dias onde verifica-se elevado erro podem ser considerados mais confiáveis que os dados observados.

Tabela 10: Análise dos resultados da estimativa do albedo da superfície sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5

	<b>1/ago</b>	<b>14/jun</b>	<b>29/mai</b>	<b>11/abr</b>	<b>22/fev</b>	<b>Média</b>
Metric	0,185	0,199	0,188	0,163	0,163	<b>0,18</b>
<b>Observados</b>	<b>0,187</b>	<b>0,177</b>	<b>0,169</b>	<b>0,203</b>	<b>0,194</b>	<b>0,19</b>
Erro Absoluto %						
Metric	1,15	12,06	11,23	19,97	16,09	<b>12,21</b>

Tabela 11: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda curta incidente a superfície ( $W.m^{-2}$ ) sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5

	<b>1/ago</b>	<b>14/jun</b>	<b>29/mai</b>	<b>11/abr</b>	<b>22/fev</b>	<b>Média</b>
Metric	592,23	535,57	567,39	706,99	827,84	<b>646,00</b>
Observados	560,98	501,4	545,1	676,7	800,2	<b>616,88</b>
Erro %						
Metric	5,57	6,82	4,09	4,48	3,47	<b>4,89</b>

Tabela 12: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda longa emitida pela superfície ( $W m^{-2}$ ) sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5

	<b>1/ago</b>	<b>14/jun</b>	<b>29/mai</b>	<b>11/abr</b>	<b>22/fev</b>	<b>Média</b>
Metric	433,1	429,3	414,0	432,8	437,8	429,4
<b>Observados</b>	<b>455,3</b>	<b>464,5</b>	<b>444,8</b>	<b>472,9</b>	<b>474,1</b>	462,32
Erro %						
Metric	4,88	7,57	6,91	4,48	7,66	6,30

Na Tabela 13 verifica-se o erro na estimativa do saldo de radiação sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu para os dias imageados. Todos os coeficientes apresentaram valores muito próximos com destaque aos coeficientes sugeridos por Allen et al. (2000) para a região de Idaho nos EUA com o menor EAM e RMSE, apresentado erro máximo sobre o saldo de radiação inferior a 4%. Resultados que podem ser considerados muito satisfatórios, considerando que o erro instrumental na obtenção dos valores observados é de 2,5% com instrumentos calibrados e que os resultados abrange uma grande cobertura espacial.

Tabela 13: Análise dos resultados da estimativa do saldo de radiação a superfície ( $W m^{-2}$ ) sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5

	<b>Coef. da Ea</b>		<b>1/ago</b>	<b>14/jun</b>	<b>29/mai</b>	<b>11/abr</b>	<b>22/fev</b>	<b>Média</b>	
Allen	0,090	0,850	368,1	313,6	358,5	503,3	593,4	<b>485,07</b>	
Bastiaansen	0,265	1,080	348,8	332,6	375,3	519,1	604,7	<b>499,70</b>	
Teixeira	0,103	0,942	364,3	342,9	387,5	535,0	624,4	<b>515,63</b>	
Tent_Erro (EM*EAM)	0,014	0,820	350,1	327,3	373,0	520,4	612,2	<b>501,87</b>	
<b>observados</b>			<b>354,9</b>	<b>321,45</b>	<b>356,82</b>	<b>486,48</b>	<b>574,64</b>	<b>472,65</b>	
Erro %									RMSE
Allen	0,090	0,850	3,72	2,44	0,47	3,46	3,26	<b>2,40</b>	<b>13,22</b>
Bastiaansen	0,265	1,080	1,72	3,47	5,18	6,71	5,23	<b>5,71</b>	<b>22,23</b>
Teixeira	0,103	0,942	2,65	6,67	8,60	9,97	8,66	<b>9,08</b>	<b>35,55</b>
Tent_Erro (EM*EAM)	0,014	0,820	1,35	1,82	4,53	6,97	6,54	<b>6,01</b>	<b>24,00</b>

Na Tabela 14 são apresentadas equações para obtenção do albedo da superfície a partir da equação sugerida por Bastiaansen (1995), onde o albedo é dado pela relação entre a diferença do albedo no topo da atmosfera e o albedo atmosférico (a) e o

quadrado a transmissividade atmosférica (b), obtidos por regressão linear a cada dia imageado, o que reduz o erro na estimativa do albedo a 0 (zero).

A aplicação destas correções ao saldo de radiação pode ser observado na Tabela 15, com uma visível diferenciação advindo dessa correção no RMSE, reduzido a quase 10%. Essa redução, além de melhorar a estimativa do saldo de radiação a superfície, permite a utilização dos dados de albedo da superfície para uma grande cobertura espacial a um erro mínimo e igual ao erro instrumental obtido de forma pontual nos locais de tomadas de dados.

Tabela 14: Equações resultantes de regressão linear para a estimativa do albedo pelo METRIC sobre a cana de açúcar na bacia do Mogi Guaçu

	<b>a</b>	<b>b = <math>\tau_w^2</math></b>	<b>Estimativa do Albedo</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>1/ago</b>	0,019	0,573	0,187	0,00
<b>14/jun</b>	-0,048	0,991	0,177	0,00
<b>29/mai</b>	-0,034	0,937	0,169	0,00
<b>11/abr</b>	0,037	0,381	0,203	0,00
<b>22/fev</b>	0,034	0,434	0,194	0,00

Tabela 15: Análise dos resultados da estimativa do saldo de radiação a superfície ( $W.m^{-2}$ ) sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Mogi Guaçu mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5

	<b>1-ago</b>	<b>14-jun</b>	<b>29-mai</b>	<b>11-abr</b>	<b>22-fev</b>	<b>Média</b>	
<b>Metric</b>	366,8	325,1	369,3	474,6	567,5	<b>470,47</b>	
<b>Observado</b>	<b>354,9</b>	<b>321,45</b>	<b>356,82</b>	<b>486,48</b>	<b>574,64</b>	<b>472,65</b>	
	<b>Erro Absoluto %</b>						<b>RMSE</b>
<b>Metric</b>	3,36	1,12	3,50	2,45	1,24	<b>2,39</b>	<b>10,03</b>

Bezerra (2006) e Bezerra et al. (2008) encontraram no processo de validação um erro que variou de 3,3% a 10,74%, considerando os resultados muito satisfatórios na região da Chapada do Araripe, Nordeste do Brasil. Singh et al. (2008) encontraram um coeficiente de correlação para o Saldo de Radiação de 0,76 no centro-sul de Nebraska, Estados Unidos. Os resultados encontrados mostram a operacionalidade e precisão do SEBAL/METRIC aplicado às condições climáticas vigentes na bacia do Mogi Guaçu. Os resultados revelam também a possibilidade e facilidade de correções do algoritmo para os diferentes ambientes aos quais não foram calibrados. Neste caso, no entanto, é



necessário um maior número de repetições que possa abranger todas as estações climáticas anuais homogêneas de forma a obter diferentes coeficientes representativos a cada estação e conseqüente melhoria nas estimativas dos componentes do balanço de radiação a superfície.

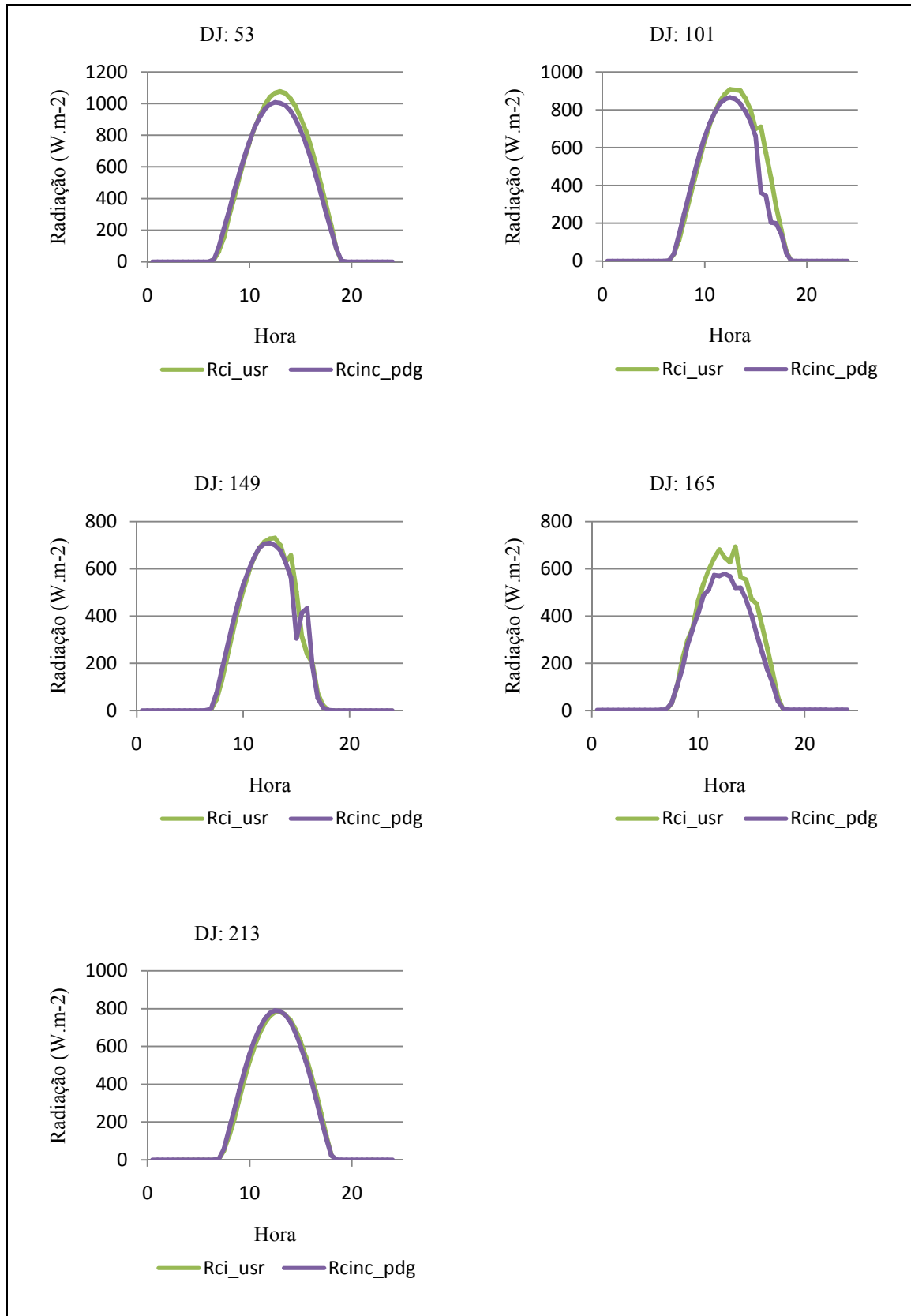


Figura 6: Comportamento da radiação de onda curta incidente observada para os alvos Cerrado e cana-de-açúcar inseridos na bacia do Mogi Guaçu nos dias imageados

### 4.3.2-Condições de clima semiárido brasileiro

Nas tabelas a seguir são apresentados os resultados dos componentes do balanço de radiação a superfície, sobre um pomar de bananeiras irrigado na bacia do Baixo Jaguaribe, inserida no Semiárido brasileiro, mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5.

Observa-se na Tabela 16 que o erro absoluto máximo observado na estimativa da radiação de onda longa incidente pelo METRIC calibrado foi de 2,45% para o dia 24/08/06, sendo inferior no mês de julho, 1,22%. Para o METRIC, utilizando os coeficientes determinados por Allen et al. (2000) o erro variou de 9,45% a 13,28%. O menor EAM foi encontrado para os resultados apresentados pelo METRIC com os coeficientes da emissividade calibrado para as condições locais, 1,88%. O mesmo ocorre na análise do erro médio quadrático. A aplicação dos coeficientes determinados por Teixeira et al. (2008) também resultaram em resultados muito satisfatórios na estimativa da radiação de onda longa incidente.

Tabela 16: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda longa incidente sobre a cultura da cana-de-açúcar na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM - Landsat 5

	Coef. da Ea		Rad. Longa Incidente ( $W m^{-2}$ )				Média	RMSE
			22/jul	8/ago	24/ago			
Allen	0,09	0,85	338,2	335,0	346,8	<b>340,00</b>		
Bastiaansen	0,265	1,080	351,6	345,5	357,0	<b>351,37</b>		
Teixeira	1,103	0,942	369,2	365,6	378,4	<b>371,07</b>		
Tent. Erro (EAM)	0,02	0,884	381,1	378,7	392,4	<b>384,07</b>		
<b>Observados</b>			<b>376,5</b>	<b>386,3</b>	<b>383</b>	<b>381,93</b>		
			Erro %					
Allen	0,09	0,85	10,17	13,28	9,45	<b>10,97</b>	42,46	
Bastiaansen	0,265	1,080	6,61	10,56	6,79	<b>7,99</b>	31,41	
Teixeira	1,103	0,942	1,93	5,37	1,19	<b>2,83</b>	12,96	
Tent. Erro (EAM)	0,02	0,884	1,22	1,97	2,45	<b>1,88</b>	7,47	

Tendo-se em vista que o erro instrumental advindo das medições com instrumentos calibrados é da ordem de 2,5%, verifica-se que o erro na estimativa desse componente através do SEBAL/METRIC está contido no erro instrumental das medições, podendo-se admitir que o SEBAL/METRIC calibrado aplicado a imagens TM – Landsat 5 representa fielmente a distribuição espacial da radiação de onda longa incidente para a região da Bacia do Baixo Jaguaribe, no Semiárido brasileiro.

Na Tabela 17 pode ser visualizado o EAM sobre a estimativa do albedo sobre a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe. Observa-se o EAM próximo a 3% apresentando erro absoluto máximo no dia 22/07/2006. Na Tabela 18 verifica-se o erro sobre a radiação de onda curta incidente em relação aos dados observados com EAM inferior a 5%. A radiação de onda longa emitida apresentou um EAM próximo a 9% (Tabela 19), sendo máximo em 08/08/06, mas tendo pouca representatividade sobre erro no saldo de radiação devido a sua pequena magnitude comparada a radiação de onda curta incidente. Esse erro pode ser atribuído a estimativa da temperatura da superfície, que como discutido anteriormente, é de difícil determinação.

Tabela 17: Análise dos resultados da estimativa do albedo da superfície sobre a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM - Landsat 5

	<b>22/jul</b>	<b>8/ago</b>	<b>24/ago</b>	<b>Média</b>
Metric	0,172	0,163	0,168	<b>0,17</b>
Observados	0,162	0,164	0,163	<b>0,16</b>
<b>Erro %</b>				
Metric	6,17	0,61	3,07	<b>3,28</b>

Tabela 18: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda curta incidente a superfície ( $W m^{-2}$ ) sobre a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5

	<b>22/jul</b>	<b>8/ago</b>	<b>24/ago</b>	<b>Média</b>
Metric	747,07	788,32	829,15	<b>788,18</b>
Observados	722,70	747,50	792,30	<b>754,17</b>
<b>Erro %</b>				
Metric	3,37	5,46	4,65	<b>4,49</b>

Tabela 19: Análise dos resultados da estimativa da radiação de onda longa emitida pela superfície ( $W m^{-2}$ ) sobre a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5

	<b>22/jul</b>	<b>8/ago</b>	<b>24/ago</b>	<b>Média</b>
Metric	426,7	423,5	438,2	<b>429,47</b>
Observados	474,16	476,1	470,8	<b>473,69</b>
<b>Erro %</b>				
Metric	10,01	11,05	6,92	<b>9,33</b>

Na Tabela 20 verifica-se o erro na estimativa do saldo de radiação sobre a cultura da bananeira na bacia do Baixo Jaguaribe para os dias imageados. Observa-se

que a aplicação dos coeficientes da emissividade apresentados por Allen et al. (2000) resultou em um EAM inferior a 5%, podendo ser considerado muito satisfatório. Embora os coeficientes determinados neste estudo tenham apresentado os melhores resultados na estimativa da radiação de onda longa incidente, quando analisado o erro sobre o saldo de radiação este apresentou os piores resultados, expondo a necessidade de calibração das demais equações para melhoria dos resultados da estimativa do saldo de radiação a superfície.

Tabela 20: Análise dos resultados da estimativa do saldo de radiação a superfície ( $W.m^{-2}$ ) sobre a cultura da banana na bacia do Baixo Jaguaribe mediante o METRIC aplicado a imagens TM – Landsat 5

	Coef. da Ea		22/jul	8/ago	24/ago	Média	
Allen	0,090	0,850	518,90	559,50	586,10	<b>554,83</b>	
Bastiaansen	0,265	1,080	531,80	569,70	595,90	<b>565,80</b>	
Teixeira	0,103	0,942	548,93	588,98	616,51	<b>584,81</b>	
Tent. Erro (EAM)	0,020	0,884	560,40	601,70	630,00	<b>597,37</b>	
<b>Observados</b>			<b>517,30</b>	<b>536,97</b>	<b>543,50</b>	<b>532,59</b>	
			Erro %				RMSE
Allen	0,090	0,850	0,31	4,20	7,84	<b>4,11</b>	13,05
Bastiaansen	0,265	1,080	2,80	6,10	9,64	<b>6,18</b>	20,68
Teixeira	0,103	0,942	6,11	9,69	13,43	<b>9,74</b>	35,15
Tent. Erro (EAM)	0,020	0,884	8,33	12,05	15,92	<b>12,10</b>	44,90

#### 4.4- Componentes do Balanço de Radiação sobre as Bacias Hidrográficas do Mogi Guaçu e do Baixo Jaguaribe

As variáveis atmosféricas analisadas com a utilização de um modelo de elevação digital para os dias 22/02/05, 11/04/05, 29/05/05, 14/06/05 e 01/08/05 na bacia do Mogi Guaçu e 23/07/06, 08/08/06 e 24/08/06 na bacia do Baixo Jaguaribe são discutidos separadamente a seguir e podem ser visualizados nas Figuras 7 a 34. O albedo ( $\alpha$ ), a temperatura da superfície ( $T_s$ ) e o saldo de radiação ( $R_n$ ) foram determinados para os alvos cerrado, cana-de-açúcar e banana, apresentados nas Figuras 5 e 6.

##### 4.4.1-Albedo

Nas Figuras 7 a 14 pode ser visualizada a variação do albedo da superfície sobre a bacia hidrográfica do Mogi Guaçu para os dias analisados.

Estes resultados revelam um albedo médio sobre a bacia do Mogi Guaçu em torno de 13%, variando de aproximadamente 10% a 13% dependendo do período do ano, com valores médios mais baixos para 29/05/05 e mais elevados para 22/02/05.

De uma forma geral, as superfícies vegetadas apresentam albedos mais elevados que áreas com exposição do solo em virtude da maior reflexão da radiação na faixa do infravermelho próximo. No entanto, o albedo de uma superfície é influenciado diretamente pela coloração da vegetação, do solo e da umidade do solo, sendo a interferência destes dois últimos denominada de efeito background. A maior incidência de precipitação sobre a região é acompanhada de um maior desenvolvimento vegetativo e conseqüentemente menores valores de albedo quando comparados a períodos secos. No entanto, é preciso entender as características da dinâmica do desenvolvimento morfológico do bioma cerrado para uma maior interpretação dos resultados. O que pode ser observado é que o albedo apresenta valores maiores para o fim do período chuvoso (22 de fevereiro) quando comparados com o período seco (14 de junho).

Para o Parque Nacional Vassuanunga, caracterizado pelo bioma cerrado, verifica-se que o albedo médio varia na faixa de 7% a 13% com mínimo no fim do mês de maio e máximo no mês de fevereiro, seguindo o comportamento verificado para toda a bacia, resultados que podem ser visualizados nas Figuras 7 a 11. A superfície o albedo médio verificado para o período foi de aproximadamente 12%.

O mesmo é verificado para cana-de-açúcar (Figuras 7 a 11), que apresentou um albedo estimado para os dias imageados entre 10% e 22%. Os valores médios observados se apresentam entre essa faixa, situando-se em torno de 18%.

A estimativa do albedo resultante da aplicação do METRIC sobre a bacia do Baixo Jaguaribe pode ser visualizado nas Figuras 12 a 14. Observa-se uma leve redução do albedo observado logo após o fim do período de chuvas na região (23/07) em relação aos dias imageados subsequentes. Durante o período o albedo médio da bacia situa-se na faixa de 10 a 16%, tendendo a valores máximos no dia 23/07 reduzindo posteriormente.

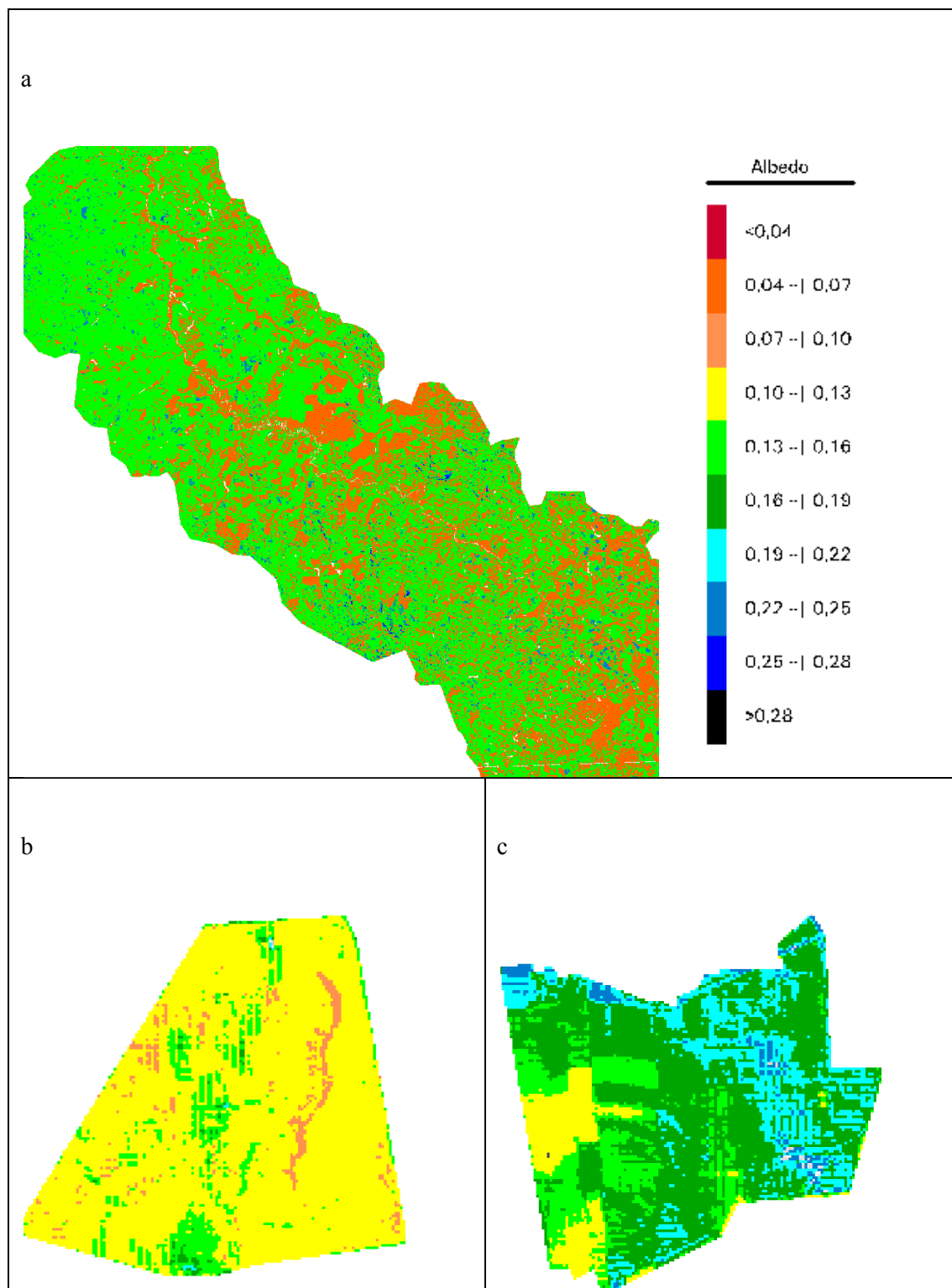


Figura 7: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 22/02/05

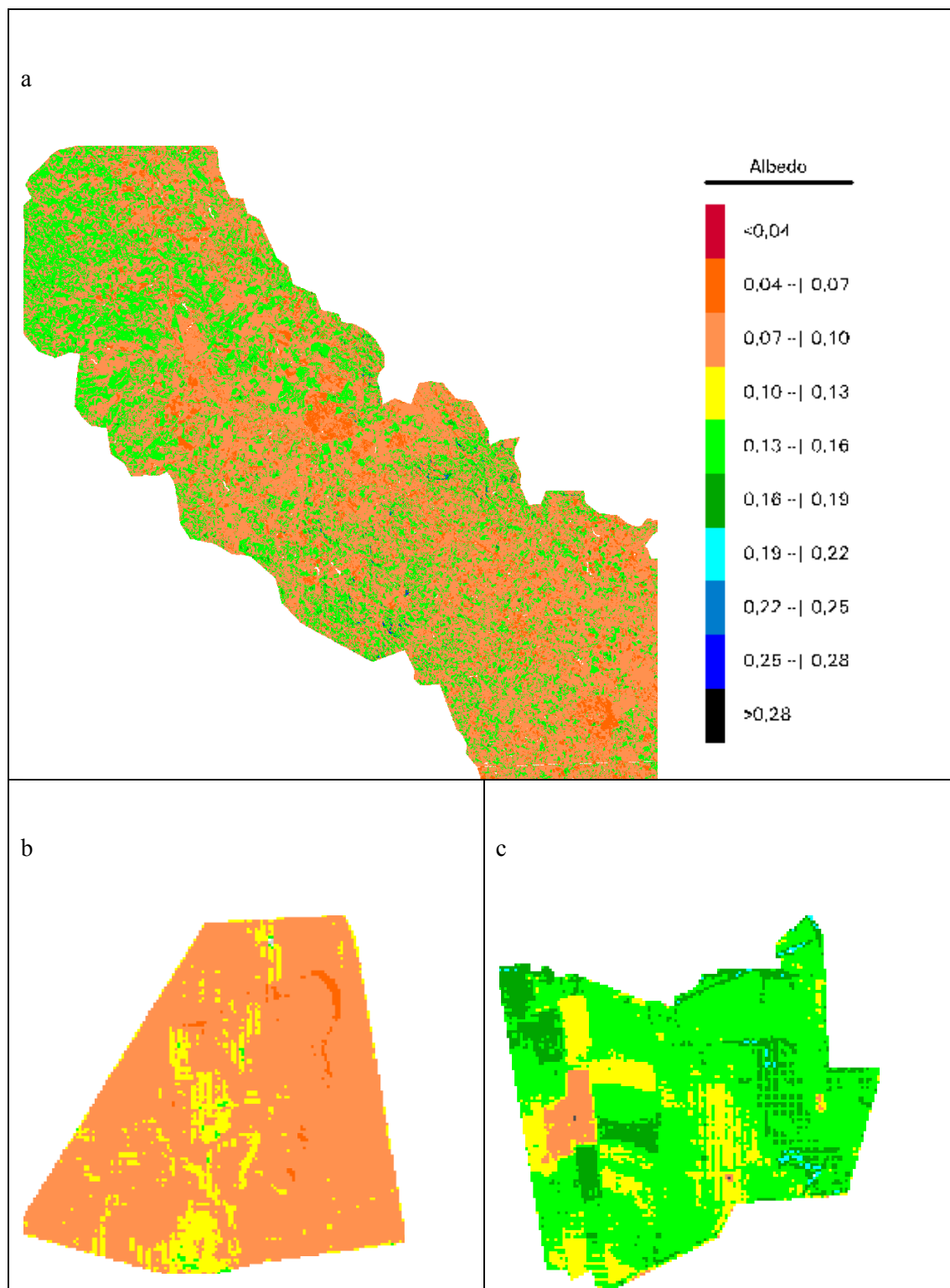


Figura 8: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 11/04/05



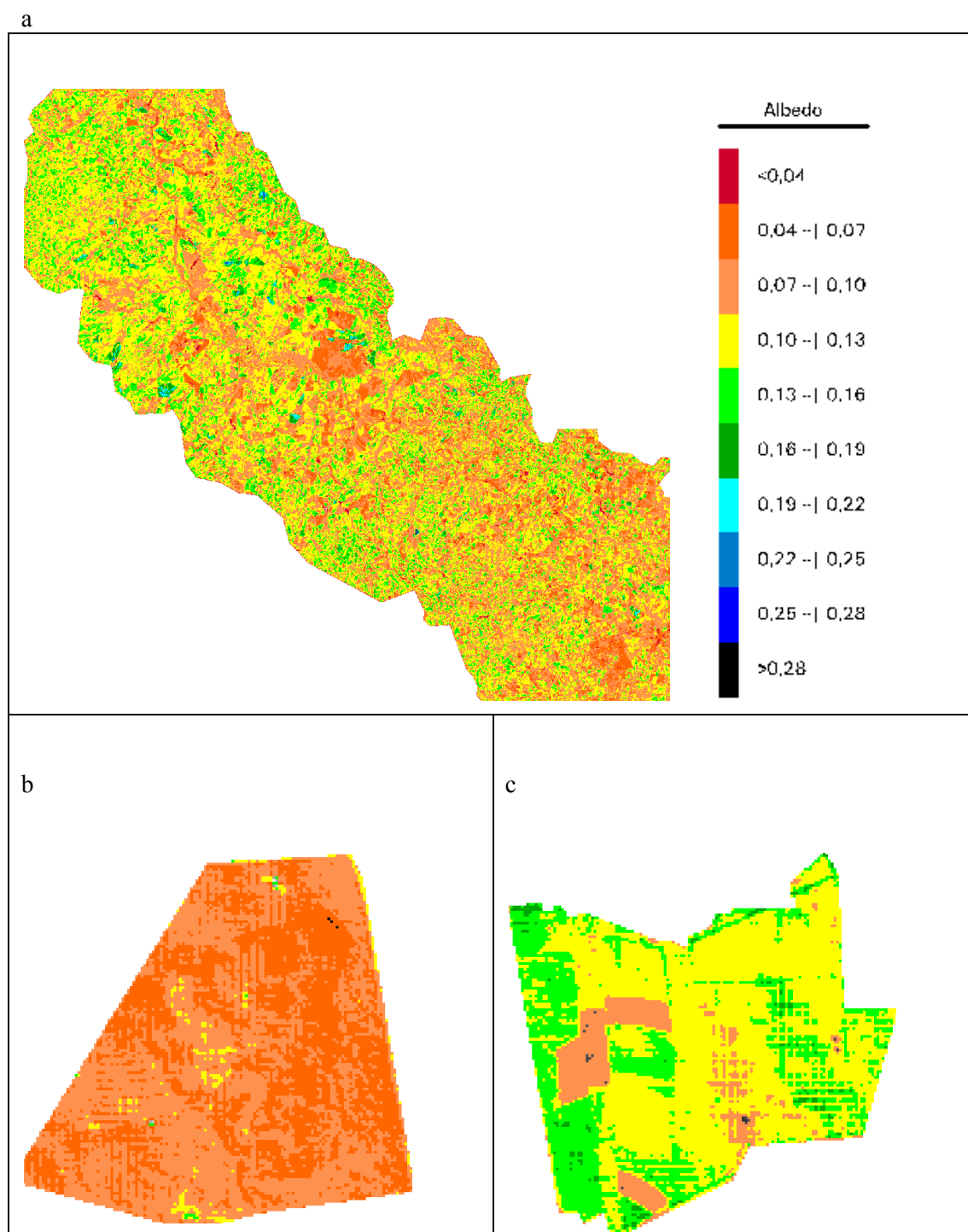


Figura 9: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 29/05/05

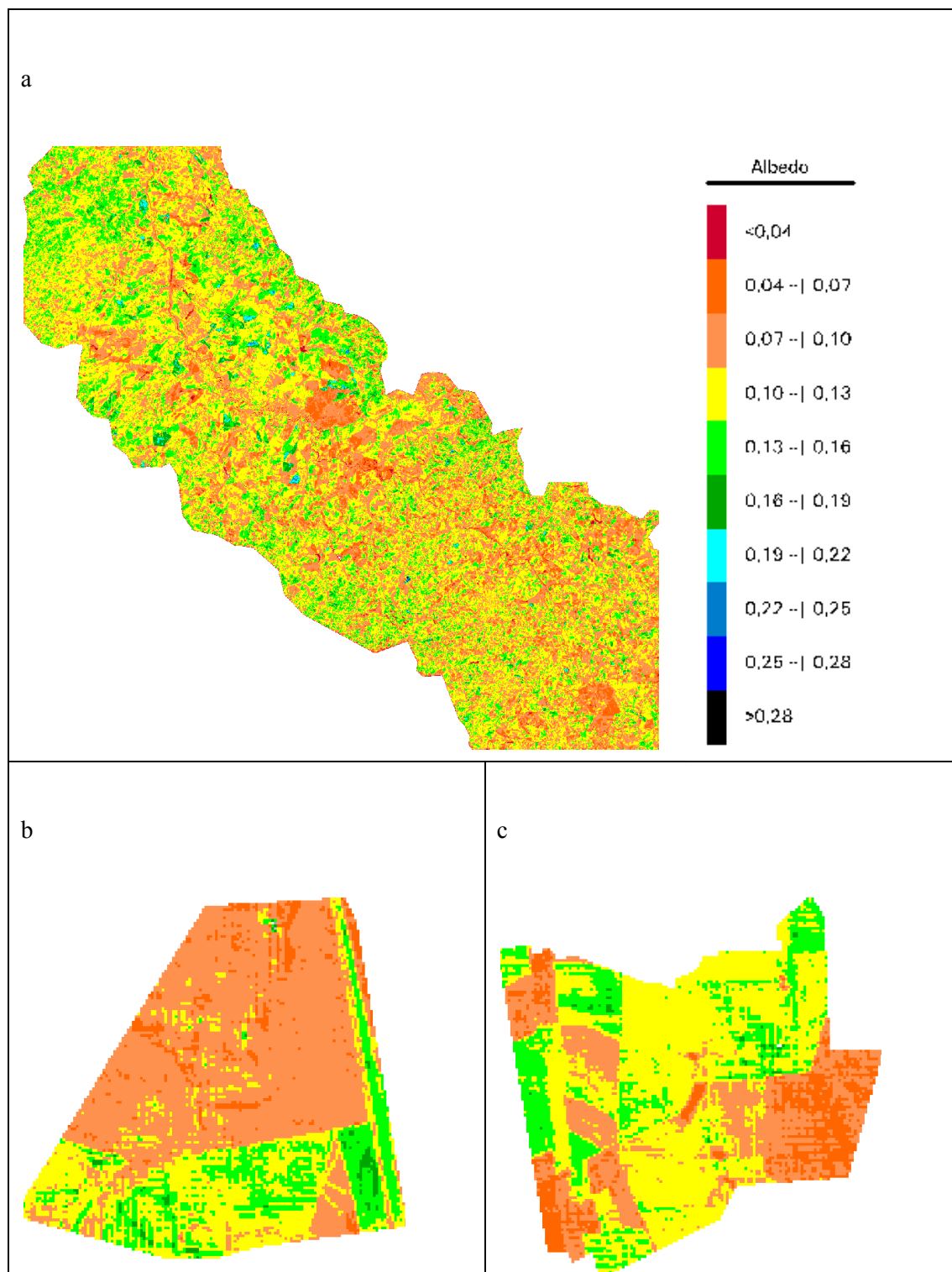


Figura 10: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 14/06/05

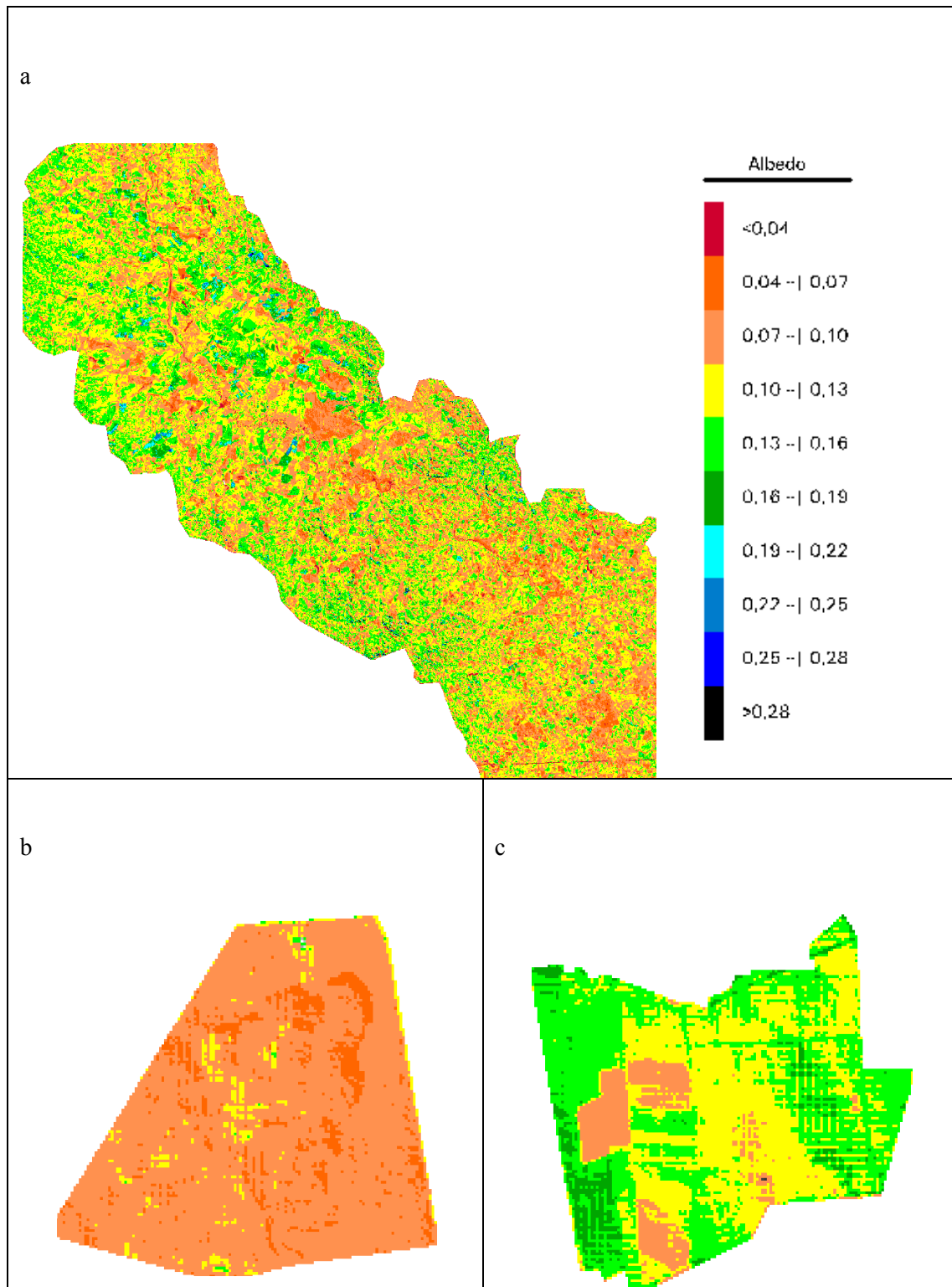


Figura 11: Albedo da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 01/08/05

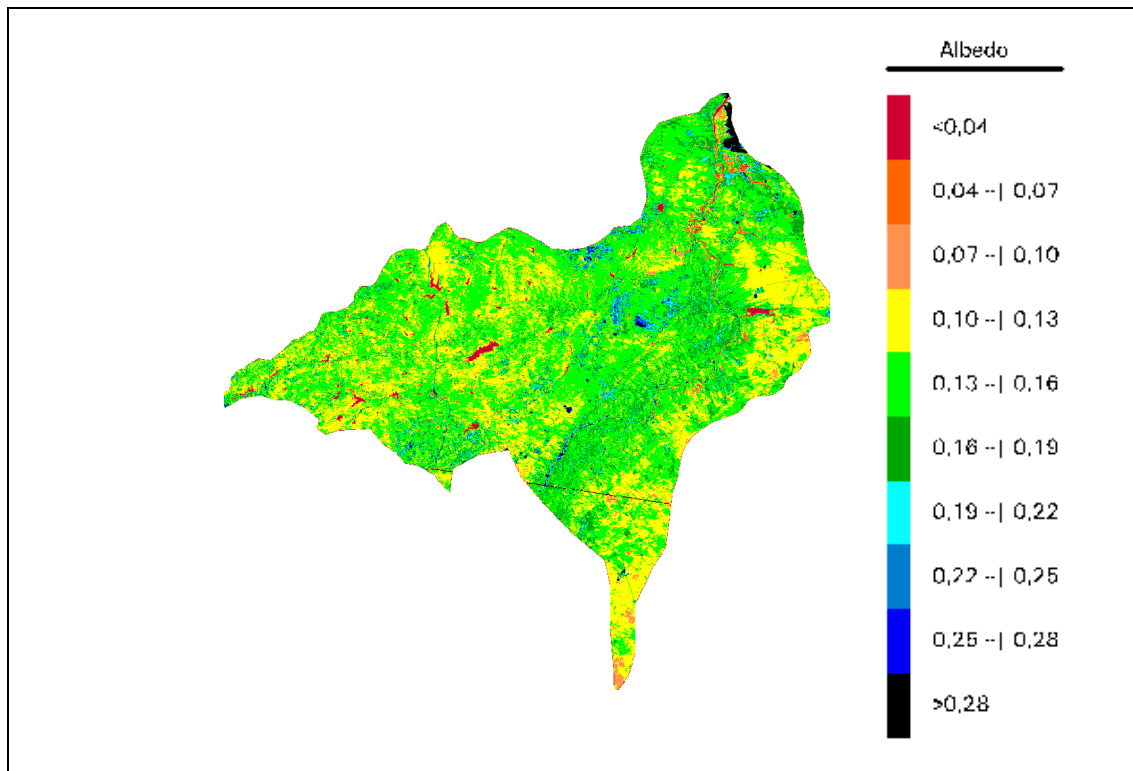


Figura 12: Albedo da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 23/07/06

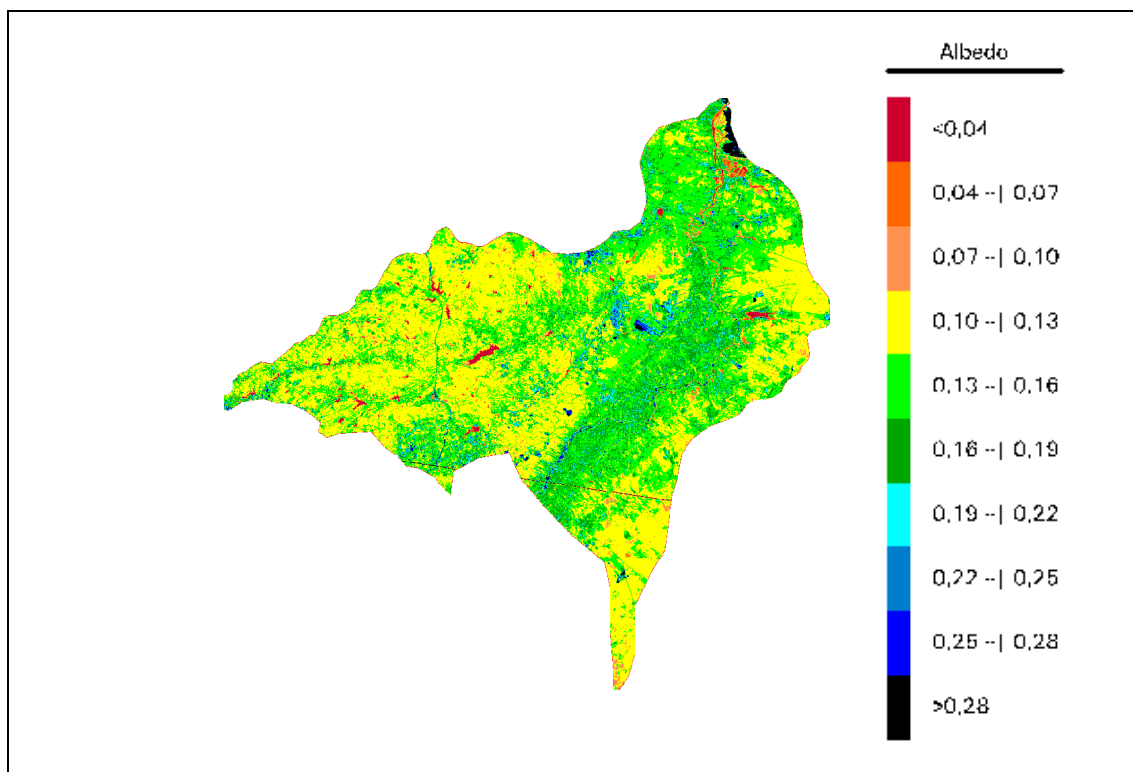


Figura 13: Albedo da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 08/08/06

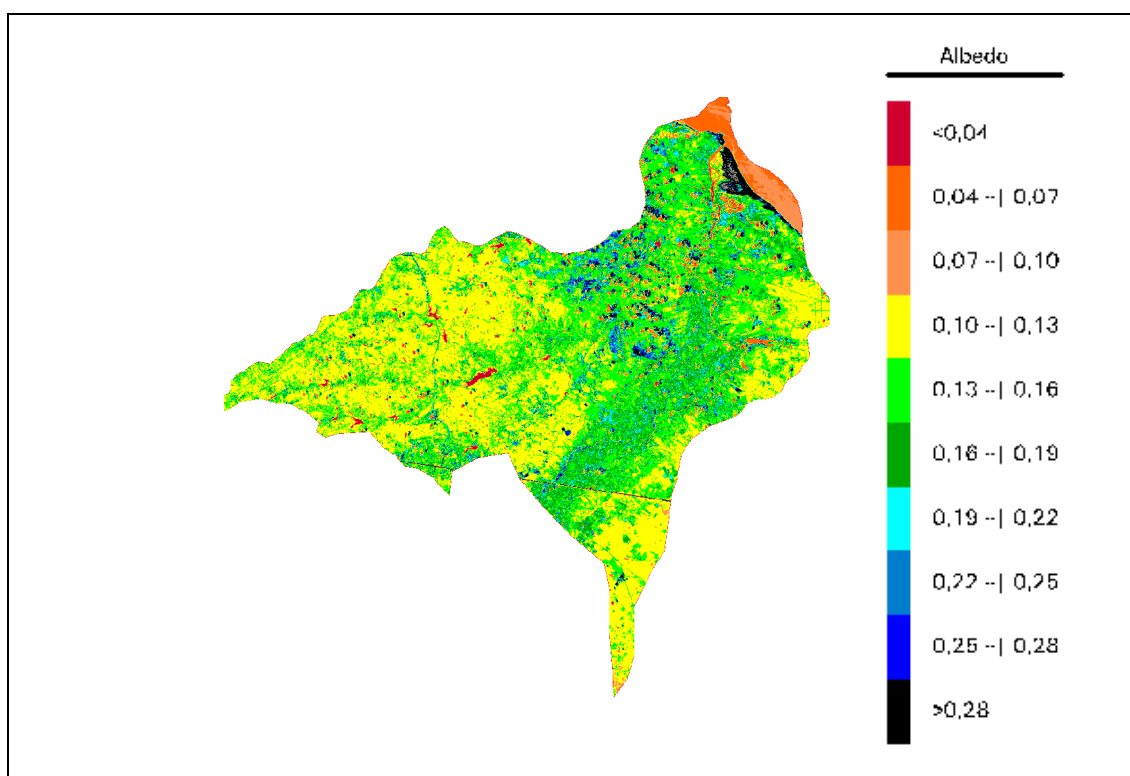


Figura 14: Albedo da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 24/08/06

#### 4.4.5- Temperatura da superfície

O plano do equador terrestre apresenta uma inclinação em relação ao plano orbital de aproximadamente  $23,45^\circ$ . Essa inclinação, juntamente com o movimento de translação da Terra, é responsável pela variação da energia radiante a superfície e, conseqüentemente, pelas estações do ano.

A temperatura da superfície apresenta uma variação que acompanha a variação da radiação solar incidente, com valores máximos no momento da culminação do Sol, desde que não haja a interferência de outros fatores. Para o hemisfério sul, a radiação máxima é observada no período de 23 de setembro a 21 de março, dependendo da latitude local, havendo dois períodos de culminação para latitudes que variam de  $0^\circ$  a  $23,45^\circ$  sul.

A temperatura da superfície sobre a bacia do Mogi Guaçu variou em média de  $17^\circ\text{C}$  a  $27^\circ\text{C}$  para o dia 14/06/05 e 22/02/05, respectivamente, facilmente visualizados nas Figuras 15 a 19. As temperaturas máximas foram verificadas no outono no

hemisfério sul (21 de dezembro a 21 de março) e as mínimas de acordo com a proximidade ao Solstício de Verão no hemisfério norte (22 de junho).

Sobre o cerrado foram verificadas temperaturas mais amenas quando comparadas a cana-de-açúcar e levemente inferiores a média da bacia (Figuras 15 a 19), variando de 26°C a 32°C, acompanhando as variações sobre a bacia. Para a cana-de-açúcar a temperatura média verificada apresentou valores superiores as médias da bacia para todos os dias analisados, variando de 17°C a 37°C, seguindo o perfil médio verificado na bacia. Essas variações de temperatura sobre a cultura da cana-de-açúcar se devem a variação dos estádios de desenvolvimento da cultura na área em estudo.

Resultados semelhantes aos encontrados por Andrade (2008), em área de cana-de-açúcar irrigada com pivô central, que reportou valores da temperatura da superfície entre 30 e 33°C para o período de fevereiro e abril e de 24 a 27°C para o mês de junho, na região do triângulo mineiro. Verifica-se, também, que a vegetação foi um fator determinante na variação da temperatura da superfície sobre os alvos estudados, com uma relação direta com os índices de vegetação.

Para a bacia do Baixo Jaguaribe (Figuras 20 a 22) a temperatura apresenta valores na faixa de 22°C a 32°C, se elevando do fim do mês de julho ao mês de agosto, à medida que se aproxima do Equinócio (23/09).

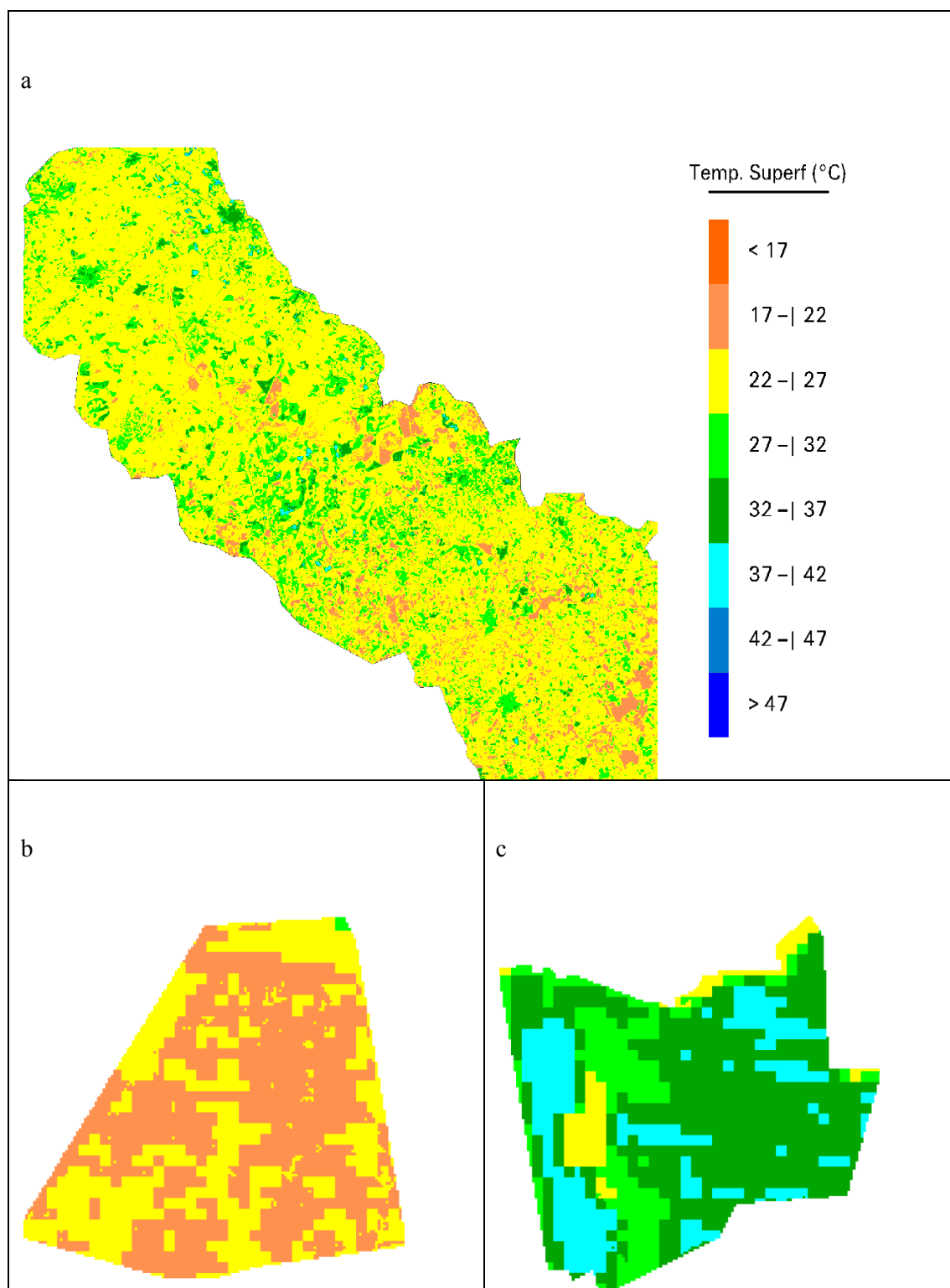


Figura 15: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 22/02/05

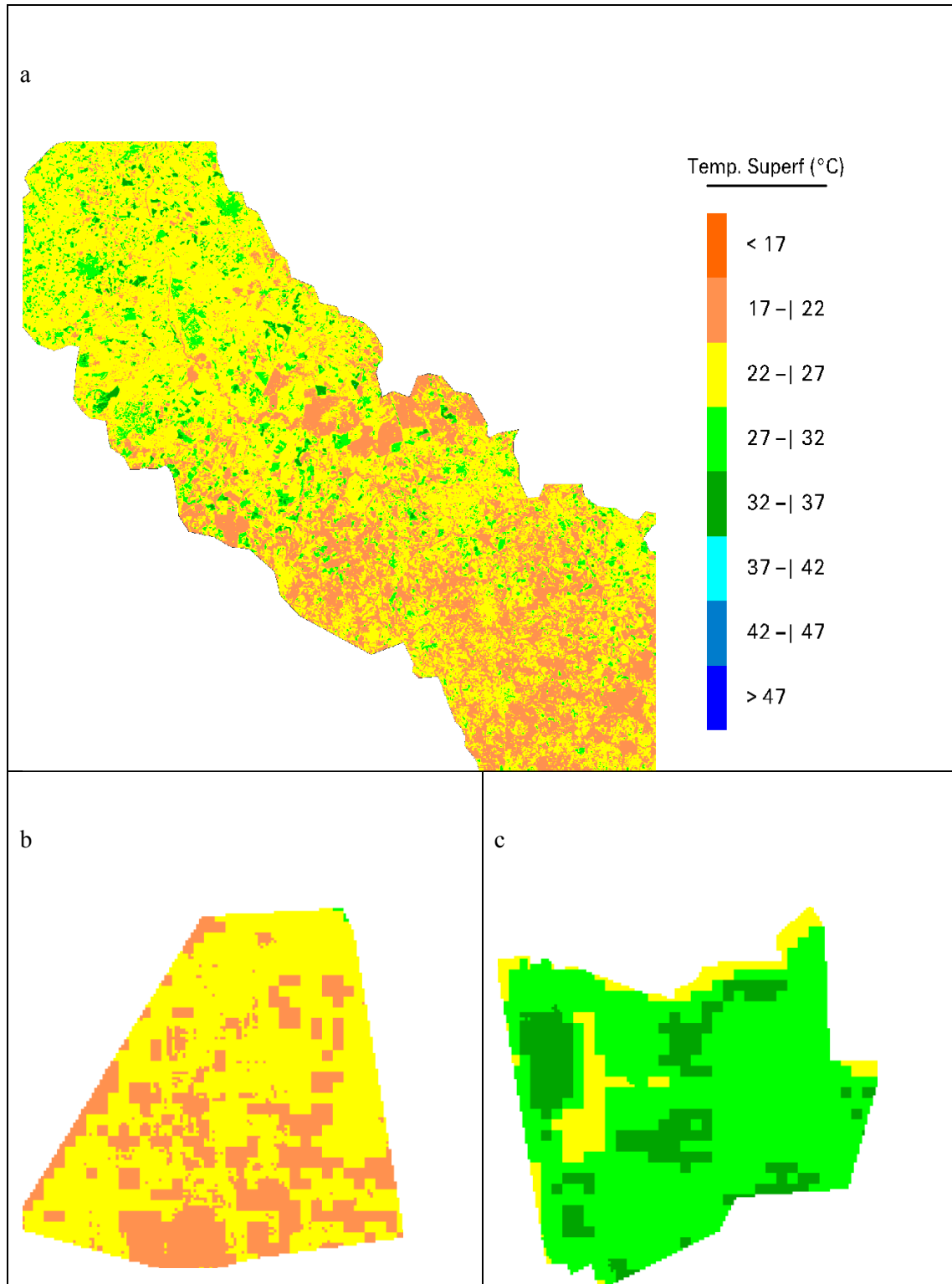


Figura 16: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 11/04/05



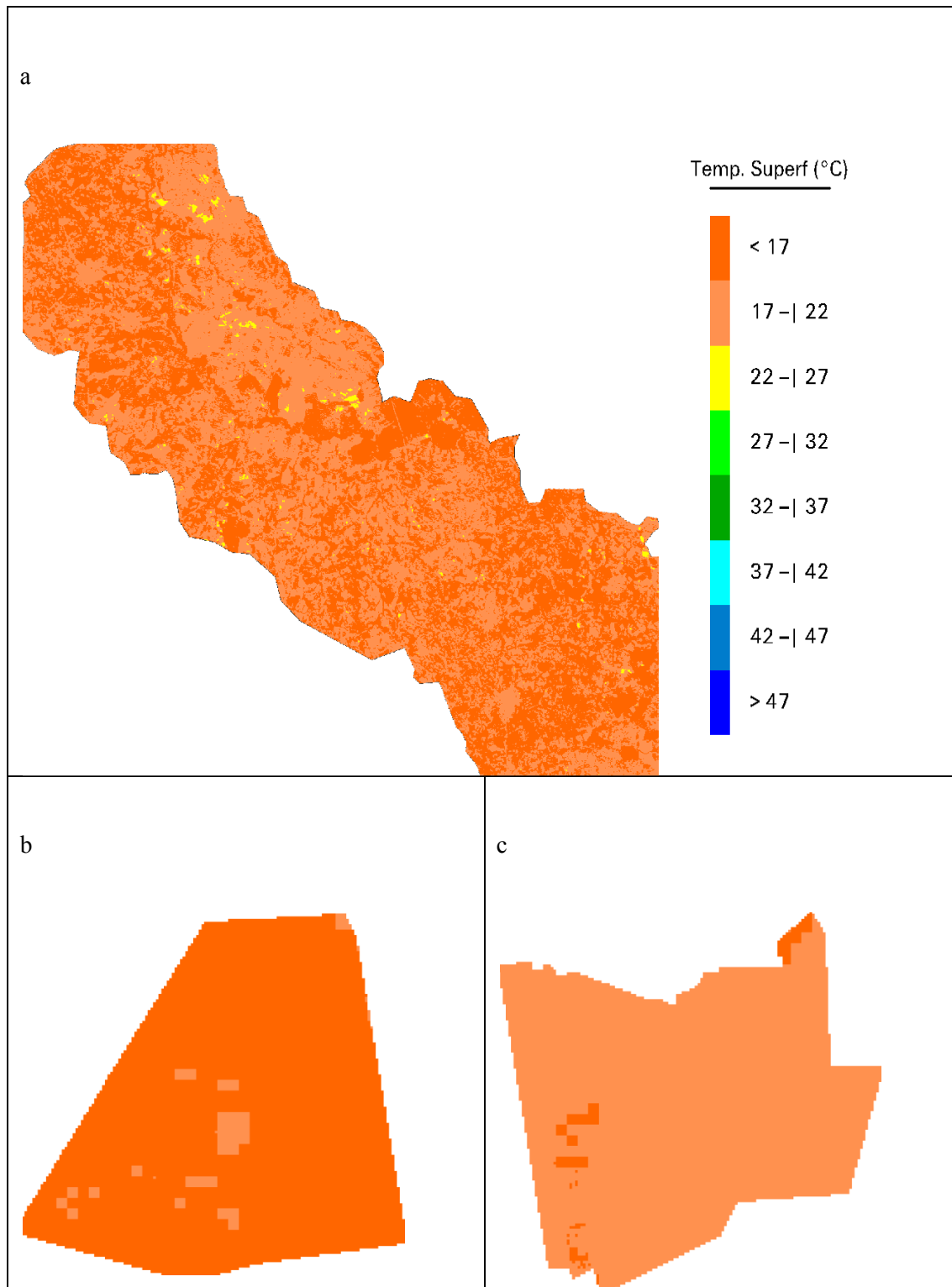


Figura 17: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 29/05/05

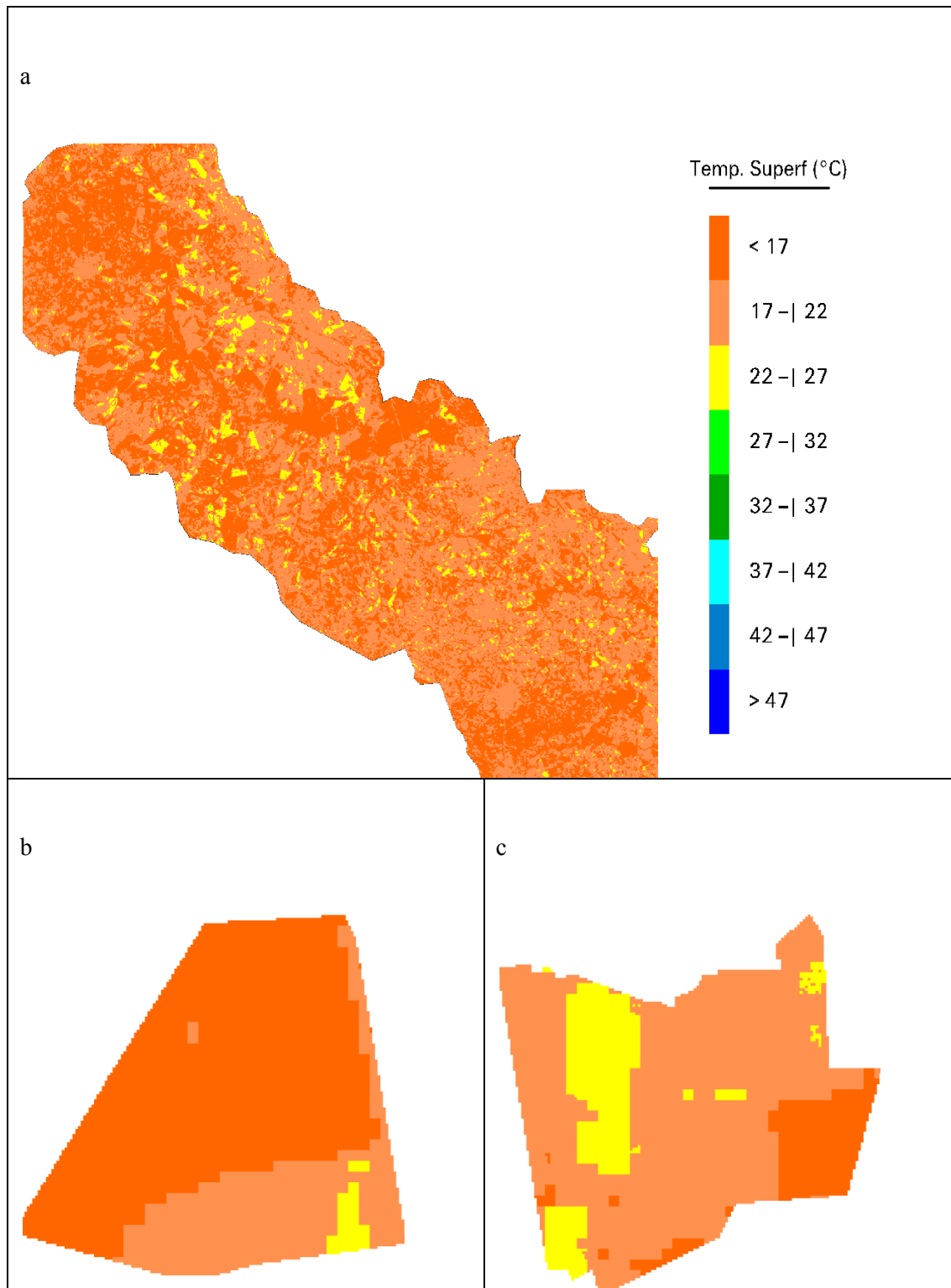


Figura 18: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 14/06/05

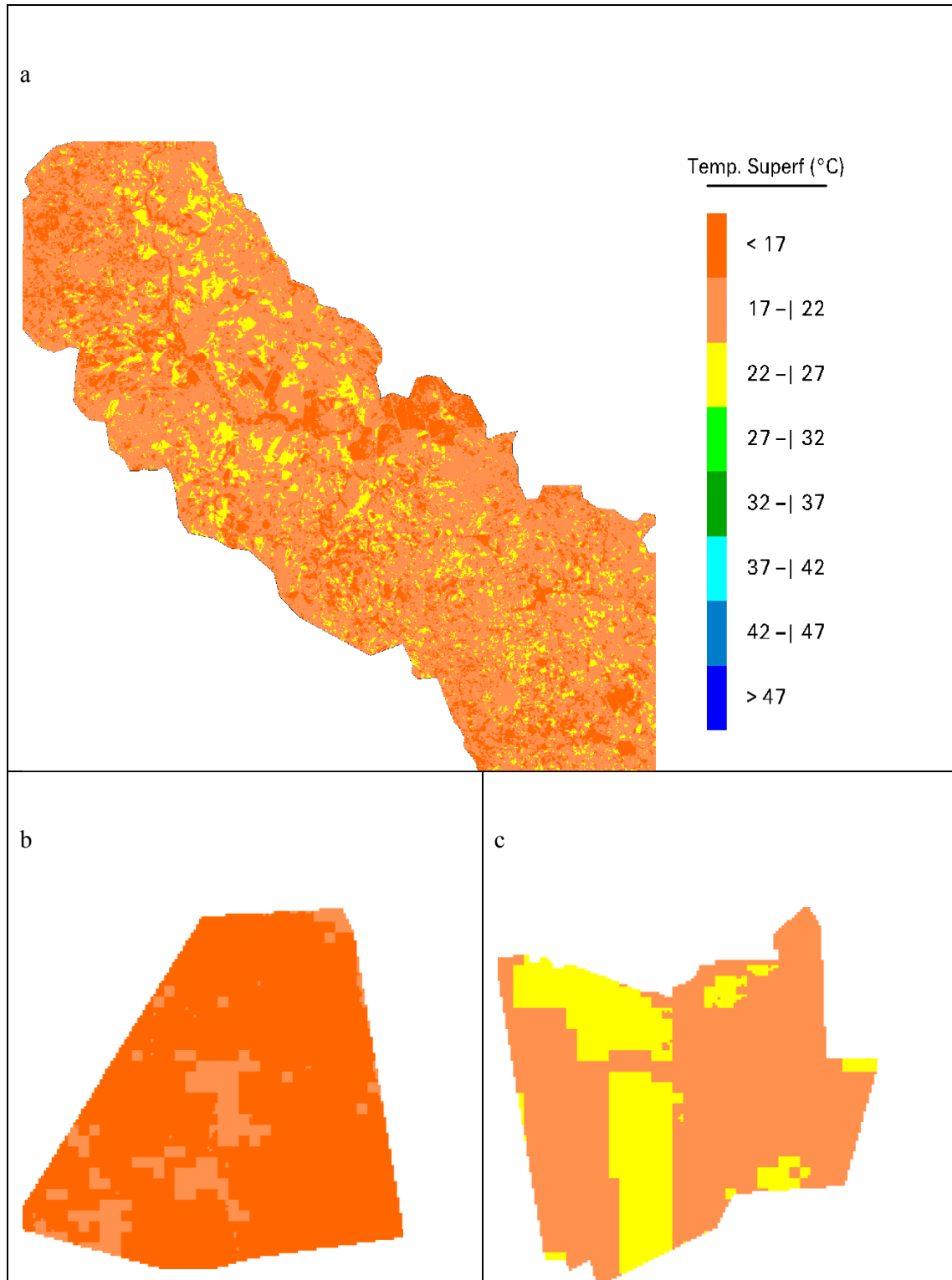


Figura 19: Temperatura da superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 01/08/05

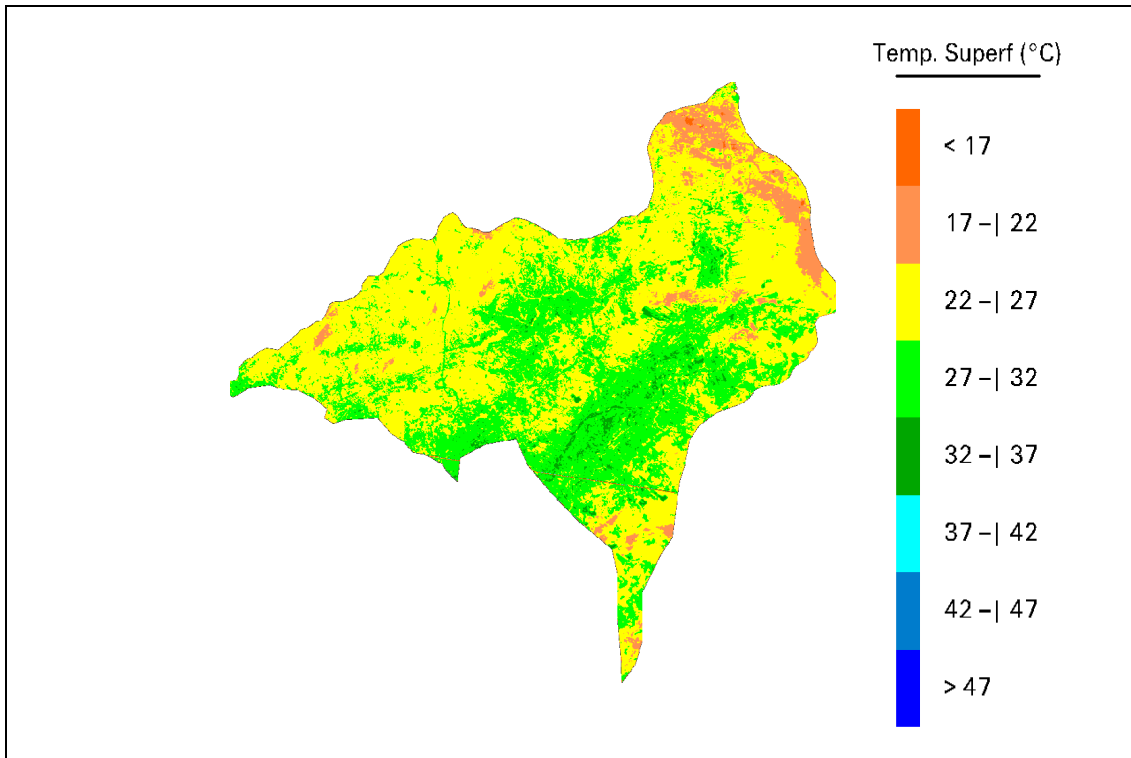


Figura 20: Temperatura da superfície da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 23/07/06

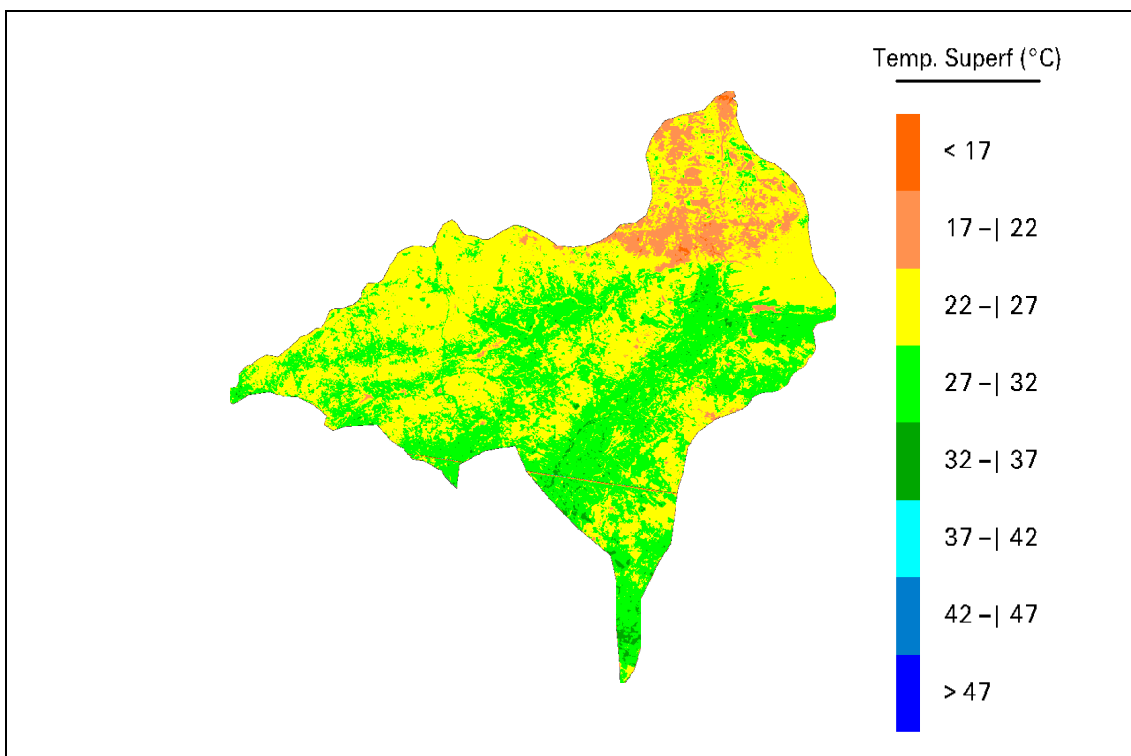


Figura 21: Temperatura da superfície da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 08/08/06

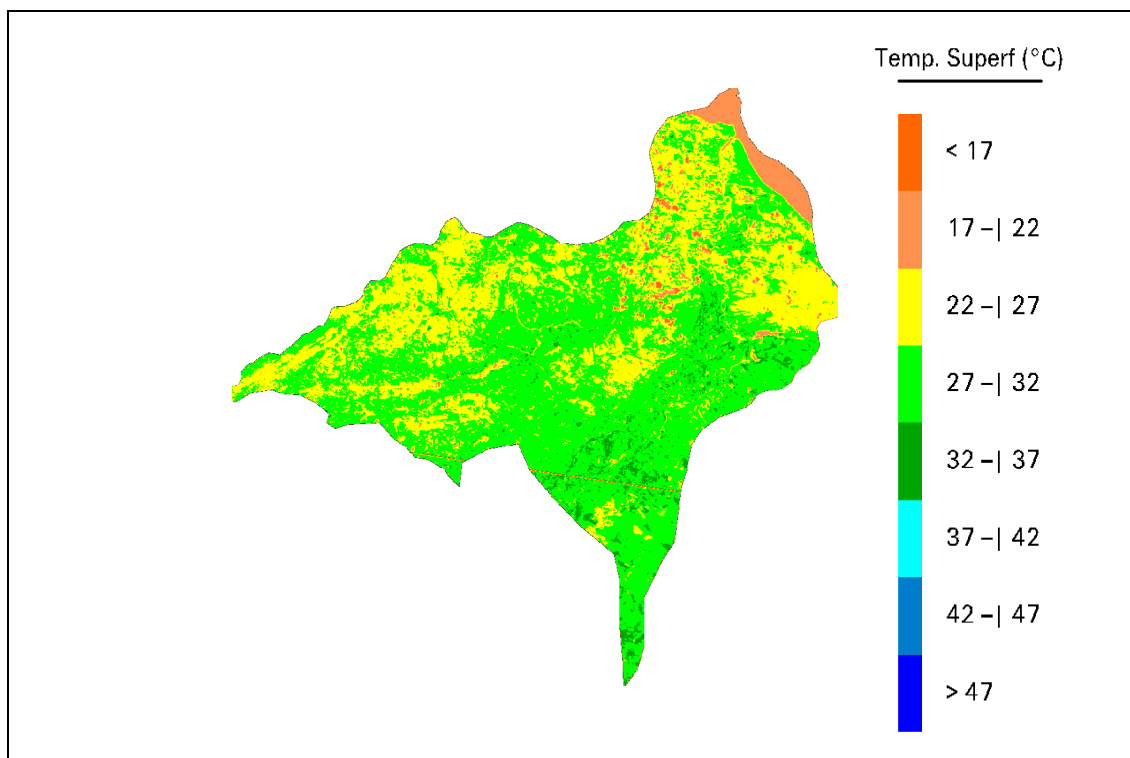


Figura 22: Temperatura da superfície da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 24/08/06

#### 4.4.6- Saldo de Radiação

Em uma superfície, a quantidade de radiação de onda curta incidente é a fonte de energia necessária a realização das atividades metabólicas vegetais e a evaporação da água, sendo a fração resultante refletida em direção a atmosfera. A concentração da vegetação em uma determinada área, ou a concentração da área fotossinteticamente ativa, é fator determinante sobre a fração energética refletida, obedecendo a grandezas inversamente proporcionais. Resultados observados nas Figuras 23 a 30.

O período logo após a estação chuvosa na Bacia do Mogi Guaçu, após o máximo desenvolvimento vegetativo, apresenta resultados esperados. O saldo de radiação obteve valores máximos para o dia 22/02/05, decaindo nos meses seguintes e atingindo o mínimo no mês de junho, acompanhando os índices de precipitação sobre a bacia, elevando-se logo em seguida.

Sobre o cerrado o saldo de radiação apresenta resultados semelhantes aos relatados sobre a bacia, com valores levemente superiores, acompanhando os índices de vegetação sobre a bacia, superiores sobre a área de preservação ambiental.

Sobre a cana de açúcar os valores máximos do saldo de radiação ocorreram em fevereiro e mínimo em junho, variando entre  $300 \text{ W m}^{-2}$  e  $600 \text{ W m}^{-2}$ , acompanhando o regime pluviométrico e a distribuição do saldo de radiação ao longo da bacia. Todos os resultados discutidos neste tópico podem ser visualizados nas Figuras 23 a 30 a seguir.

No Semiárido, na bacia do Baixo Jaguaribe, os valores do saldo de radiação variaram nas faixas de  $500$  a  $600 \text{ W m}^{-2}$  no mês de julho a  $600$  a  $700 \text{ W m}^{-2}$  no mês de agosto. Resultados que podem ser visualizados nas Figuras 28 a 30 sob a coloração verde para o mês de julho e azul claro para o mês de agosto.

Os resultados revelados corroboram com os resultados encontrados na literatura. Di Pace et al. (2008) encontraram valores do saldo de radiação de  $575,2 \text{ W m}^{-2}$  e  $543,3 \text{ W m}^{-2}$  para os dias 04/10/01 e 04/12/00, respectivamente, sobre cultivos irrigados na região de Petrolina-PE. Silva et al. (2005b) e Silva et al. (2006) encontraram valores do  $R_n$  de  $645,1 \text{ W m}^{-2}$  e  $759,3 \text{ W m}^{-2}$  sobre áreas irrigadas e corpos de água respectivamente na região de Petrolina em dezembro de 2000 e de  $664,5$  e  $750,7 \text{ W m}^{-2}$  em outubro de 2001. Bezerra et al. (2008) obtiveram saldo de radiação em torno de  $700 \text{ W m}^{-2}$  em áreas irrigadas na região do Cariri cearense.

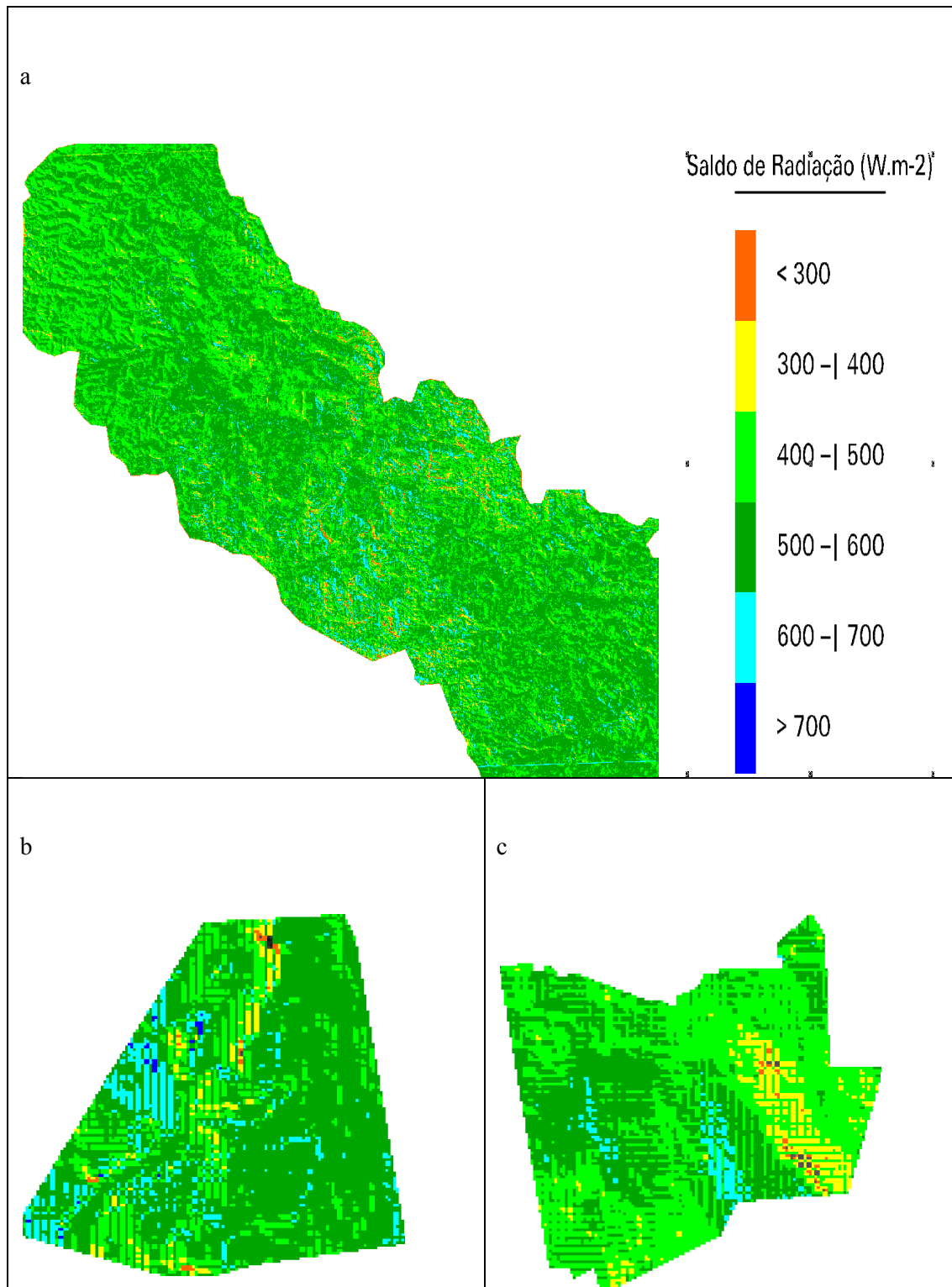


Figura 23: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c) respectivamente em 22/02/05

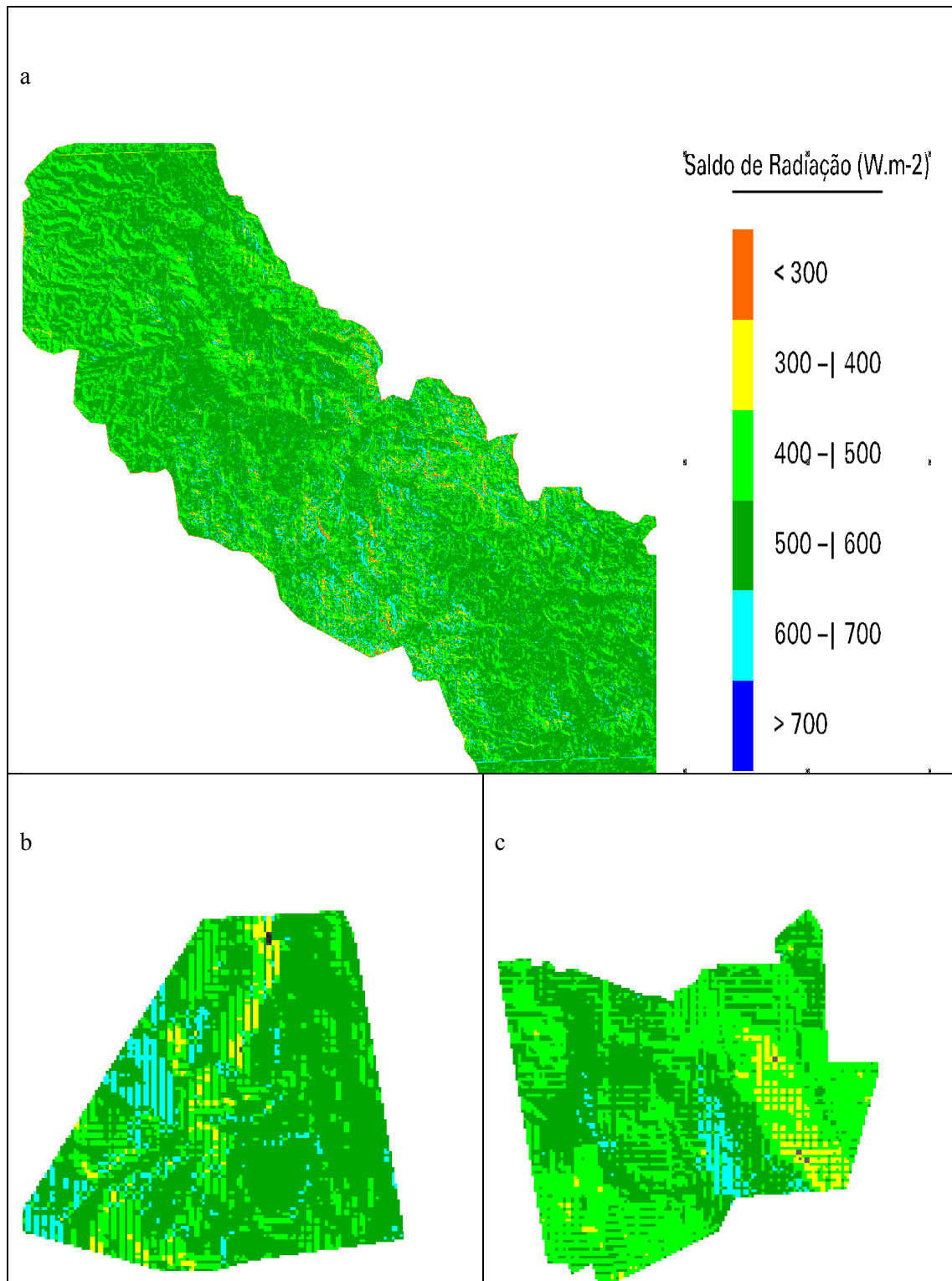


Figura 24: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 11/04/05



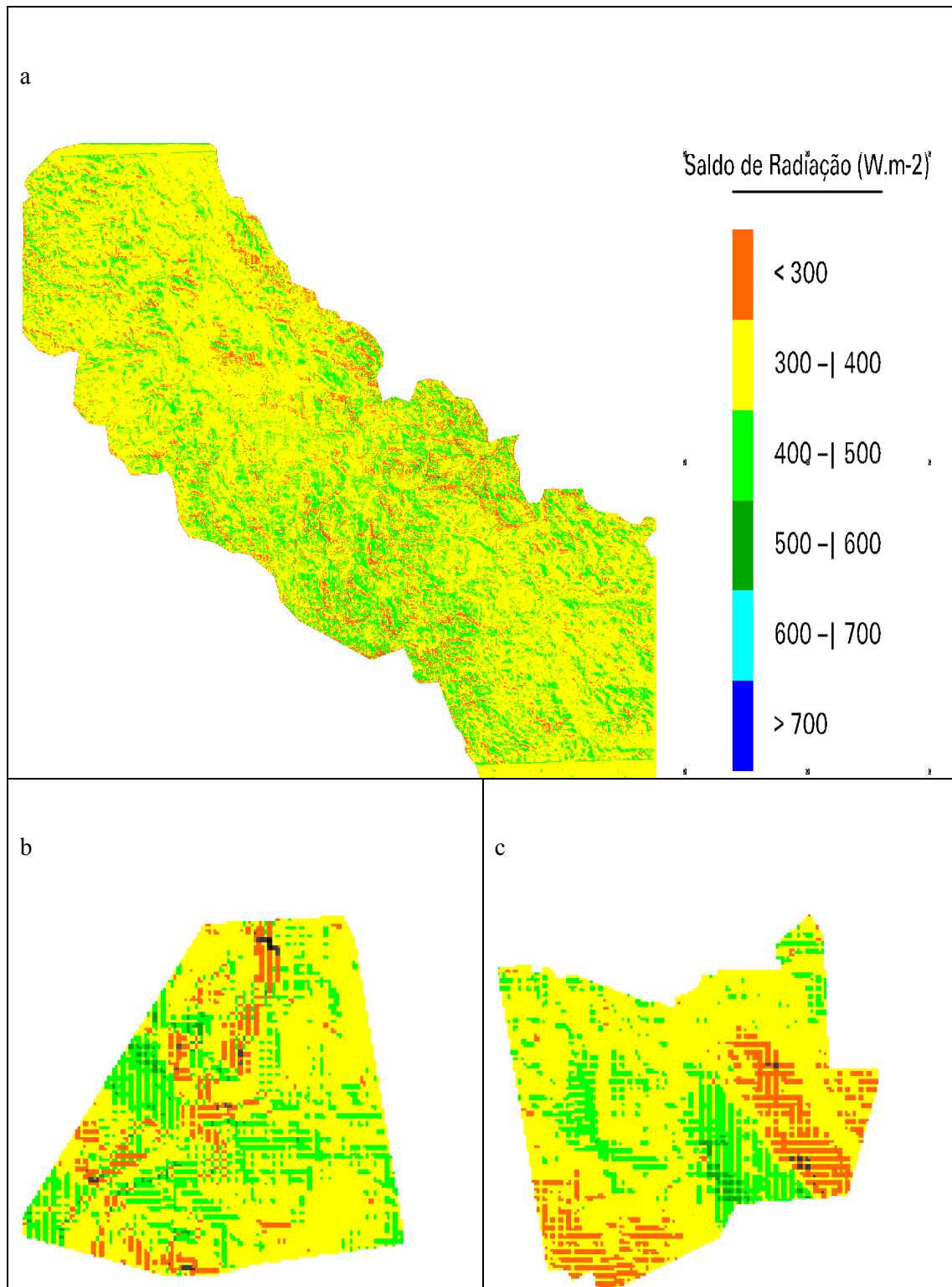


Figura 25: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 29/05/05

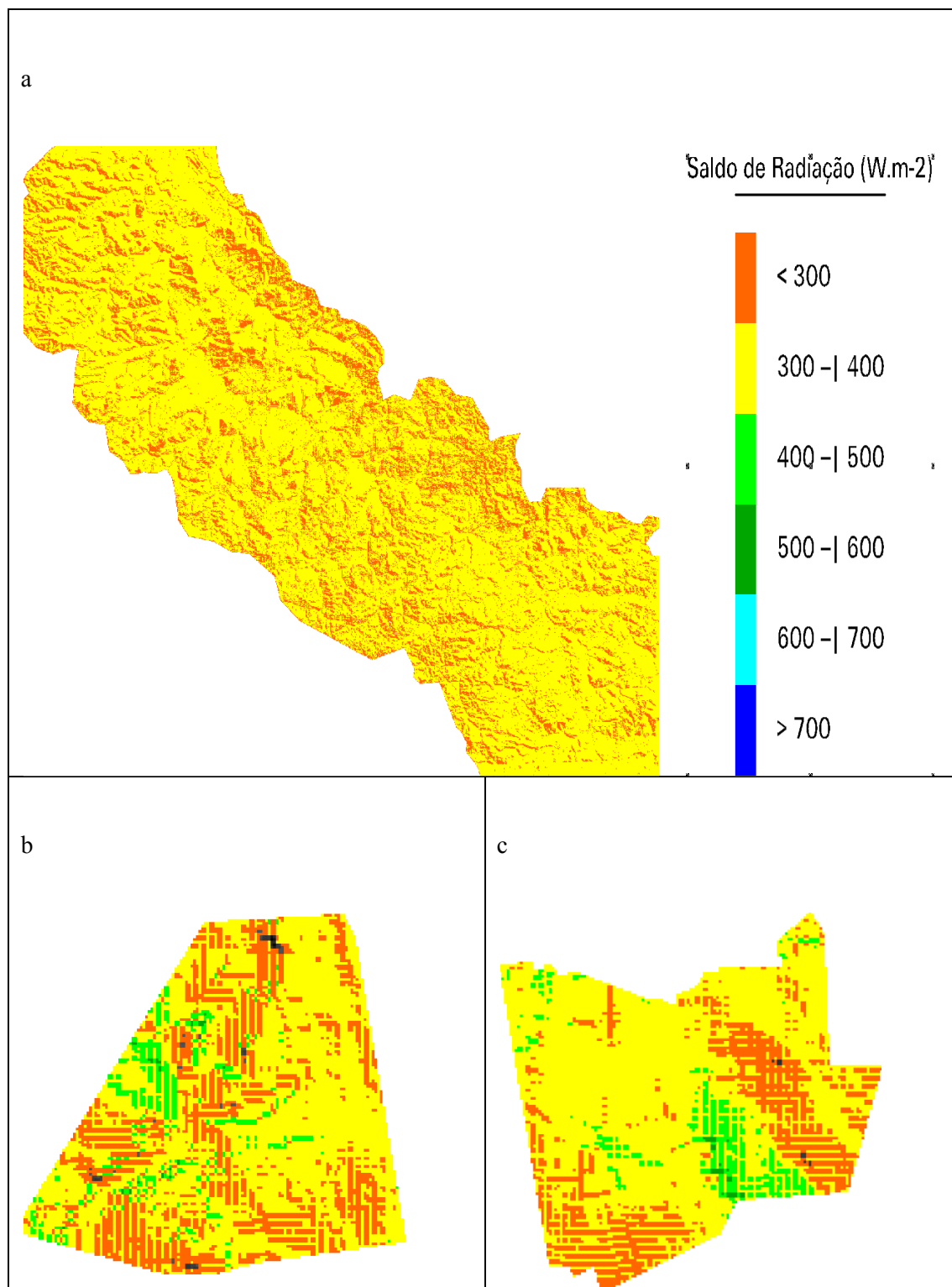


Figura 26: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 14/06/05

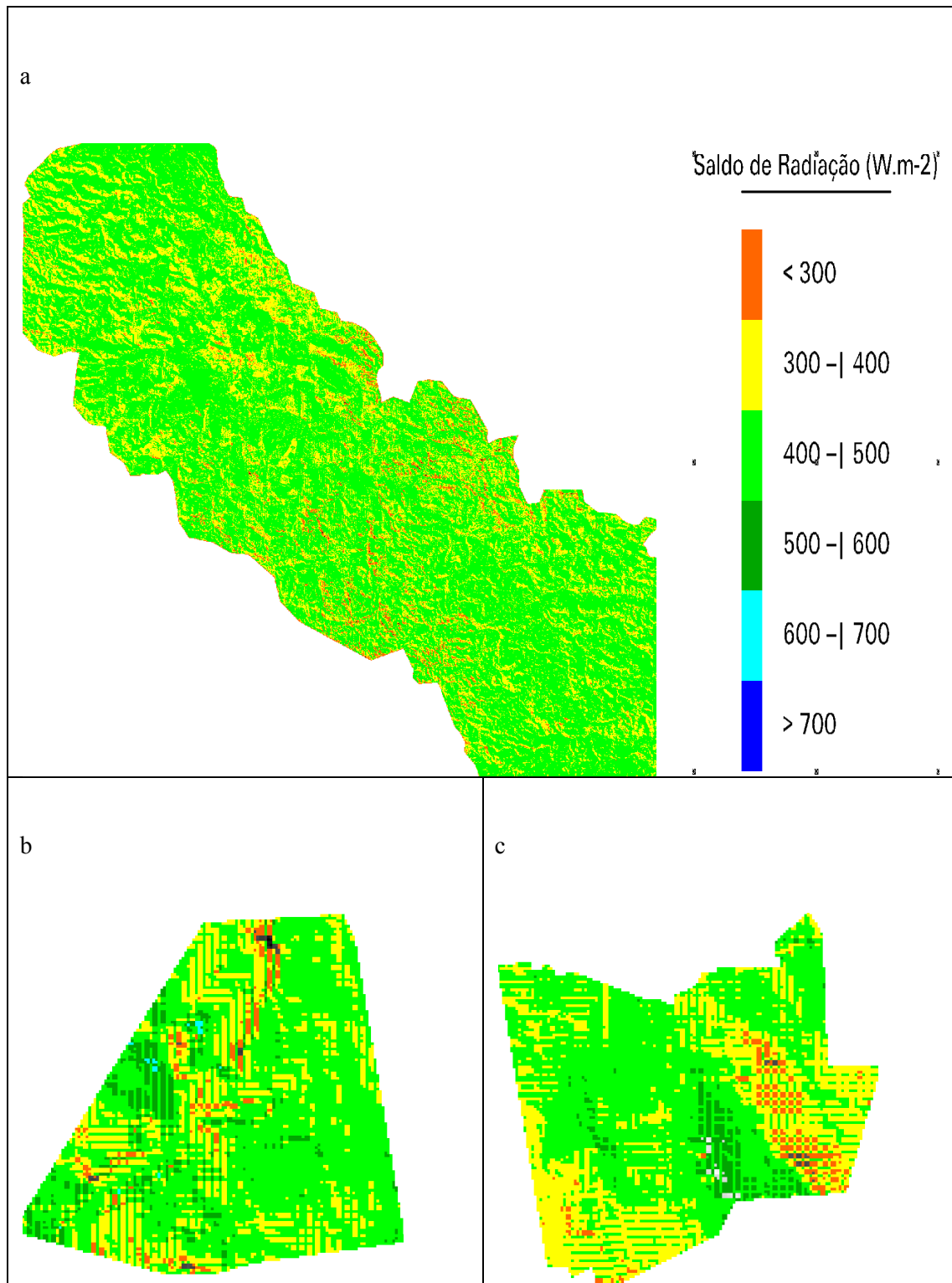


Figura 27: Saldo de radiação a superfície para a bacia do Mogi Guaçu (a) com recortes para o cerrado (b) e área de cultivo da cana-de-açúcar (c), respectivamente, em 01/08/05

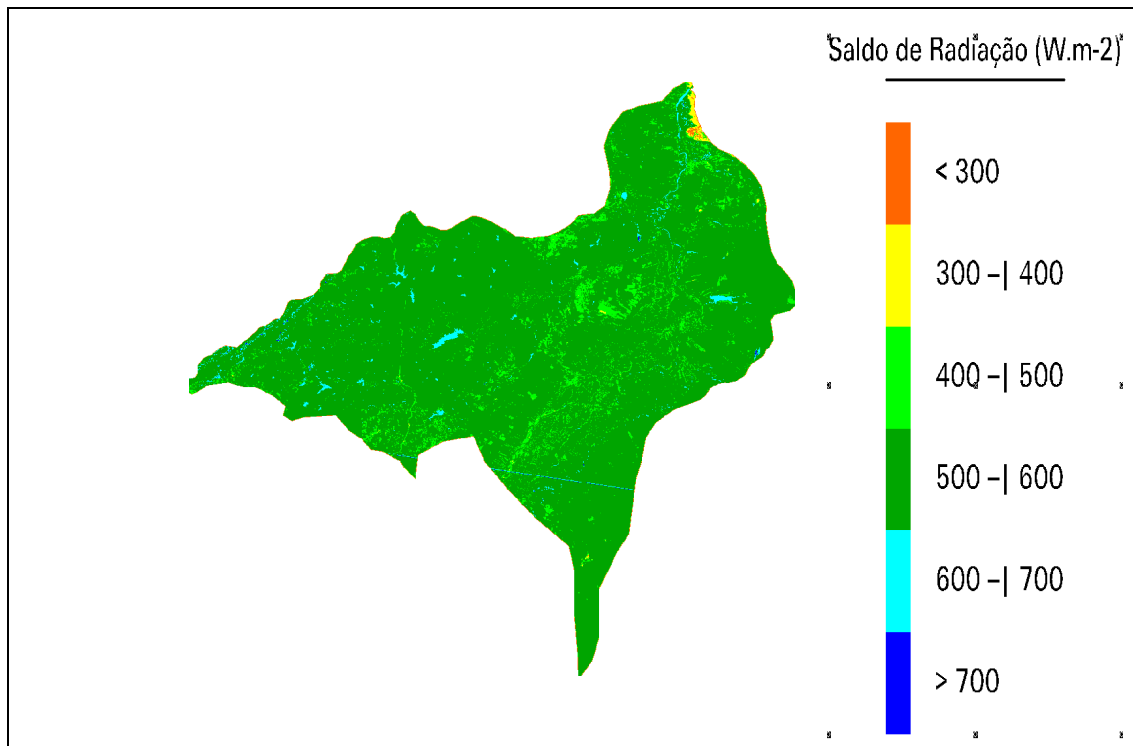


Figura 28: Saldo de Radiação da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 23/07/06

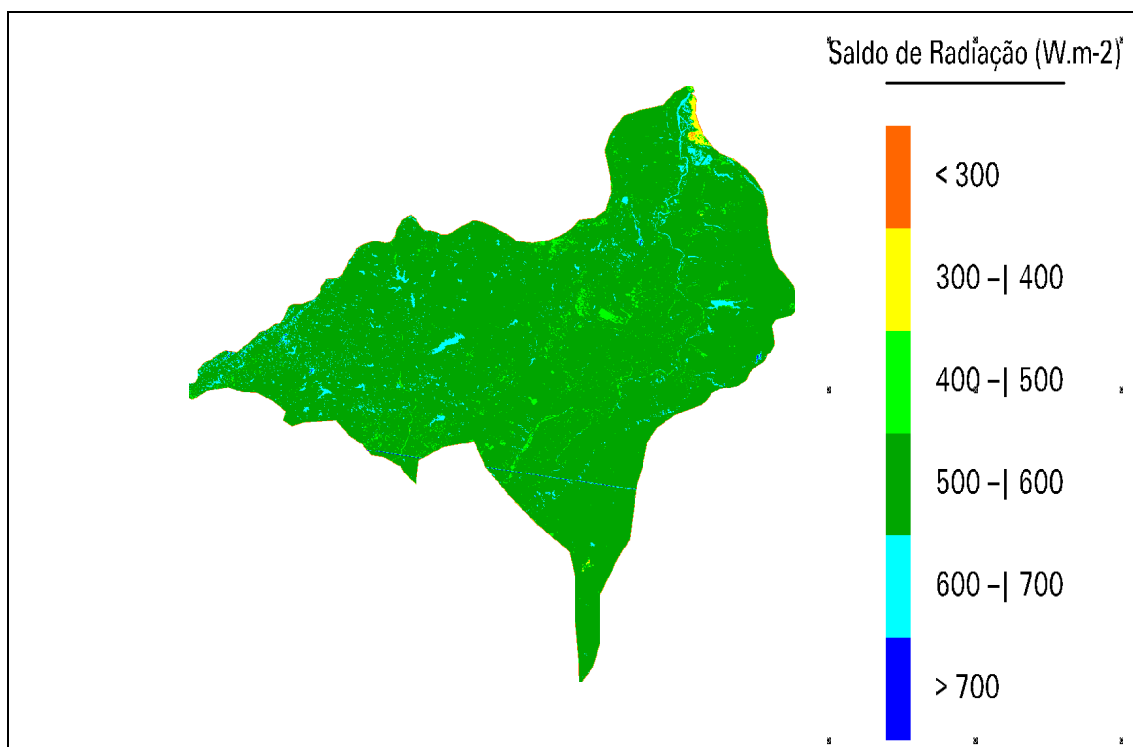


Figura 29: Saldo de Radiação da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 08/08/06

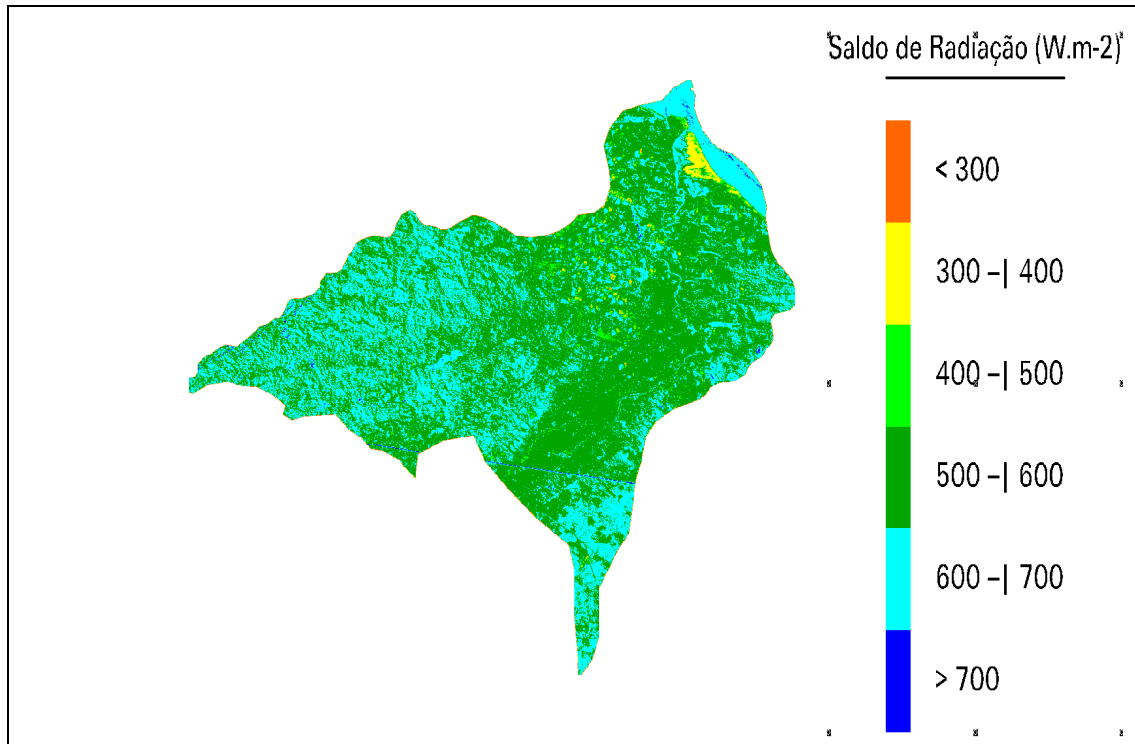


Figura 30: Saldo de Radiação da superfície para a bacia do Baixo Jaguaribe para o dia 24/08/06

## 5 – CONCLUSÕES

Houve melhoria significativa resultante do processo de calibração do SEBAL/METRIC em função da correção dos coeficientes da emissividade atmosférica para a estimativa da radiação da onda longa incidente na região da bacia do Baixo Jaguaribe.

O processo de calibração do SEBAL/METRIC para estimativa da radiação de onda longa incidente na bacia do Mogi Guaçu culminou com resultados satisfatórios quando as estimativas dos demais componentes são baseadas em observações.

Ocorreu diferenciação entre as estimativas do saldo de radiação resultante da aplicação do SEBAL/METRIC a imagens TM – Landsat 5, calibrado para as bacias do Baixo Jaguaribe e Mogi Guaçu e o SEBAL/METRIC calibrado com os coeficientes obtidos por Allen et al. (2000) no semiárido de Idaho (EUA).

O saldo de radiação estimado pelo METRIC apresentou resultados satisfatórios e coerentes com a literatura, independente do processo de calibração.

Houve diferenciação do saldo de radiação entre os dias analisados em toda a extensão da bacia do Mogi Guaçu.

Os resultados mostraram a precisão do METRIC na estimativa do saldo de radiação à superfície, independente do clima regional em que é aplicado.

A técnica constitui uma poderosa ferramenta na estimativa dos componentes do balanço de radiação a superfície em escala regional.

## 6 – SUGESTÕES

A equação sugerida por Bastiaanssen (1998) na estimativa da emissividade atmosférica tem sido aplicada em todo o planeta; no entanto, podem ser utilizadas outras equações com este mesmo objetivo, sendo necessária uma análise da aplicabilidade destas equações a cada região, com a finalidade da melhoria do modelo de estimativa do balanço de radiação.

Ao analisar os dados resultantes do processo de calibração foi verificado resultado satisfatório na estimativa da radiação de onda longa incidente na bacia do Mogi Guaçu quando as estimativas dos demais componentes resultam de observações. Porém, a aplicação destes coeficientes a imagens orbitais mostraram pequenos erros que poderiam ser reduzidos com a adoção de coeficientes de calibração sazonais.

Poderia ser sugerida, ainda, a calibração de uma equação de estimativa da transmissividade atmosférica e a calibração do maior número de equações para estimativa dos componentes do balanço de energia mediante técnicas de sensoriamento remoto e avaliação do desempenho de novos modelos na estimativa dos componentes do balanço de energia a superfície.

## 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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., HARTOGENSIS, O., AND DE BRUIN, H. Long-wave radiation over alfalfa during the RAPID field campaign in southern Idaho. **Research Report**, Kimberly, Univ. of Idaho, Id, 2000.

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

ALLEN, R. G.; MORSE, A.; TASUMI, M.; TREZZA, R.; BASTIAANSEN, W.; WRIGHT, J. L.; KRAMBER, W. Evapotranspiration from a satellite-based surface energy balance for Snake Plain aquifer in Idaho. Presented at the meeting of United States Committee on Irrigation, Drainage, and Food Control at San Luis Obispo, CA, 2002b.

ALLEN, R.; TREZZA, R.; TASUMI, M. Analytical integrated functions for daily solar radiation on slopes. **Agricultural and Forest Meteorology**, p.55-73, 2006.

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

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

ANDRADE, R.G. Aplicação do algoritmo SEBAL na estimativa da evapotranspiração e da biomassa acumulada da cana-de-açúcar. 135f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola). Departamento de Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2008.



AZEVEDO, P. V.; LEITÃO, M.M.V.B.R.; SOUSA, I.F.; MACIEL, G.F. Balanço de radiação sobre culturas irrigadas no semi-árido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 5, n.1, p. 403-410, 1990.

BOEGH, E.; SOEGAARD, H.; THOMSEM, A. Evaluating evapotranspiration rates and surface conditions using Landsat TM to estimate atmospheric resistance and surface resistance. **Remote Sensing of Environment**, v. 79, p.329-343, 2002.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, v. 212–213, p.198–212. 1998a.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F. ROENRINK, G. J. VAN DER WAL, T. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) 2. Validation. **Journal of Hydrology**, v.212–213, p.213-229. 1998b.

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

BEZERRA, M. V. C. Balanço de Energia em Áreas Irrigada Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto. 108f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2004.

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

BORGES, V.P. Aplicação do algoritmo Sebal e imagens Landsat para estimativa da demanda hídrica do algodoeiro irrigado no oeste da Bahia. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias). Centro de Ciências Agrárias Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas – BA, 2008

CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.. Balanço de Energia em Cultura de Milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.4, n.1, p.1-14, 1996.

CUNHA, G.R.; PAULA, J.R.F.; BERGAMASCHI, H.; SAIBRO, J.C.; BERLATO, M.A.. Balanço de radiação em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.1, n.1, p.1-10, 1993.

CROSTA, A.P. **Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto**. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170p.

DIAK, G. R.; BLAND, W. L.; MECIKALSKI, J. R. AND ANDERSON, M. C. Satellite-based estimates of longwave radiation for agricultural applications. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.103, p.349-355, 2000.

FAO – FAOSTAT: Production: ProdSTAT: Crops. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em 14 jun. 2008.

FAO – FAOSTAT: Production: ProdSTAT: Crops. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em 13 jan. 2003.

FEITOSA, J. R. P. Uso de Técnica de Sensoriamento Remoto e Imagens Landsat-Tm e NOAA-AVHRR na estimativa do balanço de radiação à superfície. 164f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais). Programa Institucional de Pós-graduação em Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2005.

FIORAVANÇO, J. C. Mercado mundial da banana: produção, comércio e participação brasileira. *Informações Econômicas*, SP, v.33, n.10, 2003.

GALVÃO, J.A.C.; FISCH, G. Balanço de radiação em área de pastagem na Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.8, n.1, p.1-10, 2000.

GARCIA, G. J. **Sensoriamento Remoto – Princípios e Interpretação de Imagens**. 2 ed. Nobel. São Paulo, 358p, 1982.

GRANGER, R. J. Satellite-derived Estimates of Evapotranspiration in the Gediz Basin. **Journal of Hydrology**, v.229, p.70 – 76, 2000.

HAYASHI, M.M.S.; CAMPELO JÚNIOR, J.H.; FILHO, N.P.; NOGUEIRA, J.S.; VOURLITIS, G.L.. Balanço de energia da *Crotalaria juncea* L. no período seco e no período úmido do ano, em condições de cerrado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.2, p.197-205, 2002

HUETE, A. R. Adjusting Vegetation Indices for Soil Influences. **International Agrophysics**, v.3, n.3, p.367-376, 1988.

IBGE. Disponível em: < <http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em 6 jun. 2008

LIANG, S. Narrowband conversions of land surface albedo – Algorithms, **Remote Sensing of Environment**, New York, v.76, n.2, p.213-238, 2000.

LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. Remote Sensing and Image Interpretation. 3<sup>rd</sup> edition. John, Wiley & Sons, Inc. New York, 1993, 73p.

LEIVAS, J.F. Uso de técnicas de sensoriamento remoto na estimativa do balanço de radiação na superfície. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Universidade Federal de Pelotas, Porto Aegre – RS, 2008.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do Sensoriamento Remoto e Metodologias de Aplicação**. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2003.

MOREIRA, R. S. **Banana**: teoria e prática de cultivo. 2. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1999. 1667 p. 1 CD-ROM.

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.

OLIVEIRA, R.A., PAVANI, L.C., GOMES, P.C.B., MORO, M.E.G., SILVA, V., DORES, L.A.B., GALLI, M.A. Plano da bacia hidrográfica do Rio Mogi Guaçu: metas, ações, serviços e obras de saneamento. VII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento–ASSEMAE. Disponível em: [www.semasa.sp.gov.br/Documentos/ASSEMAE/Trab\\_128.pdf](http://www.semasa.sp.gov.br/Documentos/ASSEMAE/Trab_128.pdf). Acesso em 14/11/2008.

PRATA, A.J. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. **Quarterly Journal of Royal Meteorological Society**, v.122, p.1127-1151, 1996.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. São José dos Campos: Parêntesis, 2007. 136 p.

RANGEL et al. MANUAL DE CULTURAS –CATI: Banana (*Musa sp.*). Disponível em: <<http://www.agrobyte.com.br/banana.htm>>. Acesso em 29 de junho de 2008.

ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimates the Surface Energy Balance. **Physics and Chemistry of the Earth (B)**, n.25, p.147-157, 2000.

ROUSE, J.W.; HAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite – 1 Symposium, 3. Proceedings. Washington, 1973, v.1, p.309-317.

SWAIN, P. H.; DAVIS, S. N. Remote Sensing: the quantitative approach McGraw-Hill, **New York**, p.457, 1978.

SU, Z. A Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent Heat from Point to Continental Scale. In: Su, Z., Jacobs, J (Eds), Advanced Earth Observation – Land Surface Climate. Publications of the National Remote Sensing Board (BCRS), USP – 2, 01 – 02, pp. 91 – 108, 2001.

SU, Z. A Surface Energy Balance System (SEBS) for Estimation of Turbulent HeatFluxes. **Hydrology Earth System. Sci.** 6 (1), 85 - 99, 2002.

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

SILVA, B. B. da ; BEZERRA, M. V. C. Determinação dos fluxos de calor sensível e latente na superfície utilizando imagens TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Piracicaba, SP, v.14, p.1- 10, 2006.

SONG, J. & GAO, W. An Improved Method to Derive Surface Albedo from Narrowband AVHRR Satellite Data: Narrowband to Broadband Conversion. **Journal of Applied Meteorology**, vol.38, p.239-239, 1999.

TASUMI, M.; ALLEN, R.G.; TREZZA, R.. Estimation of surface reflectance and albedo from satellite for routine, operational calculation of land surface energy balance. **Journal Hydrology Engineer**, 2007.

TEIXEIRA, A.H. C., BASTIAANSEN, W.G.M., AHMAD, M.D., BOS, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part A: Calibration and validation. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2008a.

TEIXEIRA, A.H. C., BASTIAANSSEN, W.G.M., AHMAD, M.D., BOS, M.G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the regional scale. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2008b.

WEBER, O. B.; MONTENEGRO, A.A.T.; NUNES E SILVA, M.; SOARES, I.; CRISÓSTOMO, L.A. Adubação Nitrogenada e Potássica em Bananeira ‘Pacovan’ (*Musa Aab*, Subgrupo Prata) na Chapada no Apodi, Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal – SP, v.28, n.1, p.154-157, 2006.