



CAMILA GIORGI LAZARIM

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E
TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE ATRAVÉS DE IMAGENS
DO SATÉLITE AVHRR/NOAA, DESTINADA AO
MONITORAMENTO AGROMETEOROLÓGICO**

**CAMPINAS
2013**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

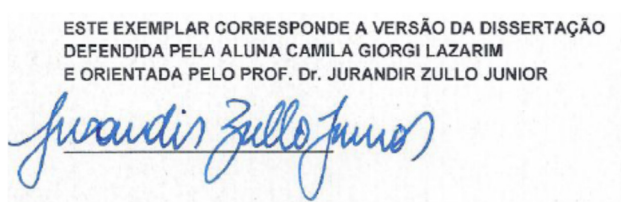
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

CAMILA GIORGI LAZARIM

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E
TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE ATRAVÉS DE IMAGENS
DO SATÉLITE AVHRR/NOAA, DESTINADA AO
MONITORAMENTO AGROMETEOROLÓGICO**

Orientador: Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.



CAMPINAS

2013

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

L457e Lazarim, Camila Giorgi
Estimativa da evapotranspiração e temperatura de
superfície através de imagens do satélite
AVHRR/NOAA, destinada ao monitoramento
agrometeorológico / Camila Giorgi Lazarim. --
Campinas, SP: [s.n.], 2013.

Orientador: Jurandir Zullo Junior.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de
Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de
Campinas, para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Agrícola, na área de concentração de
Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável.

1. Meteorologia por satellite. 2. Satelites artificias em
agricultura. 3. Processamento de imagens. 4.
Agrometeorologia. I. Zullo Junior, Jurandir. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Estimation of evapotranspiration and surface temperature through
images of satellite AVHRR/NOAA for agrometeorological
monitoring

Palavras-chave em Inglês: Weather Satellite, Artificial satellites in agriculture,
Image processing, Agrometeorology

Área de concentração: Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável

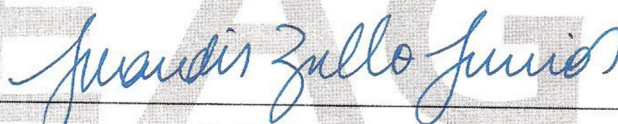
Titulação: Mestra em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: José Teixeira Filho, Luiz Eduardo Vicente

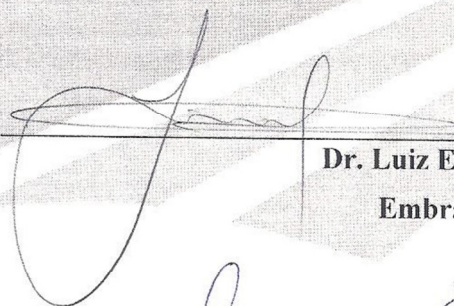
Data da defesa: 26-02-2013

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Camila Giorgi Lazarim**, aprovada pela Comissão Julgadora em 26 de fevereiro de 2013, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



Dr. Luiz Eduardo Vicente
Embrapa/CNPM



Prof. Dr. José Teixeira Filho – Membro Titular
Feagri/Unicamp

*Dedico essa dissertação
à minha irmã Carolina,
pela alegria e paciência.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família por toda paciência e apoio ao longo desses dois anos. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jurandir Zullo Junior pelos ensinamentos e conselhos. Agradeço a todos os colegas de trabalho do Cepagri, tanto aos alunos quanto aos funcionários, por todo apoio, ajuda e companheirismo. Agradeço também ao CNPq pelo financiamento da minha pesquisa, ao Agritempo por fornecer os dados meteorológicos e a FEAGRI pela oportunidade.

*“A melhor recompensa que a vida oferece é a oportunidade de trabalhar duro em algo que
vale a pena.”*

Theodore Roosevelt

RESUMO

A obtenção de valores precisos e confiáveis, em uma quantidade adequada, e com a maior agilidade possível da temperatura da superfície terrestre é estratégica para aplicações de grande interesse como os estudos de mudanças climáticas e o monitoramento agrometeorológico. As redes meteorológicas de superfície, automáticas e manuais, são de grande utilidade e imprescindíveis mas, normalmente, apresentam limitações que dificultam a sua utilização efetiva e confiável em escala regional, tais como: i) Distribuição espacial inadequada; ii) Grande diversidade de equipamentos para medidas; iii) Difíceis condições de manutenção e acesso a dados. Os dados provenientes dos sensores remotos, a bordo dos satélites orbitais, representam uma alternativa que deve ser considerada visando o aumento da densidade, confiabilidade e agilidade de obtenção dos dados de temperatura da superfície terrestre em estudos regionais. A estimativa da evapotranspiração é um parâmetro de grande importância no monitoramento da irrigação, na simulação de balanços hídricos, no acompanhamento do desenvolvimento e produção de uma cultura agrícola, e em estudos climáticos. A utilização da temperatura de superfície como dado inicial simplifica os modelos de estimativa de evapotranspiração de uma determinada área de interesse. Esse é o caso do método S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index), que se fundamenta no fluxo de calor entre a superfície do solo e a atmosfera. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi estimar a evapotranspiração, através do algoritmo S-SEBI, e a temperatura de superfície, utilizando um modelo adaptado dos algoritmos propostos por Sobrino *et al.* (1997) e Ulivieri *et al.* (1994) modificados por Ouaidrari *et al.* (2002). Isto foi feito através da avaliação do comportamento dessas equações propostas ao longo do ano, modificando constantes e dados de entrada, visando a utilização efetiva delas no monitoramento agrometeorológico. Assim, foi obtida uma equação adaptada que teve resultados significativos na estimativa da temperatura de superfície e, a partir desse dado, foi estimada a evapotranspiração que apresentou valores superestimados.

Palavras-chaves: S-SEBI; agricultura; processamento de imagens; São Paulo; emissividade.

ABSTRACT

Obtaining accurate and reliable Earth's surface temperature values, adequate in quantity and with the greatest flexibility possible is of great strategic interest for applications such as studies of climate change and agrometeorological monitoring. The surface meteorological networks - both automatic and manual - are very useful and indispensable, but often have limitations that hinder their effective and reliable use in regional scale, such as: i) inadequate spatial distribution, ii) Wide range of equipment iii) Conditions of maintenance and data access. Data coming from remote sensors on board orbiting satellites represent an alternative that should be considered in order to increase the density, reliability and speed of data attainment from surface temperature in regional studies. The evapotranspiration is a parameter of great importance in monitoring the irrigation and the development and production of a crop, the water balance simulation, and climate studies. The use of surface temperature as initial data simplifies the models that estimate hourly and daily evapotranspiration for a certain area of interest. This is the case of the method SEBI S-(Simplified Surface Energy Balance Index), which is based on the heat flux between the ground surface and the atmosphere. Therefore, the objective of this work was to estimate the evapotranspiration through the S-SEBI algorithm and the surface temperature, using a model adapted from the algorithms proposed by Sobrino *et al.* (1997) and Ulivieri *et al.* (1994) modified by Ouaidrari *et al.* (2002). This was done by evaluating their behavior of these proposed equations over the year and modifying the constants and the input data, for their effective use in agrometeorological monitoring. Therefore, was obtained an equation adapted which had significant results in the estimated surface temperature and, from this data was estimated the evapotranspiration which presented overestimated values.

Keywords: S-SEBI; agriculture; image processing; São Paulo; emissivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Comparação da variação do percentual de produção nos anos 2012 e 2013. (em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa , acessado em: 28 de março de 2013).....	01
Figura 2: Saldo de radiação na superfície.....	07
Figura 3: Representação gráfica da relação entre a temperatura de superfície e a refletância (adaptado de ROERINK <i>et al.</i> 2000).....	11
Figura 4: Banda 4 da passagem completa do NOAA-16 de 16/12/2004 às 05:57GMT.....	15
Figura 5: Banda 4 do recorte sobre o estado de São Paulo da passagem do NOAA-16 de 16/12/2004 às 05:57GMT.....	16
Figura 6: Fluxograma das etapas utilizadas para obter o fluxo de calor latente.....	24
Figura 7: Imagens geradas pelo sistema NAV, com o albedo da superfície à esquerda e a composição RGB à direita, em 01/02/2009.....	31
Figura 8: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 01, 05 e 09 de abril de 2009.....	32
Figura 9: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 07 de março e 09 de janeiro de 2009.....	33
Figura 10: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°).....	36
Figura 11: Relação entre a temperatura de superfície e o albedo de superfície e as retas para LE_{max} e H_{max}	53
Figura 12: Comparação da estimativa da evapotranspiração diária (mm/d) entre os modelos S-SEBI e <i>Thornwaite</i> para o dia 02/02/2010.....	56
Figura 13: Comparação da estimativa da evapotranspiração diária (mm/d) entre os modelos S-SEBI e <i>Thornwaite</i> para o dia 05/02/2010.....	57
Figura 14: Comparação da estimativa da evapotranspiração diária (mm/d) entre os modelos S-SEBI e <i>Thornwaite</i> para o dia 10/04/2010.....	57
Figura 15: Comparação da estimativa da evapotranspiração diária (mm/d) entre os modelos S-SEBI e <i>Thornwaite</i> para o dia 12/04/2010.....	58

Figura A.1: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 01, 02 e 05 de maio de 2009.....	68
Figura A.2: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 01, 05 e 18 de fevereiro de 2009.....	69
Figura A.3: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 04, 05 e 06 de junho de 2009.....	64
Figura A.4: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 04, 09 e 14 de agosto de 2009.....	71
Figura A.5: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 06 e 07 de março e 26 de setembro de 2009.....	72
Figura A.6: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 10, 14 e 18 de maio de 2009.....	73
Figura A.7: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 11, 18 e 19 de abril de 2009.....	74
Figura A.8: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 13, 18 e 22 de julho de 2009.....	75
Figura A.9: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 14 de junho, 01 e 09 de julho de 2009.....	76
Figura A.10: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 17 de agosto, 12 de setembro e 01 de janeiro de 2009.....	77
Figura A.11: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 19, 23 e 24 de maio de 2009.....	78
Figura A.12: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 21, 22 de fevereiro e 02 de março de 2009.....	79
Figura A.13: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 21 de outubro, 02 e 11 de novembro de 2009.....	80
Figura A.14: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 22, 26 e 27 de abril de 2009.....	81
Figura B.1: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 01 de abril e 01 de maio de 2009.....	82

Figura B.2: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 01 de fevereiro e 02 de março de 2009.....	83
Figura B.3: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 01 de julho e 02 de maio de 2009.....	84
Figura B.4: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 02 e 04 de novembro de 2009.....	85
Figura B.5: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 04 de junho e 04 de agosto de 2009.....	86
Figura B.6: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 05 de abril e 05 de maio de 2009.....	87
Figura B.7: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 05 de fevereiro e 06 de março de 2009.....	88
Figura B.8: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 05 de junho e 06 de junho de 2009.....	89
Figura B.9: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 06 de julho e 08 de agosto de 2009.....	90
Figura B.10: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 09 de abril e 09 de julho de 2009.....	91
Figura B.11: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 09 de agosto e 10 de maio de 2009.....	92
Figura B.12: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 11 de abril e 12 de setembro de 2009.....	93
Figura B.13: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 14 de maio e 14 de junho de 2009.....	94
Figura B.14: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 17 de agosto e 18 de abril de 2009.....	95
Figura B.15: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 18 e 21 de fevereiro de 2009.....	96
Figura B.16: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 18 de maio e 18 de julho de 2009.....	97

Figura B.17: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 19 de abril e 19 de maio de 2009.....	98
Figura B.18: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 21 de outubro e 21 de dezembro de 2009.....	99
Figura B.19: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 22 de fevereiro e 26 de setembro de 2009.....	100
Figura B.20: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 22 de julho e 23 de maio de 2009.....	101
Figura B.21: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> nos dias 24 de maio e 26 de abril de 2009.....	102
Figura D.1: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°), em 01/04/2009, 01/07/2009, 02/03/2009, 02/05/2009, 02/11/2009, 04/06/2009, 04/11/2009, 05/02/2009.....	106
Figura D.2: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°) em 05/04/2009, 05/05/2009, 05/06/2009, 06/06/2009, 06/07/2009, 07/03/2009, 08/08/2009 e 09/07/2009.....	107
Figura D.3: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°) em 09/08/2009, 11/04/2009, 12/09/2009, 13/07/2009, 14/05/2009, 14/06/2009, 14/08/2009 e 17/08/2009.....	108
Figura D.4: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°) em 18/04/2009, 18/05/2009, 18/07/2009, 19/04/2009, 19/05/2009, 21/02/2009, 21/10/2009 e 21/12/2009.....	109
Figura D.5: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°) em 22/07/2009, 23/05/2009, 24/05/2009 e 26/04/2009.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características espectrais do NOAA (adaptado de: http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html , acessado em: 05 de julho de 2011).....	04
Tabela 2: Datas escolhidas com menor contaminação por nuvens e respectivos horários da passagem do satélite.....	29
Tabela 3: Valores de temperatura mínima medidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> , em 06/07/2009.....	34
Tabela 4: Valores de temperatura mínima medidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> , em 06/07/2009.....	35
Tabela 5: Resultados da aplicação dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> em datas correspondentes ao Outono e Inverno.....	38
Tabela 6: Resultados da aplicação dos modelos <i>Sobrino</i> e <i>Ulivieri</i> em datas correspondentes a Primavera e Verão.....	39
Tabela 7: Estimativa da temperatura através do método <i>Sobrino</i> utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 4g/cm^2	40
Tabela 8: Estimativa da temperatura através do método <i>Sobrino</i> utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 7g/cm^2	42
Tabela 9: Estimativa da temperatura através do método <i>Ulivieri</i> utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 4g/cm^2	44
Tabela 10: Estimativa da temperatura através do método <i>Ulivieri</i> utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 7g/cm^2	46
Tabela 11: Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 para o modelo <i>Sobrino</i>	48
Tabela 12: Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 para o modelo <i>Ulivieri</i>	50
Tabela 13: Coeficientes obtidos para o modelo <i>Sobrino</i> através de regressão linear múltipla...	52
Tabela 14: Estimativa da temperatura de superfície através do modelo modificado para quatro datas.....	52
Tabela 15: Equações das retas obtidas para LE_{max} e H_{max}	54
Tabela 16: Componentes do Saldo de Radiação.....	54

Tabela 17: Componentes para a estimativa da Evapotranspiração.....	54
Tabela 18: Valores diários de evapotranspiração estimados através do método S-SEBI.....	55
Tabela 19: Valores diários de evapotranspiração estimados através do método <i>Thornthwaite</i>	56
Tabela C.1: Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 e $TV=4g/cm^2$ para o modelo <i>Sobrino</i>	103
Tabela C.2: Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa e $TV=4g/cm^2$ igual a 0,9853 para o modelo <i>Ulivieri</i>	104
Tabela A1: Fotoperíodo diário, N, em função da latitude e época do ano (adaptado de PEREIRA <i>et. al.</i> 1997).	111
Tabela A2: Emissividades para diferentes tipos de cobertura. Os valores são válidos para bandas espectrais no intervalo de 10,2 a 12,5 μm (adaptado de GUPTA <i>et al.</i> 1999).	112

LISTA DE SÍMBOLOS

a - Albedo da superfície

c_1 - constante universal, $3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^2$

c_2 - constante universal, $1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ mK}$

DJ - Dia do ano

d_r - inverso do quadrado da distância Terra – Sol (m^2)

ET_0 - Evapotranspiração de referência (mm d^{-1})

ET_r - Evapotranspiração real (mm d^{-1})

ET_p - Evapotranspiração potencial (mm d^{-1})

ET_d - Evapotranspiração diária (mm d^{-1})

G - Fluxo de calor no solo (W/m^2)

H - Fluxo de calor sensível (W/m^2)

I – Índice de calor da região

L - Calor latente de evaporação ($2,45 \text{ MJ.Kg}^{-1}$)

LE - Fluxo de calor latente (W/m^2)

N – Fotoperíodo diário

ND – Número de dias no mês

R - Radiância Espectral ($\text{W/m}^2\mu\text{m.sr}$)

R_c – Radiação de onda curta (W/m^2)

$R_{c\downarrow}$ - Radiação de onda curta incidente (W/m^2)

$R_{c\uparrow}$ - Radiação de onda curta refletida (W/m^2)

R_l - Radiação de onda longa (W/m^2)

$R_{l\downarrow}$ - Radiação de onda longa incidente (W/m^2)

$R_{l\uparrow}$ - Radiação de onda longa refletida (W/m^2)

R_n - Saldo de radiação (W/m^2)

S - Constante solar, 1367 W/m^2

T_a - Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$)

T_i - Temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$)

T_h - Temperatura dependente da refletância para H_{max} (K)

T_{LE} – Temperatura dependente da refletância para LE_{max} (K)

T_s - Temperatura da superfície (°C)

T_4 - Temperatura de brilho do canal 4 do AVHRR (K)

T_5 - Temperatura de brilho do canal 5 do AVHRR (K)

TV - Conteúdo total de vapor de uma coluna de ar que se estende da superfície ao topo da atmosfera (g/cm^2)

z – altitude local (m)

α - Refletância

ε - Emissividade da superfície

ε_a - Emissividade do ar

θ - ângulo zenital (radianos)

λ - comprimento de onda (μm)

Λ - Fração evaporativa

σ - constante de Stefan-Boltzman, $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}^4$

τ - Transmissividade atmosférica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativa.....	1
1.2 Objetivo Geral.....	5
1.3 Objetivos Específicos.....	5
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1 Balanço de Energia.....	6
2.2 Evapotranspiração.....	8
2.3 S-SEBI.....	10
2.4 NOAA.....	13
2.5 Temperatura de superfície.....	17
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.1 Estimativa da temperatura de superfície.....	20
3.2 Estimativa da Evapotranspiração.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	29
4.1 Temperatura de superfície.....	29
4.2 Evapotranspiração.....	53
5. CONCLUSÕES.....	60
5.1 Temperatura de superfície.....	60
5.2 Evapotranspiração.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62
APÊNDICE.....	68
A. Imagens da temperatura de superfície.....	68
B. Correlação entre temperaturas.....	82
C. Tabelas de resultados do teste 3.....	103
D. D. Variação da temperatura.....	106
ANEXO.....	106
A1. Fotoperíodo.....	111
A2. Emissividade.....	112

1. Introdução

1.1 Justificativa

O agronegócio nacional é fundamental para o nosso país, representando cerca de um terço do PIB brasileiro. O aumento da produção agrícola nacional (Figura 1) amplifica a necessidade de um planejamento. O Zoneamento Agrícola é um instrumento de política e gestão de riscos na agricultura.

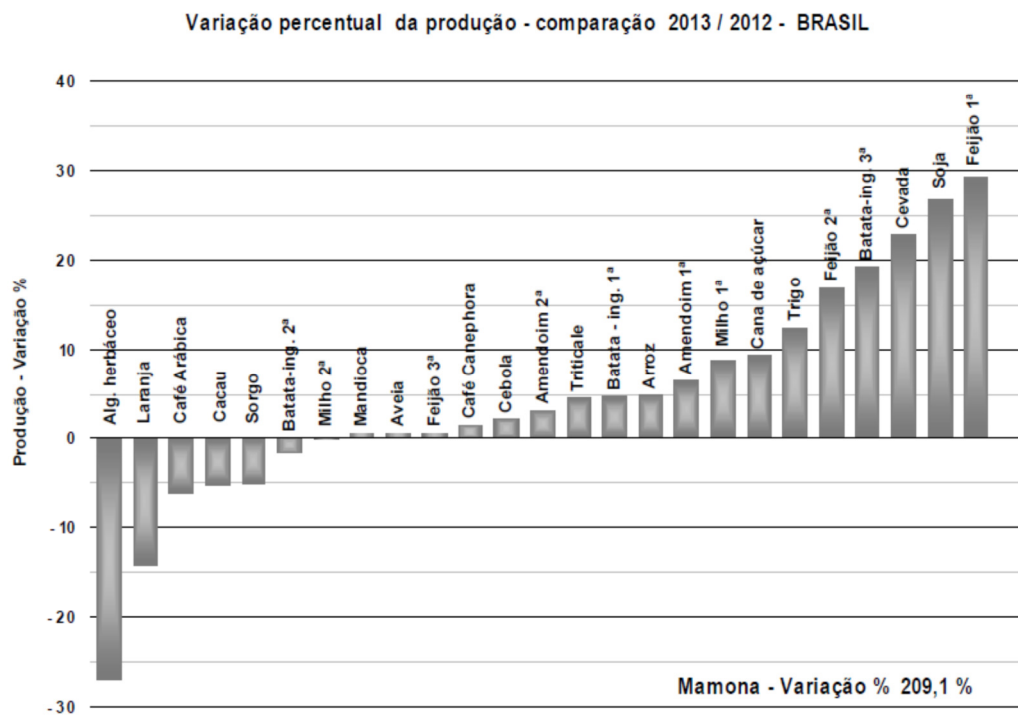


Figura 1: Comparação da variação do percentual de produção nos anos 2012 e 2013 (em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa>, acessado em: 28 de março de 2013).

Como o clima é um dos principais fatores determinantes da produção agrícola, para obter sucesso no planejamento das atividades agrícolas é necessário observar a resposta das culturas às variações dos fenômenos atmosféricos às quais ficam expostas. Através de um monitoramento contínuo é possível avaliar os efeitos produzidos na vegetação e garantir decisões que contribuem para o desenvolvimento das culturas. Nesse sentido o Zoneamento Agrícola quantifica os riscos climáticos envolvidos nas lavouras que podem ocasionar perdas na produção (em: <http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola>, acessado em: 28 de março de 2013).

Dessa forma, um monitoramento agrometeorológico eficiente é imprescindível para tornar viável e útil o planejamento agrícola.

A temperatura de superfície é de grande importância para o monitoramento agrícola, permitindo monitorar geadas e temperaturas elevadas, que afetam os locais de produção. Além disso, a temperatura de superfície é um indicador do estado hídrico das plantas, sendo um dos principais dados de entrada para os algoritmos de estimativa da evapotranspiração. Portanto, essa estimativa contribui para o monitoramento da demanda hídrica das culturas agrícolas.

Alterações no clima, na vegetação e/ou na cobertura vegetal causam mudanças na evapotranspiração. Para conseguir quantificar o efeito dessas mudanças na energia e no balanço hídrico da superfície e, dessa forma, realizar estudos de mudanças climáticas e monitoramento agrometeorológico, é preciso estimar a evapotranspiração com a melhor precisão possível como, por exemplo, através de modelos que se baseiam em sua natureza física. Através dessa estimativa, é possível obter dados relevantes como a simulação de balanços hídricos, monitoramento da vegetação através de índices específicos e identificação de danos por geadas e outros fenômenos extremos.

Existem diversos métodos para estimar a temperatura de superfície através de dados de satélites. Entre eles, estão os algoritmos propostos por Sobrino *et al.* (1997) e Ulivieri *et al.* (1994) modificados por Ouaidrari *et al.* (2002), que utilizam o método denominado de “*split-window*” para diminuir os efeitos atmosféricos e, assim, tornar a estimativa da temperatura de superfície mais precisa e útil. Entretanto, é necessário modificar esses algoritmos para adaptá-los a áreas distintas das que foram utilizadas no seu desenvolvimento, para obter os resultados desejados.

Há várias pesquisas para determinar a variabilidade temporal e espacial da evapotranspiração, através de medidas em superfície e modelos numéricos. Os satélites meteorológicos representam uma alternativa viável para a obtenção dos dados necessários para determinar a evapotranspiração devido a fatores como:

- i) Custo de aquisição das estações meteorológicas de superfície;
- ii) Dificuldade de comunicação e operação, associada à dificuldade de acesso a vários locais em que estão instaladas as estações de superfície;
- iii) Grande dimensão territorial do país.

Muitos métodos têm sido propostos para estimar a evapotranspiração a partir de dados de sensoriamento remoto orbital. As vantagens desses métodos são, principalmente, que eles permitem apresentar a evapotranspiração de forma espacial e, que após o ajuste do algoritmo às condições do local de estudo, não são necessários realizar experimentos em campo, além de não ser necessário conhecer previamente a cobertura terrestre. Esses métodos exigem apenas observações meteorológicas como as temperaturas do ar e de superfície no momento da passagem dos satélites.

O S-SEBI é um algoritmo que utiliza apenas observações meteorológicas e dados de imagens de satélite. Esse método utiliza uma metodologia relativamente simples para a obtenção do balanço de energia e, a partir desses dados, estima a evapotranspiração com base apenas no contraste da fração evaporativa entre áreas secas e úmidas (ROERINK *et al.* 2000).

Para estimar a evapotranspiração utilizando o algoritmo S-SEBI e a temperatura de superfície utilizando os algoritmos Sobrino *et al.* (1997) e Ulivieri *et al.* (1994) modificados por Ouaidrari *et al.* (2002), é necessário que os canais visível, infravermelho próximo e infravermelho termal sejam utilizados como dados de entrada. Os satélites da série AVHRR/NOAA (Advanced Very High Resolution Radiometer - National Oceanic and Atmospheric Administration) são indicados neste caso por terem um sensor que proporciona imagens com cinco bandas no espectro eletromagnético distribuídas desde o visível até o infravermelho termal (Tabela 1). A alta resolução temporal e baixa resolução espacial dos satélites AVHRR/NOAA podem fornecer informações em escalas globais ou regionais com maior frequência temporal. Além disso, os satélites possuem cobertura global e imagens gratuitas, o que faz com que seja elevada a probabilidade de obter imagens adequadas às áreas de interesse e reduzir os custos de aquisição e processamento das imagens.

Nesse sentido, este trabalho tem a seguinte hipótese: É possível estimar a temperatura de superfície através de um modelo adaptado dos algoritmos propostos por Sobrino *et al.*(1997) e Ulivieri *et al.* (1994) modificados por Ouaidrari *et al.* (2002) e, com esses dados, estimar a evapotranspiração diária no estado de São Paulo utilizando o modelo S-SEBI.

Tabela 1. Características espectrais do NOAA (adaptado de: <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>, acessado em: 05 de julho de 2011)

Canal	Banda Espectral	
	Largura (µm)	Nome
1	0,58 – 0,68	Visível (Vermelho)
2	0,725 – 1,00	Infravermelho Próximo
3A	1,58 – 1,64	Infravermelho Próximo
3B	3,55 – 3,93	Infravermelho Médio
4	10,3 – 11,3	Infravermelho Termal
5	11,5 – 12,5	Infravermelho Termal

1.2 Objetivo Geral

Essa dissertação tem como objetivo principal estimar a temperatura de superfície no estado de São Paulo através de um modelo modificado dos algoritmos propostos por Sobrino *et al.*(1997) e Ulivieri *et al.* (1994) modificados por Ouaidrari *et al.* (2002) e, utilizando esses dados, estimar a evapotranspiração diária no estado de São Paulo através do modelo S-SEBI.

1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são os seguintes:

- Modificar os modelos propostos por Sobrino *et al.*(1997) e Ulivieri *et al.* (1994) modificados por Ouaidrari *et al.* (2002) através de variações dos dados de entrada e regressão numérica.
- Comparar os resultados obtidos através do modelo modificado com os dados de temperatura do ar de estações meteorológicas para verificar a validade do método;
- Aplicar o método S-SEBI em imagens AVHRR/NOAA e comparar com os valores de evapotranspiração obtidos através da estimativa utilizando dados das estações meteorológicas de superfície.

2. Revisão de Literatura

2.1 Balanço de Energia

O Balanço de Energia é a representação dos diferentes tipos de interação da energia com a superfície. A principal fonte de energia para a superfície é a radiação solar, que é denominada de Radiação de Ondas Curtas (R_c). Parte da radiação incidente ($R_{c\downarrow}$) é refletida ($R_{c\uparrow}$), conforme o poder refletor da superfície chamado albedo (a) e dessa forma o saldo da radiação de ondas curtas é dado pela Equação (1).

$$R_c = R_{c\downarrow} - R_{c\uparrow} = R_{c\downarrow}(1 - a) \quad (1)$$

Além da energia radiante, existe também a emitida pela superfície e pela atmosfera. Conforme a Lei de Stefan-Boltzmann (Equação 2), essa energia é proporcional à temperatura e emissividade do corpo (ε) e é denominada radiação de ondas longas (R_l).

$$R_l = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2)$$

sendo, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$

O saldo de radiação de ondas longas é dado pela Equação 3.

$$R_l = R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} \quad (3)$$

Parte da radiação de onda longa ascendente ($R_{l\uparrow}$) é devido ao aquecimento da superfície e parte é a radiação de onda longa da atmosfera refletida. O saldo das ondas longas é dado pela Equação 4.

$$R_l = R_{l\downarrow} - \varepsilon_a \sigma T_a^4 + \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (4)$$

onde, ε_a é a emissividade da ar e T_a é a temperatura do ar.

Portanto o saldo de radiação (R_n) considerando todas as energias refletidas (Figura 2) e emitidas da superfície e atmosfera é dado pela Equação 5.

$$R_n = R_{c\downarrow}(1 - a) + R_{l\downarrow} - \varepsilon_a \sigma T_a^4 + \varepsilon_s \sigma T_s^4 \quad (5)$$

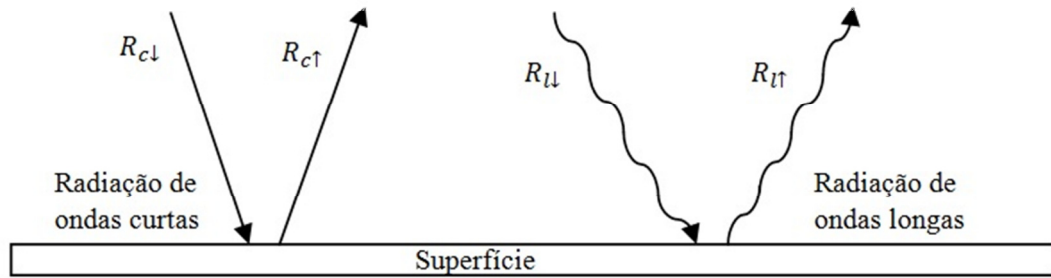


Figura 2: Saldo de radiação na superfície.

As componentes da Equação 4 podem ser medidas através de radiômetros, porém não é rotina em postos meteorológicos e, por isso, existe a necessidade da estimativa do saldo de radiação.

Esse saldo de radiação, ou seja, a energia disponível, é então utilizada em outros processos da superfície, sendo os principais: aquecimento do ar (H); processos de evaporação (LE); aquecimento do solo (G) (Equação 6).

$$R_n = LE + H + G \quad (6)$$

Sendo que o aquecimento do ar ocorre através do chamado fluxo de calor sensível (H), o do solo através do fluxo de calor no solo (G) e os processos de evaporação através do fluxo de calor latente (LE). Da mesma forma que o saldo de radiação, os fluxos de calor podem ser estimados através de vários métodos (PEREIRA *et. al.*, 1997).

2.2 Evapotranspiração

A evaporação é o fenômeno no qual uma substância no estado líquido passa para o estado gasoso. Esse processo também pode ser definido como a transferência de água de solos úmidos, oceanos, lagos e rios e sublimação de gelo para a atmosfera sob a forma de vapor (VAREJÃO-SILVA, 2005). A água consome energia para evaporar e passa à atmosfera como vapor, sendo que a quantidade de energia necessária para evaporar a água (calor latente de evaporação) é $2,45 \cdot MJ \cdot Kg^{-1}$.

A transpiração é a perda da água que foi utilizada pela planta na forma de vapor. Esse fluxo de água ocorre através dos estômatos das plantas, localizados na folha. Essas estruturas permanecem abertas durante o dia e fechadas à noite e durante situações de estresse hídrico, que ocorre em duas situações: quando o solo não contém água disponível para a planta; quando a planta não consegue absorver a água do solo em uma velocidade e quantidade suficientes para atender a demanda atmosférica (PEREIRA *et. al.*, 1997).

O termo evapotranspiração expressa a ocorrência simultânea da evaporação e transpiração em uma superfície vegetada e foi utilizado por Thornthwaite no início da década de 40 (PEREIRA *et. al.*, 1997). Seu controle é feito pela disponibilidade de energia, demanda atmosférica, tensões superficiais e suprimento de água do solo às plantas. Por ser um processo que depende principalmente da quantidade de energia que chega à superfície do solo, seu valor depende da latitude e da topografia do local. Outro fator que influencia a disponibilidade de radiação é o albedo da superfície. Uma vegetação mais escura “evapotranspira” mais que uma cultura ou gramado sob as mesmas condições climáticas.

Thornthwaite também desenvolveu o conceito de evapotranspiração potencial (ET_p), que corresponde à água que uma superfície extensa e vegetada, com ótimas condições de umidade, utiliza. A ET_p é o oposto da chuva e possui a mesma unidade de medidas, isto é mm. O resultado da comparação entre a chuva e a ET_p é o balanço hídrico climatológico, que indica se a cultura possui deficiências ou excessos de umidade durante o ano.

A evapotranspiração de referência (ET_0) é a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência sem deficiência hídrica, como a grama utilizada em postos meteorológicos. A evapotranspiração real (ET_r) ocorre nas condições existentes de umidade e cobertura, ou seja, nas condições reais do local (PEREIRA *et. al.*, 1997). Devido às dificuldades na gestão das culturas e restrições ambientais, que limitam a evapotranspiração, a ET_r é geralmente menor que a ET_p (ALLEN *et. al.* 1998).

Muitos métodos para estimar a evapotranspiração já foram propostos. Por ser uma das componentes principais do ciclo hidrológico, sua aplicação é importante para estudos hidrológicos, climáticos e no planejamento e manejo de cultivos agrícolas. Devido à grande quantidade de água utilizada na agricultura, é importante conhecer a evapotranspiração de uma cultura, por exemplo, para planejar as irrigações (KASHYAP e PANDA, 2001).

Os métodos tradicionais para estimar a evapotranspiração, como a razão de Bowen, estimam com precisão para uma área homogênea, porém, não são precisos para áreas heterogêneas, com diferentes coberturas. Além disso, exigem medidas de uma série de variáveis que necessitam de extensos trabalhos experimentais em campo (SANTOS e SILVA, 2008). Dessa forma, utilizar dados de estações meteorológicas e, para uma estimativa em escala regional, usar o sensoriamento remoto é de grande utilidade (ROERINK *et al.* 2000).

Um método que utiliza apenas dados de estações de superfícies é o desenvolvido por Thornthwaite (PEREIRA *et. al.* 1997), que será chamado nesse trabalho *Thornthwaite*, que utiliza apenas a temperatura do ar como variável independente. Esse modelo estima a evapotranspiração potencial mensal e é dado pelas Equações 7 a 9.

$$ET_p = 16(10 \frac{T_i}{I})^d \quad (7)$$

$$d = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 7,7912 \cdot 10^{-2} I + 0,49239 \quad (8)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2T_i)^{1,514} \quad (9)$$

sendo, T_i a temperatura média mensal e I o índice de calor da região.

A partir desse método foram desenvolvidos vários outros que são utilizados em redes de estações meteorológicas de superfície para contribuir com o manejo agrícola. O IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) utiliza o método de Camargo, desenvolvido em 1983, que foi baseado nos resultados de Thornthwaite e também utiliza a temperatura do ar como variável de entrada (em: http://www.ciiagro.sp.gov.br/def_1.html, acessado em: 13 de outubro de 2012).

A maioria dos outros métodos propostos, como o SEBAL – *Surface Energy Balance Algorithm for Land*, SEBS – *Surface Energy Balance System*, TSEB – *Two Source Energy Balance* e o S-SEBI - *Simplified Surface Energy Balance Index* (SANTOS e SILVA, 2008) é baseada na transferência de energia entre o solo e atmosfera. Esses métodos são promissores, pois não é necessário conhecer previamente o sistema de cultivo, sendo que os resultados podem ser obtidos de forma espacial, de acordo com o tipo de cobertura presente no local de estudo (SANTOS e SILVA, 2008). Dessa forma, com o uso do sensoriamento remoto para mapear a distribuição da evapotranspiração, os resultados podem ser fornecidos em escala regional.

2.3 S-SEBI

O algoritmo S-SEBI (Simplified Surface Energy Balance Index) foi desenvolvido por Roerink *et al.* (2000) é um modelo simplificado para estimar a evapotranspiração. Esse método utiliza a fração evaporativa para estimar o fluxo de calor latente e o fluxo de calor sensível, conforme descrito na Equação 10.

$$\Lambda = \frac{LE}{LE+H} = \frac{LE}{R_n-G} \quad (10)$$

Foi observado que existe uma relação entre a temperatura de superfície e a refletância para áreas com forçantes atmosféricas constantes (BASTIAANSSEN, 1995). O comportamento das refletâncias, e temperaturas pode ser explicado se for assumido temperatura do ar e radiação global constantes.

Segundo Roerink *et al.* (2000), para baixas refletâncias a temperatura de superfície tende a ser constante com o aumento da refletância (I – Figura 3). Comportamento que ocorre em áreas com superfícies irrigadas, corpos d’água e solos saturados, ou seja, áreas em que toda energia é usada no processo de evaporação.

Com o aumento da refletância (II – Figura 3), a temperatura de superfície também aumenta (ROERINK *et al.* 2000). A partir de certo ponto a evaporação diminui (III – Figura 3), devido ao decréscimo da disponibilidade da umidade no solo e isso faz com que ocorra uma mudança na temperatura. Acima de um determinado valor da refletância, a temperatura de superfície diminui com o aumento da refletância. Nesse caso o que ocorre é que a umidade do solo diminui até que não ocorre mais evaporação, o que deixa toda a energia disponível para aquecer a superfície. Entretanto, com o aumento da refletância, a energia disponível diminui e dessa forma a temperatura de superfície diminui com o aumento da refletância. (ROERINK *et al.* 2000).

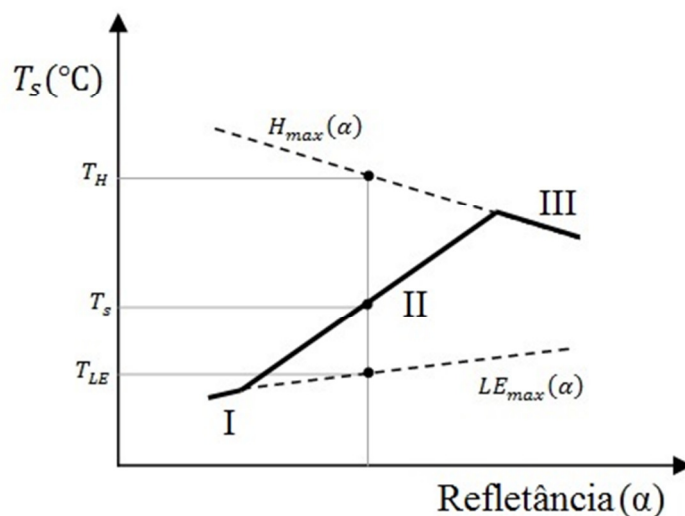


Figura 3: Representação gráfica da relação entre a temperatura de superfície e a refletância (adaptado de ROERINK *et al.* 2000).

Conforme pode ser visto na Figura 3, a temperatura de superfície e a refletância são determinadas para cada pixel. Para estimar a fração evaporativa é necessário também determinar a temperatura dependente da refletância T_{LE} , onde $LE_{max}(\alpha) = R_n - G$ e $H = 0$ e a temperatura dependente da refletância T_H , onde $H_{max}(\alpha) = R_n - G$ e $LE = 0$.

Assim, a fração evaporativa é dada pela Equação 11.

$$\Lambda = \frac{T_H - T_s}{T_H - T_{LE}} \quad (11)$$

Portanto a evapotranspiração pode ser calculada a partir da Equação 12.

$$LE = \Lambda(R_n - G) \quad (12)$$

As maiores vantagens desse método em relação a outros são: i) Não é necessário nenhuma informação adicional, além dos dados rotineiros, de estações meteorológicas de superfície para obter os valores dos fluxos necessários ao cálculo de evapotranspiração; ii) As temperaturas extremas para condições secas e úmidas variam com a mudança dos valores de refletância, enquanto outros métodos tentam determinar uma temperatura fixa para condições úmidas e secas, para a imagem toda e cada tipo de solo (ROERINK *et al.* 2000).

A estimativa da evapotranspiração através do método S-SEBI foi validada em 1997 na área de Piano di Rosia (Toscana, Itália). Uma diferença relativa máxima de 8% entre a fração evaporativa medida através da Razão de Bowen e a estimada foi encontrada (ROERINK *et al.* 2000).

O algoritmo S-SEBI vem sendo aplicado em diferentes regiões para estimar a evapotranspiração. Sobrino *et al.* (2005) utilizou o método na Espanha, Weligepolage (2005) na Holanda e Sobrino *et al.* (2007) na Península Ibérica. No Brasil, Santos e Silva (2008) utilizaram o método para obter o saldo de radiação e o coeficiente da cultura da bananeira em áreas irrigadas em regiões semiáridas. Os autores obtiveram erros inferiores a 3,5% nos valores do saldo de radiação, sendo que os valores do coeficiente da cultura foram coerentes com outros estudos já realizados. Recentemente, Galleguillos *et. al.* (2011) utilizou o algoritmo S-SEBI para estimar a evapotranspiração em vinícolas na bacia do Mediterrâneo. Isso mostra que o algoritmo vem sendo aplicado em diferentes áreas, com diferentes culturas e solos e tem tido resultados significativos.

2.4 NOAA

Dentre os sistemas orbitais existentes, os satélites da série AVHRR/NOAA (Advanced Very High Resolution Radiometer - National Oceanic and Atmospheric Administration) estão entre os mais indicados para o monitoramento agrometeorológico e estudos climáticos por proporcionarem imagens com coberturas globais diárias, possuírem bandas espectrais termais calibradas e terem disponibilidade ampla de imagens devido à operação simultânea de vários satélites (KIDWELL, 1995).

Os satélites da série AVHRR/NOAA operam em órbitas circulares, síncronas com o sol (heliossíncronas), com altitude média de 850km e quase-polares (inclinação média de 98,819°), formando um campo de observação compreendido entre 78° de latitude Norte e 78° de latitude Sul. O tempo necessário para que seja realizada uma volta completa em torno da Terra (período orbital) é de, aproximadamente, 102 minutos, o que faz com que 14,1 órbitas por dia sejam completadas (em < <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>> . Acesso em: 05 de julho 2011). Cada satélite da série realiza duas passagens por dia sobre um mesmo local, sendo uma diurna e outra noturna. Isto faz com a frequência de aquisição de imagens diárias sobre um mesmo ponto na Terra seja elevada.

Cada imagem cobre uma faixa de, aproximadamente, 2.700km de largura, no solo, sendo que a melhor resolução espacial de um ponto da imagem (pixel) é da ordem de 1,1km ao nadir, ou seja, mais próximo ao centro da imagem. Os satélites da série NOAA, a partir do NOAA-15, que entrou em operação em 1998, possuem seis bandas espectrais nas faixas do espectro de radiação eletromagnética correspondentes ao visível, infravermelho próximo, infravermelho médio e infravermelho termal. A Figura 4 apresenta a banda 4 de uma passagem completa do NOAA-16 ocorrida em 16/12/2004 às 05:57GMT, mostrando a abrangência espacial das imagens deste sistema. A Figura 5 é um detalhe sobre o estado de São Paulo desta mesma passagem.

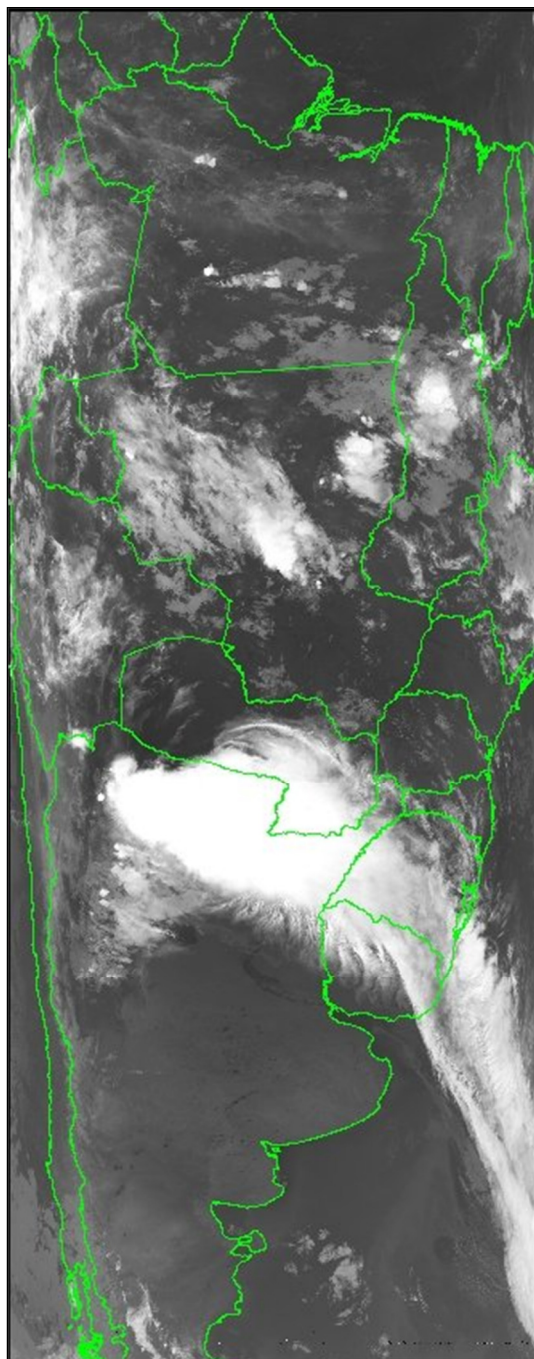


Figura 4. Banda 4 da passagem completa do NOAA-16 de 16/12/2004 às 05:57GMT

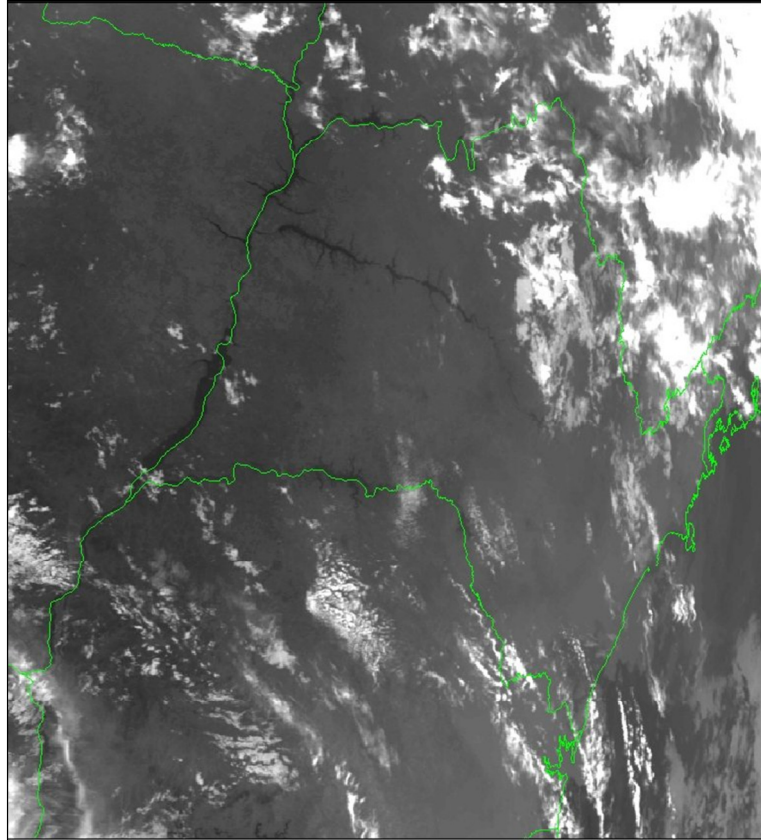


Figura 5. Banda 4 do recorte sobre o estado de São Paulo da passagem do NOAA-16 de 16/12/2004 às 05:57GMT

Devido ao volume de dados disponíveis, é necessário um método para automatizar etapas do processamento de imagens, como a correção geométrica e a análise de dados extraídos. O NAVPRO é um sistema automático que, como descrito em Antunes (2005) e Esquerdo (2007), foi desenvolvido parcialmente por pesquisadores do *Colorado Center for Astro Dynamics Research* (CCAR), *Aerospace Engineering Sciences*, da Universidade do Colorado (Boulder/USA). O sistema converte formatos, faz calibração radiométrica, correção geométrica e gera o albedo e o NDVI (Índice de Vegetação Normalizada), calculado através das refletâncias das bandas 1 e 2 (Equação 13) de imagens AVHRR/NOAA de forma automática (ESQUERDO *et. al.* 2006).

$$\text{NDVI} = (\alpha_2 - \alpha_1) / (\alpha_2 + \alpha_1) \quad (13)$$

onde, α_1 é a refletância no vermelho e α_2 a refletância no infravermelho próximo.

2.5 Temperatura de superfície

A temperatura de superfície é uma variável climatológica estratégica para estimar o fluxo de energia da superfície da Terra. A interação entre a atmosfera e a superfície é diretamente relacionada com a temperatura de superfície, portanto, uma melhor acurácia na estimativa da temperatura de superfície torna mais preciso o cálculo do fluxo de energia na superfície. Uma incerteza de 1°C a 3°C na estimativa da temperatura de superfície pode levar a erros significativos nos modelos de estimativa de fluxo de superfície. Em grandes áreas vegetadas, por exemplo, os erros podem chegar a 100W/m² (KUSTAS e NORMAM, 1996).

A temperatura de superfície (**T_s**) global ou regional é apenas viável por sensoriamento remoto por satélites. Os sensores a bordo dos satélites medem a radiância da superfície modificada pela atmosfera. Para um dado sensor, **T_s** depende da distribuição de temperatura e emissividade dentro de um pixel e do canal espectral. A radiação eletromagnética transporta energia que pode ser quantificada em termos de radiância espectral. Na região do infravermelho, a temperatura de brilho é equivalente à temperatura do corpo negro. A temperatura de brilho correspondente a essa radiância é calculada através da equação inversa de Planck (Equação 14).

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left[\frac{\varepsilon c_1}{\lambda^5 \pi R} + 1 \right]} \quad (14)$$

onde, λ é o comprimento de onda (μm); ε é a emissividade do corpo no comprimento de onda; T é a temperatura (K); c_1 e c_2 são constantes universais que valem respectivamente $3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ e $1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; R é a radiância espectral ($\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m} \cdot \text{sr}$).

Para obter a temperatura de superfície através de sensores orbitais, é necessário levar em conta alguns fatores, como os efeitos atmosféricos e a emissividade. Os três principais efeitos da atmosfera são a absorção, a emissão ascendente e a irradiação descendente (DASH *et al.* 2002). O vapor d'água é o principal responsável pelos efeitos atmosféricos. Outros gases também influenciam esses efeitos, mas não são tão relevantes quanto o vapor d'água. O conteúdo de vapor d'água na atmosfera é bastante variável e geralmente diminui com a altitude, o que dificulta a obtenção do seu valor. A emissividade da superfície, ao contrário do que acontece em oceanos, difere muito com a vegetação, umidade da superfície e rugosidade e, por isso, ao ser estimada, é necessário levar em conta a superfície do local.

Existe vários algoritmos para estimar a temperatura de superfície, a partir da temperatura de brilho e dados auxiliares (DASH *et al.* 2002). A maioria dos algoritmos que estimam a temperatura de superfície utilizando imagens de satélite se baseia em medidas da temperatura de brilho do topo da atmosfera através de duas bandas espectrais termais no infravermelho. Para isso, os modelos partem do pressuposto que os efeitos atmosféricos podem ser aproximados como uma diferença em dois canais (método “*Split-Window*”), que a emissividade da superfície pode ser estimada com acurácia e que a emissão da superfície é angularmente isotrópica (PINHEIRO *et. al.*, 2006).

Os modelos que utilizam o método *Split-Window* são derivados da expansão de primeira ordem da série de Taylor, aplicada à equação de Planck (equação 14). No caso do sensor AVHRR, são utilizados os canais 4 e 5 e é assumido que a atenuação atmosférica é maior no canal 5 do que no canal 4, e que a diferença aumenta com o aumento da quantidade de vapor d'água. Para esse sensor, a relação entre a temperatura de brilho nos dois canais (T_4 e T_5) e a temperatura de superfície (T_s) é dada pela Equação 15.

$$T_s = T_4 + a_1(T_4 - T_5) + a_0 \quad (15)$$

sendo a_0 uma constante e a_1 uma constante dependente do tipo da atmosfera e que leva em conta o conteúdo de vapor d'água e a emissividade (PINHEIRO *et. al.*, 2006).

Os métodos propostos por Sobrino *et al.* (1997) e Ulivieri *et al.* (1994) utilizam essa relação e já foram aplicados em diferentes regiões do mundo, como Canadá (HAN *et al.* 2004) e Brasil (GUSSO e FONTANA, 2003).

Para melhorar a precisão esses modelos foram corrigidos por Ouaidrari *et al.* (2002) para reduzir os efeitos atmosféricos, principalmente a absorção gasosa. Os algoritmos corrigidos foram aplicados por Lazarim e Zullo Jr. (2009) no estado do Paraná, gerando correlações significativas entre a temperatura do ar e a temperatura de superfície estimada.

Lazarim e Zullo Jr. (2011) estimaram a temperatura de superfície no estado de São Paulo utilizando os dois algoritmos citados acima e não obtiveram resultados significativos, mostrando que são necessárias outras modificações nos métodos propostos para adaptá-los para o estado de São Paulo.

3. Material e Métodos

A metodologia do trabalho é dividida em duas etapas principais:

1. Estimativa da temperatura de superfície
2. Estimativa da evapotranspiração

3.1 Estimativa da temperatura de superfície

Foram escolhidas imagens do estado de São Paulo obtidas no banco de dados do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI/UNICAMP), que estão no formato padrão “Level-1B” utilizado pela NOAA. Estas imagens foram processadas através do sistema NAVPRO (ESQUERDO *et al.* 2006), sendo feito um recorte para o Estado de São Paulo.

Para estimar a temperatura de superfície, foi criada uma rotina em linguagem IDL (*Interactive Data Language*), utilizando o método “*Split-Window*“, baseado em dois modelos propostos na literatura: Sobrino *et al.* (1997) corrigido por Ouaidrari *et al.* (2002), denominado de *Sobrino*, e Ulivieri *et al.* (1994), denominado *Ulivieri*.

No modelo *Sobrino*, a temperatura de superfície T_s é calculada através da Equação 16.

$$T_s = 12,3626 + 0,9549.T_4 + 1,8474.(T_4 - T_5) + 0,2038.(T_4 - T_5)^2 + (2,0049.TV + 52,3183).(1 - \varepsilon) \quad (16)$$

onde, TV é o conteúdo total de vapor d’água, igual a 3g/cm^2 ;

T_4 é a temperatura de brilho do canal 4;

T_5 é a temperatura de brilho do canal 5;

A emissividade da superfície (ε) pode ser obtida a partir do índice de vegetação NDVI, cujo valores são dados automaticamente pelo sistema NAV, através das Equações 17, 18 e 19.

$$\Delta\varepsilon = 0,01019 + 0,0134.\ln(\text{NDVI}) \quad (17)$$

$$\varepsilon_4 = 0,9897 + 0,039.\ln(\text{NDVI}) \quad (18)$$

$$\varepsilon_5 = \varepsilon_4 - \Delta\varepsilon \quad (19)$$

O valor final da emissividade ε é a média aritmética entre ε_4 e ε_5 , conforme a Equação 20.

$$\varepsilon = (\varepsilon_4 + \varepsilon_5) / 2 \quad (20)$$

A temperatura de superfície no modelo *Ulivieri* é dada pela Equação 21.

$$T_s = 0,9947.T_4 + 2,6212.(T_4 - T_5) + (2,5551.TV + 52,1904).(1 - \varepsilon) \quad (21)$$

Da mesma forma que a Equação 16, T_4 e T_5 são as temperaturas de brilho dos canais 4 e 5 do AVHRR/NOAA e TV é o conteúdo de vapor d'água. A mesma metodologia é utilizada para o cálculo da emissividade da superfície (ε). Com os valores obtidos da temperatura de superfície utilizando os dois métodos, foram feitos mapas de temperatura.

Através dos valores da latitude e longitude de cada estação meteorológica, é possível corresponder essas coordenadas com as dos pixels (cada um representando 1,1 x 1,1km) na imagem já processada, e, assim, obter o valor da temperatura de superfície estimada para esses locais. Dessa maneira é possível observar a diferença absoluta entre a temperatura estimada pelo satélite e a temperatura medida nas estações de superfície. Apesar da validação dos produtos de sensoriamento remoto serem feitos com dados pontuais, possuindo assim escalas diferentes, vários estudos mostram que os resultados são encorajadores (GAO *et al.*, 2008)

As estações meteorológicas de superfície do estado de São Paulo utilizadas para fazer essa comparação são: Ariranha, Avaré, Barretos, Bauru, Campinas, Casa Branca, Catanduva, Echaporã, Ibitinga, Ilha Solteira, Itapeva, Jaboticabal, Jales, Jau, José Bonifácio, Junqueirópolis, Limeira, Lins, Marinópolis, Miguelópolis, Mogi Guaçu, Mogi Mirim, Ourinhos, Paulínia, Pedrinhas Paulistas, Piraciaba, Pradópolis, Presidente Prudente, Rancharia, São José do Rio Pardo, São Paulo, Santa Cruz do Rio Pardo, São Carlos, São Miguel Arcanjo, Sorocaba, Valinhos e Votuporanga.

Como a maioria das estações meteorológicas não fornece a temperatura de superfície, a comparação foi feita com a temperatura do ar.

A temperatura do ar é medida nas estações meteorológicas entre 1,5m a 2m do solo e, por isso existe uma diferença entre essa temperatura e a de superfície. Para quantificar o valor médio dessa diferença, foram comparados valores entre a temperatura do solo e a temperatura do ar da estação de superfície de Campinas, localizada na Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), em 46 datas. Como a temperatura do solo medida se encontra próximo à superfície (a 0,03m de profundidade), foi considerada como a T_s .

Em seguida, foram feitos testes para avaliar a influência da atmosfera e da emissividade nas estimativas para que, assim, fosse possível estudar e adaptar as equações para região de estudo:

- 1) Teste 1: separar as datas correspondentes às imagens escolhidas (46 datas) em outono/inverno e primavera/verão, para verificar a influência das estações do ano na estimativa da temperatura;
- 2) Teste 2: modificar o valor do conteúdo de vapor d'água (TV) para analisar o variação da estimativa da temperatura de superfície. Foram utilizados dois valores de vapor d'água: $TV=4g/cm^2$, pois a maioria dos modelos de estimativa foram derivados para esse valor e $TV=7g/cm^2$ pois, segundo Ouardrari *et al.* (2002), uma análise do registro histórico da NASA revelou que valores de $7g/cm^2$ ou mais foram registrados em várias regiões do globo;
- 3) Teste 3: utilizar um valor fixo para da emissividade, conforme o tipo de solo, para verificar a modificação nos valores da estimativa de T_s ;

Após analisados os testes, fez-se uma regressão com os resultados para obter novos valores dos coeficientes para o modelo de estimativa de temperatura de superfície, visando adapta-lo às condições regionais do estado de São Paulo.

A seguir esse modelo adaptado foi aplicado a quatro datas distintas do grupo anteriormente escolhido para ser validado.

3.2 Estimativa da Evapotranspiração

Para a estimativa da evapotranspiração, foram utilizadas quatro imagens correspondentes às datas em que foi utilizado o modelo adaptado da estimativa da temperatura de superfície. Os valores das imagens utilizados correspondem aos pontos em que se encontram as estações meteorológicas, conforme feito na estimativa da temperatura de superfície.

As etapas para estimar a evapotranspiração com o modelo S-SEBI estão apresentadas no fluxograma da Figura 6.

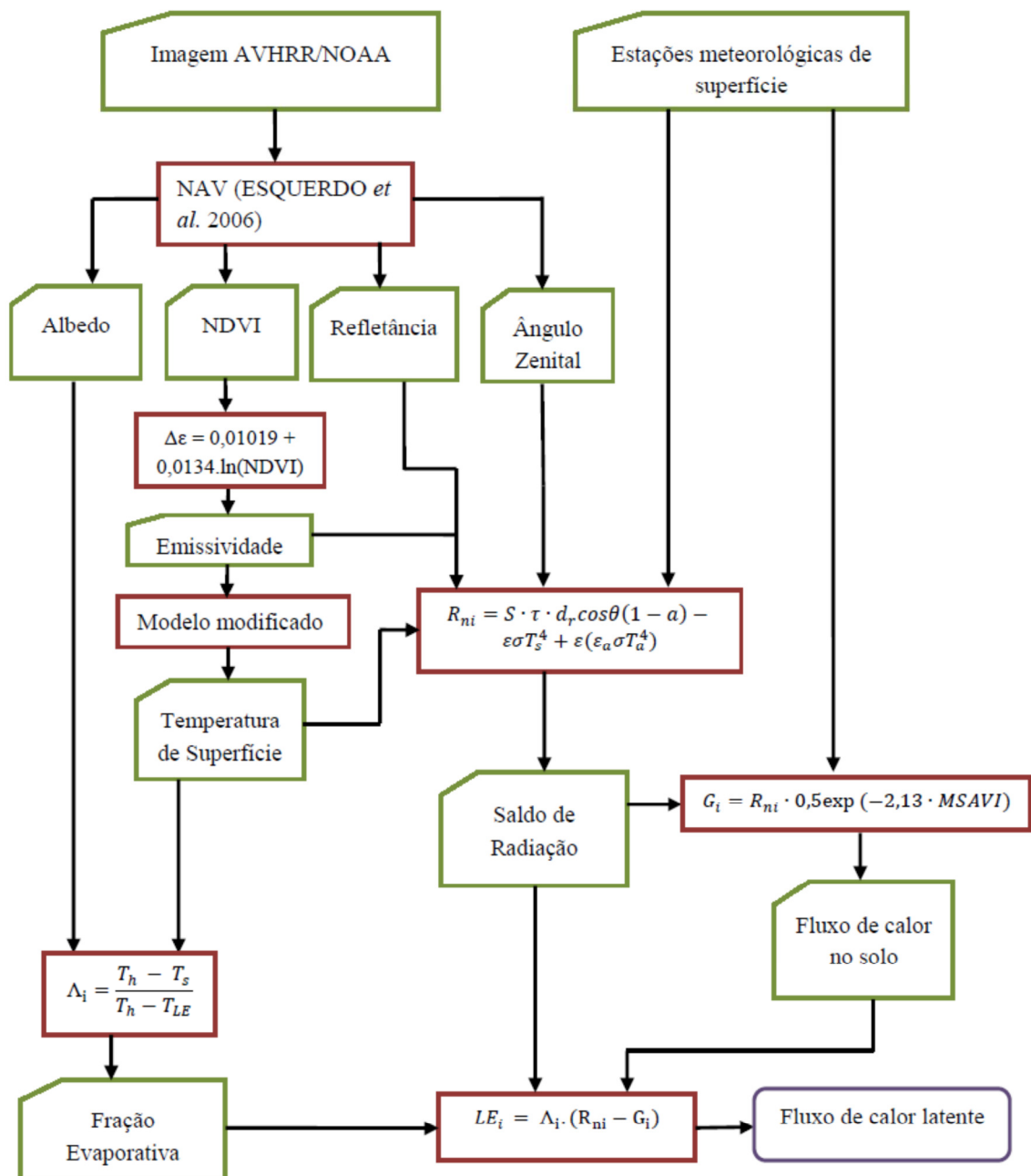


Figura 6. Fluxograma das etapas utilizadas para obter o fluxo de calor latente.

Para estimar a evapotranspiração, é necessário estimar o fluxo de calor latente (LE_i), através das estimativas do fluxo de calor do solo (G_i), do saldo de radiação (R_{ni}) e da fração evaporativa (Λ_i), conforme descrito na Equação 22:

$$LE_i = \Lambda_i \cdot (R_{ni} - G_i) \quad (22)$$

onde o subscrito “i” se refere a valores instantâneos.

O saldo de radiação (R_{ni}) é estimado pela Equação 23, sendo a radiação de onda longa ($R_{l\downarrow}$ e $R_{l\uparrow}$) calculada através da equação de Stefan-Boltzmann, conforme as Equações 24 e 25.

$$R_{ni} = R_{c\downarrow}(1 - a) + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow} - (1 - \varepsilon)R_{l\downarrow} \quad (23)$$

$$R_{l\uparrow} = \varepsilon \sigma T_s^4 \quad (24)$$

$$R_{l\downarrow} = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (25)$$

onde, ε_a é a emissividade da ar e T_a é a temperatura do ar fornecida pelas estações meteorológicas.

A emissividade do ar é calculada através da transmissividade atmosférica (τ), segundo as Equações 26 e 27.

$$\varepsilon_a = 0,85(-\ln\tau)^{0,99} \quad (26)$$

$$\tau = 0,75 + (2 \cdot 10^{-5}z) \quad (27)$$

sendo, z a altitude local onde se encontra a estação meteorológica.

Substituindo as Equações 25 e 26 na Equação 24, chega-se a Equação 28.

$$R_{ni} = R_{c\downarrow}(1 - a) - \varepsilon \sigma T_s^4 + \varepsilon(\varepsilon_a \sigma T_a^4) \quad (28)$$

A radiação de onda curta ($R_{c\downarrow}$) é dada pela Equação 29.

$$R_{c\downarrow} = S \cdot \tau \cdot d_r \cos\theta \quad (29)$$

sendo, S a constante solar de valor $1367W/m^2$, d_r o inverso do quadrado da distância Terra-Sol (dada pela Equação 30) e θ o ângulo zenital.

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{DJ \cdot 2\pi}{365}\right) \quad (30)$$

sendo DJ o dia do ano.

O fluxo de calor no solo pode ser estimado a partir do saldo de radiação e do MSAVI (índice de vegetação modificado ajustado ao solo), conforme a Equação 31 (Sobrino et al 2005).

$$G_i = R_{ni} \cdot 0,5 \exp(-2,13 \cdot MSAVI) \quad (31)$$

sendo que MSAVI é dado pela Equação 32 (Qi et al., 1994).

$$MSAVI = \frac{2\alpha_2 + 1 - \sqrt{(2\alpha_2 + 1)^2 - 8(\alpha_2 - \alpha_1)}}{2} \quad (32)$$

onde α_1 e α_2 são as refletâncias dos canais 1 e 2 do AVHRR.

A fração evaporativa é dada pela Equação 33.

$$\Lambda_i = \frac{T_h - T_s}{T_h - T_{LE}} \quad (33)$$

Observando a Figura 2 do item 2.3 do capítulo 2, mé possível constatar que os valores T_h e T_{LE} podem ser encontrados através das regressões lineares descritas pelas Equações 34 e 35.

$$T_h = a_h + b_h a \quad (34)$$

$$T_{LE} = a_{LE} + b_{LE} a \quad (35)$$

onde, a_h , b_{LE} , a_{LE} e b_h são coeficientes de regressão e a é o albedo.

Dessa forma, é possível obter o fluxo de calor latente instantâneo. Para obter a evapotranspiração diária, é necessário converter esse valor instantâneo para valores diários. Para isso é assumido que a fração evaporativa em escala diária é similar à derivada instantaneamente no horário da aquisição do dado (BASTIAANSEEN, 2000). Assim, escrevendo a Equação 37 para valores instantâneos e diários tem-se que a evapotranspiração diária (ET_d) pode ser obtida através da Equação 37.

$$\frac{LE_d}{LE_i} = \frac{\Lambda_d(R_{nd}-G_d)}{\Lambda_i(R_{ni}-G_i)} \approx \frac{(R_{nd}-G_d)}{(R_{ni}-G_i)} \quad (36)$$

$$ET_d = LE_i \frac{(R_{nd}-G_d)}{L(R_{ni}-G_i)} \quad (37)$$

onde, L é o calor latente de vaporização ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$)

A mudança de valores instantâneos para diários do saldo de radiação pode ser feita através do método proposto por Seguin and Itier (1983) que afirmam que a razão entre esses valores é constante para um determinado horário (Equação 38):

$$C_{di} = \frac{R_{nd}}{R_{ni}} \quad (38)$$

Para o sensor AVHRR, às 12 GMT, a expressão para obter C_{di} é dada pela Equação 40 (SOBRINO *et. al.*, 2007).

$$C_{di} = -7 \cdot 10^{-6} D J^2 + 0,0026 D + 0,0756 \quad (39)$$

Considerando que o fluxo de calor no solo diário é próximo a zero, a Equação 38 pode ser escrita conforme a Equação 40.

$$ET_d = \frac{\Lambda_i C_{di} R_{ni}}{L} \quad (40)$$

Os valores obtidos da evapotranspiração diária foram comparados com os valores obtidos através do método Thornthwaite (Equação 41) que utiliza dados de estações meteorológicas de superfície.

$$ET_{pm} = 16(10^{\frac{T_i}{I}})^d \quad (41)$$

onde o subscrito “m” em ET_p se refere a valores mensais, para um mês de 30 dias e cada dia com fotoperíodo de 12 horas. Para estimar para um mês de ND dias e fotoperíodo diário N (Tabela A1 no Anexo), o método foi ajustado por um fator de correção, conforme descrito na Equação 42.

$$ET_{pm} = ET_{pmc} \frac{N \cdot ND}{12 \cdot 30} \quad (42)$$

sendo ET_{pmc} a evapotranspiração corrigida.

Para obter a evapotranspiração diária (ET_{pd}), foi utilizada a relação apresentada na Equação 43.

$$ET_{pd} = \frac{ET_{pmc}}{ND} \quad (43)$$

4. Resultados e Discussões

4.1 Temperatura de Superfície

Foram escolhidas 46 datas para o estado de São Paulo através da análise visual das imagens de satélite, entre as que apresentavam uma menor contaminação por nuvens. A Tabela 2 mostra os horários de passagem do satélite NOAA-AVHRR-17 correspondente a cada data escolhida.

Tabela 2. Datas escolhidas com menor contaminação por nuvens e respectivos horários da passagem do satélite.

Datas	Horário de passagem do NOAA/AVHRR-17 (GMT)
09/01/2009	12:33
01/02/2009	11:59
05/02/2009	12:06
18/02/2009	12:04
21/02/2009	12:34
22/02/2009	12:11
02/03/2009	12:25
06/03/2009	12:32
07/03/2009	12:09
01/04/2009	12:28
05/04/2009	12:35
09/04/2009	12:48
11/04/2009	11:56
18/04/2009	12:33
19/04/2009	12:10
26/04/2009	12:47
01/05/2009	12:31
02/05/2009	12:07
05/05/2009	12:38
10/05/2009	12:21

Tabela 2 (continuação). Datas escolhidas com menor contaminação por nuvens e respectivos horários da passagem do satélite.

Datas	Horário de passagem do NOAA/AVHRR-17 (GMT)
14/05/2009	12:28
18/05/2009	12:35
19/05/2009	12:12
23/05/2009	12:19
24/05/2009	11:56
04/06/2009	12:40
05/06/2009	12:17
06/06/2009	11:53
06/07/2009	11:56
14/06/2009	12:07
01/07/2009	12:12
06/07/2009	11:56
09/07/2009	12:26
13/07/2009	12:33
18/07/2009	12:16
22/07/2009	12:33
04/08/2009	12:21
08/08/2009	12:28
09/08/2009	12:04
14/08/2009	11:48
17/08/2009	12:18
12/09/2009	12:13
26/09/2009	11:47
21/10/2009	12:05
02/11/2009	12:25
04/11/2009	11:39
21/12/2009	11:44

As imagens correspondentes às datas selecionadas foram processadas automaticamente através do sistema NAVPRO (ESQUERDO *et al.* 2006), sendo feito um recorte para o Estado de São Paulo. Desse processamento foram obtidas imagens com o valor de refletância, ângulo zenital, temperatura de brilho, albedo e RGB, conforme apresentado na Figura 7.

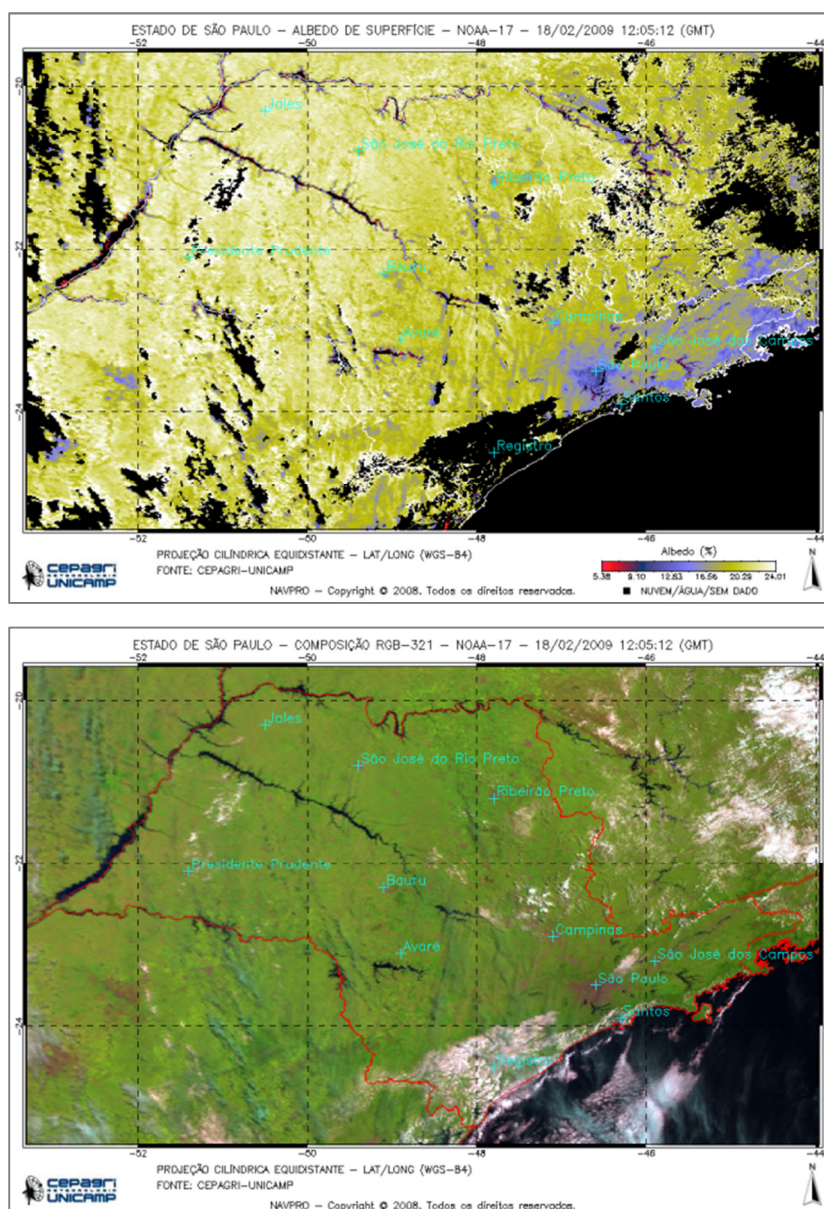


Figura 7: Imagens geradas pelo sistema NAV, com o albedo da superfície à esquerda e a composição RGB à direita, em 01/02/2009.

A Figura 8 apresenta imagens geradas após a aplicação dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* através do software IDL. As imagens geradas para outras datas se encontram no Apêndice (Figura A.1 a A.14).

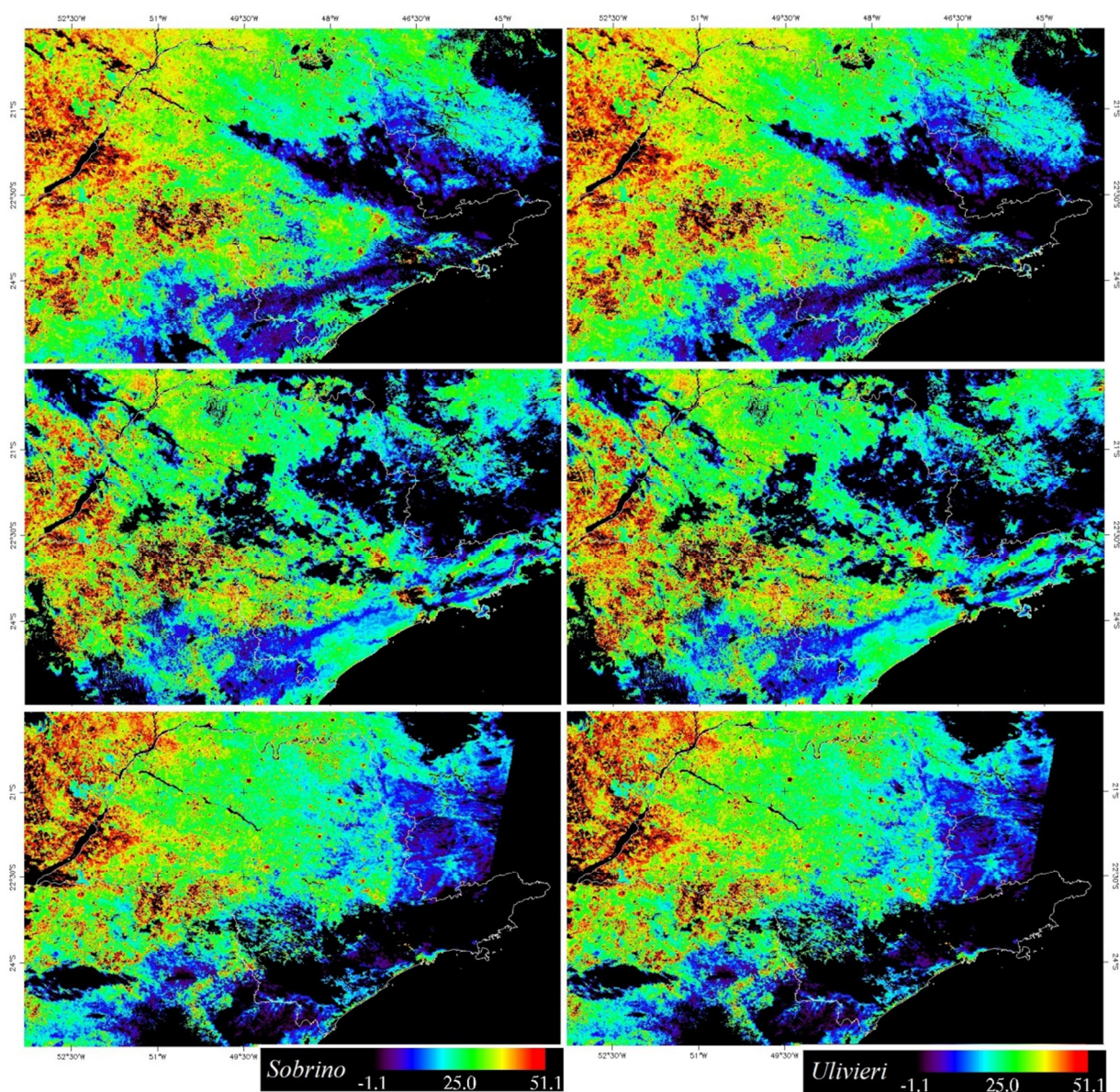


Figura 8: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 01, 05 e 09 de abril de 2009.

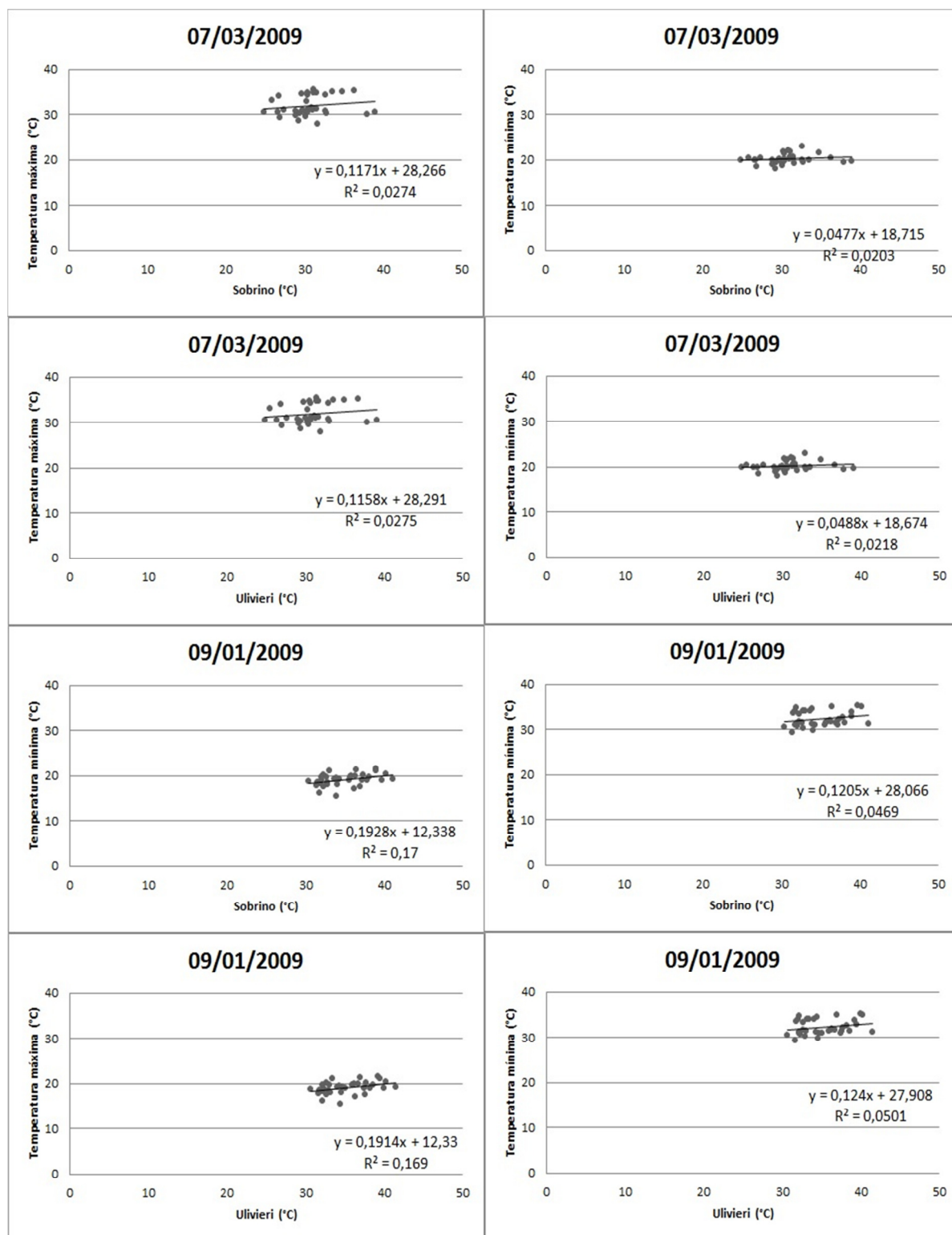


Figura 9: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 07 de março e 09 de janeiro de 2009.

Conforme observado na Figura 9, não existe uma correlação linear entre a temperatura medida e a temperatura estimada. É possível notar também que ambos os modelos apresentam valores maiores da temperatura de superfície que a temperatura do ar. O mesmo ocorre para as outras datas, como pode ser visto nas Figuras B.1 a B.21 (Apêndice).

As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores de temperatura obtidos na estação meteorológica e os valores estimados através dos modelos.

Tabela 3: Valores de temperatura mínima medidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri*, em 06/07/2009.

Temperatura Mínima (°C)	Sobrino (°C)	Diferença Absoluta (°C)	Desvio Padrão	Ulivieri (°C)	Diferença Absoluta (°C)	Desvio Padrão
16,20	21,33	5,13	3,63	21,22	5,02	3,55
14,60	19,36	4,76	3,37	19,14	4,54	3,21
12,50	22,74	10,24	7,24	22,71	10,21	7,22
12,54	21,35	8,81	6,23	21,20	8,66	6,13
13,50	21,56	8,06	5,70	21,42	7,92	5,60
17,90	23,65	5,75	4,07	23,65	5,75	4,07
13,60	21,59	7,99	5,65	21,51	7,91	5,59
14,97	22,63	7,66	5,42	22,58	7,61	5,38
15,60	21,00	5,40	3,82	20,90	5,30	3,74
15,60	23,39	7,79	5,51	23,38	7,78	5,50
12,40	25,47	13,07	9,24	25,49	13,09	9,26
15,35	25,13	9,78	6,91	25,18	9,83	6,95
14,64	18,41	3,77	2,66	18,09	3,45	2,44
14,86	22,68	7,82	5,53	22,58	7,72	5,46
14,97	20,61	5,64	3,99	20,41	5,44	3,85
13,20	19,97	6,77	4,79	19,82	6,62	4,68
15,33	23,02	7,69	5,44	22,99	7,66	5,42
14,31	22,45	8,14	5,76	22,31	8,00	5,66
15,18	20,46	5,28	3,74	20,34	5,16	3,65
13,41	21,63	8,22	5,81	21,51	8,10	5,73
14,44	20,00	5,56	3,93	19,78	5,34	3,78
17,40	25,65	8,25	5,84	25,71	8,31	5,88

Tabela 4: Valores de temperatura máxima medidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri*, em 06/07/2009.

Temperatura Máxima (°C)	Sobrino (°C)	Diferença Absoluta (°C)	Desvio Padrão	Ulivieri (°C)	Diferença Absoluta (°C)	Desvio Padrão
27,60	21,33	6,27	4,43	21,22	6,38	4,51
24,10	19,36	4,74	3,35	19,14	4,96	3,50
28,50	22,74	5,76	4,08	22,71	5,79	4,09
25,56	21,35	4,21	2,98	21,20	4,36	3,08
24,10	21,56	2,54	1,80	21,42	2,68	1,89
27,30	23,65	3,65	2,58	23,65	3,65	2,58
27,90	21,59	6,31	4,46	21,51	6,39	4,52
25,19	22,63	2,56	1,81	22,58	2,61	1,84
25,82	21,00	4,82	3,41	20,90	4,92	3,48
29,00	23,39	5,61	3,97	23,38	5,62	3,97
26,60	25,47	1,13	0,80	25,49	1,11	0,79
25,56	25,13	0,43	0,31	25,18	0,38	0,27
24,86	18,41	6,45	4,56	18,09	6,77	4,79
25,08	22,68	2,40	1,69	22,58	2,50	1,77
25,19	20,61	4,58	3,24	20,41	4,78	3,38
28,60	19,97	8,63	6,10	19,82	8,78	6,21
25,55	23,02	2,53	1,79	22,99	2,56	1,81
24,53	22,45	2,08	1,47	22,31	2,22	1,57
25,40	20,46	4,94	3,49	20,34	5,06	3,58
23,63	21,63	2,00	1,42	21,51	2,12	1,50
24,66	20,00	4,66	3,29	19,78	4,88	3,45
29,60	25,65	3,95	2,79	25,71	3,89	2,75

Observando os valores apresentados nas Tabelas 3 e 4 é possível constatar que as temperaturas estimadas através dos modelos aproximam-se mais da temperatura máxima. Tanto o modelo *Sobrino* quanto o *Ulivieri* possuem diferenças absolutas e desvio padrão maiores quando comparados à temperatura mínima.

Para as 46 datas, foram feitos gráficos para observar o comportamento da temperatura de superfície ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°W).

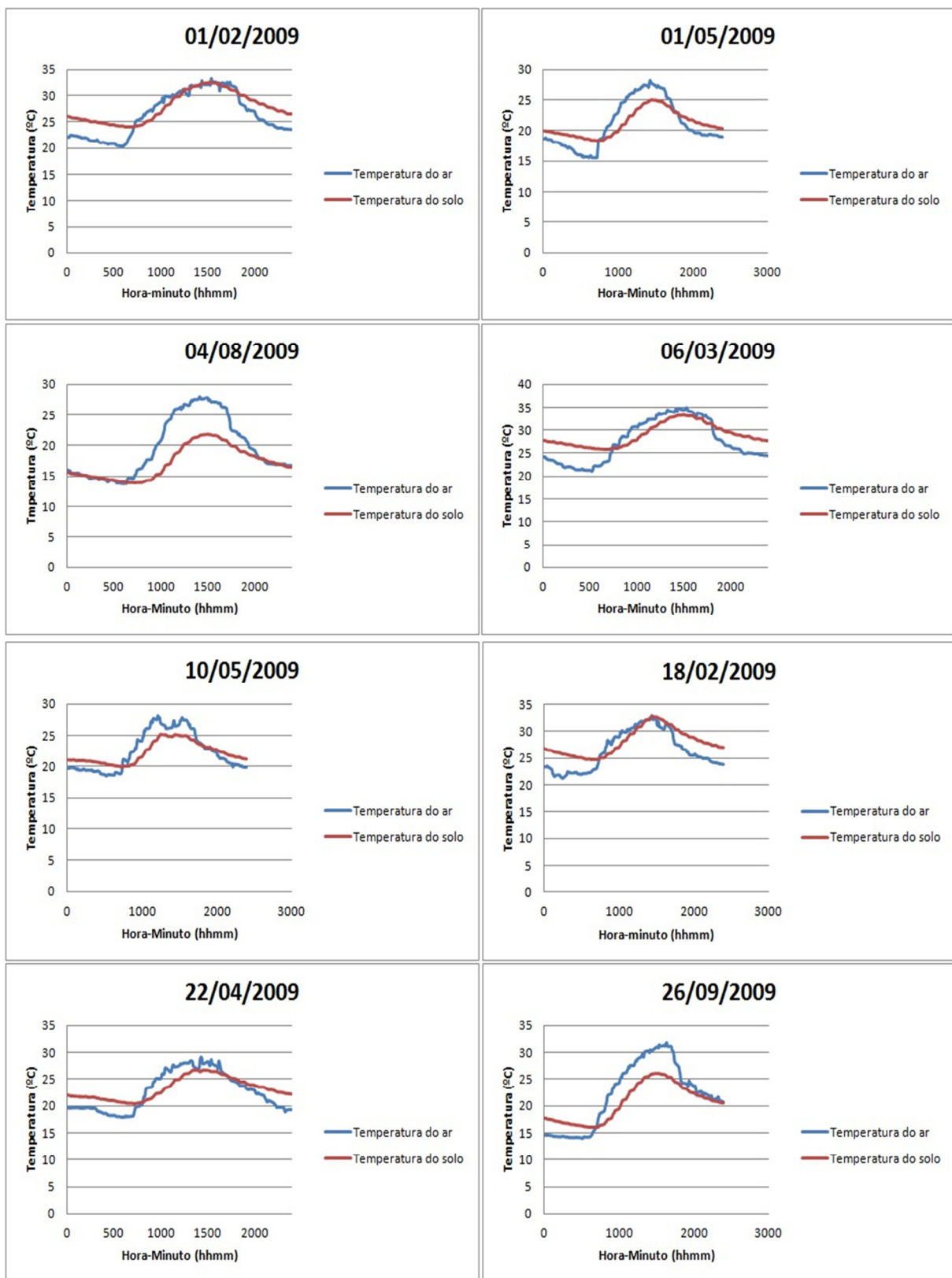


Figura 10: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°W).

É possível notar na Figura 10, que no início do dia a temperatura do solo é maior que a do ar. Em seguida a situação se inverte até o início da noite, na qual a situação original retorna. Essa mudança ocorre em sua maioria entre 6 e 8 horas da manhã. O mesmo comportamento é exibido para as outras datas, conforme pode ser visto nas Figuras D.1 a D.5 que se encontram no Apêndice. Portanto, como os horários das imagens (passagem do satélite sobre São Paulo) escolhidas são após esse horário, era esperado que a temperatura de superfície obtida fosse maior que a do ar, que é o que ocorre conforme visto na Tabela 3 e 4. Além disso, quando o NDVI é próximo ao valor máximo, como é o caso da cobertura (grama) das estações meteorológicas, a temperatura de superfície deve se aproximar da temperatura do ar.

O valor médio da diferença entre a temperatura de superfície e a temperatura do ar para os horários de passagem do satélite é de 2,33°C. Portanto, espera-se que essa seja a diferença máxima entre a temperatura estimada e a temperatura medida nas estações escolhidas. Como o valor medido da temperatura de superfície na estação da Unicamp está a 0,03m de profundidade, esse valor é ligeiramente menor que a temperatura da superfície estimada pelo satélite, que considera a superfície da cobertura, já que a temperatura do solo diminui com a profundidade. Dessa forma, a diferença entre a temperatura de superfície e a temperatura do ar deverá ser menor do que 2,33°C.

São apresentados a seguir os resultados dos testes 1, 2 e 3.

Teste 1

Após separar as datas em outono/inverno primavera/verão obteve-se os valores apresentados nas Tabelas 5 e 6, que mostra resultados da comparação entre a temperatura mínima, máxima e os modelos *Sobrino* e *Ulivieri*.

Tabela 5: Resultados da aplicação dos modelos Sobrino e Ulivieri em datas correspondentes ao Outono e Inverno.

Outono/Inverno								
Data	Média Temperatura Mínima (°C)	Média Temperatura Máxima (°C)	Sobrino Média (°C)	Erro Médio (tmin, Sobrino)	Erro Médio (tmax, Sobrino)	Ulivieri Média (°C)	Erro Médio (tminx, Ulivieri)	Erro Médio (tmax, Ulivieri)
01/04/2009	18,77	29,58	28,02	9,25	1,55	28,15	9,38	1,43
01/05/2009	15,99	26,98	25,93	9,94	1,05	25,99	10,00	0,99
01/07/2009	14,48	27,41	23,85	9,36	3,56	23,74	9,26	3,67
02/05/2009	16,03	26,53	24,80	8,77	1,73	24,84	8,81	1,69
04/06/2009	8,65	24,05	18,44	9,79	5,61	17,69	9,04	6,36
04/08/2009	14,70	28,01	24,73	10,04	3,28	24,65	9,95	3,36
05/04/2009	19,45	29,62	29,00	9,55	0,62	28,85	9,40	0,77
05/05/2009	15,03	27,08	24,10	9,07	2,99	24,09	9,06	3,00
05/06/2009	11,33	26,64	20,93	9,60	5,71	20,49	9,17	6,15
06/06/2009	13,36	24,82	20,99	7,62	3,83	20,80	7,43	4,02
06/07/2009	14,66	26,11	22,00	7,35	4,10	21,91	7,25	4,20
08/08/2009	15,86	28,74	27,51	11,65	1,23	27,56	11,71	1,18
09/04/2009	18,71	29,31	28,35	9,65	0,96	28,54	9,83	0,78
09/07/2009	14,53	26,71	24,26	9,73	2,45	24,19	9,65	2,52
09/08/2009	14,75	28,36	25,06	10,31	3,30	24,85	10,09	3,51
10/05/2009	17,20	29,09	27,25	10,05	1,83	27,39	10,19	1,69
11/04/2009	16,71	28,42	25,85	9,14	2,57	25,85	9,14	2,57
12/09/2009	16,67	28,43	27,82	11,15	0,62	27,96	11,29	0,47
13/07/2009	10,27	25,41	17,95	7,68	7,46	17,19	6,92	8,22
14/05/2009	16,81	28,86	27,56	10,75	1,29	27,59	10,78	1,26
14/06/2009	11,52	23,71	17,25	5,73	6,46	16,54	5,03	7,17
14/08/2009	13,52	27,47	22,73	9,21	4,74	22,25	8,73	5,22
17/08/2009	15,25	29,02	28,91	13,66	0,11	28,80	13,56	0,21
18/04/2009	16,57	28,82	25,92	9,35	2,90	25,75	9,18	3,07
18/05/2009	14,57	26,51	22,55	7,98	3,96	22,33	7,76	4,18
18/07/2009	14,60	27,38	23,70	9,11	3,68	23,66	9,06	3,72
19/04/2009	15,96	29,04	25,65	9,69	3,39	25,41	9,45	3,63
19/05/2009	15,29	27,38	23,34	8,05	4,04	23,08	7,79	4,31
22/07/2009	14,87	28,42	25,39	10,52	3,03	25,37	10,49	3,05
23/05/2009	14,84	26,95	23,10	8,25	3,85	22,74	7,90	4,21
24/05/2009	14,71	27,38	22,89	8,18	4,49	22,69	7,98	4,70
26/04/2009	16,84	28,62	27,41	10,57	1,21	27,55	10,71	1,07

Tabela 6: Resultados da aplicação dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* em datas correspondentes a Primavera e Verão.

Verão/Primavera								
Data	Média Temperatura Mínima (°C)	Média Temperatura Máxima (°C)	<i>Sobrino</i> Média (°C)	Erro Médio (tmim, <i>Sobrino</i>)	Erro Médio (tmax, <i>Sobrino</i>)	<i>Ulivieri</i> Média (°C)	Erro Médio (tmim, <i>Ulivieri</i>)	Erro Médio (tmax, <i>Ulivieri</i>)
01/02/2009	18,65	30,54	30,08	11,43	0,46	29,94	11,29	0,60
02/03/2009	20,48	32,32	29,04	8,56	3,28	29,16	8,67	3,16
02/11/2009	19,36	32,17	34,97	15,61	2,80	35,38	16,02	3,20
04/11/2009	19,38	31,30	32,63	13,25	1,33	32,96	13,57	1,66
05/02/2009	19,46	30,68	29,54	10,08	1,14	29,61	10,15	1,07
05/02/2009	19,46	30,68	29,54	10,08	1,14	29,61	10,15	1,07
06/03/2009	19,82	32,63	33,20	13,38	0,57	33,53	13,71	0,90
07/03/2009	20,18	31,87	30,74	10,56	1,12	30,88	10,70	0,98
09/01/2009	19,07	32,27	34,91	15,84	2,63	35,21	16,15	2,94
18/02/2009	19,72	30,56	29,82	10,10	0,74	29,88	10,16	0,68
21/02/2009	19,99	31,29	30,95	10,95	0,34	30,96	10,97	0,33
21/10/2009	18,20	30,54	31,57	13,37	1,03	31,69	13,49	1,15
21/12/2009	20,33	31,86	30,84	10,51	1,02	30,89	10,56	0,97
22/02/2009	20,54	32,05	32,24	11,70	0,19	31,90	11,36	0,16
26/09/2009	16,15	29,45	27,37	11,21	2,08	27,44	11,28	2,01

De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6, ambos os modelos, tanto no Outono/Inverno quanto na Primavera/Verão, apresentam resultados mais significativos quando comparados à temperatura máxima medida pela estação. No Outono/Inverno, *Sobrino* e *Ulivieri* tem valores menores de Erro Médio quando comparados à temperatura mínima que em Primavera/Verão, mas esse resultado não é significativo, pois o valor está muito acima do esperado.

Como para os dois casos de estações do ano os menores valores de Erro Médio são para quando os modelos são comparados à temperatura máxima, não é possível afirmar que os modelos tenham comportamento diferenciado para diferentes estações do ano e, portanto pode-se utilizar o mesmo modelo ao longo do ano.

Também é possível observar que o modelo *Sobrino* é mais acurado que o modelo *Ulivieri*. O Erro Médio máximo, considerando a temperatura máxima e *Sobrino* é 7,46°C e o Erro Médio mínimo é 0,11°C. Já o Erro Médio máximo de *Ulivieri* é 8,22°C e o Erro Médio mínimo é 0,16°C.

Teste 2

O conteúdo de vapor d'água utilizado nos modelos foi alterado e em seguida os algoritmos modificados foram aplicados ao conjunto de 46 datas. Os resultados são apresentados nas Tabela 7 a 10, sendo que a “Média” considerada é a média do valor da temperatura de todas as estações para cada data.

Tabela 7: Estimativa da temperatura através do método *Sobrino* utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 4g/cm^2 .

TV= 4g/cm^2				
Data	Média da Temperatura Máxima (°C)	Média Sobrino (°C)	Erro	Desvio Padrão
01/04/2009	29,58	28,10	2,03	1,04
01/05/2009	26,98	26,03	1,54	0,67
01/07/2009	27,41	23,96	3,50	2,44
02/05/2009	26,53	24,90	2,35	1,15
04/06/2009	24,05	18,52	5,55	3,91
04/08/2009	28,01	24,84	3,61	2,24
05/04/2009	29,62	29,10	2,46	0,37
05/05/2009	27,08	24,19	3,04	2,05
05/06/2009	26,64	21,03	5,84	3,97
06/06/2009	24,82	21,09	3,73	2,64
06/07/2009	26,11	22,12	3,99	2,82
08/08/2009	28,74	27,62	2,73	0,79
09/04/2009	26,71	24,38	2,73	1,65
09/08/2009	28,36	25,17	3,48	2,26
10/05/2009	29,09	27,35	2,51	1,23
11/04/2009	28,42	25,94	2,84	1,75
12/09/2009	28,43	27,92	2,03	0,36
13/07/2009	25,41	18,04	7,37	5,21
14/05/2009	28,86	27,67	1,95	0,84
14/06/2009	23,71	17,34	6,37	4,50
14/08/2009	27,47	22,84	4,76	3,28
17/08/2009	29,02	29,02	2,51	0,00
18/04/2009	28,82	26,00	2,91	1,99
18/05/2009	26,51	22,65	3,86	2,73
18/07/2009	27,38	23,81	3,72	2,52
19/04/2009	29,04	25,74	3,35	2,33
19/05/2009	27,38	23,44	3,95	2,79
22/07/2009	28,42	25,50	3,22	2,06
23/05/2009	26,95	23,19	3,76	2,66

Tabela 7 (continuação): Estimativa da temperatura através do método *Sobrino* utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 4g/cm^2 .

TV= 4g/cm^2				
Data	Média da Temperatura Máxima (°C)	Média Sobrino (°C)	Erro	Desvio Padrão
24/05/2009	27,38	22,99	4,42	3,10
26/04/2009	28,62	27,50	2,29	0,79
01/02/2009	30,54	30,18	2,46	0,25
02/03/2009	32,32	29,12	4,02	2,26
02/11/2009	32,17	35,06	3,32	2,04
04/11/2009	31,30	32,72	2,45	1,01
05/02/2009	30,68	29,63	1,85	0,74
05/02/2009	30,68	29,63	1,85	0,74
06/03/2009	32,63	33,28	2,58	0,46
07/03/2009	31,87	30,84	2,73	0,73
09/01/2009	32,27	35,00	3,32	1,93
18/02/2009	30,56	29,91	2,55	0,46
21/02/2009	31,29	31,03	2,43	0,18
21/10/2009	30,54	31,67	2,05	0,80
21/12/2009	31,86	30,93	2,32	0,66
22/02/2009	32,05	32,33	2,83	0,20
26/09/2009	29,45	27,47	2,88	1,40

Tabela 8: Estimativa da temperatura através do método *Sobrino* utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 7g/cm^2 .

TV= 7g/cm^2				
Data	Média da Temperatura Máxima (°C)	Média Sobrino (°C)	Erro	Desvio Padrão
01/04/2009	29,58	28,35	1,80	0,87
01/05/2009	26,98	26,32	1,46	0,47
01/07/2009	27,41	24,31	3,21	2,19
02/05/2009	26,53	25,20	2,18	0,94
04/06/2009	24,05	18,78	5,31	3,72
04/08/2009	28,01	25,18	3,35	2,01
05/04/2009	29,62	29,40	2,43	0,16
05/05/2009	27,08	24,46	2,81	1,86
05/06/2009	26,64	21,33	5,57	3,76
06/06/2009	24,82	21,40	3,42	2,42
06/07/2009	26,11	22,47	3,64	2,57
08/08/2009	28,74	27,95	2,64	0,56
09/04/2009	26,71	24,71	2,49	1,42
09/08/2009	28,36	25,48	3,27	2,04
10/05/2009	29,09	27,65	2,40	1,02
11/04/2009	28,42	26,21	2,67	1,56
12/09/2009	28,43	28,23	1,99	0,14
13/07/2009	25,41	18,31	7,10	5,02
14/05/2009	28,86	27,99	1,94	0,61
14/06/2009	23,71	17,63	6,08	4,30
14/08/2009	27,47	23,16	4,47	3,05
17/08/2009	29,02	29,37	2,54	0,25
18/04/2009	28,82	26,25	2,70	1,82
18/05/2009	26,51	22,95	3,63	2,52
18/07/2009	27,38	24,13	3,49	2,30
19/04/2009	29,04	26,00	3,12	2,15
19/05/2009	27,38	23,73	3,65	2,58
22/07/2009	28,42	25,81	3,02	1,84
23/05/2009	26,95	23,47	3,48	2,46
24/05/2009	27,38	23,30	4,15	2,89
26/04/2009	28,62	27,76	2,26	0,61
01/02/2009	30,54	30,48	0,06	0,04
02/03/2009	32,32	29,38	3,90	2,08
02/11/2009	32,17	35,33	3,50	2,23
04/11/2009	31,30	33,01	2,58	1,21
05/02/2009	30,68	29,90	1,78	0,55

Tabela 8 (continuação): Estimativa da temperatura através do método *Sobrino* utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 7g/cm^2 .

TV= 7g/cm^2				
Data	Média da Temperatura Máxima (°C)	Média Sobrino (°C)	Erro	Desvio Padrão
06/03/2009	32,63	33,52	2,64	0,63
07/03/2009	31,87	31,11	2,69	0,53
09/01/2009	32,27	35,27	3,47	2,12
18/02/2009	30,56	30,19	2,53	0,26
21/02/2009	31,29	31,29	2,45	0,00
21/10/2009	30,54	31,97	2,13	1,01
21/12/2009	31,86	31,19	2,29	0,48
22/02/2009	32,05	32,61	2,91	0,40
26/09/2009	29,45	27,78	2,69	1,18

Tabela 9: Estimativa da temperatura através do método *Ulivieri* utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 4g/cm².

TV=4g/cm ²				
Data	Média da Temperatura Máxima (°C)	Média Ulivieri (°C)	Erro	Desvio Padrão
01/04/2009	29,58	28,25	1,98	0,94
01/05/2009	26,98	26,12	1,53	0,61
01/07/2009	27,41	23,89	3,60	2,49
02/05/2009	26,53	24,96	2,33	1,11
04/06/2009	24,05	17,80	6,25	4,42
04/08/2009	28,01	24,79	3,62	2,28
05/04/2009	29,62	28,98	2,53	0,45
05/05/2009	27,08	24,20	3,04	2,04
05/06/2009	26,64	20,62	6,24	4,26
06/06/2009	24,82	20,93	3,89	2,75
06/07/2009	26,11	22,05	4,05	2,87
08/08/2009	28,74	27,70	2,74	0,73
09/04/2009	26,71	24,33	2,72	1,68
09/08/2009	28,36	24,98	3,68	2,39
10/05/2009	29,09	27,52	2,50	1,11
11/04/2009	28,42	25,97	2,86	1,74
12/09/2009	28,43	28,09	0,34	0,24
13/07/2009	25,41	17,30	8,11	5,73
14/05/2009	28,86	27,73	1,97	0,80
14/06/2009	23,71	16,66	7,05	4,98
14/08/2009	27,47	22,39	5,22	3,59
17/08/2009	29,02	28,95	2,32	0,05
18/04/2009	28,82	25,85	3,07	2,10
18/05/2009	26,51	22,46	4,07	2,87
18/07/2009	27,38	23,79	3,76	2,54
19/04/2009	29,04	25,52	3,57	2,49
19/05/2009	27,38	23,20	4,18	2,96
22/07/2009	28,42	25,50	3,26	2,06
23/05/2009	26,95	22,86	4,09	2,89
24/05/2009	27,38	22,82	4,59	3,23
26/04/2009	28,62	27,66	2,34	0,68
01/02/2009	30,54	30,07	0,47	0,33
02/03/2009	32,32	29,26	4,01	2,16
02/11/2009	32,17	35,49	3,61	2,35
04/11/2009	31,30	33,08	2,64	1,26
05/02/2009	30,68	29,72	1,83	0,68
05/02/2009	30,68	29,72	1,83	0,68

Tabela 9 (continuação): Estimativa da temperatura através do método *Ulivieri* utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 4g/cm².

TV=4g/cm ²				
Data	Média da Temperatura Máxima (°C)	Média Ulivieri (°C)	Erro	Desvio Padrão
06/03/2009	32,63	33,63	2,75	0,71
07/03/2009	31,87	31,00	2,72	0,61
09/01/2009	32,27	35,33	3,48	2,16
18/02/2009	30,56	30,00	2,61	0,40
21/02/2009	31,29	31,07	2,47	0,15
21/10/2009	30,54	31,82	2,18	0,90
21/12/2009	31,86	31,00	2,44	0,61
22/02/2009	32,05	32,02	2,91	0,03
26/09/2009	29,45	27,57	2,88	1,33

Tabela 10: Estimativa da temperatura através do método *Ulivieri* utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 7g/cm^2 .

TV= 7g/cm^2				
Data	Média da Temperatura Máxima (°C)	Média Ulivieri (°C)	Erro	Desvio Padrão
01/04/2009	29,58	28,57	1,87	0,94
01/05/2009	26,98	26,48	1,48	0,61
01/07/2009	27,41	24,33	3,22	2,49
02/05/2009	26,53	25,35	2,14	1,11
04/06/2009	24,05	18,13	5,93	4,42
04/08/2009	28,01	25,22	3,42	2,28
05/04/2009	29,62	29,36	2,51	0,45
05/05/2009	27,08	24,54	2,75	2,04
05/06/2009	26,64	21,00	5,89	4,26
06/06/2009	24,82	21,32	3,50	2,75
06/07/2009	26,11	22,49	3,61	2,87
08/08/2009	28,74	28,13	2,65	0,73
09/04/2009	26,71	24,75	2,41	1,68
09/08/2009	28,36	25,38	3,40	2,39
10/05/2009	29,09	27,90	2,37	1,11
11/04/2009	28,42	26,31	2,64	1,74
12/09/2009	28,43	28,49	2,04	0,24
13/07/2009	25,41	17,64	7,76	5,73
14/05/2009	28,86	28,14	1,93	0,80
14/06/2009	23,71	17,03	6,68	4,98
14/08/2009	27,47	22,81	4,84	3,59
17/08/2009	29,02	29,39	2,39	0,05
18/04/2009	28,82	26,17	2,81	2,10
18/05/2009	26,51	22,83	3,77	2,87
18/07/2009	27,38	24,20	3,49	2,54
19/04/2009	29,04	25,86	3,27	2,49
19/05/2009	27,38	23,58	3,80	2,96
22/07/2009	28,42	25,91	3,01	2,06
23/05/2009	26,95	23,22	3,73	2,89
24/05/2009	27,38	23,21	4,25	3,23
26/04/2009	28,62	27,99	2,31	0,68
01/02/2009	30,54	30,45	0,09	0,33
02/03/2009	32,32	29,59	3,85	2,16
02/11/2009	32,17	35,83	3,84	2,35
04/11/2009	31,30	33,44	2,83	1,26
05/02/2009	30,68	30,06	1,76	0,68
05/02/2009	30,68	30,06	1,76	0,68

Tabela 10 (continuação): Estimativa da temperatura através do método *Ulivieri* utilizando conteúdo de vapor d'água igual a 7g/cm^2 .

TV= 7g/cm^2				
Data	Média da Temperatura Máxima ($^{\circ}\text{C}$)	Média Ulivieri ($^{\circ}\text{C}$)	Erro	Desvio Padrão
06/03/2009	32,63	33,94	2,86	0,71
07/03/2009	31,87	31,35	2,70	0,61
09/01/2009	32,27	35,67	3,68	2,16
18/02/2009	30,56	30,35	2,57	0,40
21/02/2009	31,29	31,40	2,51	0,15
21/10/2009	30,54	32,20	2,31	0,90
21/12/2009	31,86	31,33	2,43	0,61
22/02/2009	32,05	32,37	2,95	0,03
26/09/2009	29,45	27,97	2,68	1,33

Apesar de o Erro Médio ter sido menor para a aplicação do modelo *Sobrino* e *Ulivieri* com TV= 3g/cm^2 (Tabelas 5 e 6) que para TV= 4g/cm^2 (Tabelas 7 e 9), os menores valores de Erro Médio e Desvio Padrão foram para TV= 7g/cm^2 (Tabelas 8 e 10). O Erro Médio máximo para o modelo *Sobrino* usando TV= 4g/cm^2 foi 7,37, utilizando TV= 7g/cm^2 foi 7,10, o mínimo foi 1,54 e 0,06, respectivamente. Para o modelo *Ulivieri*, o Erro Médio Máximo foi 8,11 para TV= 4g/cm^2 e 7,76 para TV= 7g/cm^2 , o mínimo foi 0,34 e 0,09, respectivamente.

Pinheiro *et. al.* (2006), aplicaram o algoritmo Ulivieri na África e obtiveram bons resultados utilizando TV= 3g/cm^2 , que é uma condição razoável devido às grandes porções de semiárido no continente.

Em média, os Erros Médios obtidos para os dois modelos, em todos os casos, foram maiores que 1°C . Como o estado de São Paulo fica numa zona tropical, o conteúdo de vapor d'água tende a ser maior, o que explica o melhor funcionamento dos algoritmos para TV= 7g/cm^2 , e também indica a necessidade de ajustar os coeficientes dos modelos para essa nova condição, uma vez que os coeficientes foram definidos para condições com menor TV.

Teste 3

Os modelos *Sobrino* e *Ulivieri* calculam a emissividade a partir do NDVI, para tentar reduzir os erros devido a essa variável, foi utilizada a emissividade fixa, $\varepsilon = 0,9853$ (Tabelas 11 e 12).

Esse valor representa a emissividade para uma área com cobertura de grama (Gupta, Wilber, e Kratz, 1999). Foi escolhido esse tipo de cobertura por ser a utilizada em postos meteorológicos e, assim, quando a estimativa da temperatura de superfície foi feita utilizando esse valor, foi possível fazer a comparação com os dados de temperatura medidos nas estações de superfície. Para outros tipos de cobertura é preciso consultar a Tabela A.2 no Anexo.

Tabela 11: Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 para o modelo *Sobrino*.

Data	Temperatura Máxima Média(°C)	Sobrino Média(°C) $\varepsilon = 0,9853$	Erro Médio	Desvio Padrão
01/04/2009	29,58	26,61	3,10	2,10
01/05/2009	26,98	24,12	2,86	2,02
01/07/2009	27,41	21,44	5,97	4,22
02/05/2009	26,53	22,83	3,76	2,62
04/06/2009	24,05	16,92	7,12	5,04
04/08/2009	28,01	22,47	5,63	3,92
05/04/2009	29,62	27,08	3,16	1,80
05/05/2009	27,08	22,46	4,62	3,27
05/06/2009	26,64	19,03	7,61	5,38
06/06/2009	24,82	18,96	5,86	4,14
06/07/2009	26,11	19,62	6,49	4,59
08/08/2009	28,74	25,22	3,98	2,49
09/04/2009	26,71	22,01	4,76	3,32
09/08/2009	28,36	22,98	5,39	3,81
10/05/2009	29,09	25,32	3,81	2,66
11/04/2009	28,42	24,18	4,24	3,00
12/09/2009	28,43	25,78	3,06	1,87
13/07/2009	25,41	16,31	9,10	6,44
14/05/2009	28,86	25,44	3,46	2,42
14/06/2009	23,71	15,43	8,37	5,86
14/08/2009	27,47	20,56	6,92	4,89
17/08/2009	29,02	26,54	2,94	1,75
18/04/2009	28,82	24,47	4,35	3,07
18/05/2009	26,51	20,67	5,84	4,13

Tabela 11 (continuação): Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 para o modelo *Sobrino*.

Data	Temperatura Máxima Média(°C)	Sobrino Média(°C) $\varepsilon = 0,9853$	Erro Médio	Desvio Padrão
18/07/2009	27,38	21,60	5,78	4,09
19/04/2009	29,04	24,09	4,95	3,50
19/05/2009	27,38	21,45	5,93	4,20
22/07/2009	28,42	23,28	5,14	3,63
23/05/2009	26,95	21,34	5,61	3,97
24/05/2009	27,38	20,89	6,50	4,59
26/04/2009	28,62	25,85	2,81	1,96
01/02/2009	30,54	28,07	2,38	1,74
02/03/2009	32,32	27,44	4,99	3,45
02/11/2009	32,17	33,25	2,20	0,77
04/11/2009	31,30	30,77	2,12	0,38
05/02/2009	30,68	27,84	2,92	2,01
05/02/2009	30,68	27,84	2,92	2,01
06/03/2009	32,63	31,71	2,37	0,65
07/03/2009	31,87	28,94	3,58	2,07
09/01/2009	32,27	33,17	2,37	0,64
18/02/2009	30,56	28,01	2,93	1,80
21/02/2009	31,29	29,33	2,71	1,39
21/10/2009	30,54	29,58	1,98	0,68
21/12/2009	31,86	29,22	3,04	1,87
22/02/2009	32,05	30,42	2,73	1,16
26/09/2009	29,45	25,22	4,51	2,99

Tabela 12: Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 para o modelo *Ulivieri*.

Data	Temperatura Máxima Média (°C)	Ulivieri Média(°C) $\varepsilon = 0,9853$	Erro Médio	Desvio Padrão
01/04/2009	29,58	26,73	3,10	2,02
01/05/2009	26,98	24,16	2,86	1,99
01/07/2009	27,41	21,30	5,97	4,32
02/05/2009	26,53	22,84	3,76	2,61
04/06/2009	24,05	16,17	7,12	5,57
04/08/2009	28,01	22,36	5,63	4,00
05/04/2009	29,62	26,91	3,16	1,92
05/05/2009	27,08	22,44	4,62	3,28
05/06/2009	26,64	18,57	7,61	5,71
06/06/2009	24,82	18,75	5,86	4,29
06/07/2009	26,11	19,49	6,49	4,68
08/08/2009	28,74	25,25	3,95	2,47
09/04/2009	26,71	21,91	4,76	3,40
09/08/2009	28,36	22,74	5,39	3,98
10/05/2009	29,09	25,45	3,81	2,57
11/04/2009	28,42	24,17	4,24	3,01
12/09/2009	28,43	25,90	3,02	1,79
13/07/2009	25,41	15,53	9,10	6,98
14/05/2009	28,86	25,44	3,46	2,42
14/06/2009	23,71	14,71	9,12	6,37
14/08/2009	27,47	20,05	6,92	5,25
17/08/2009	29,02	26,41	2,94	1,85
18/04/2009	28,82	24,29	4,35	3,20
18/05/2009	26,51	20,43	5,84	4,30
18/07/2009	27,38	21,52	5,78	4,14
19/04/2009	29,04	23,84	4,95	3,68
19/05/2009	27,38	21,17	5,93	4,39
22/07/2009	28,42	23,23	5,14	3,67
23/05/2009	26,95	20,97	5,61	4,23
24/05/2009	27,38	20,66	6,50	4,76
26/04/2009	28,62	25,98	2,82	1,87
01/02/2009	30,54	27,89	2,65	1,87
02/03/2009	32,32	27,52	4,97	3,39
02/11/2009	32,17	33,62	2,40	1,03
04/11/2009	31,30	31,06	2,15	0,17
05/02/2009	30,68	27,87	2,89	1,99
05/02/2009	30,68	27,87	2,89	1,99
06/03/2009	32,63	32,01	2,40	0,44

Tabela 12 (continuação): Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 para o modelo *Ulivieri*.

Data	Temperatura Máxima Média (°C)	Ulivieri Média(°C) $\varepsilon = 0,9853$	Erro Médio	Desvio Padrão
07/03/2009	31,87	29,03	3,51	2,00
09/01/2009	32,27	33,44	2,42	0,83
18/02/2009	30,56	28,03	2,96	1,79
21/02/2009	31,29	29,31	2,75	1,40
21/10/2009	30,54	29,66	1,99	0,63
21/12/2009	31,86	29,24	3,12	1,86
22/02/2009	32,05	30,04	3,00	1,43

Nas Tabelas 11 e 12, os resultados mostrados são para emissividade fixa e $TV=7g/cm^2$. Mesmo com a diminuição dos Erros Médios ao usar um conteúdo de vapor d'água maior, os Erros Médio e Desvio Padrão aumentaram usando um valor fixo para emissividade em relação a quando foi usado uma emissividade a partir do NDVI. O mesmo ocorre quando usado $TV=4g/cm^2$ e emissividade fixa (Tabela C.1 e C.2 no Apêndice), em que a diferença entre a temperatura do ar e a estimada é maior.

Ao considerar a emissividade fixa, considera-se que o pixel todo (km^2) é composto pela mesma cobertura, no caso a gramínea. Quando a estimativa é feita considerando a emissividade a partir do NDVI é utilizada a refletância do pixel, que considera uma média da superfície que está refletindo na área do pixel e, por isso, a emissividade do pixel é o valor ponderado das coberturas que ocupam a área de $1km^2$.

Portanto, utilizar a emissividade fixa de acordo com o tipo de cobertura em uma área heterogênea, como é o caso do estado de São Paulo, sendo que o AVHRR possui uma baixa resolução espacial, leva a erros de estimativa significativos.

Considerando todos os resultados obtidos, é possível notar que, para ambos os modelos, a temperatura estimada é mais próxima à temperatura máxima medida nas estações meteorológicas. Isto está coerente, pois normalmente as medidas da temperatura mínima na estação de superfície são feitas antes do horário de aquisição das imagens de satélite. Além disso, a temperatura de superfície tende a ser maior que a temperatura do ar e, por isso é mais próxima à temperatura máxima que é medida após o horário das imagens utilizadas.

Depois de feitos todos os testes, foi verificado que o algoritmo *Sobrino* possui um desempenho melhor e que usar $TV=7\text{g/cm}^2$ diminui os erros de estimativa. Assim, os novos coeficientes foram calculados para essas condições.

A Tabela 13 mostra os coeficientes calculados através de uma regressão utilizando as variáveis do modelo *Sobrino* sendo que os coeficientes calculados são dados pela Equação 45.

$$T_s = A + B \cdot T_4 + C(T_4 - T_5) + D(T_4 - T_5)^2 + E \cdot TV + F \cdot \varepsilon \cdot TV + G(-\varepsilon) \quad (44)$$

Tabela 13: Coeficientes obtidos para o modelo *Sobrino* através de regressão linear múltipla.

	A	B	C	D	E	F	G
Coefficientes	-2,4467	0,4148	0,7673	0,1614	0	3,0815	0
Erro Padrão	6,9750	0,0252	0,3351	0,0818	0	1,0436	0
Estatística t	-0,3508	16,4593	2,2897	1,9734	0	2,9528	0

Pode-se observar pela Tabela 13 que os coeficientes E e G foram nulos, o que indica que não eram significativos para a equação. Os coeficientes B,C,D e F possuem mais significância estatística (Estatística T) e portanto são mais significativos para a equação.

O modelo modificado foi aplicado a quatro datas distintas das utilizadas anteriormente, sendo que foram escolhidas da mesma maneira que as anteriores, através da observação visual da imagem.

A temperatura de superfície estimada foi comparada com a temperatura máxima obtida nas estações meteorológicas (Tabela 14).

Tabela 14: Estimativa da temperatura de superfície através do modelo modificado para quatro datas.

Data	Média Temperatura Máxima (°C)	Média Modelo Modificado (°C)	Erro Médio	Desvio Padrão
02/02/2010	33,10	31,00	2,28	1,49
05/02/2010	32,77	30,65	2,13	1,50
10/04/2010	27,22	27,63	0,82	0,29
12/04/2010	27,75	27,08	0,96	0,47

De acordo com os resultados apresentados, os novos coeficientes encontrados para o modelo *Sobrino* e a consideração do $TV=7\text{g/cm}^2$ diminui os erros e estão dentro da margem de erro de $2,33^\circ\text{C}$ (diferença entre a temperatura do ar e da superfície) e com isso podem ser utilizados com eficiência para estimar a temperatura de superfície no estado de São Paulo ao longo do ano.

4.2 Evapotranspiração

Utilizando as imagens para as mesmas datas em que foi aplicado o modelo modificado e as temperaturas de superfície estimadas por esse modelo, foi possível obter todos os dados de entrada necessários à estimativa da evapotranspiração.

A Figura 11 mostra os gráficos obtidos através dos dados do albedo da imagem e da temperatura de superfície.

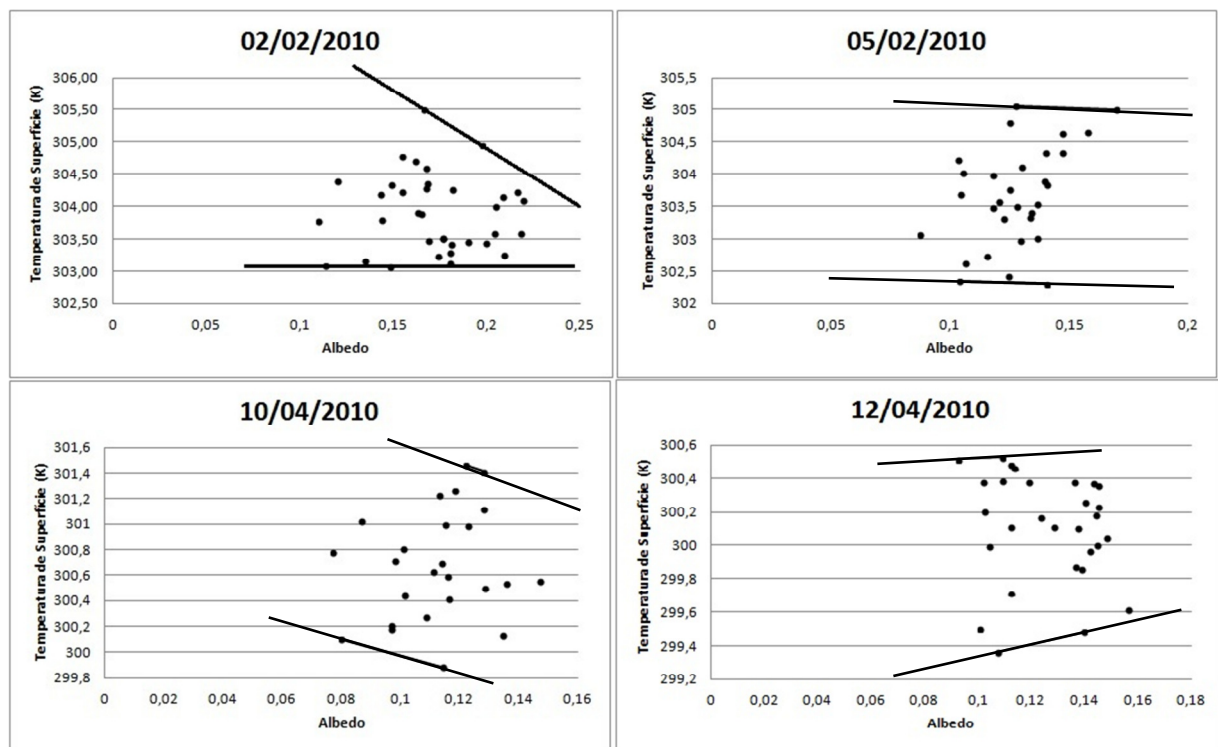


Figura 11: Relação entre a temperatura de superfície e o albedo de superfície e as retas para LE_{max} e H_{max} .

Através da regressão linear são obtidas expressões para T_h e T_{LE} apresentadas na Tabela 15.

Tabela 15: Equações das retas obtidas para LE_{max} e H_{max} .

Data	$T_h(K)$	$T_{LE}(K)$
02/02/2010	$-17,511a + 308,42$	$-0,4454a + 303,14$
05/02/2010	$-1,2924a + 305,22$	$-1,0467a + 302,44$
10/04/2010	$-8,2518a + 302,47$	$-6,2576a + 300,6$
12/04/2010	$0,4477a + 300,48$	$3,641a + 298,97$

Os coeficientes das retas apresentaram uma grande variabilidade entre os dias estudados, como era esperado, já que esses coeficientes são específicos para a data e o local (ROERINK *et al.* 2000).

A Fração Evaporativa (Λ_i) foi calculada através dos resultados apresentados na Tabela 15.

A Radiância (R_{ni}) (Tabela 16) e o Fluxo de Calor no Solo (G_i) foram estimados através de dados obtidos pela imagem de satélite e fornecidos pela estação meteorológica. Com esses valores foi estimado o fluxo de calor latente instantâneo LE_i .

Tabela 16: Componentes do Saldo de Radiação.

Data	$R_{cl}(W/m^2)$	$R_{l\uparrow}(W/m^2)$	$R_{l\downarrow}(W/m^2)$	$R_n(W/m^2)$
02/02/2010	552,38	462,59	361,05	450,83
05/02/2010	669,05	462,82	358,93	565,16
10/04/2010	571,41	444,47	335,52	462,46
12/04/2010	441,75	132,92	101,21	410,04

A Tabela 17 apresenta os valores médios de cada componente para as quatro datas consideradas.

Tabela 17: Componentes para a estimativa da Evapotranspiração.

Data	$G(W/m^2)$	$R_n(W/m^2)$	Fração Evaporativa	$LE(W/m^2)$
02/02/2010	150,27	450,83	0,64	195,51
05/02/2010	201,13	565,16	0,55	201,54
10/04/2010	170,90	462,46	0,53	154,13
12/04/2010	150,64	410,04	0,38	97,56

Os valores diários de evapotranspiração são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Valores diários de evapotranspiração estimados através do método S-SEBI.

ET_d (mm/d)				
Data	Médio	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
02/02/2010	18,31	6,32	30,23	6,49
05/02/2010	19,68	3,31	38,60	9,57
10/04/2010	15,34	4,04	25,89	6,39
12/04/2010	9,59	1,18	23,69	6,14

Nota-se valores altos obtidos do fluxo de calor no solo, G (Tabela 17). O fluxo de calor no solo é a menor das componentes do balanço de energia e apresenta valores significativamente menores que os outros fluxos de calor, principalmente em relação ao saldo de radiação, como pode ser observado nos resultados obtidos por Santos e Silva, (2010), e Sobrino *et. al* (2005), que estimaram um valor máximo de $116,5 \text{ W/m}^2$ e $63,11 \text{ W/m}^2$ respectivamente.

O fluxo de calor no solo é calculado através das refletâncias da superfície. Normalmente os menores valores de G ocorrem em áreas irrigadas, onde existe uma maior cobertura do solo e, conseqüentemente, recebem menos incidência da radiação solar à superfície (SANTOS e SILVA, 2010). Como os pontos escolhidos para obtenção dos valores são estações meteorológicas de superfície, recebem muita incidência da radiação solar. O que faz com a que refletância aumente e conseqüentemente os valores de G .

É possível perceber também que a estimativa da evapotranspiração diária apresentou valores maiores que o esperado. Um valor máximo da evapotranspiração diária de $6,3\text{mm/d}^1$, $9,2\text{mm/d}^1$ e $6,0\text{mm/d}^1$ foi encontrado por Sansigolo (2002), Marcuzzo *et al.* (2008) e Martins (2011) respectivamente no estado de São Paulo através de diferentes métodos e em diferentes tipos de área e cobertura do solo. Dessa forma, os valores mínimos obtidos de ET_d através do método S-SEBI estão próximos aos valores encontrados na literatura, entretanto os valores máximos ultrapassam esses valores, indicando que o modelo S-SEBI superestimou a estimativa da evapotranspiração real.

Para comparar os valores obtidos, a evapotranspiração também foi estimada através do método *Thornthwaite* (ET_{pd}), apresentados na Tabela 19 e, em seguida, foram feitas as Figuras 12 a 15 comparativas.

Tabela 19: Valores diários de evapotranspiração estimados através do método *Thornthwaite*.

ET_{pd} (mm/d)				
Data	Médio	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
02/02/2010	9,56	7,18	13,92	1,75
05/02/2010	9,24	6,69	12,88	1,77
10/04/2010	6,38	4,40	8,80	0,96
12/04/2010	6,13	4,40	8,80	1,06

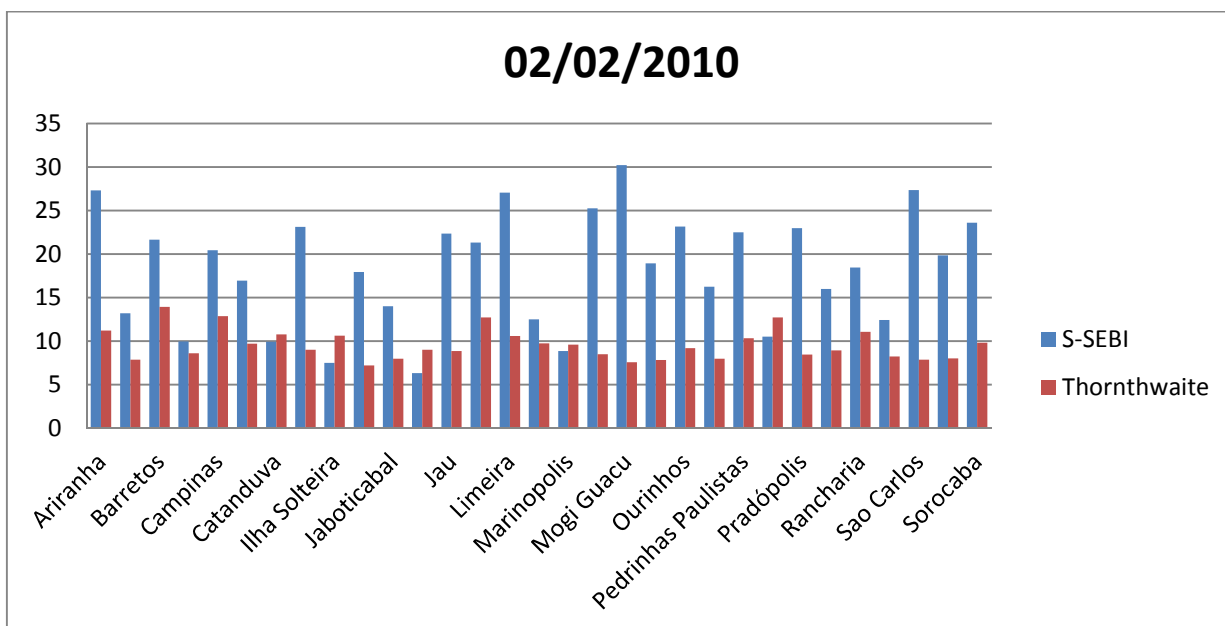


Figura 12: Comparação da estimativa da evapotranspiração diária (mm/d) entre os modelos S-SEBI e *Thornthwaite* para o dia 02/02/2010.

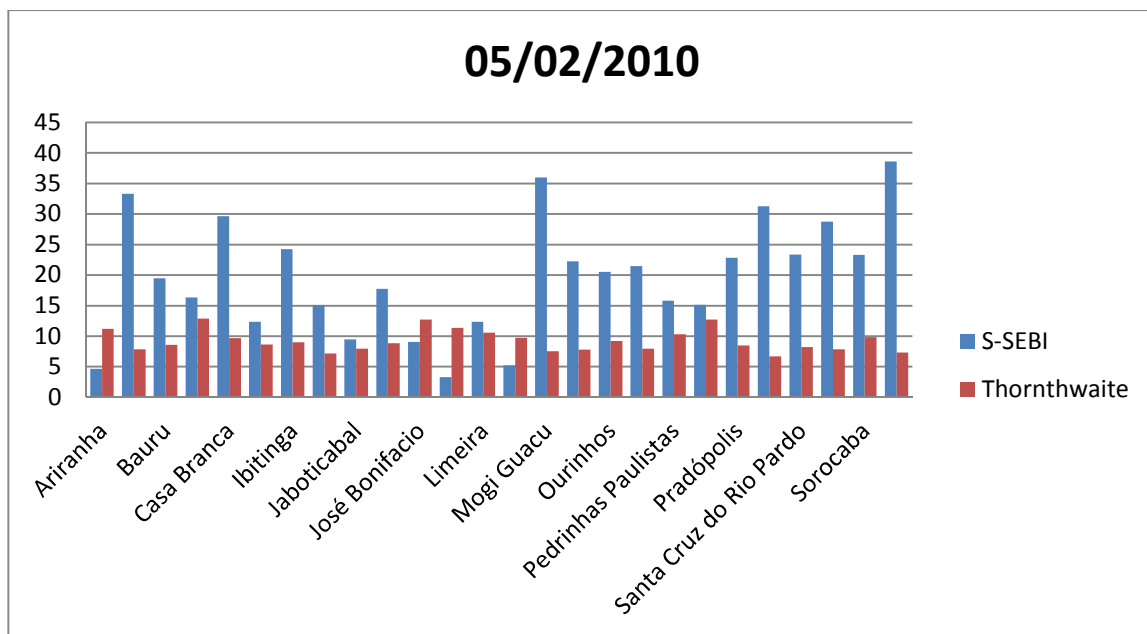


Figura 13: Comparação da estimativa da evapotranspiração diária (mm/d) entre os modelos S-SEBI e *Thornthwaite* para o dia 05/02/2010.

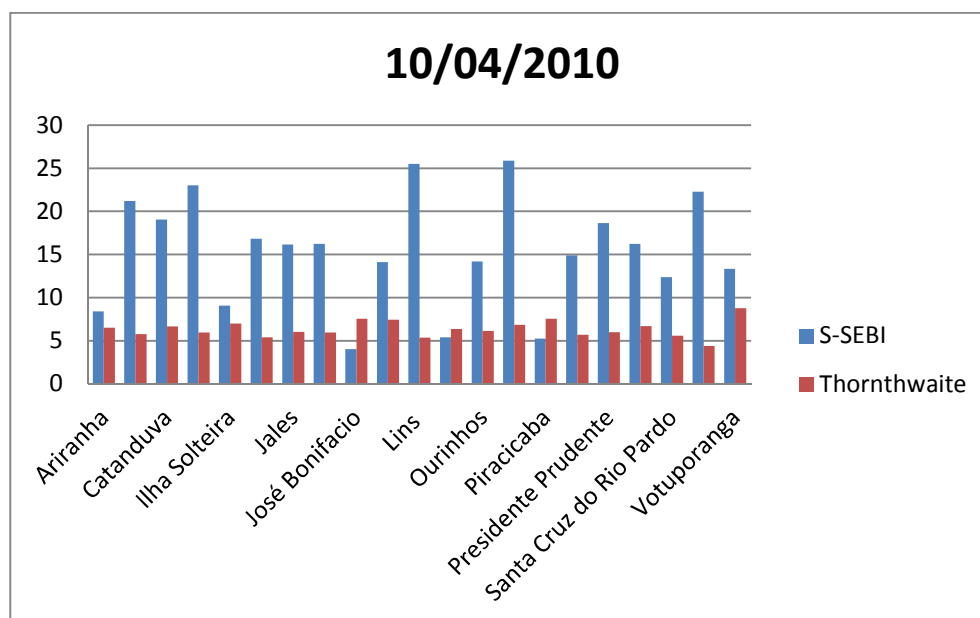


Figura 14: Comparação da estimativa da evapotranspiração diária (mm/d) entre os modelos S-SEBI e *Thornthwaite* para o dia 10/04/2010.

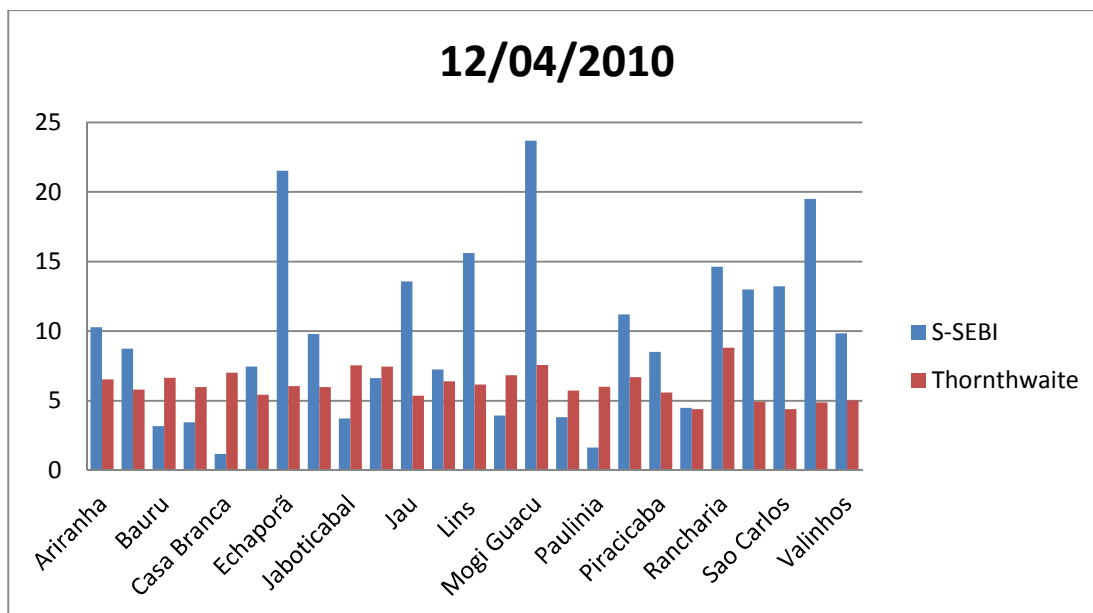


Figura 15: Comparação da estimativa da evapotranspiração diária (mm/d) entre os modelos S-SEBI e *Thornthwaite* para o dia 12/04/2010.

Era esperado que o valor da evapotranspiração potencial fosse maior que o valor da evapotranspiração real estimada pelo S-SEBI. Entretanto, o método S-SEBI superestimou os valores de ET_d . Dessa forma, ocorreu um comportamento inverso e a evapotranspiração real apresentou valores maiores que os obtidos pelo método *Thornthwaite*.

As Figuras 12 a 15 mostram que os municípios de Ariranha, Bauru, Catanduva, Jales, Jaboticabal, José Bonifácio, Marinópolis e Piracicaba apresentaram resultados mais significativos para a estimativa através do modelo S-SEBI e consequentemente mais próximos aos valores obtidos através do modelo *Thornthwaite*. As estações meteorológicas de superfície nesses municípios se encontram em diferentes tipos de áreas: urbana, agrícola e próximos a lagos. Sendo assim, não foi possível obter um padrão para o comportamento diferenciado desses locais.

Um fator que pode ter interferido nos valores da evapotranspiração é o fato que o S-SEBI se fundamenta na distribuição espacial da temperatura de superfície e refletância, que são sensíveis a presença de nuvens e portanto a proximidade de nuvens em algumas estações meteorológicas pode ter influenciado o resultado.

Além disso, ao transformar os valores instantâneos em valores diários, foram feitas várias aproximações que podem aumentar os erros na evapotranspiração diária. Outros métodos para estimar a evapotranspiração diária exigem dados de estações meteorológicas que não são rotineiros, como vento e pressão atmosférica.

5. Conclusões

5.1 Temperatura de Superfície

A aplicação dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nas 46 datas utilizadas mostrou a necessidade de uma modificação nos seus coeficientes para adaptá-los às condições regionais do estado de São Paulo.

Os dados da estação meteorológica de Campinas mostraram uma diferença média de 2,33°C entre a temperatura de superfície e a temperatura do ar.

Os algoritmos apresentaram comportamento semelhante em todos os três testes realizados. O resultado do Teste 1 mostrou que não existe uma diferença significativa entre a estimativa através desses métodos no Outono/Inverno e Primavera/Verão, ou seja, os métodos apresentaram o mesmo comportamento ao longo do ano.

O resultado do Teste 2 mostrou que a mudança no valor do conteúdo de vapor d'água dos modelos exerce uma grande influência na acurácia dos métodos. Concluiu-se que o uso de $TV=7\text{g/cm}^2$ é mais adequado para o estado de São Paulo, produzindo resultados mais significativos na estimativa da temperatura de superfície na região.

O Teste 3 indicou que a utilização da emissividade fixa na estimativa da temperatura aumenta consideravelmente os erros de estimativa analisados. O uso do NDVI para obter a emissividade apresenta uma acurácia melhor, uma vez que considera a ponderação da cobertura do pixel da imagem.

Considerando os resultados dos três testes foi possível concluir que a estimativa da temperatura de superfície pode ser feita ao longo do ano utilizando $TV=7\text{g/cm}^2$ e que a emissividade calculada a partir do NDVI diminui os erros de estimativa. Além disso, o modelo *Sobrino*, no geral, apresentou uma acurácia melhor. Portanto a equação base utilizada para o cálculo de novos coeficientes, adaptados a região à São Paulo, foi a do método *Sobrino*.

Ao aplicar o método *Sobrino* com os novos coeficientes para quatro datas distintas no estado de São Paulo, foi comprovada uma diminuição dos Erros Médios e que ficaram dentro do valor esperado de 2,33°C de diferença entre a temperatura de superfície e a temperatura do ar. Assim, é possível estimar a temperatura de superfície do estado de São Paulo através desse modelo modificado de forma eficaz no monitoramento agrometeorológico.

5.1 Evapotranspiração

Foi utilizado o algoritmo S-SEBI para estimar a evapotranspiração. Os dados de entrada foram obtidos através das imagens correspondentes às quatro datas selecionadas anteriormente e que também foram utilizadas na estimativa da temperatura de superfície. Como forma de comparação, também foi estimada a evapotranspiração potencial através do método Thornthwaite.

Os valores da evapotranspiração real obtidos foram superestimados em relação aos valores da evapotranspiração potencial. Normalmente, os valores de ET_p são maiores do que ET_d , porém, nesse caso, ocorreu o inverso. Isso se deve ao fato do modelo de ter superestimado os valores de evapotranspiração diária.

O fluxo de calor no solo e a evapotranspiração diária apresentaram valores maiores do que o esperado. Como o fluxo de calor no solo foi obtido através da refletância da imagem, o aumento da incidência de radiação direta no local também aumenta os valores dessa variável. Essa componente do balanço de energia é uma função da condutividade térmica do solo e requer informações detalhadas sobre o solo (GIACOMONI, 2005), portando a estimativa usando apenas dados da imagem de satélite pode levar a resultados superestimados por não levar em conta os aspectos da cobertura do local.

Os valores da evapotranspiração diária variaram muito para diferentes municípios, porém não foi encontrado um padrão do tipo de cobertura do solo que explicasse essa diferença.

Uma possível causa é a presença de nuvens na imagem próximo as estações meteorológicas de superfície, que interferem no valores e de refletância e consequentemente nos valores de evapotranspiração. Além disso as aproximações feitas para transformar os valores de evapotranspiração instantâneo em valores diários podem aumentar os erros e assim superestimar os valores obtidos.

Portanto, o uso do algoritmo S-SEBI para estimar a evapotranspiração diária no estado de São Paulo não apresentou resultados significativos, mostrando a necessidade de modificações na metodologia e no algoritmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. *et al* .**Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements**. 300 p. FAO irrigation and Drainage Paper 56 - Rome, Italy, 1998.

ANTUNES, J.F.G. **Aplicações de lógica fuzzy para estimativa de área plantada da cultura de soja utilizando imagens AVHRR/NOAA**. 91p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Feagri/Unicamp, Campinas., 2005.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**. 273 p. Tese (Doutorado em Agricultura) – Wageningen Agricultural University, Wageningen, Holanda, 1995.

CIIAGRO, Balanço Hídrico. <http://www.ciiagro.sp.gov.br/def_1.html>, 13/01/2013.

DASH, P. *et. al*. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice—current trends. **International Journal of Remote Sensing**, vol.23, n.13, p.2563–2594, 2002.

ESQUERDO, J.C.D.M. *et. al*. An automatic system for AVHRR land surface product generation. **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n.18, p.3925-3942, 2006.

ESQUERDO, J.C.D.M. **Utilização de perfis multi-temporais do NDVI/AVHRR no acompanhamento da safra de soja no oeste do Paraná**. 2007. 168p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

GALLEGUILLOS, M. *et al*. Mapping Daily Evapotranspiration Over a Mediterranean Vineyard Watershed. **IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters**, v.8, n.1, p.168-172, jan. 2011.

GIACOMONI, Marcio Hofheinz. **Estimativa da evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelos de balanço de energia:** aplicação no estado do Rio Grande do Sul. 113 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

GUSSO, A.; FONTANA, D. C. Ensaio comparativo sobre métodos de monitoramento da temperatura da superfície terrestre no estado do Rio Grande do Sul com uso dos satélites noaa. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003, Belo Horizonte (MG). **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.** São José dos Campos: INPE, 2003. v.1, p.1185-1192.

GAO, H.; Fu, R.; Dickinson, R. E.; Juárez, R. I. N.; A Practical Method for Retrieving Land Surface Temperature From AMSR-E Over the Amazon Forest. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.46, n.1, p.193-199, jan. 2008.

GUPTA, S. K., WILBER, A.C., KRATZ, D. P., **Surface emissivity maps for satellite retrieval of the longwave radiation budget.** Apêndice B. Relatório Técnico - NASA, 1999.

HAN, K.S.; VIAU, A. A.; ANCTIL, F.. An analysis of GOES and NOAA derived land surface temperatures estimated over a boreal forest. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n.21, p.4761-4780, 10 nov. 2004.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola.** < http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201302comentarios.pdf >, 28/03/2013.

KASHYAP, P.S.; PANDA, R.K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. **Agricultural Water management.** Amsterdam, v.50, n.1, p.9-25. 2001.

KIDWELL, K.B. NOAA polar orbiter data users guide. **Washington: US Department of Commerce**, 1995. p.255.

KUSTAS, W. P; NORMAN J. M., Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. **Hydrological Sciences Journal**, vol.41, n.4, p.495–515, 1996.

LAZARIM, C.G.; ZULLO JR, J. Estimativa da temperatura de superfície terrestre, através de imagens do satélite AVHRR/NOAA, destinada ao monitoramento agrometeorológico. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2009, Natal (RN). **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2009. v.1, p.6943-6949.

Disponível em:<<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.18/doc/6943-6949.pdf>>. Acesso em: 28 de junho de 2011.

LAZARIM, C.G.; ZULLO JR, J. Estimativa da temperatura da superfície terrestre, destinada ao monitoramento agrometeorológico de dias com temperaturas elevadas, utilizando dados do sensor AVHRR. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2011, Curitiba (PR). **Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2011. v.1, p.78-84. Disponível em:<<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0846.pdf>>. Acesso em: 28 de junho de 2011.

MARCUZZO, F. F. N., ARANTES, E. J., WENDLAND, E.; Avaliação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial e direta para a região de São Carlos – SP. **Irriga, Botucatu**, v.13, n.03, p 323 – 338, 2008.

MARTINS, Cinthis Avellar. **Estimativa da Evapotranspiração no estado de São Paulo com o modelo da Biosfera SiB2**. 64-70p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade Estadual de São Paulo, 2011.

MAPA. **Zoneamento Agrícola de Risco Climático**.<<http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola>>, 28/03/2103.

NASA (1991). **EOS reference handbook**. Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center (147 pp.).

NOAA Satellite and Information Service. **Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR**. Disponível em < <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html> > . Acesso em: 05 jul. 2011.

OUAIDRARI, H. *et al.* Land surface temperature estimation from AVHRR thermal infrared measurements: An assessment for the AVHRR Land Pathfinder II data set. **Remote Sensing of Environment**, v.81, n.1, p.114-128, 2002.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C.; **Evapo(transpi)ração**. 1ed. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PINHEIRO, A.C.T. *et al.* Development of a daily long term record of NOAA-14 AVHRR land surface temperature over Africa. **Remote Sensing of Environment**, v. 103, p.153-164, 2006.

PINHEIRO, A. C. T.; PRIVETTE, J. L.; GUILLEVIC, P. Modeling the Observed Angular Anisotropy of Land Surface Temperature in a Savanna. **IEEE Transactions on Geosciences Remote Sensing**, vol. 44, n.4, p. 1036–1047, 2006.

Qi, J.; *et al.* A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). **Remote Sensing of Environment**, vol. 48, p. 119-126, 1994.

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

SANSIGOLO, C. A., estimativas climatológicas de evapotranspiração regional em Piracicaba-SP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.17, n.1, p.11-18, 2002.

SANTOS, C. A. C. dos; SILVA, B. B. da. Estimativa da evapotranspiração da bananeira em região semi-árida através do algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.16, n.1, p.9-20, abr. 2008.

SANTOS, C. A. C. dos; SILVA, B. B. da. Obtenção dos fluxos de energia à superfície utilizando o algoritmo S-SEBI. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 05, n.03, p.365 a 374, 2010.

SEGUIN, B., ITIER, B., Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. **International Journal os Remote Sensing**, v. 4, p. 371-284

SOBRINO, J.A.; RAISSOUNI, N.; LOBO, A. Monitoring the Iberian Penninsula land cover using NOAA-AVHRR data. In Guyot & Phulpin (Eds.). **Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing**, p. 787-794, Rotterdam: Balkema, 1997.

SOBRINO, J.A. *et. al.* A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: Application to the DAISEX Campaigns. **Journal of Hydrology**, v.315, p.117–125, 2005.

SOBRINO, J.A. *et. al.* A. application of a simple algorithm to estimate daily evapotranspiration from NOAA-AVHRR images for the Iberian Peninsula. **Remote Sensing of Environment**,v. 110, p. 139-148, 2007.

ULIVIERI, C. *et. al.* A. A split window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. **Advances in Space Research**, v.14, n.3, p.59-65, 1994.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; **Meteorologia e Climatologia**. Versão Digital. Recife: 2005. 152 p.

WELIGEPOLAGE, K. **Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek, The**

Netherlands. (Dissertação de Mestrado) - International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, Netherlands, 2005.

APÊNDICES

A. Imagens da temperatura de superfície

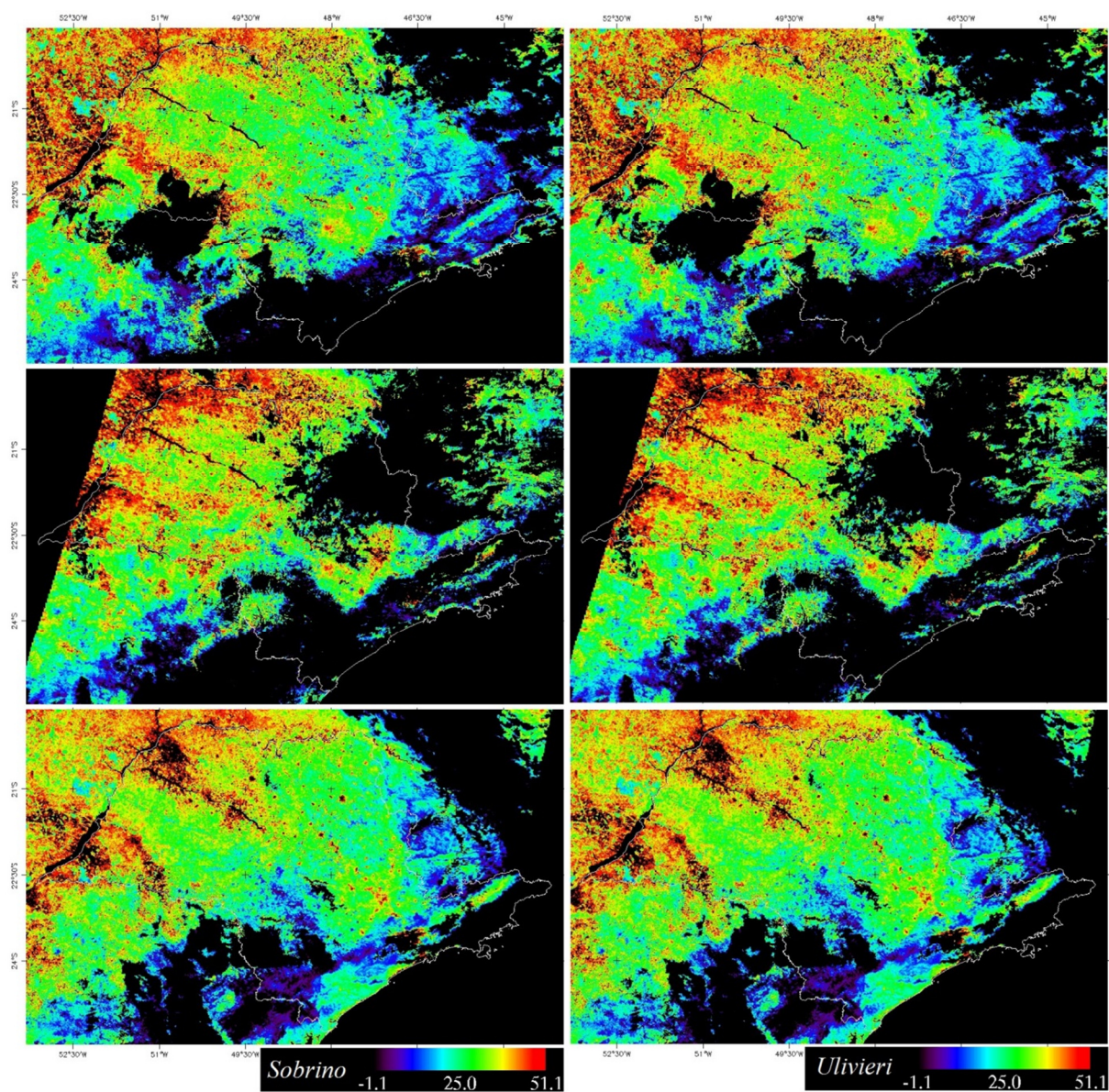


Figura A.1: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 01, 02 e 05 de maio de 2009.

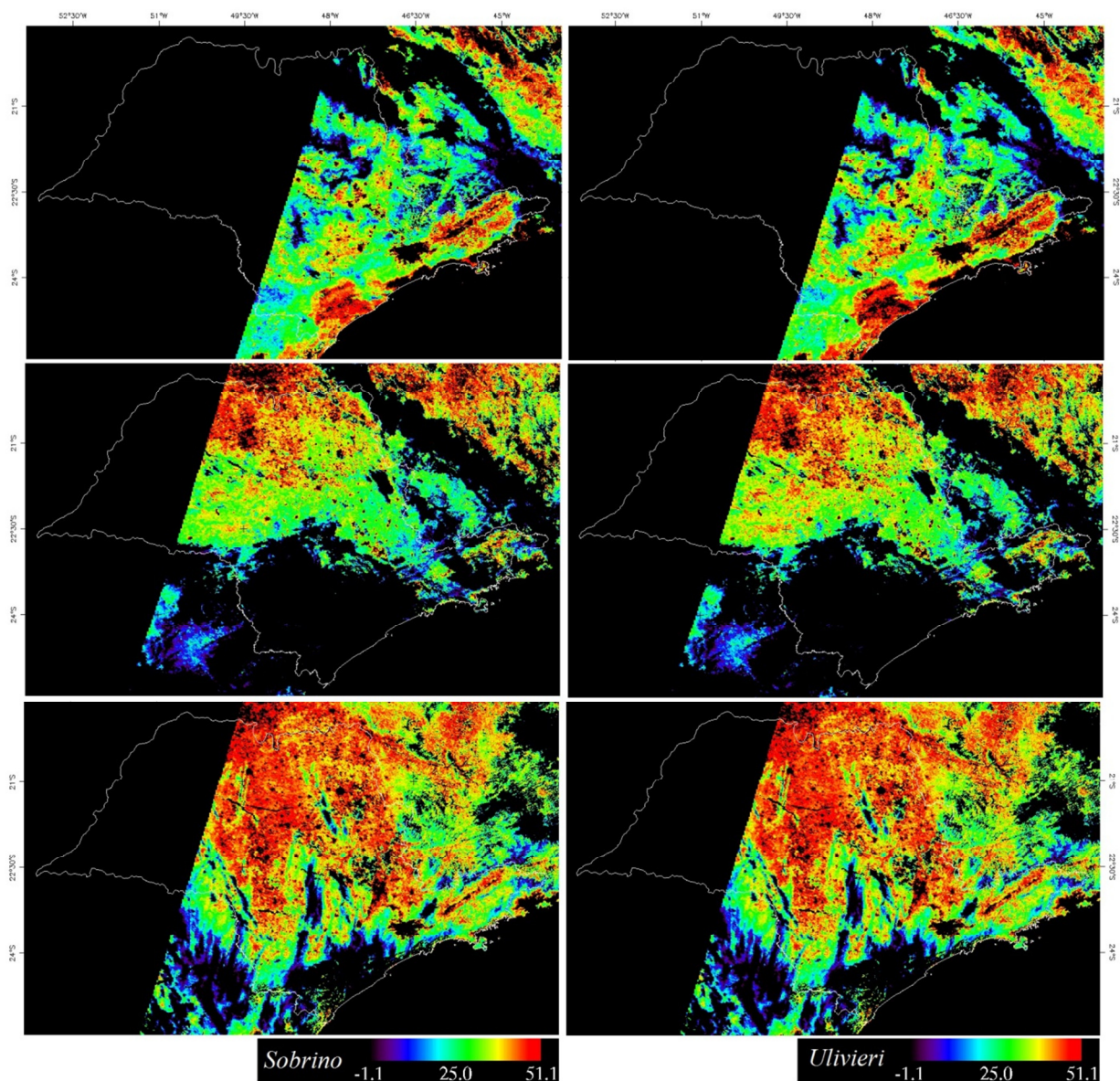


Figura A.2: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 01, 05 e 18 de fevereiro de 2009.

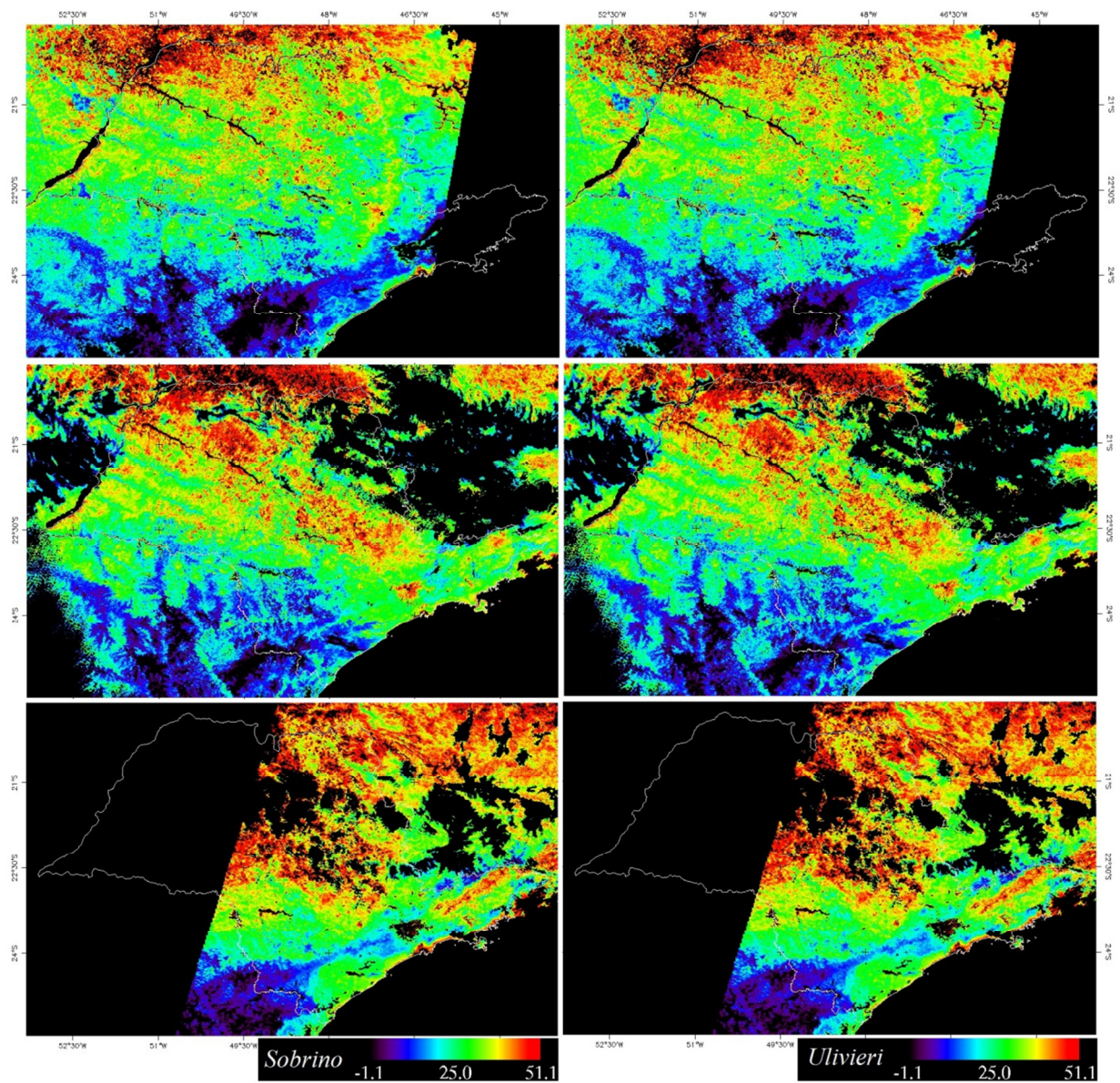


Figura A.3: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 04, 05 e 06 de junho de 2009.

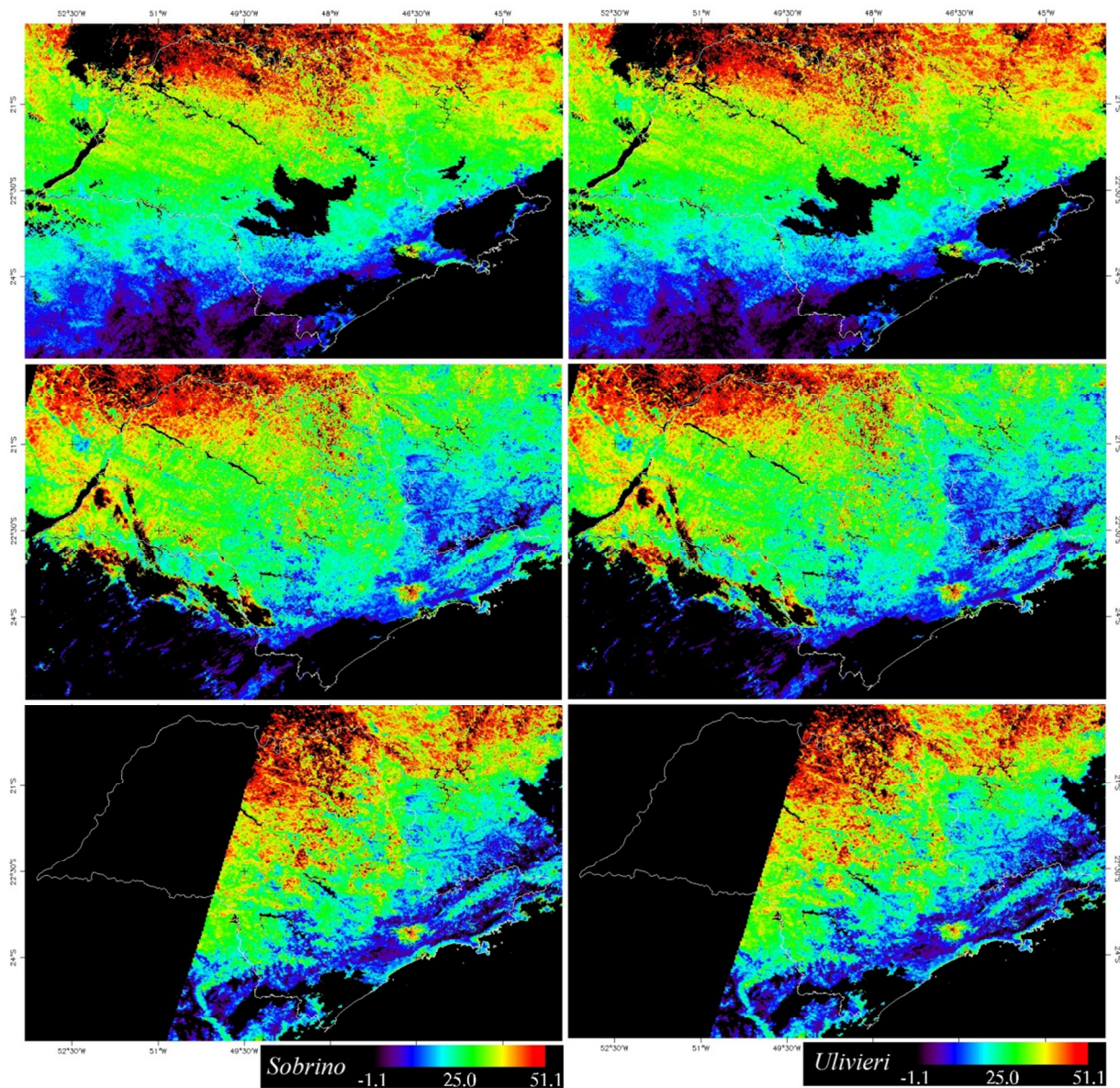


Figura A.4: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 04, 09 e 14 de agosto de 2009.

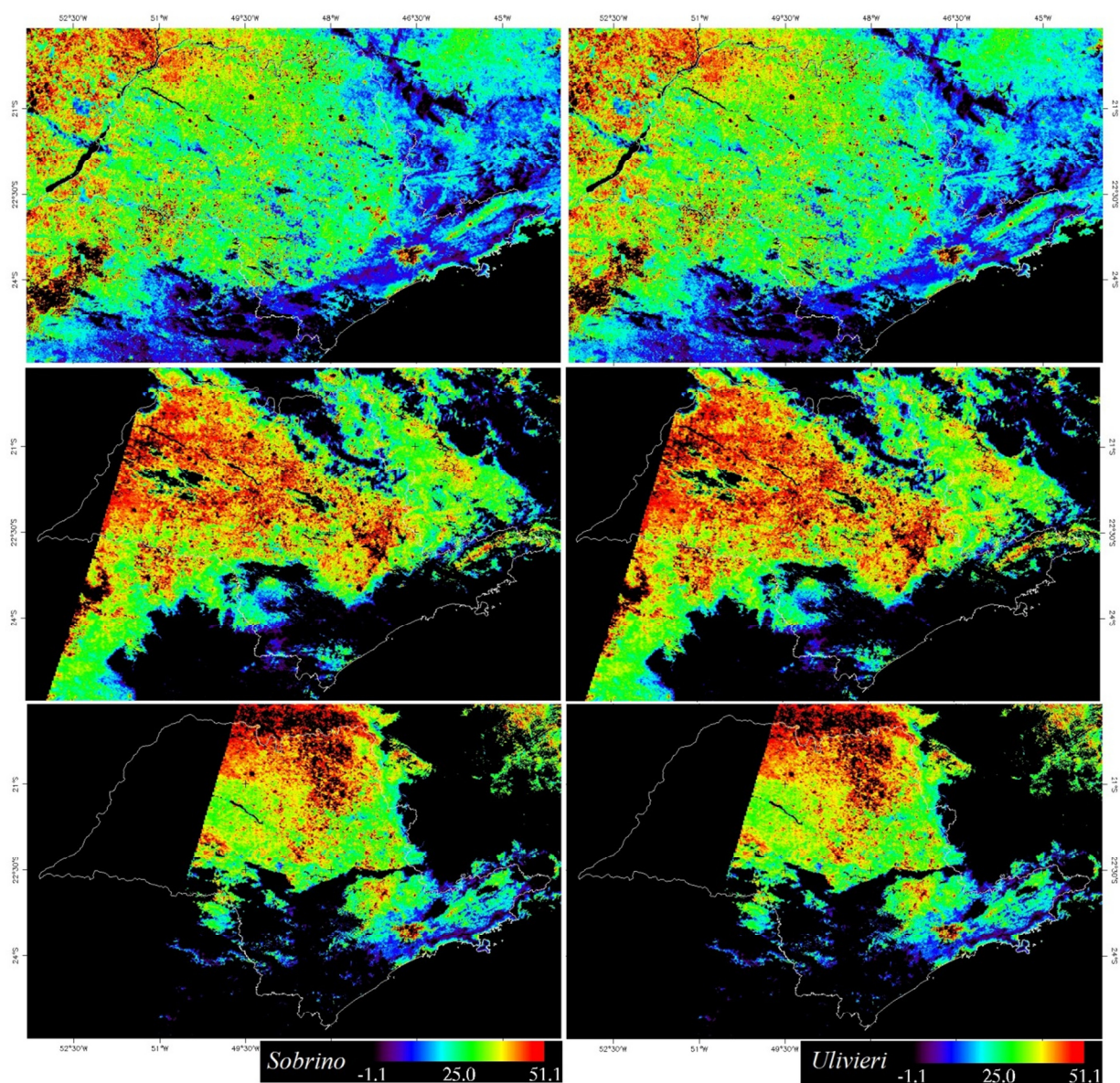


Figura A.5: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 06 e 07 de março e 26 de setembro de 2009.

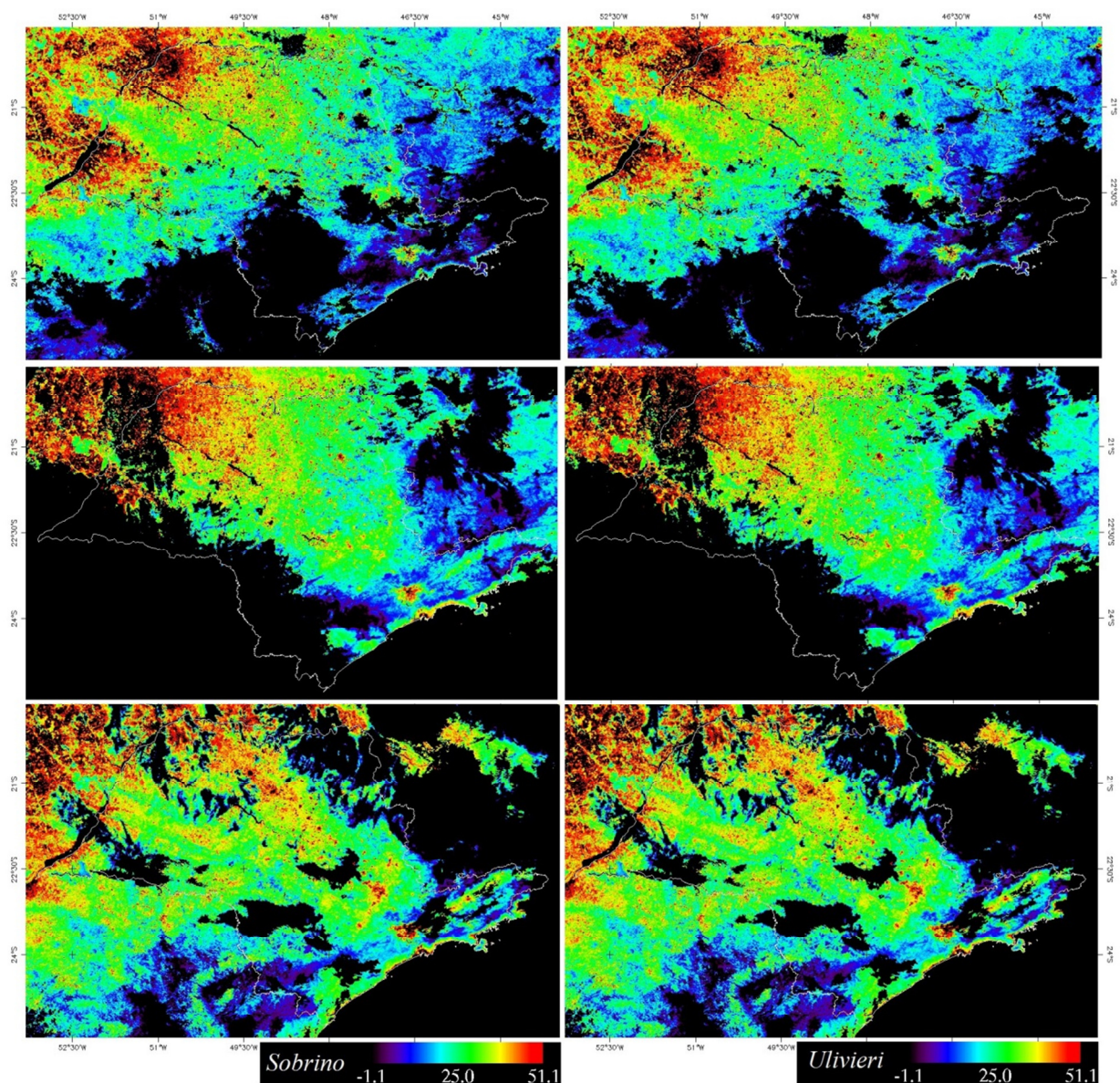


Figura A.6: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 10, 14 e 18 de maio de 2009.

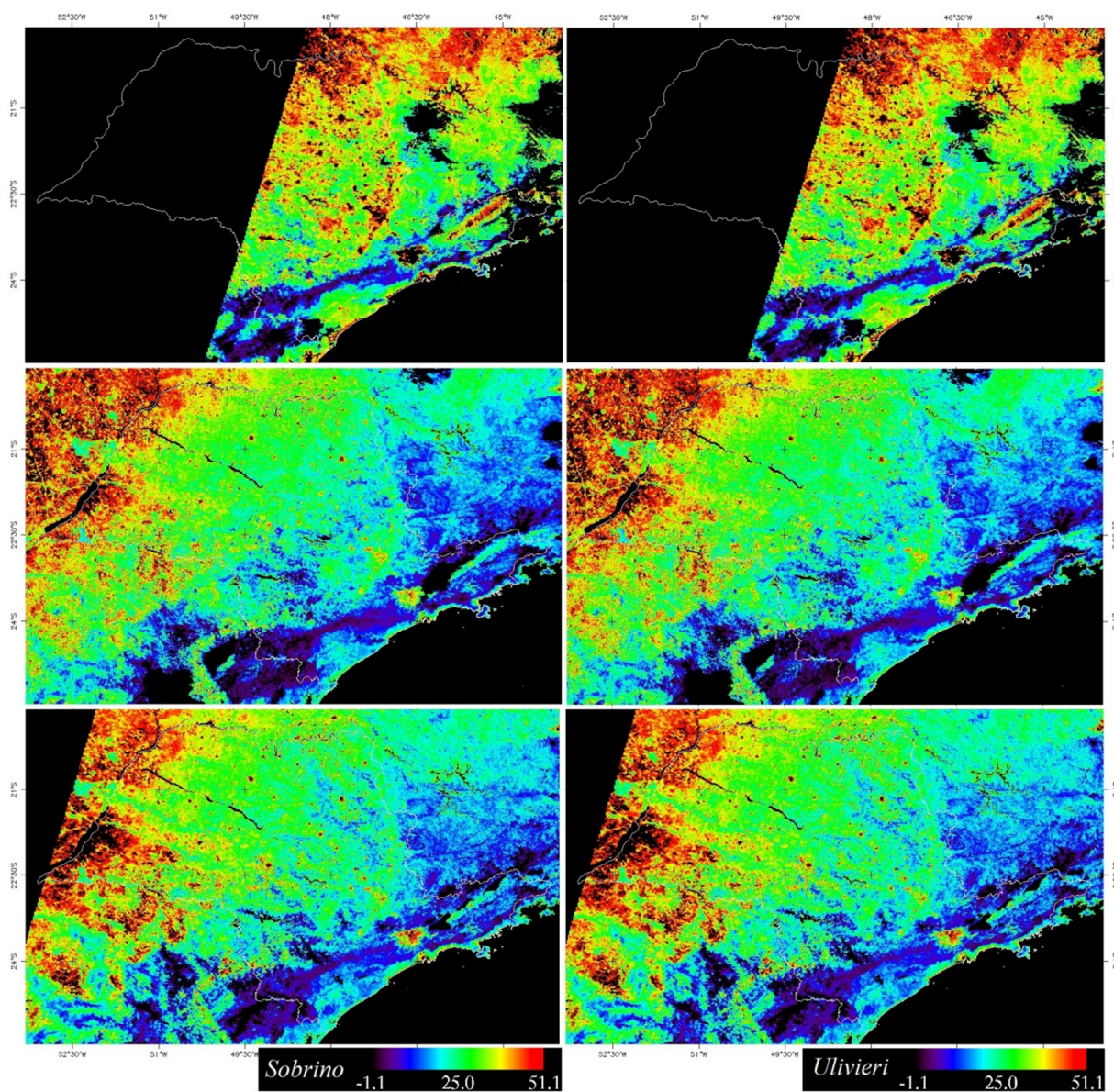


Figura A.7: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 11, 18 e 19 de abril de 2009.

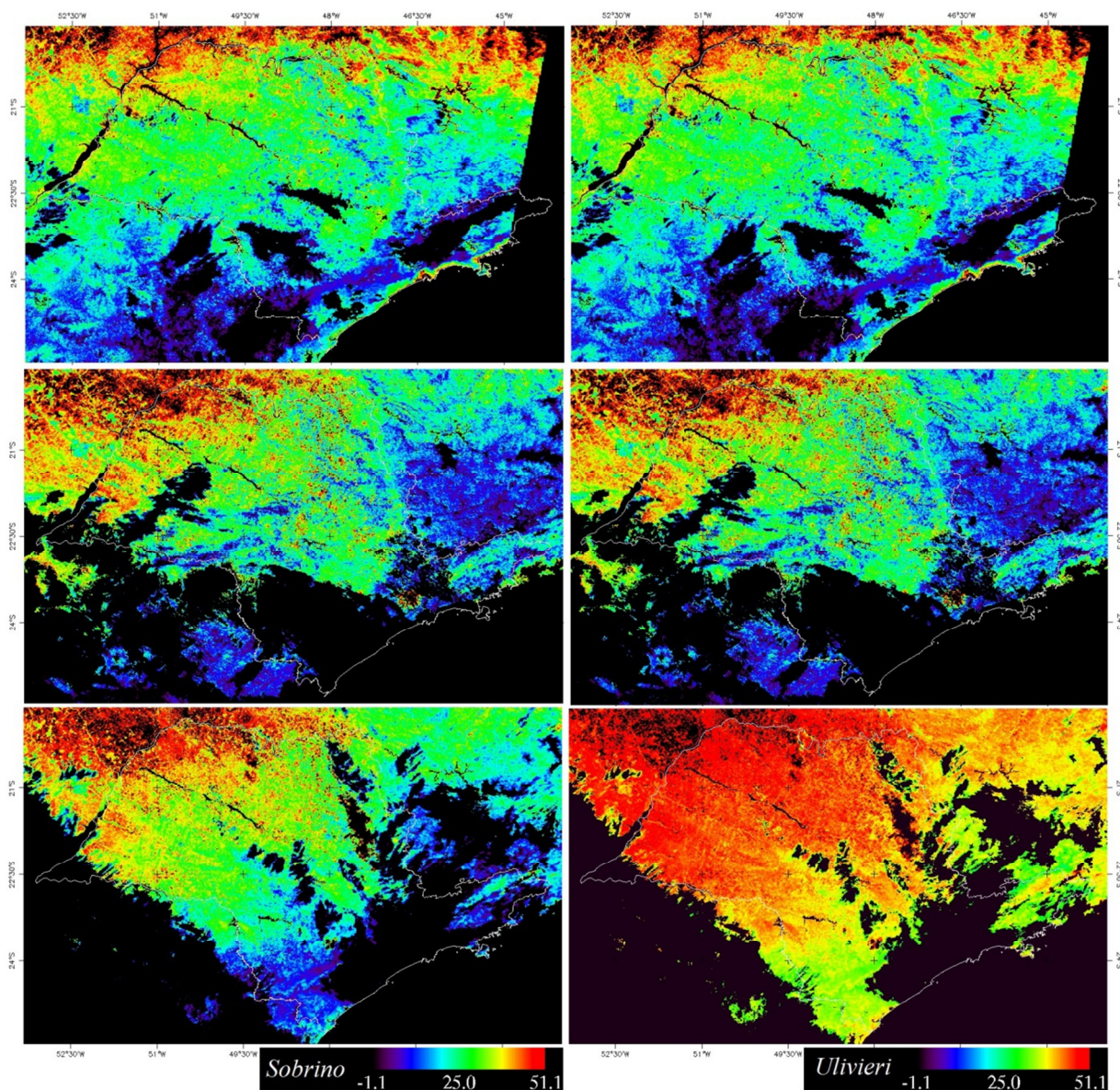


Figura A.8: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 13, 18 e 22 de julho de 2009.

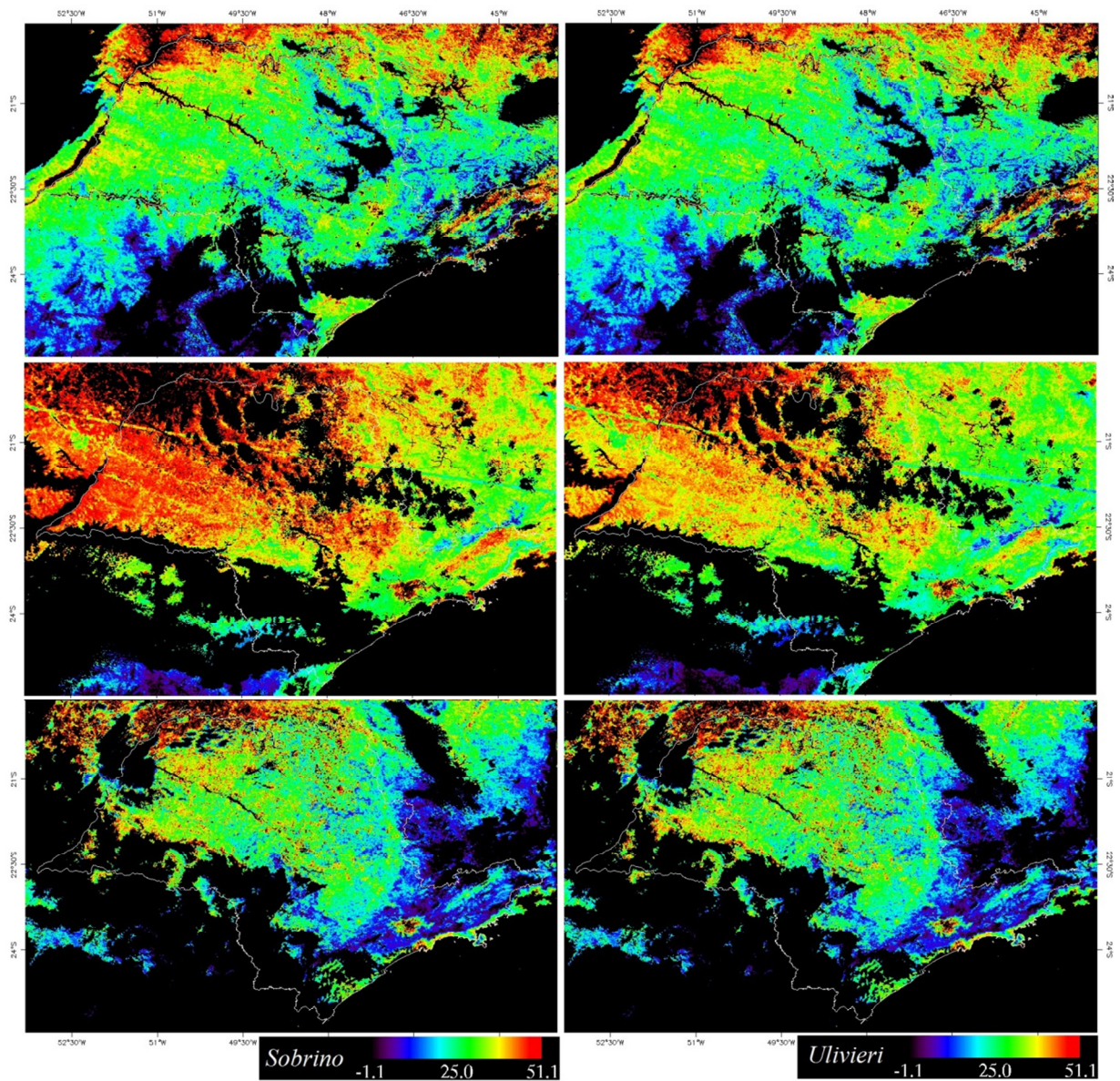


Figura A.9: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 14 de junho, 01 e 09 de julho de 2009.

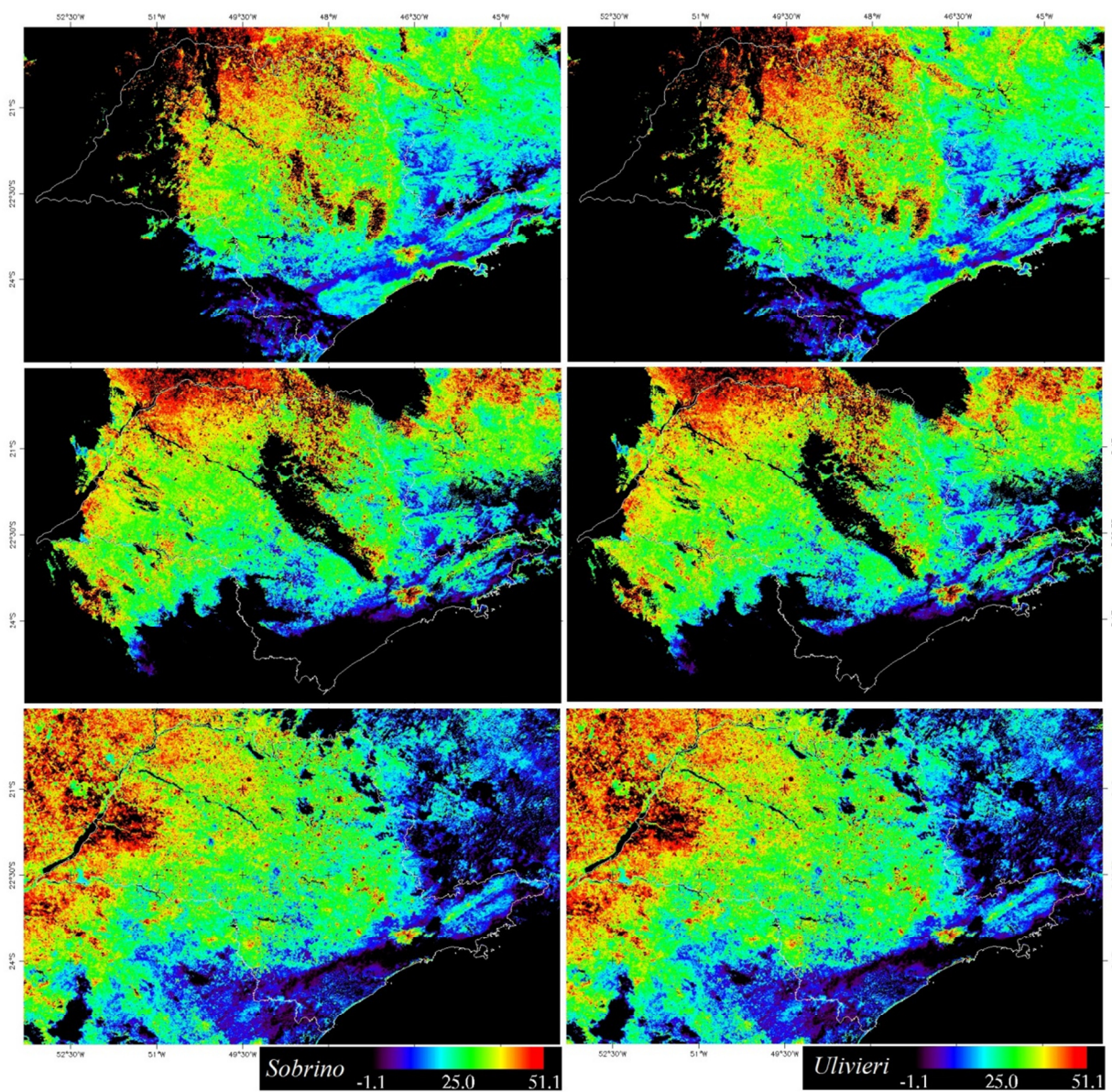


Figura A.10: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 17 de agosto, 12 de setembro e 01 de janeiro de 2009.

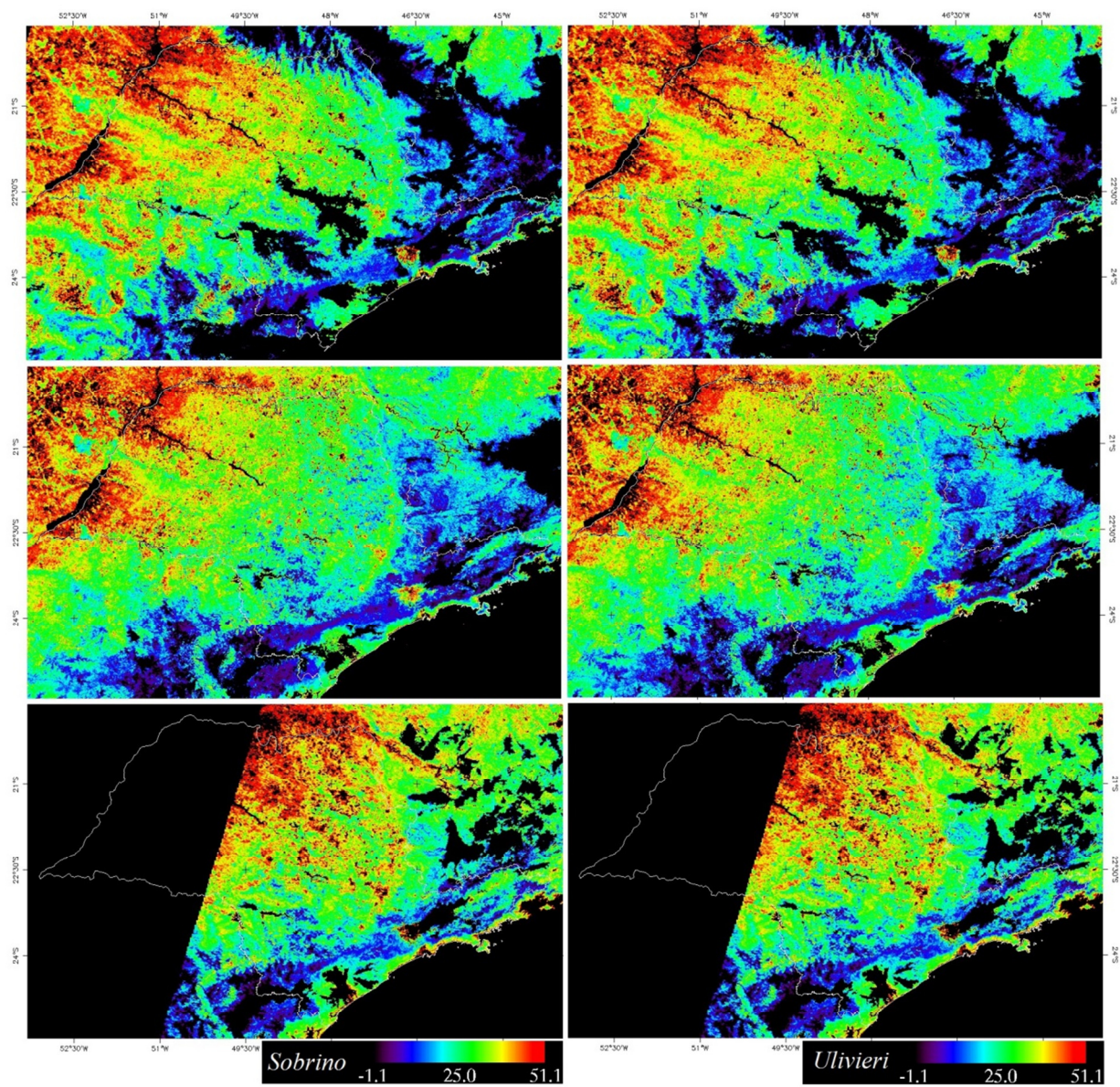


Figura A.11: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 19, 23 e 24 de maio de 2009.

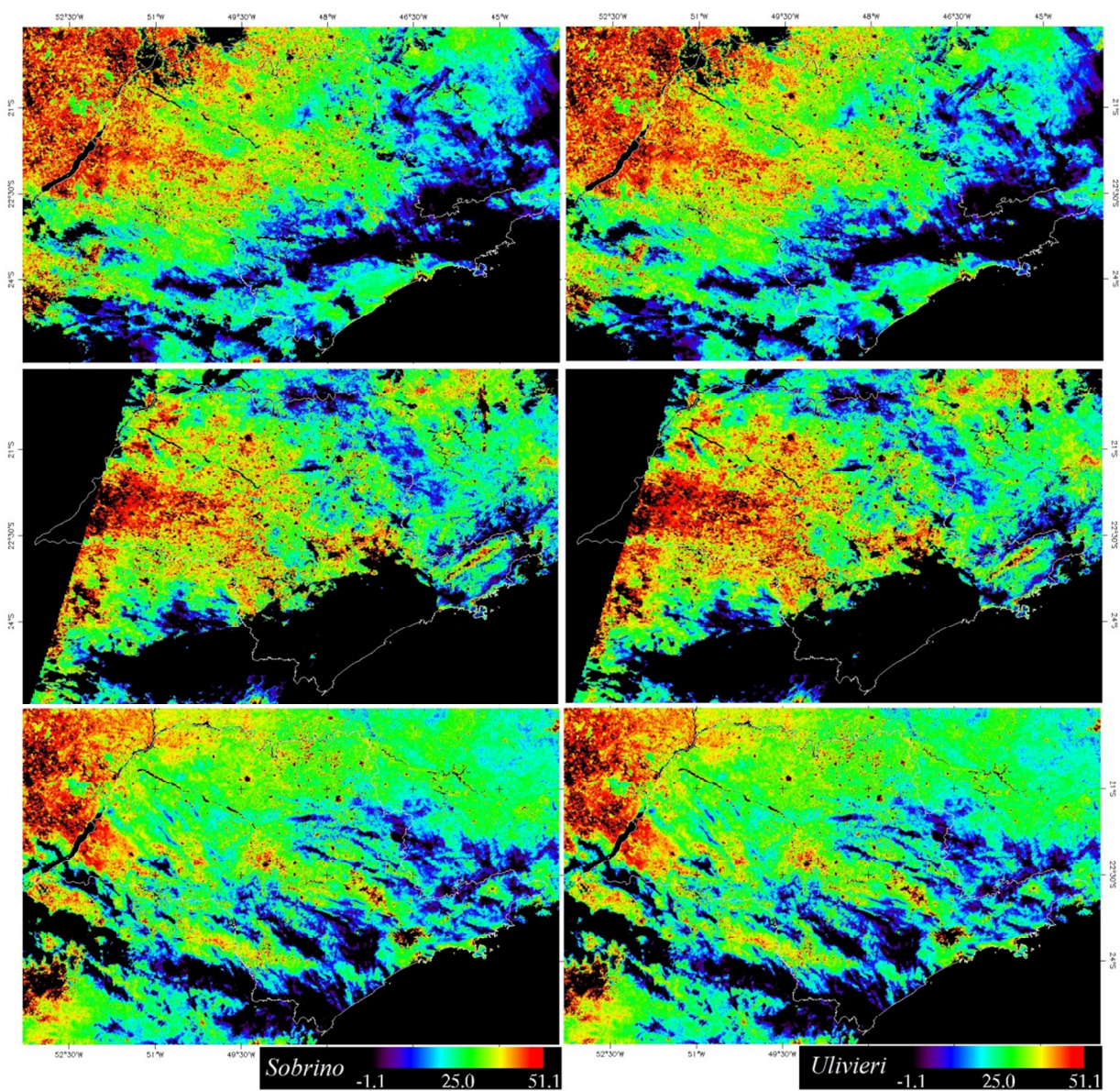


Figura A.12: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 21, 22 de fevereiro e 02 de março de 2009.

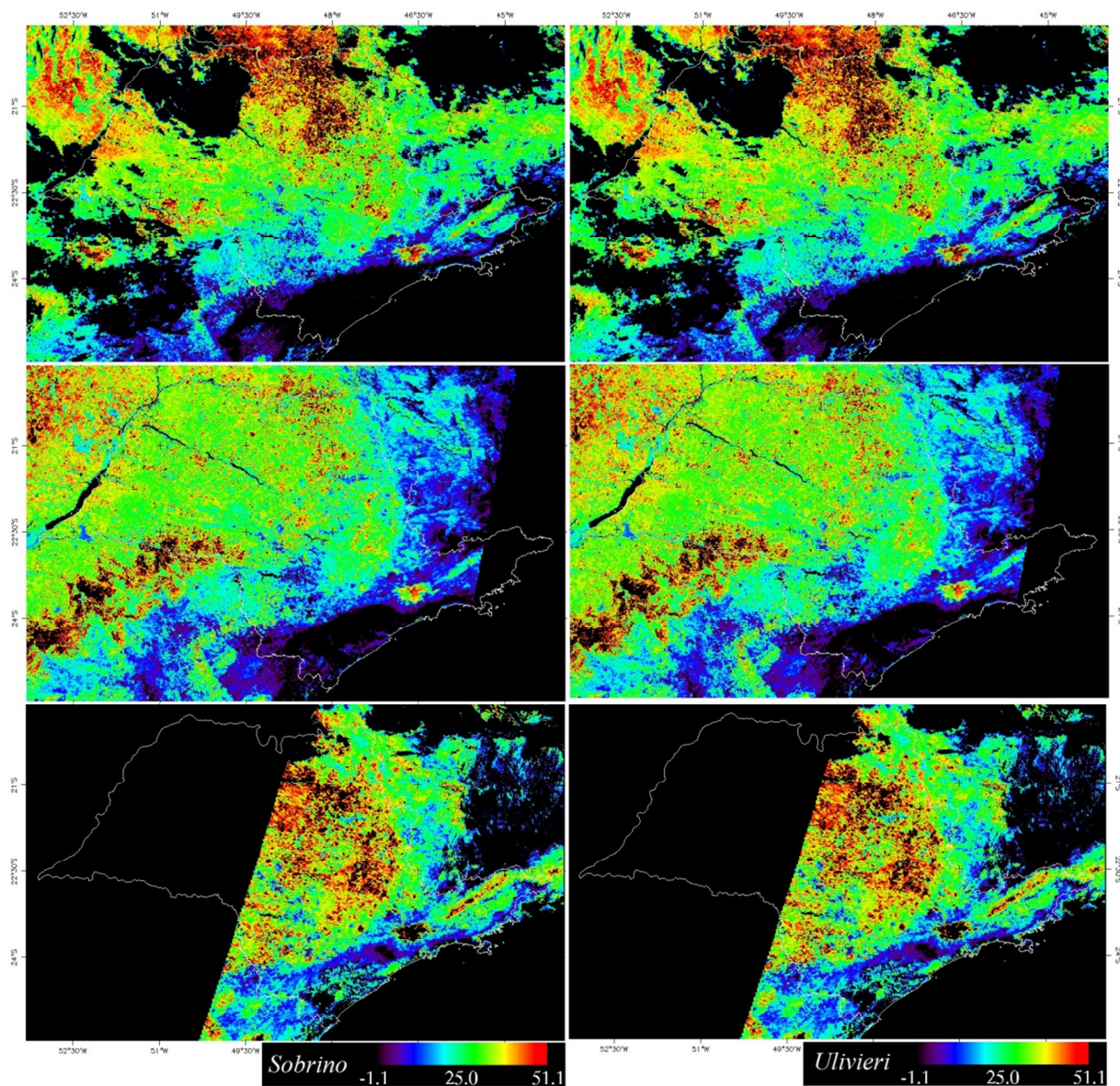


Figura A.13: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 21 de outubro, 02 e 11 de novembro de 2009.

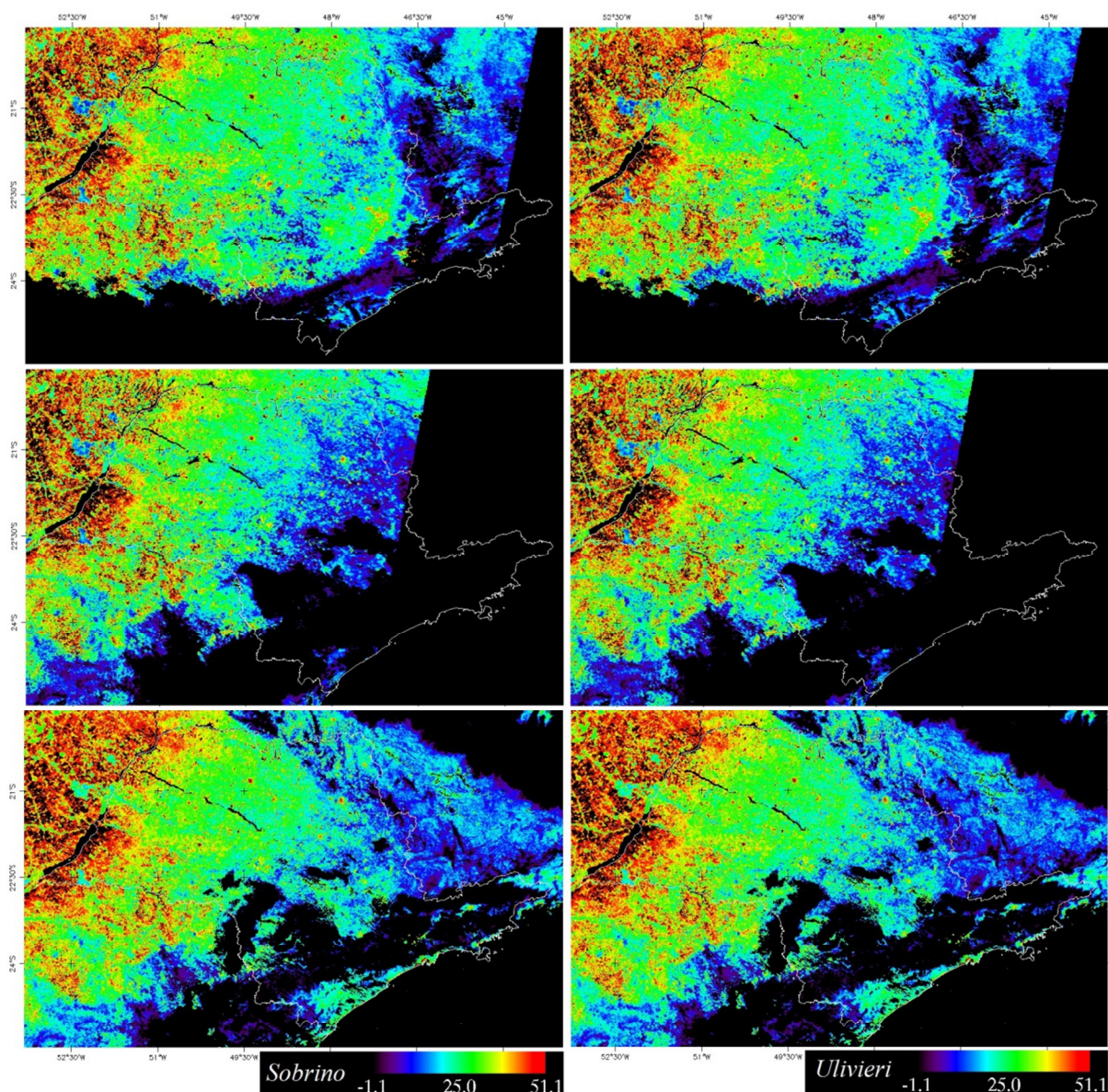


Figura A.14: Imagens da temperatura de superfície estimada através dos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 22, 26 e 27 de abril de 2009.

B. Correlação entre temperaturas

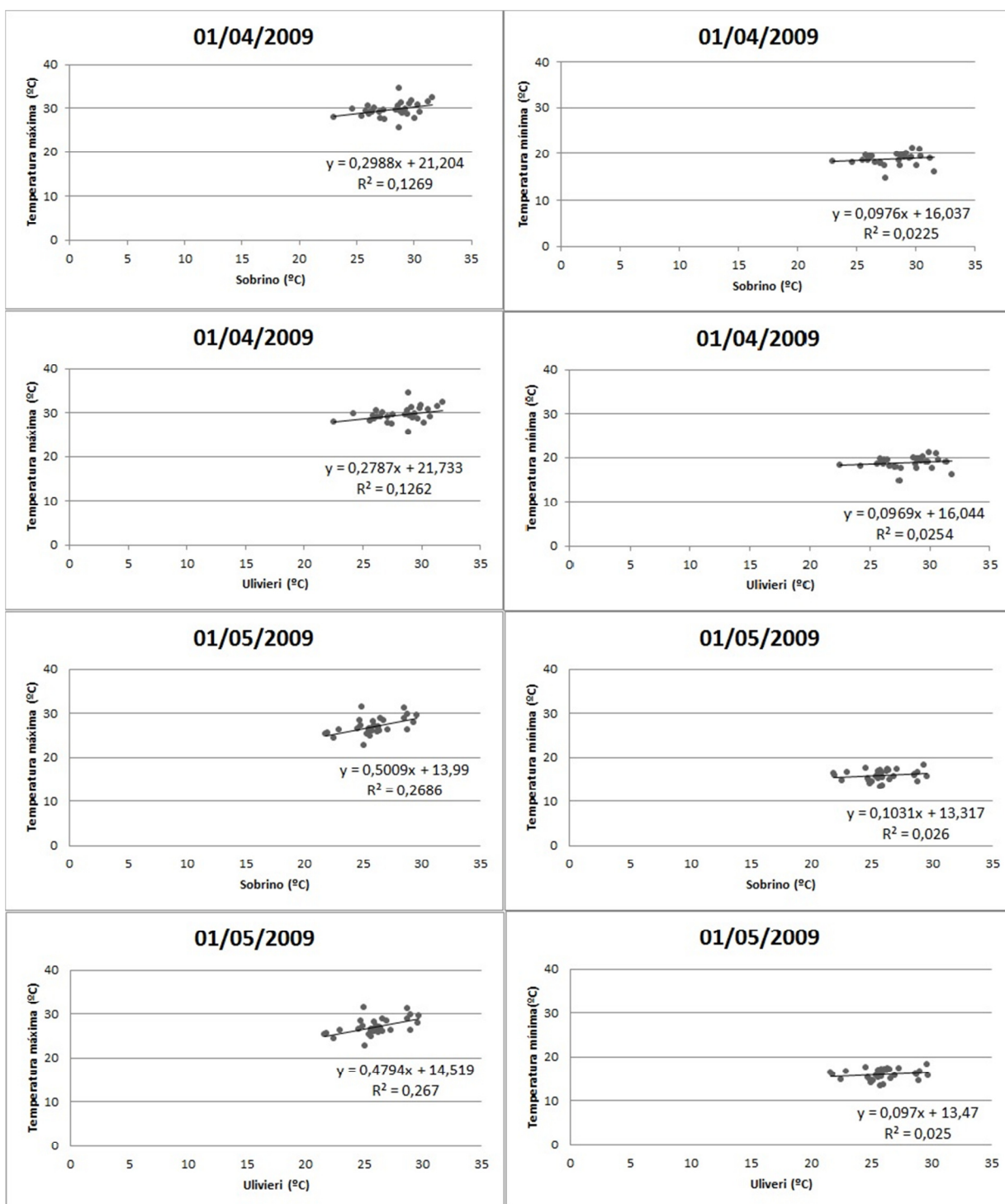


Figura B.1: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 01 de abril e 01 de maio de 2009.

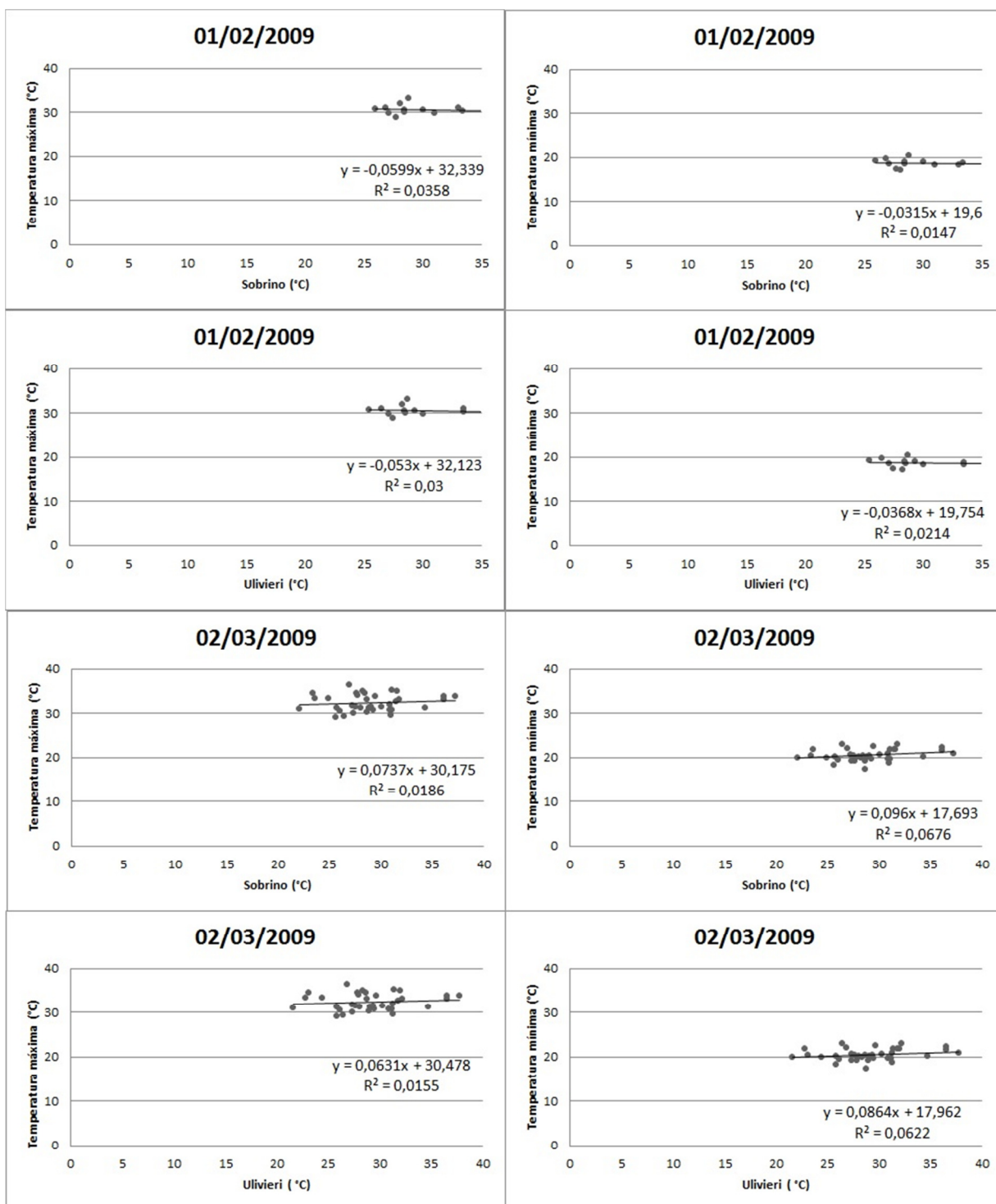


Figura B.2: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 01 de fevereiro e 02 de março de 2009.

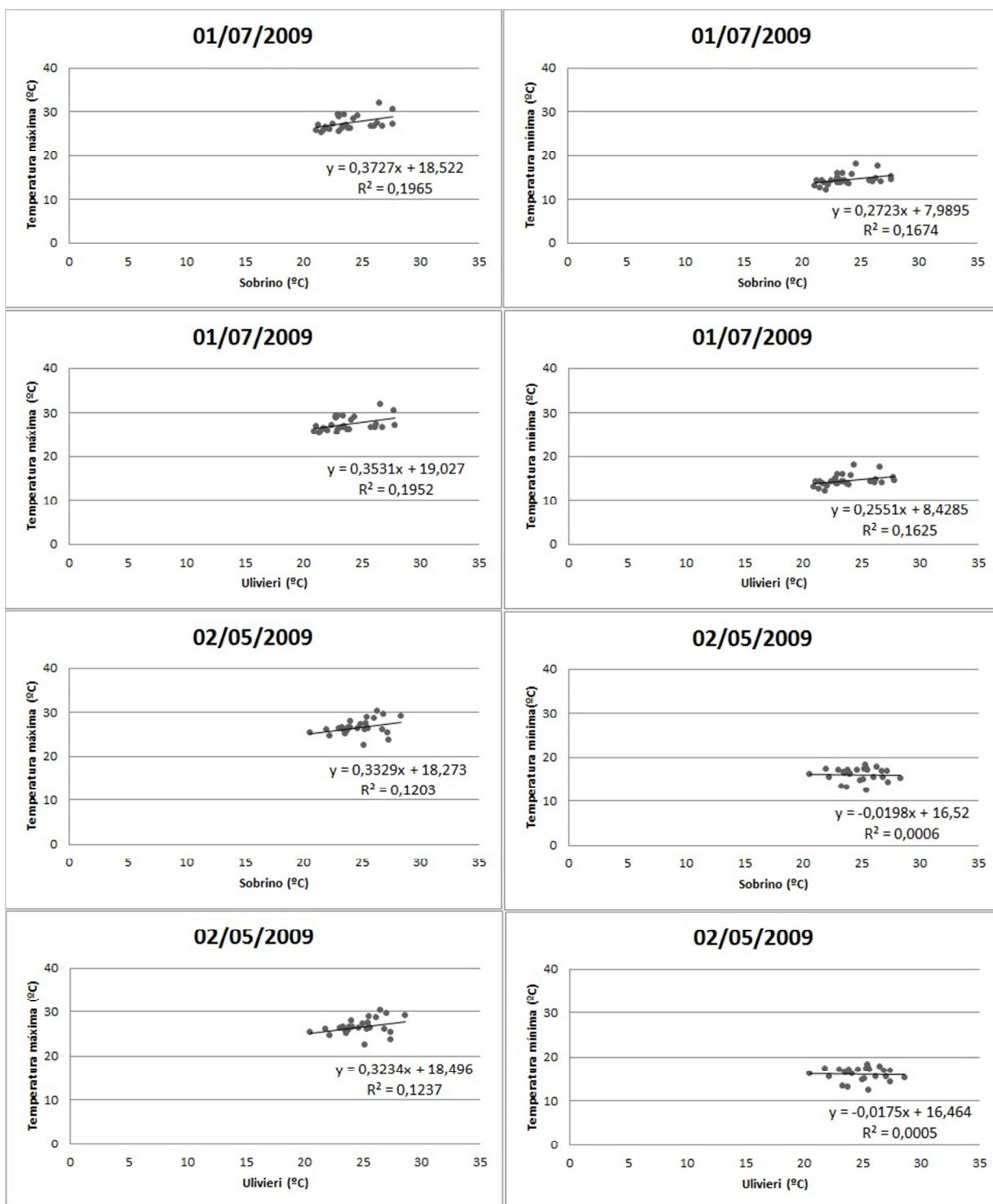


Figura B.3: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 01 de julho e 02 de maio de 2009.

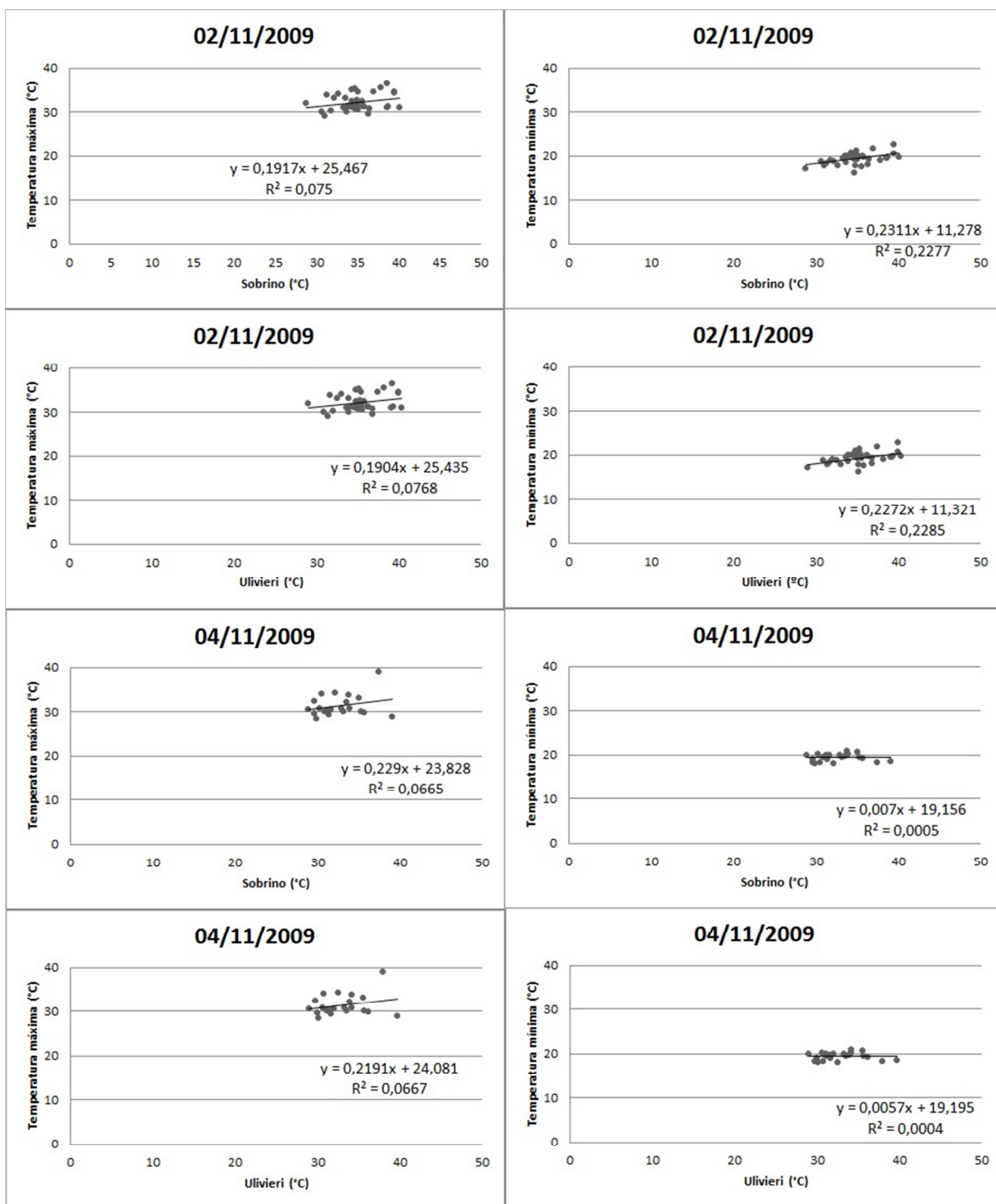


Figura B.4: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 02 e 04 de novembro de 2009.

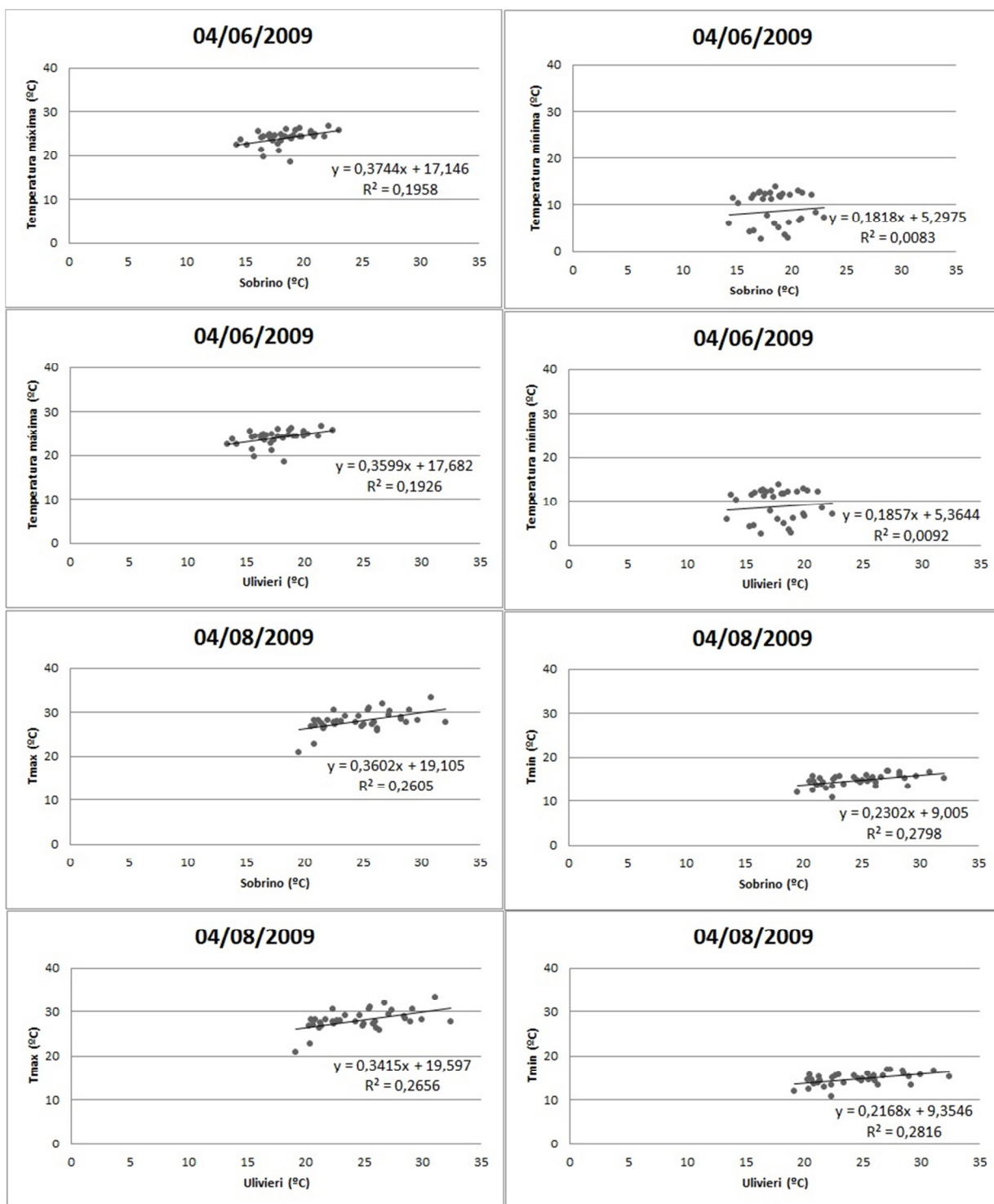


Figura B.5: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 04 de junho e 04 de agosto de 2009.

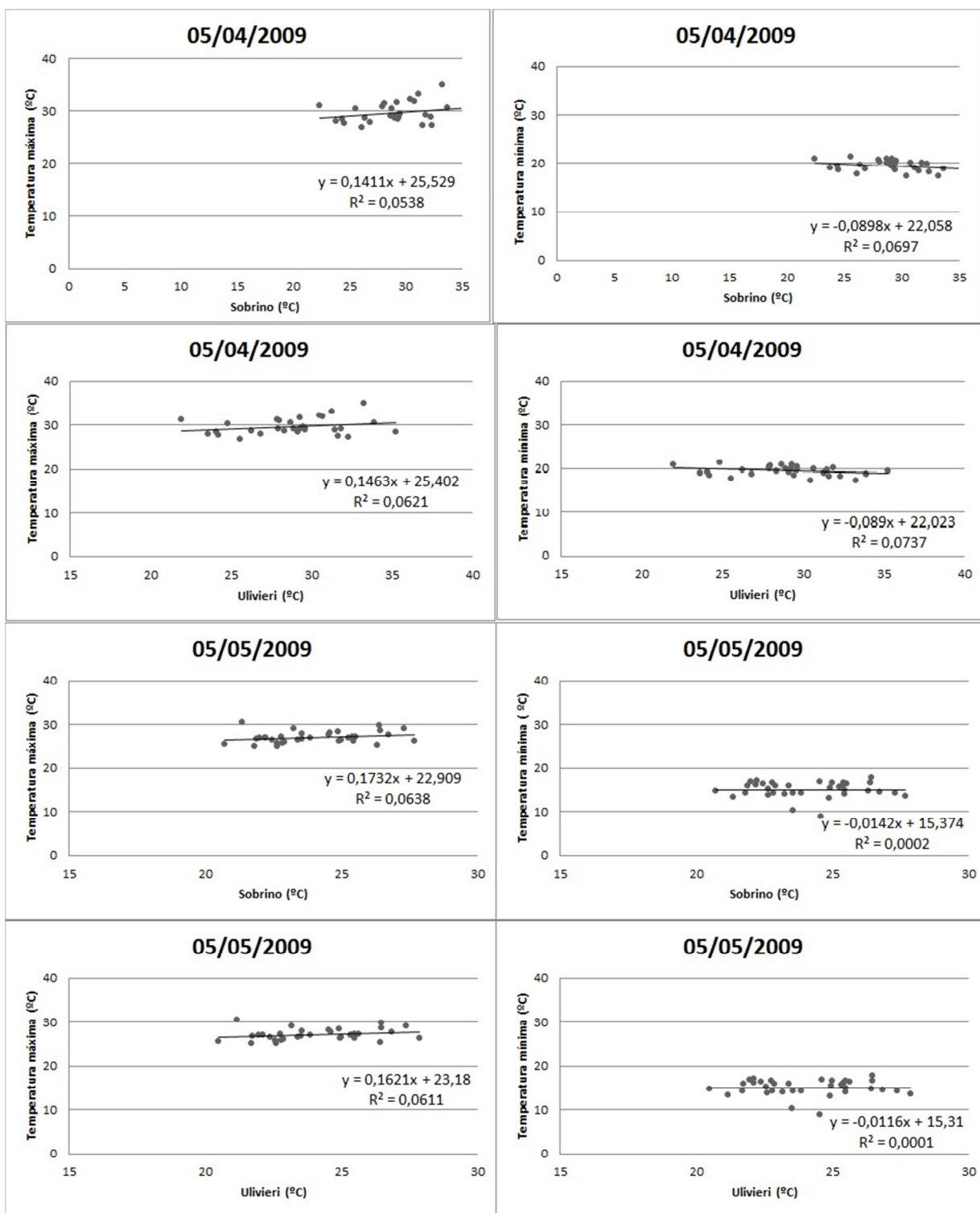


Figura B.6 Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 05 de abril e 05 de maio de 2009.

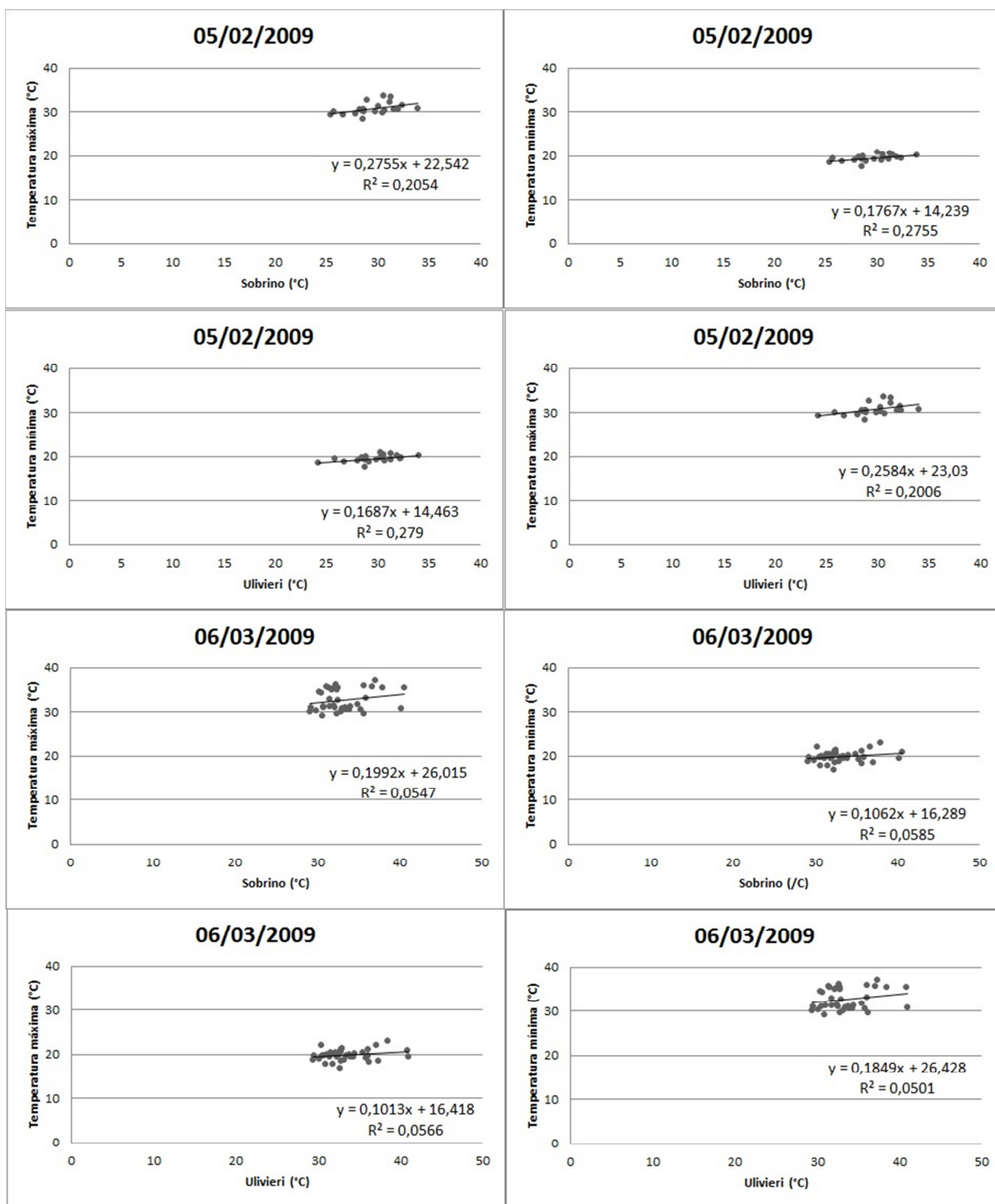


Figura B.7: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 05 de fevereiro e 06 de março de 2009.

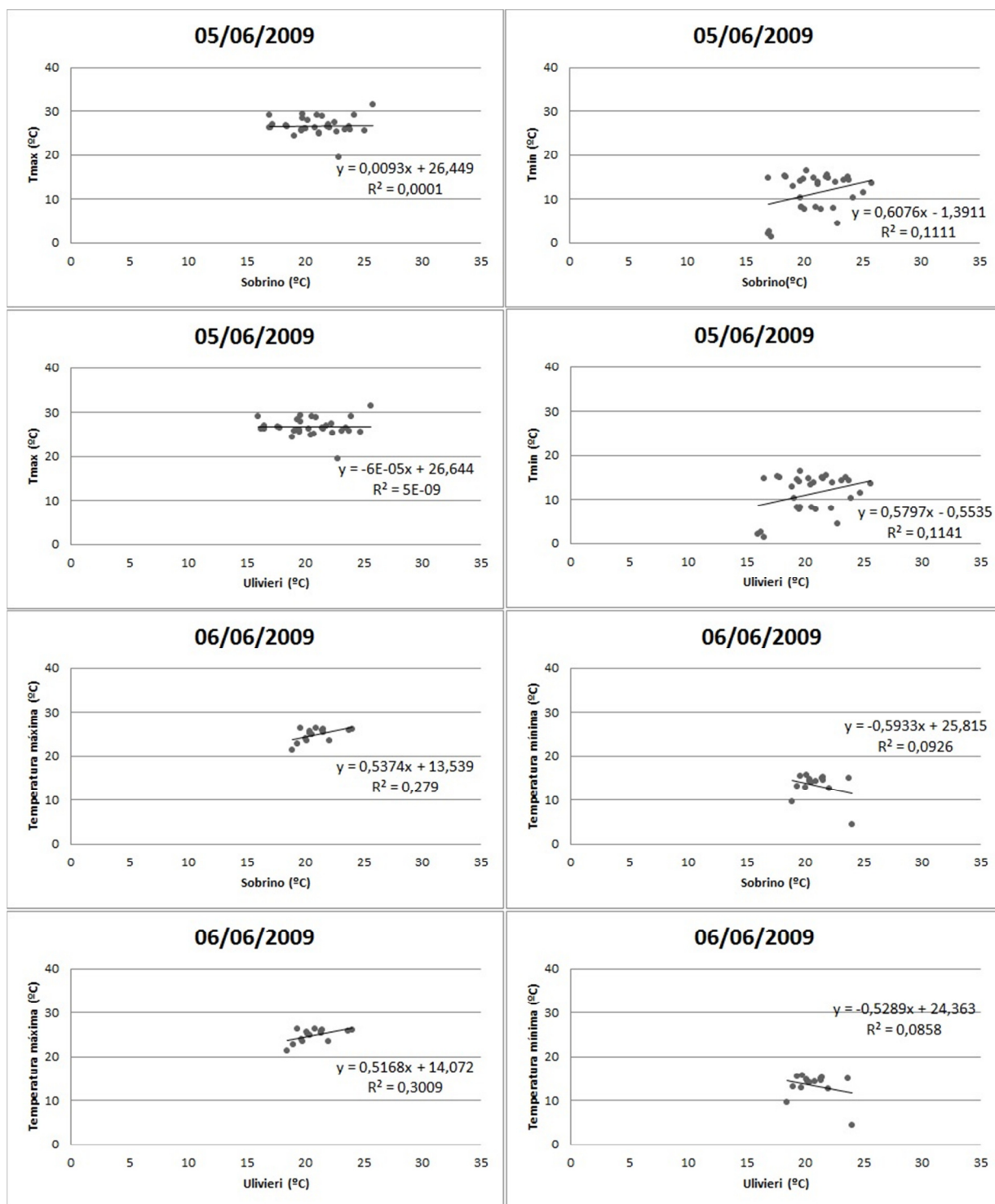


Figura B.8: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 05 de junho e 06 de junho de 2009.

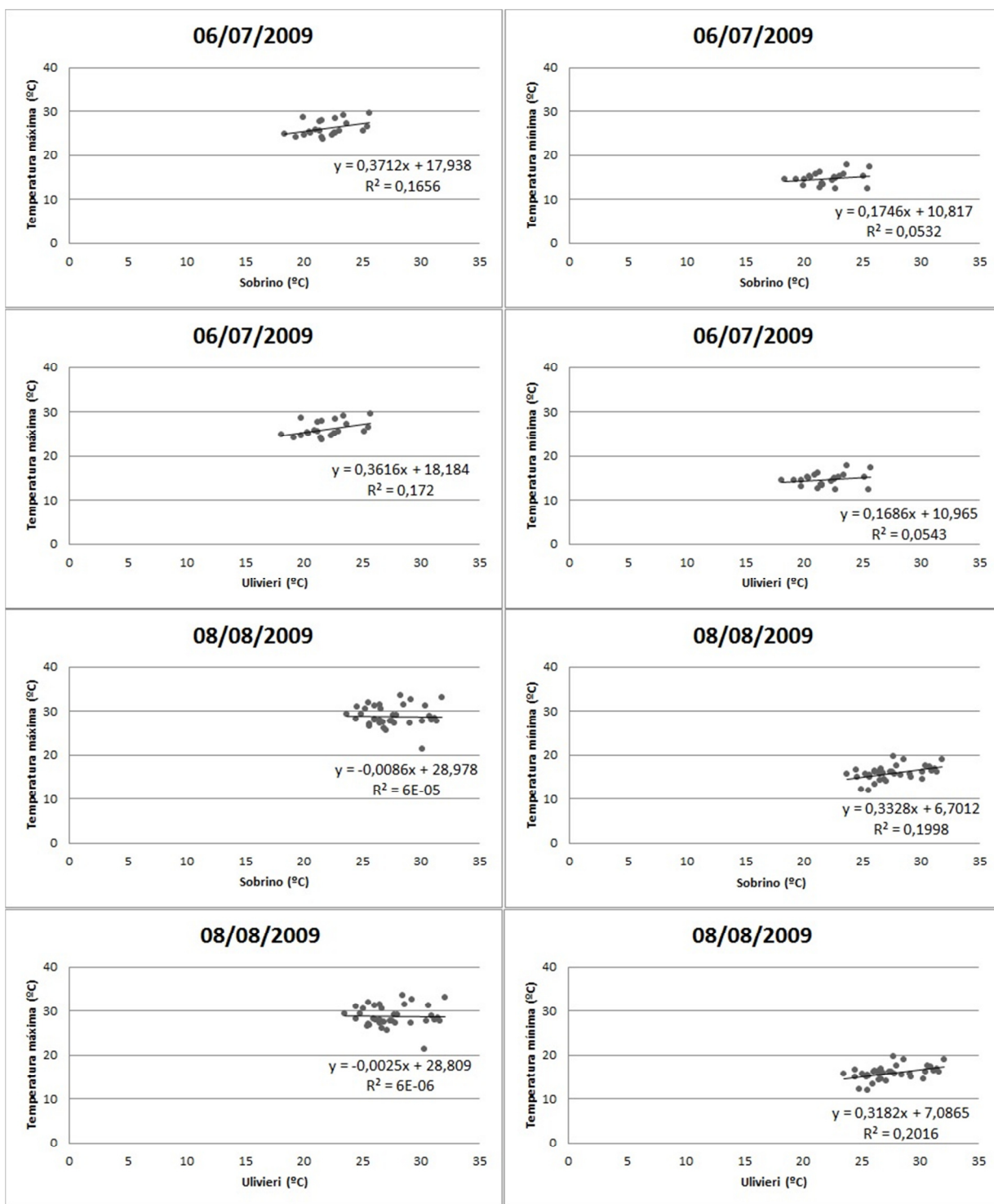


Figura B.9: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 06 de julho e 08 de agosto de 2009.

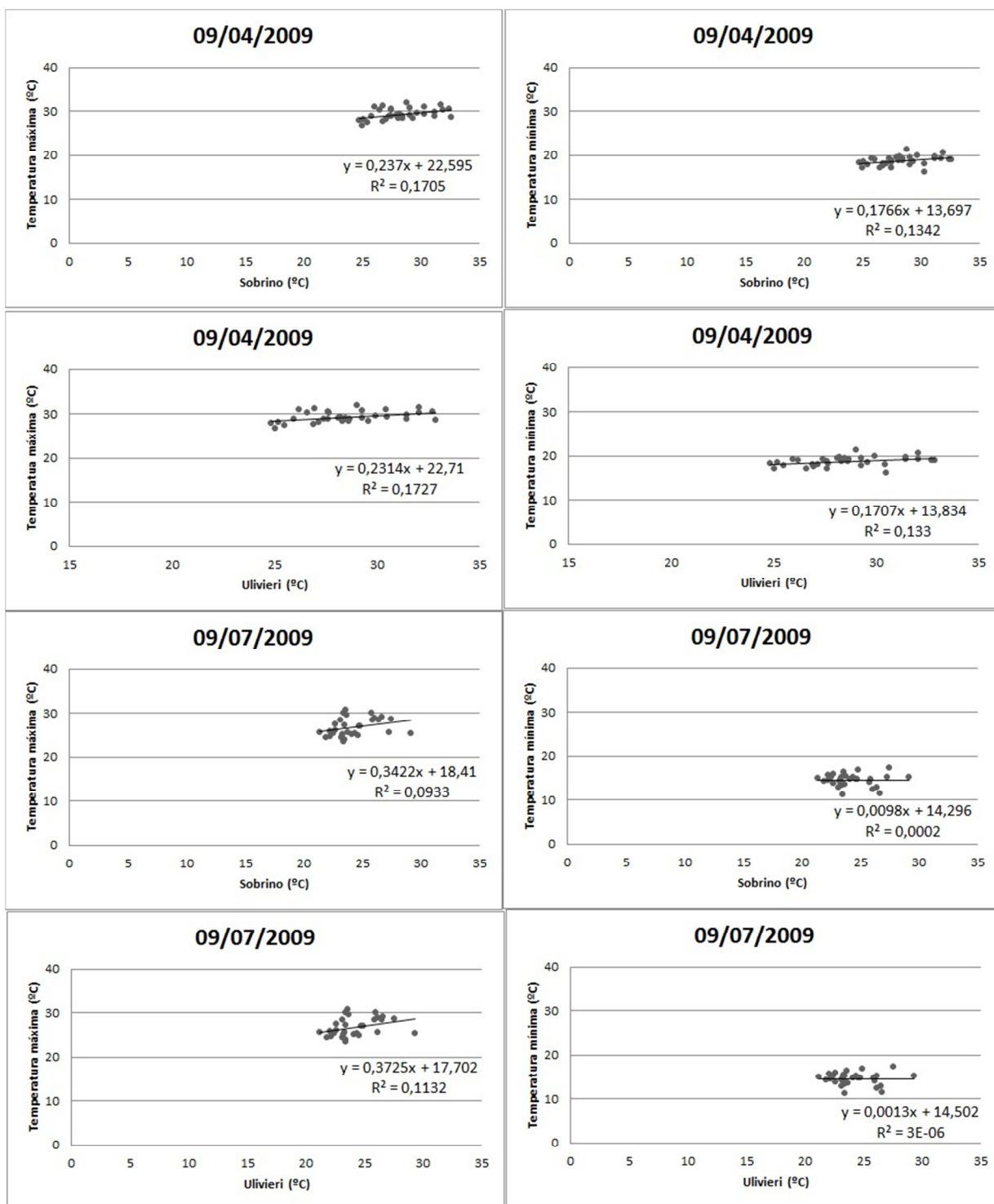


Figura B.10: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 09 de abril e 09 de julho de 2009.

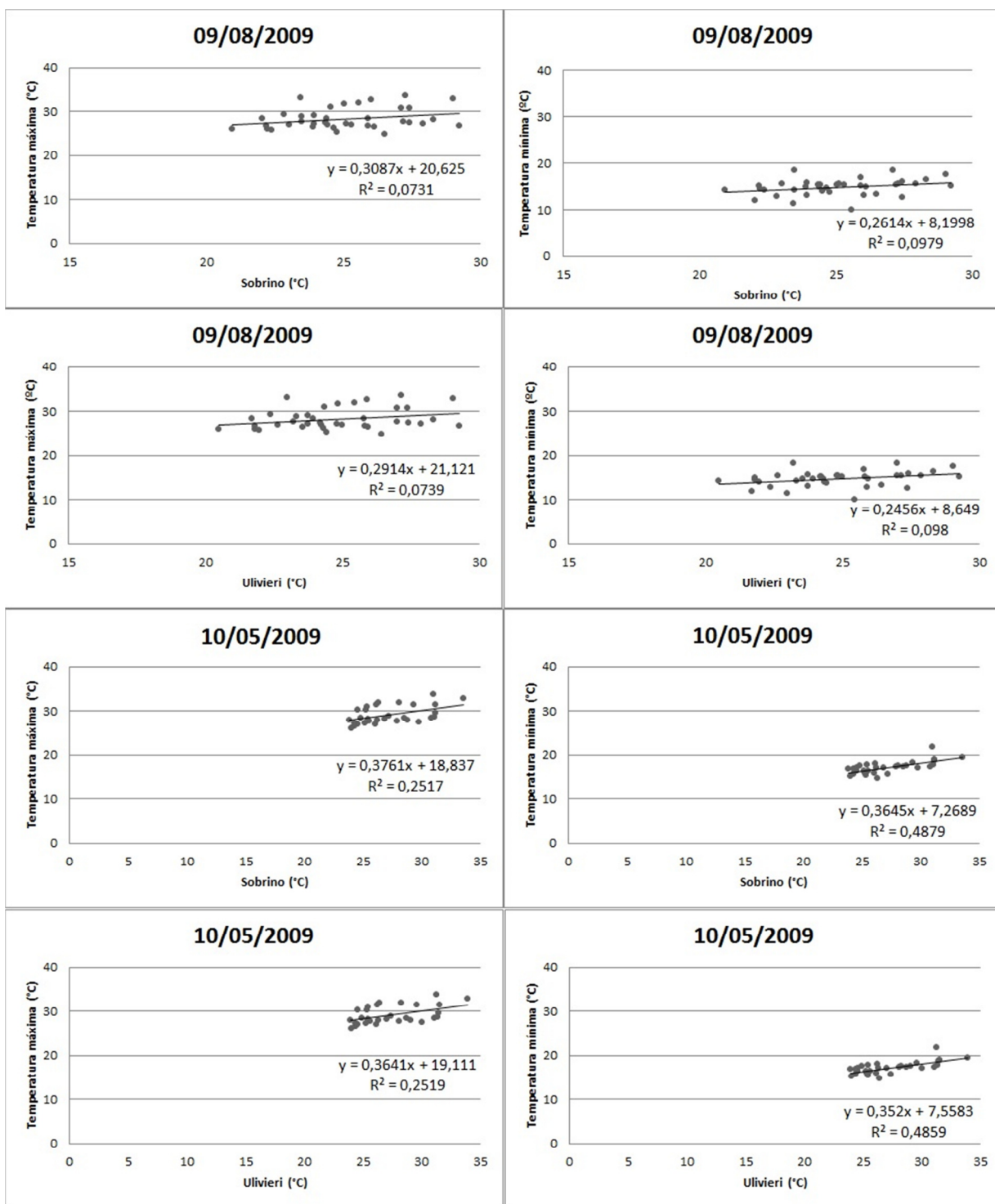


Figura B.11: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 09 de agosto e 10 de maio de 2009.

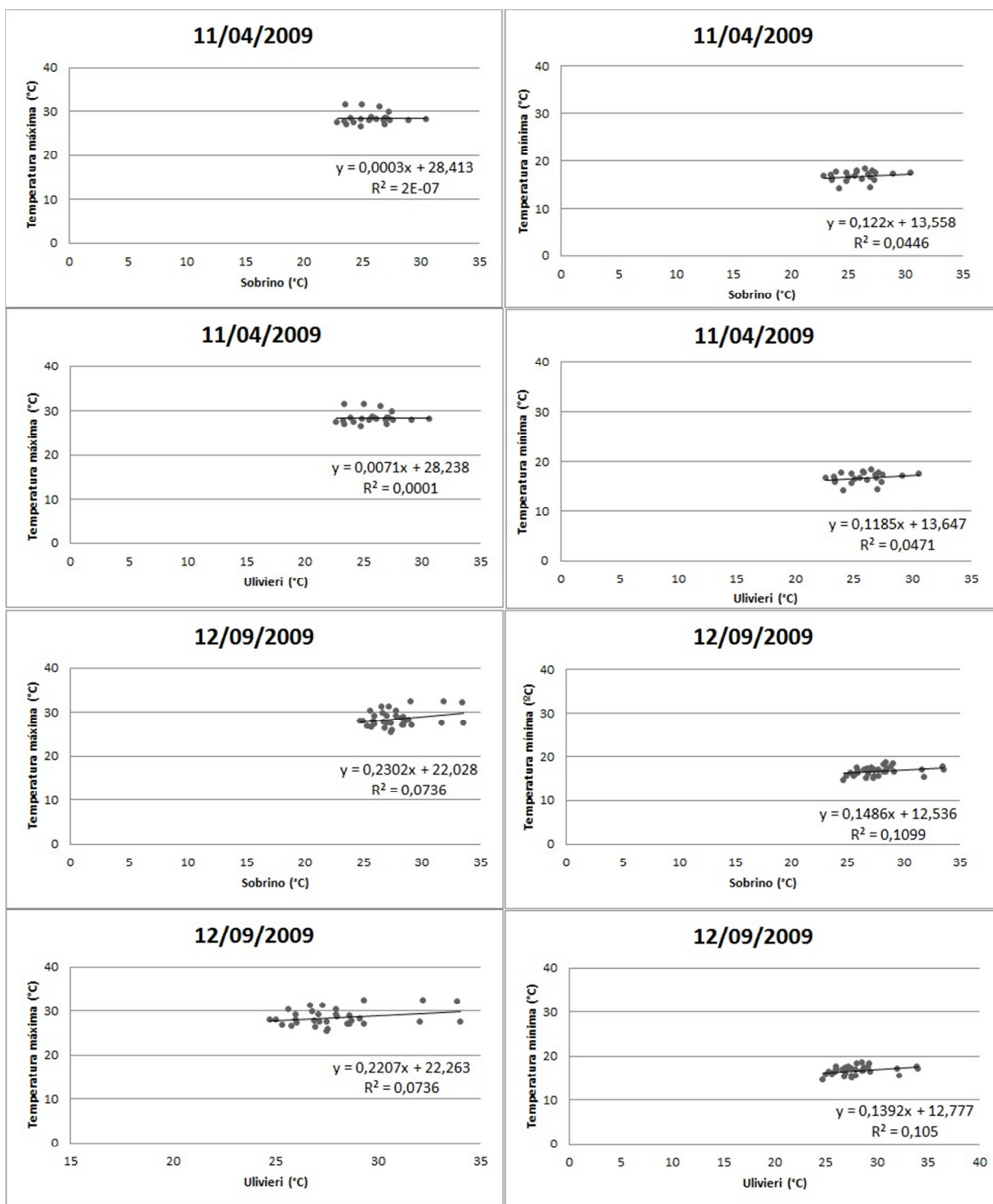


Figura B.12: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 11 de abril e 12 de setembro de 2009.

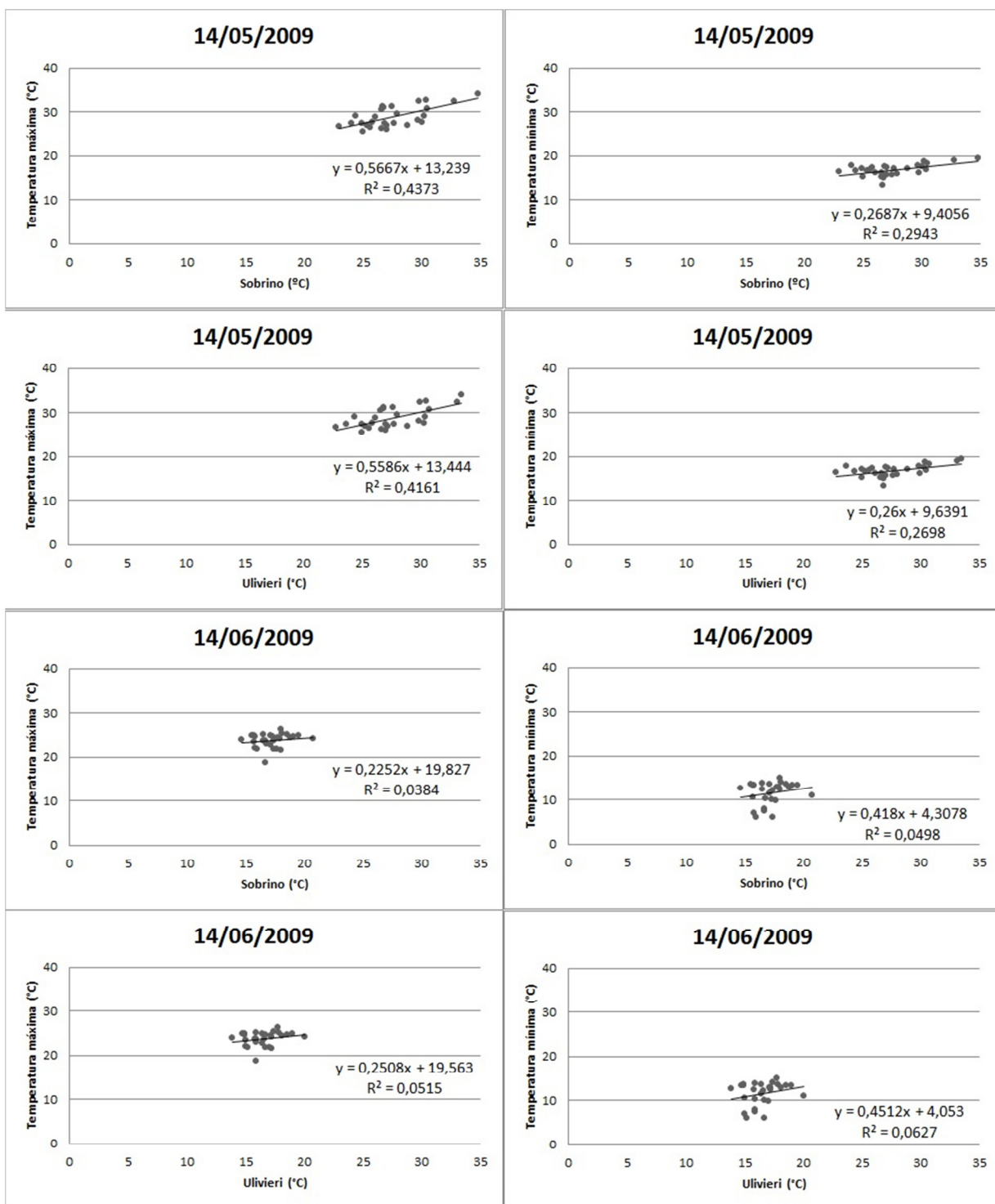


Figura B.13: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 14 de maio e 14 de junho de 2009.

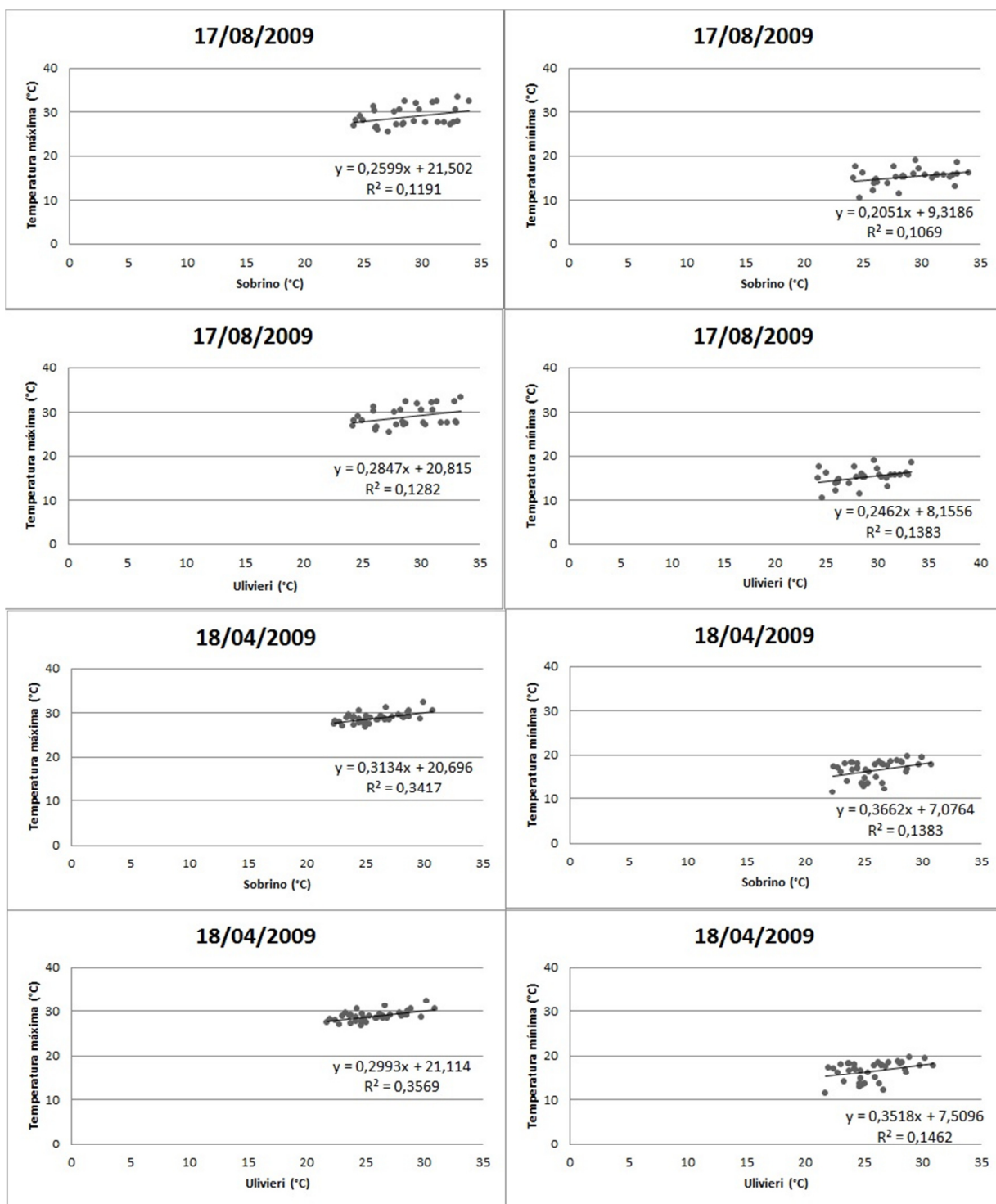


Figura B.14: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Olivieri* nos dias 17 de agosto e 18 de abril de 2009.

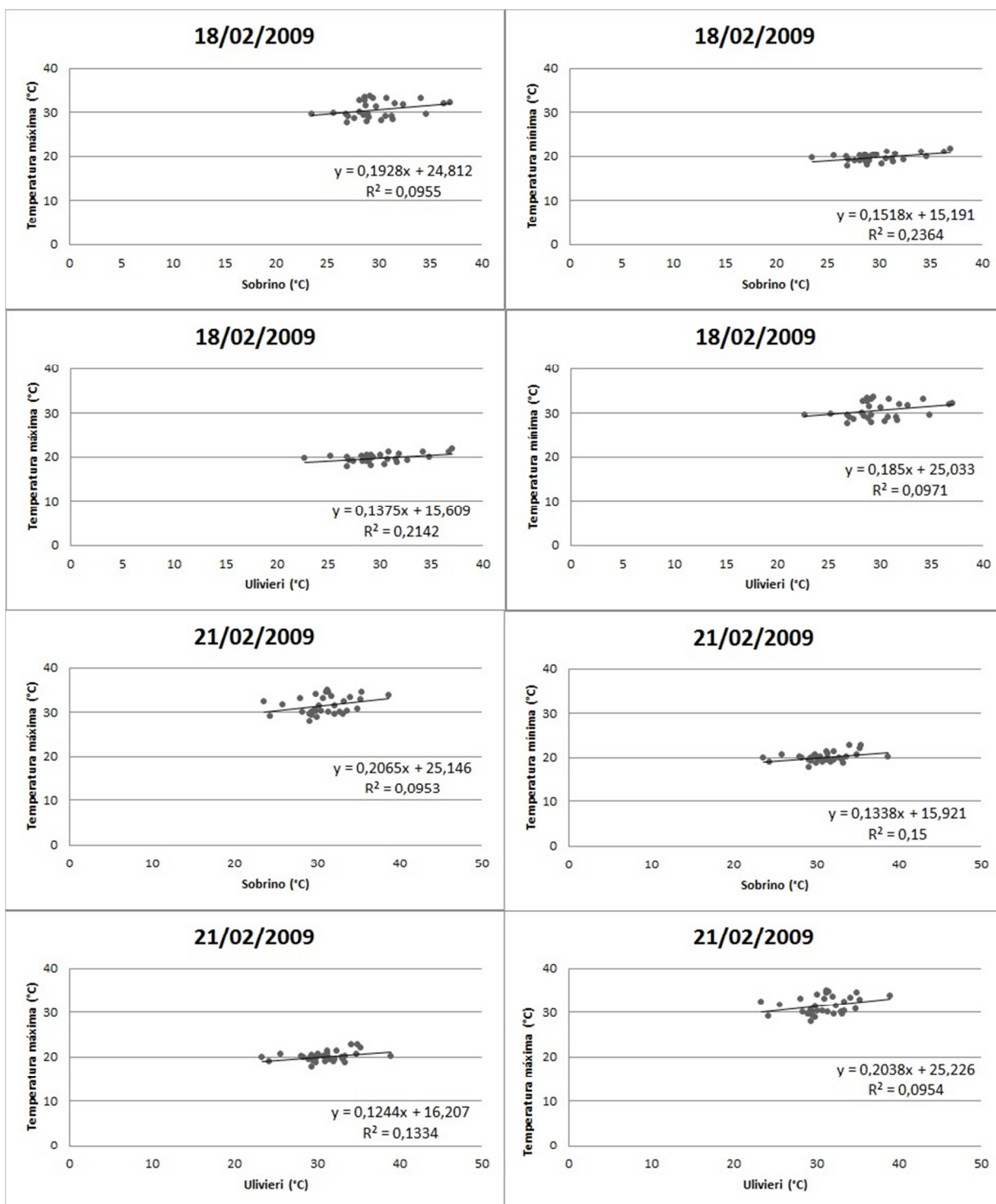


Figura B.15: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 18 e 21 de fevereiro de 2009.

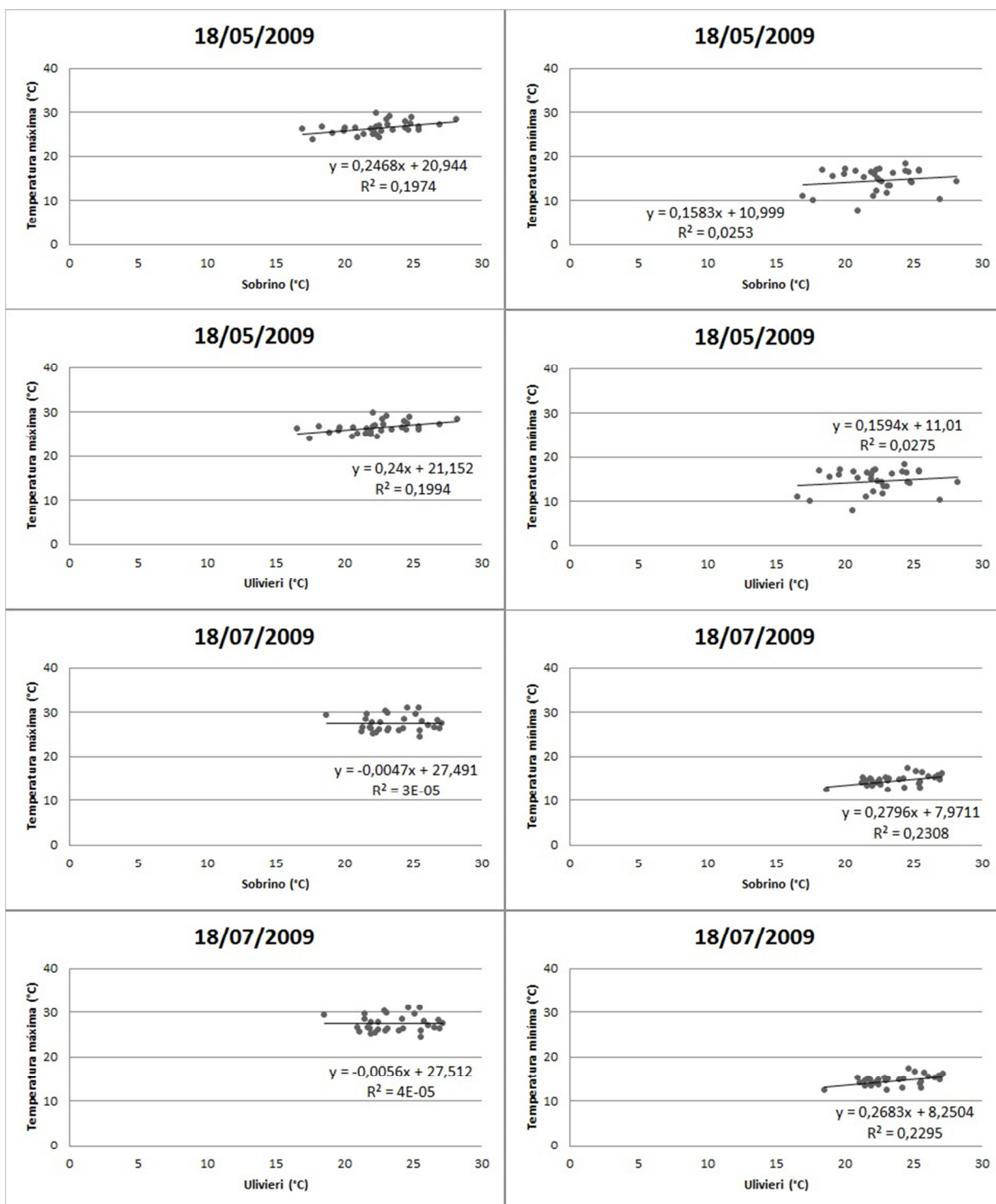


Figura B.16: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 18 de maio e 18 de julho de 2009.

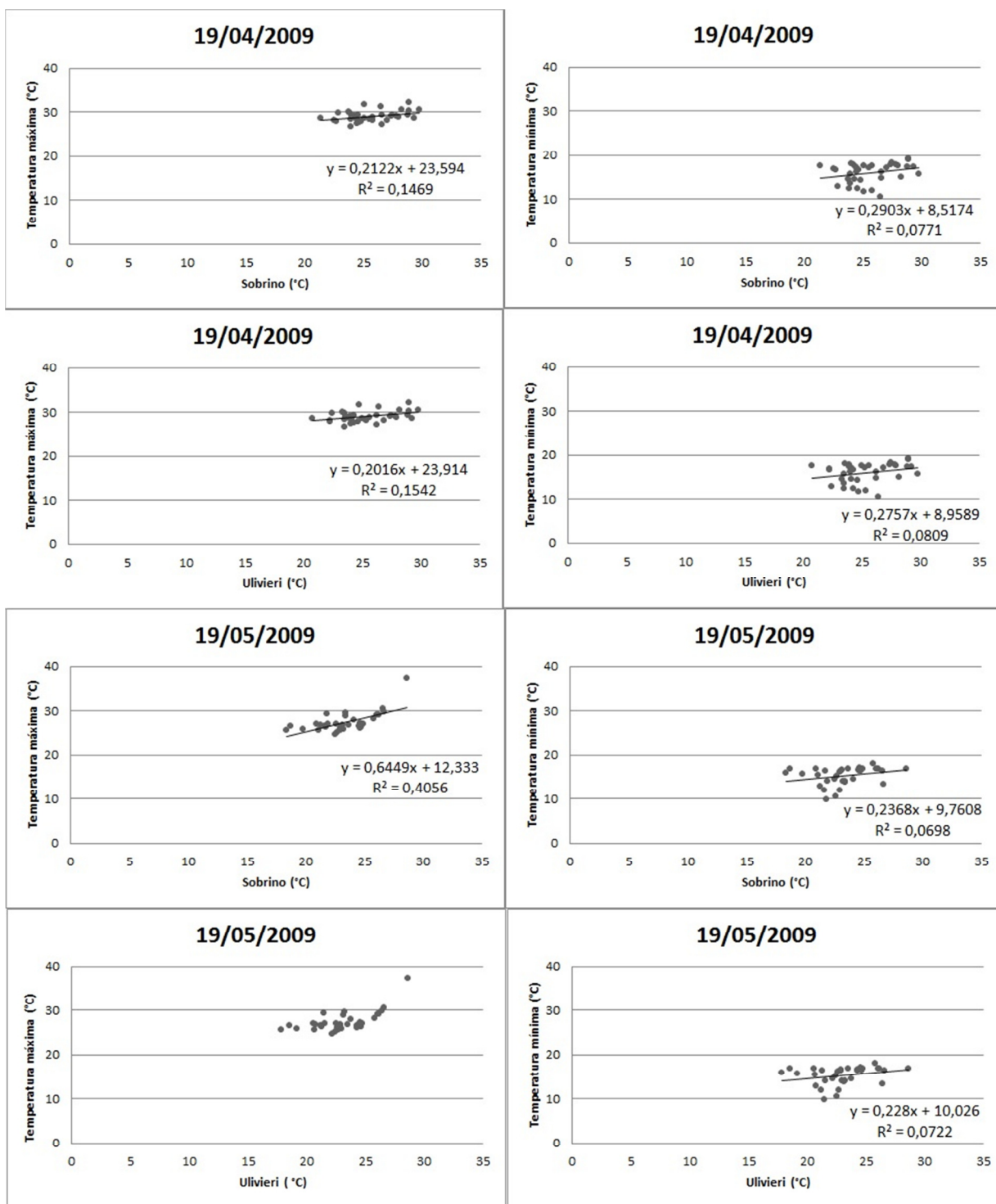


Figura B.17: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 19 de abril e 19 de maio de 2009.

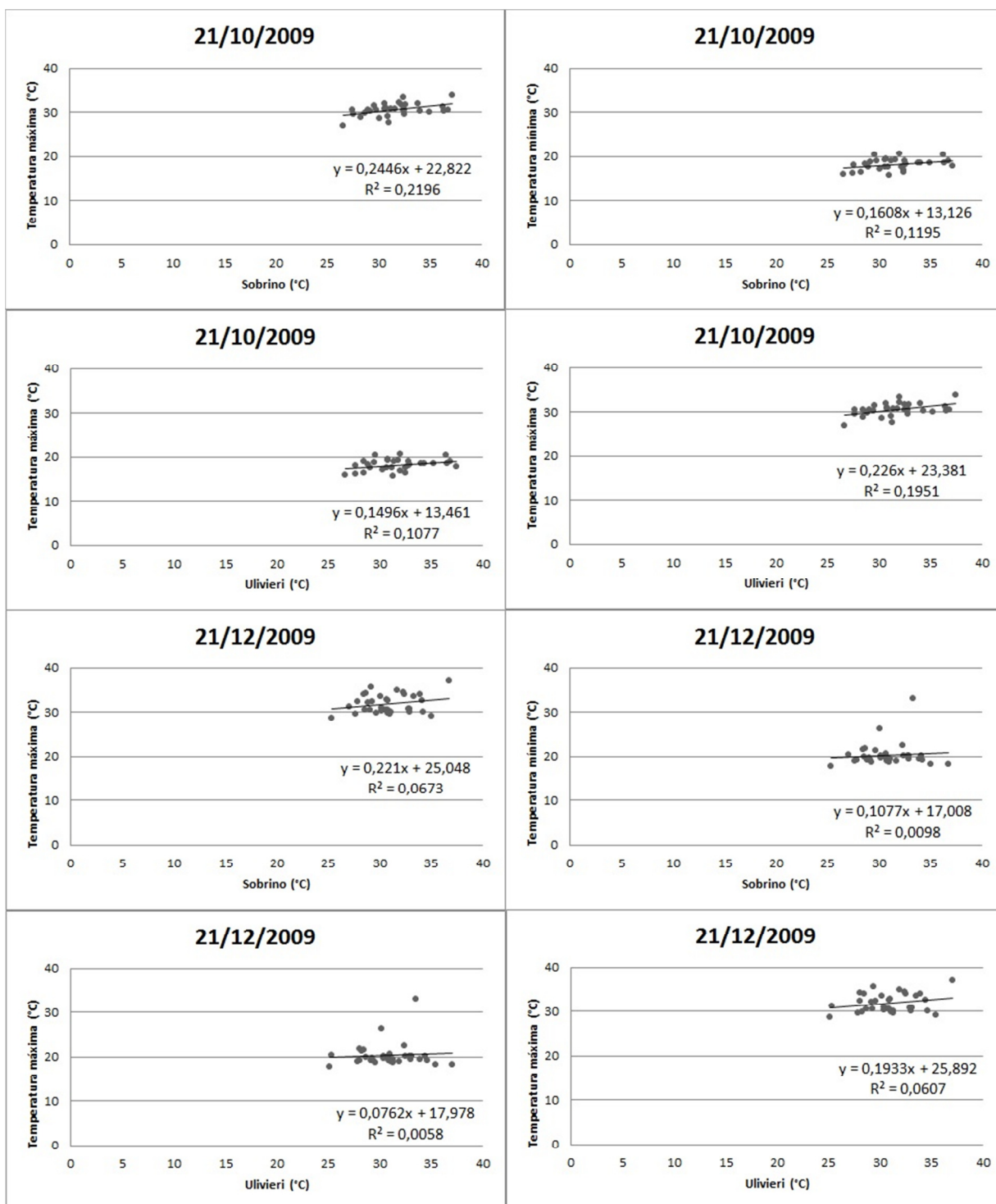


Figura B.18: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 21 de outubro e 21 de dezembro de 2009.

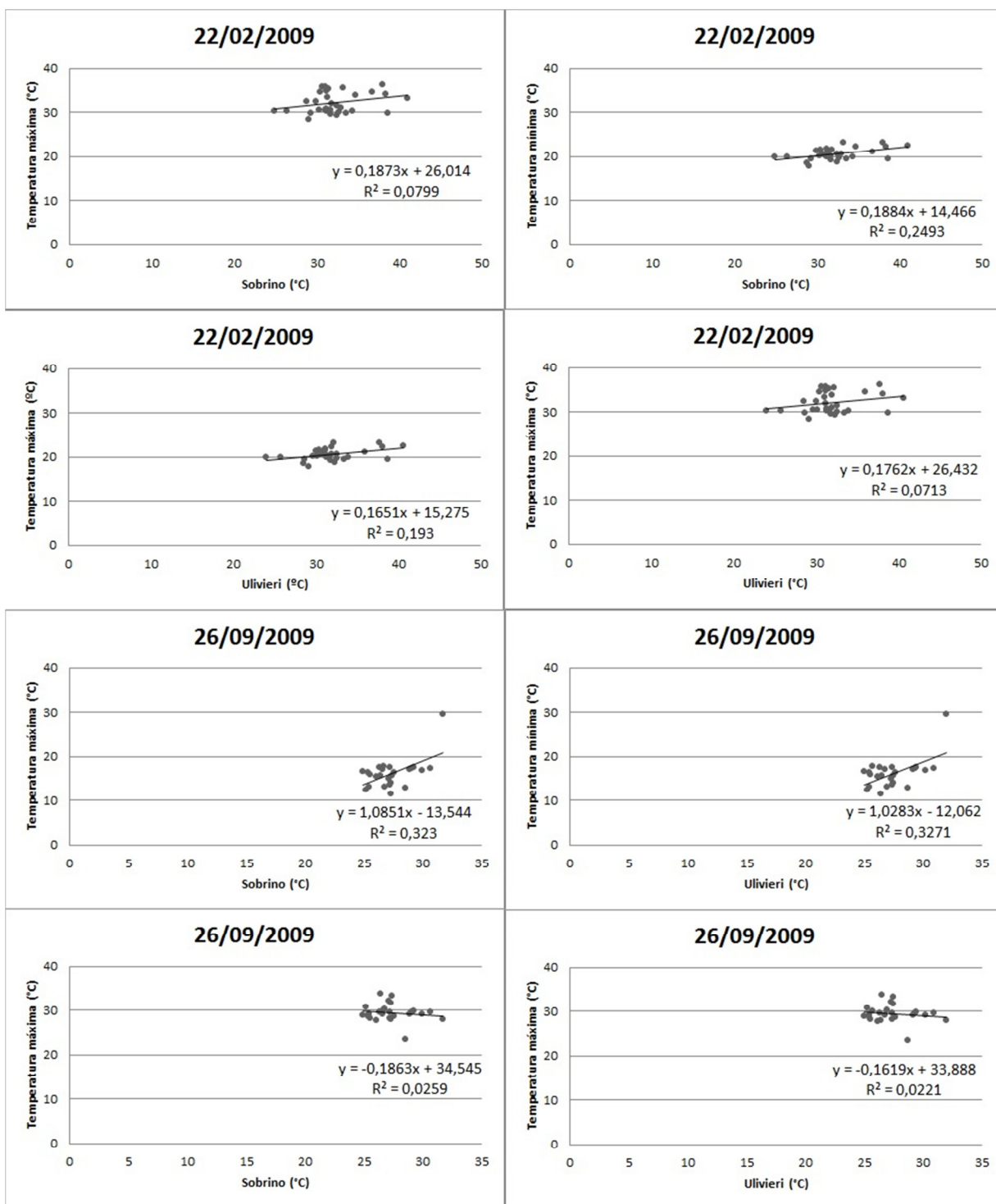


Figura B.19: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 22 de fevereiro e 26 de setembro de 2009.

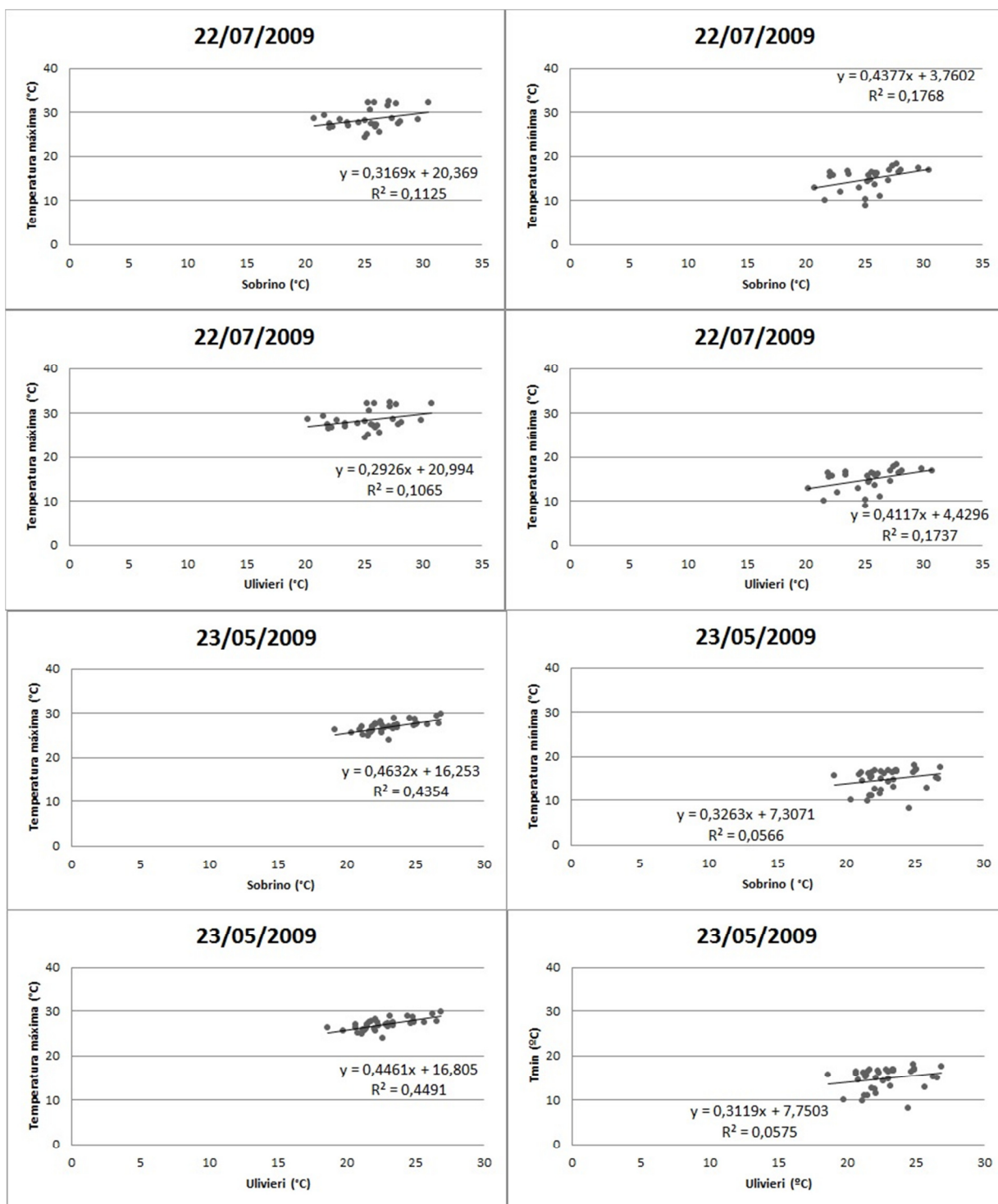


Figura B.20: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 22 de julho e 23 de maio de 2009.

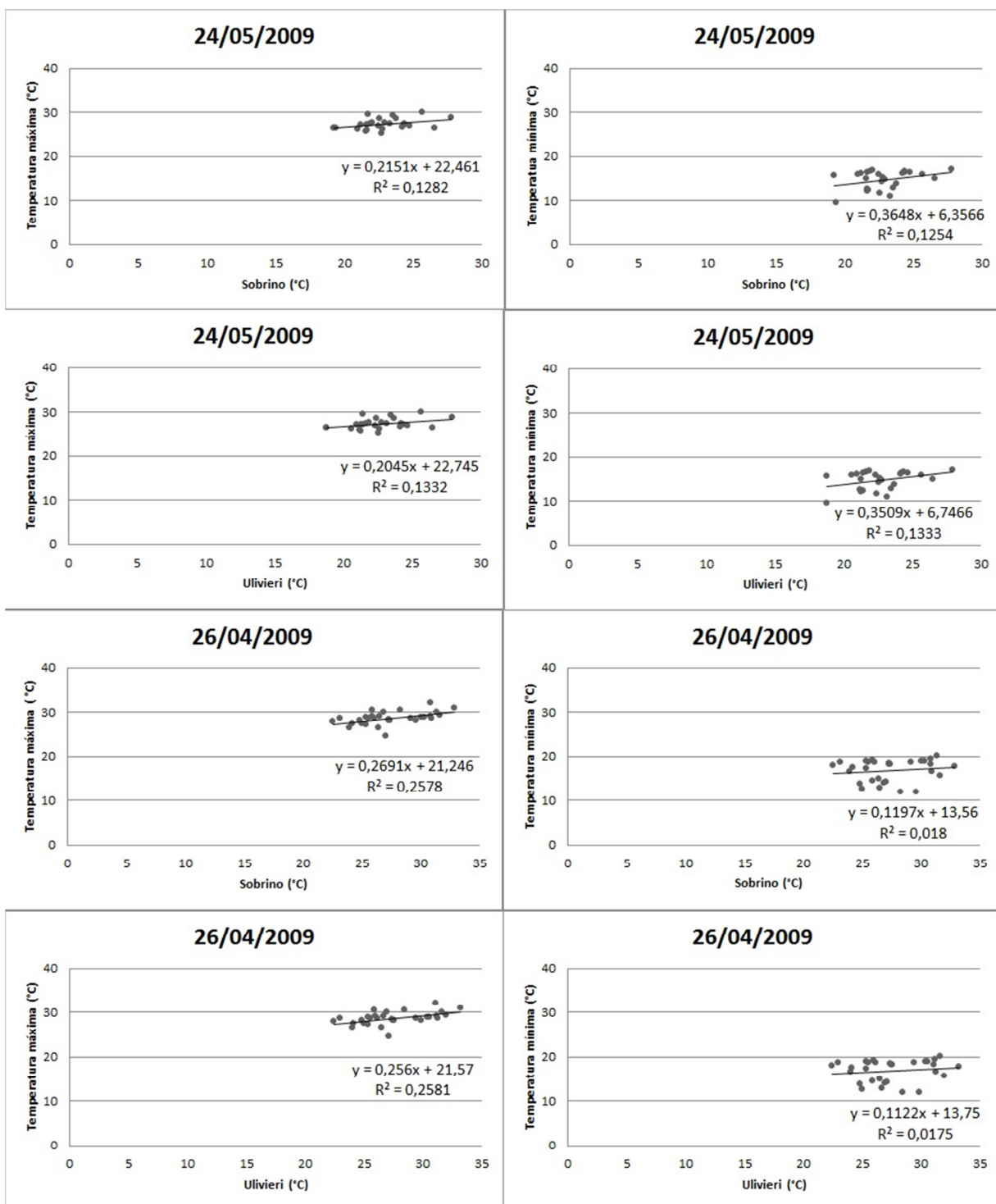


Figura B.21: Correlação entre os dados obtidos nas estações meteorológicas e estimados pelos modelos *Sobrino* e *Ulivieri* nos dias 24 de maio e 26 de abril de 2009.

C. Tabelas de resultados do teste 3

Tabela C.1: Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 e $TV=4\text{g/cm}^2$ para o modelo *Sobrino*.

Data	Média Temperatura Máxima (°C)	Sobrino Média(°C) $\varepsilon = 0,9853$	Erro Médio	Desvio Padrão
01/04/2009	29,58	26,52	3,18	2,16
01/05/2009	26,98	24,03	2,95	2,09
01/07/2009	27,41	21,35	6,06	4,29
02/05/2009	26,53	22,74	3,84	2,68
04/06/2009	24,05	16,84	7,21	5,10
04/08/2009	28,01	22,38	5,71	3,98
05/04/2009	29,62	26,99	3,22	1,86
05/05/2009	27,08	22,38	4,71	3,33
05/06/2009	26,64	18,94	7,70	5,45
06/06/2009	24,82	18,87	5,95	4,20
06/07/2009	26,11	19,53	6,58	4,65
08/08/2009	28,74	25,14	4,04	2,55
09/04/2009	29,31	26,82	2,54	1,76
09/08/2009	28,36	22,89	5,47	3,87
10/05/2009	29,09	25,24	3,94	2,72
11/04/2009	28,42	24,09	4,33	3,06
12/09/2009	28,43	25,69	3,13	1,94
13/07/2009	25,41	16,31	9,10	6,44
14/05/2009	28,86	25,35	3,55	2,48
14/06/2009	23,71	15,34	8,37	5,92
14/08/2009	27,47	20,47	7,01	4,95
17/08/2009	29,02	26,45	3,12	1,81
18/04/2009	28,82	24,39	4,43	3,13
18/05/2009	26,51	20,58	5,93	4,19
18/07/2009	27,38	21,51	5,87	4,15
19/04/2009	29,04	24,00	5,04	3,56
19/05/2009	27,38	21,36	6,02	4,26
22/07/2009	28,42	23,19	5,23	3,70
23/05/2009	26,95	21,25	5,70	4,03
24/05/2009	27,38	20,80	6,59	4,66
26/04/2009	28,62	25,76	2,89	2,02
01/02/2009	30,54	28,16	2,38	1,68
02/03/2009	32,32	27,53	4,92	3,39
02/11/2009	32,17	33,34	2,24	0,83
04/11/2009	31,30	30,86	2,11	0,31

Tabela C.1 (continuação): Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 e $TV=4g/cm^2$ para o modelo *Sobrino*.

Data	Média Temperatura Máxima (°C)	Sobrino Média(°C) $\varepsilon = 0,9853$	Erro Médio	Desvio Padrão
05/02/2009	30,68	27,93	2,84	1,95
05/02/2009	30,68	27,93	2,84	1,95
06/03/2009	32,63	31,80	2,36	0,58
07/03/2009	31,87	29,02	3,52	2,01
09/01/2009	32,27	33,26	2,39	0,70
18/02/2009	30,56	28,10	2,88	1,74
21/02/2009	31,29	29,42	2,66	1,33
21/10/2009	30,54	29,67	1,94	0,62
21/12/2009	31,86	29,31	2,99	1,80
22/02/2009	32,05	30,51	1,55	1,09
26/09/2009	29,45	25,31	4,44	2,92

Tabela C.2: Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 e $TV=4g/cm^2$ para o modelo *Ulivieri*.

Data	Média Temperatura Máxima (°C)	Ulivieri Média(°C) $\varepsilon = 0,9853$	Erro Médio	Desvio Padrão
01/04/2009	29,58	26,61	3,10	2,09
01/05/2009	26,98	24,05	2,93	2,07
01/07/2009	27,41	21,19	6,22	4,40
02/05/2009	26,53	22,73	3,85	2,69
04/06/2009	24,05	16,05	8,00	5,65
04/08/2009	28,01	22,25	5,86	4,08
05/04/2009	29,62	26,80	3,39	2,00
05/05/2009	27,08	22,33	4,76	3,36
05/06/2009	26,64	18,46	8,18	5,79
06/06/2009	24,82	18,63	6,19	4,37
06/07/2009	26,11	19,37	6,73	4,76
08/08/2009	28,74	25,14	4,09	2,55
09/04/2009	29,31	26,97	2,43	1,66
09/08/2009	28,36	22,62	5,74	4,06
10/05/2009	29,09	25,33	3,81	2,65
11/04/2009	28,42	24,05	4,37	3,09
12/09/2009	28,43	25,79	3,08	1,87
13/07/2009	25,41	15,53	9,10	6,98
14/05/2009	28,86	25,33	3,58	2,50
14/06/2009	23,71	14,59	9,12	6,45
14/08/2009	27,47	19,94	7,01	5,33
17/08/2009	29,02	26,29	3,12	1,93

Tabela C.2 (continuação): Resultados da estimativa da temperatura considerando emissividade fixa igual a 0,9853 e $TV=4g/cm^2$ para o modelo *Ulivieri*.

Data	Média Temperatura Máxima (°C)	Ulivieri Média(°C) $\varepsilon = 0,9853$	Erro Médio	Desvio Padrão
18/04/2009	28,82	24,18	4,43	3,28
18/05/2009	26,51	20,31	5,93	4,38
18/07/2009	27,38	21,41	5,87	4,22
19/04/2009	29,04	23,73	5,04	3,76
19/05/2009	27,38	21,06	6,02	4,47
22/07/2009	28,42	23,11	5,23	3,75
23/05/2009	26,95	20,86	5,70	4,31
24/05/2009	27,38	20,55	6,59	4,84
26/04/2009	28,62	25,86	2,89	1,95
01/02/2009	30,54	28,00	2,54	1,79
02/03/2009	32,32	27,63	4,87	3,31
02/11/2009	32,17	33,73	2,46	1,11
04/11/2009	31,30	31,17	2,14	0,09
05/02/2009	30,68	27,98	2,79	1,91
05/02/2009	30,68	27,98	2,79	1,91
06/03/2009	32,63	32,12	2,39	0,36
07/03/2009	31,87	29,15	3,43	1,92
09/01/2009	32,27	33,56	2,46	0,91
18/02/2009	30,56	28,15	2,91	1,71
21/02/2009	31,29	29,42	2,69	1,32
21/10/2009	30,54	29,77	1,95	0,55
21/12/2009	31,86	29,35	3,06	1,78
22/02/2009	32,05	30,15	2,94	1,35
26/09/2009	29,45	25,36	4,43	2,89

D. Variação da temperatura

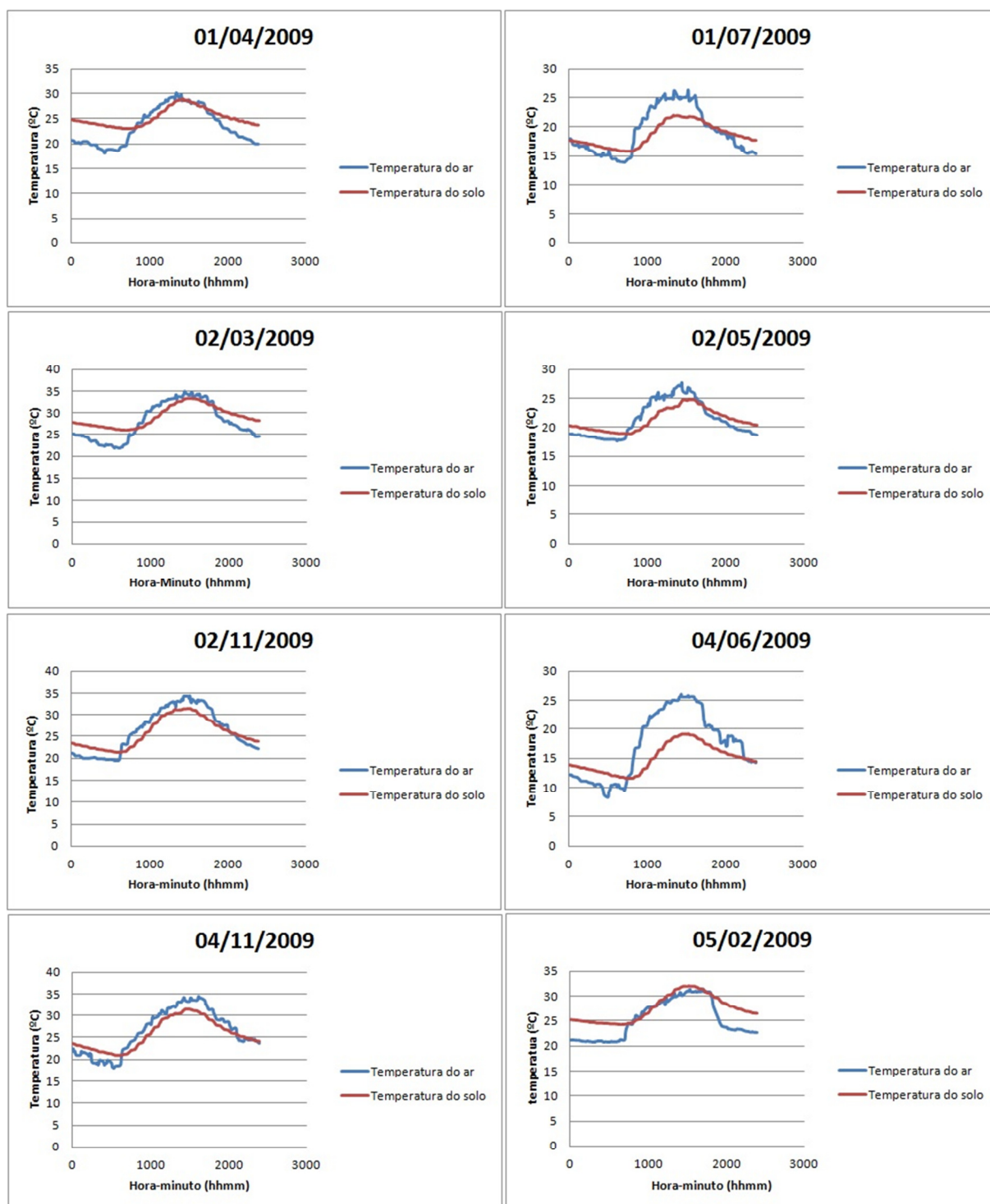


Figura D.1: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°), em 01/04/2009, 01/07/2009, 02/03/2009, 02/05/2009, 02/11/2009, 04/06/2009, 04/11/2009, 05/02/2009.

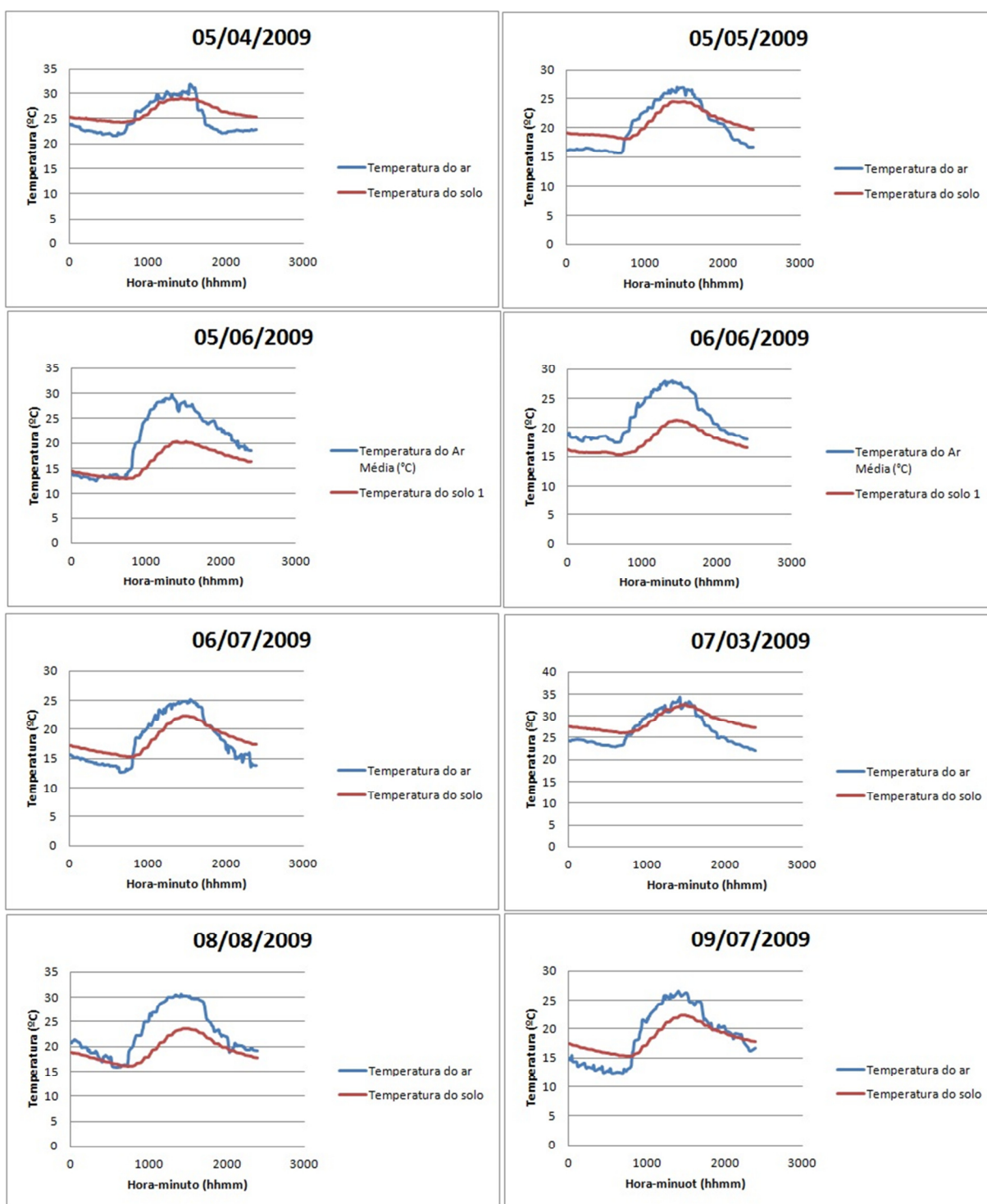


Figura D.2: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°) em 05/04/2009, 05/05/2009, 05/06/2009, 06/06/2009, 06/07/2009, 07/03/2009, 08/08/2009 e 09/07/2009.

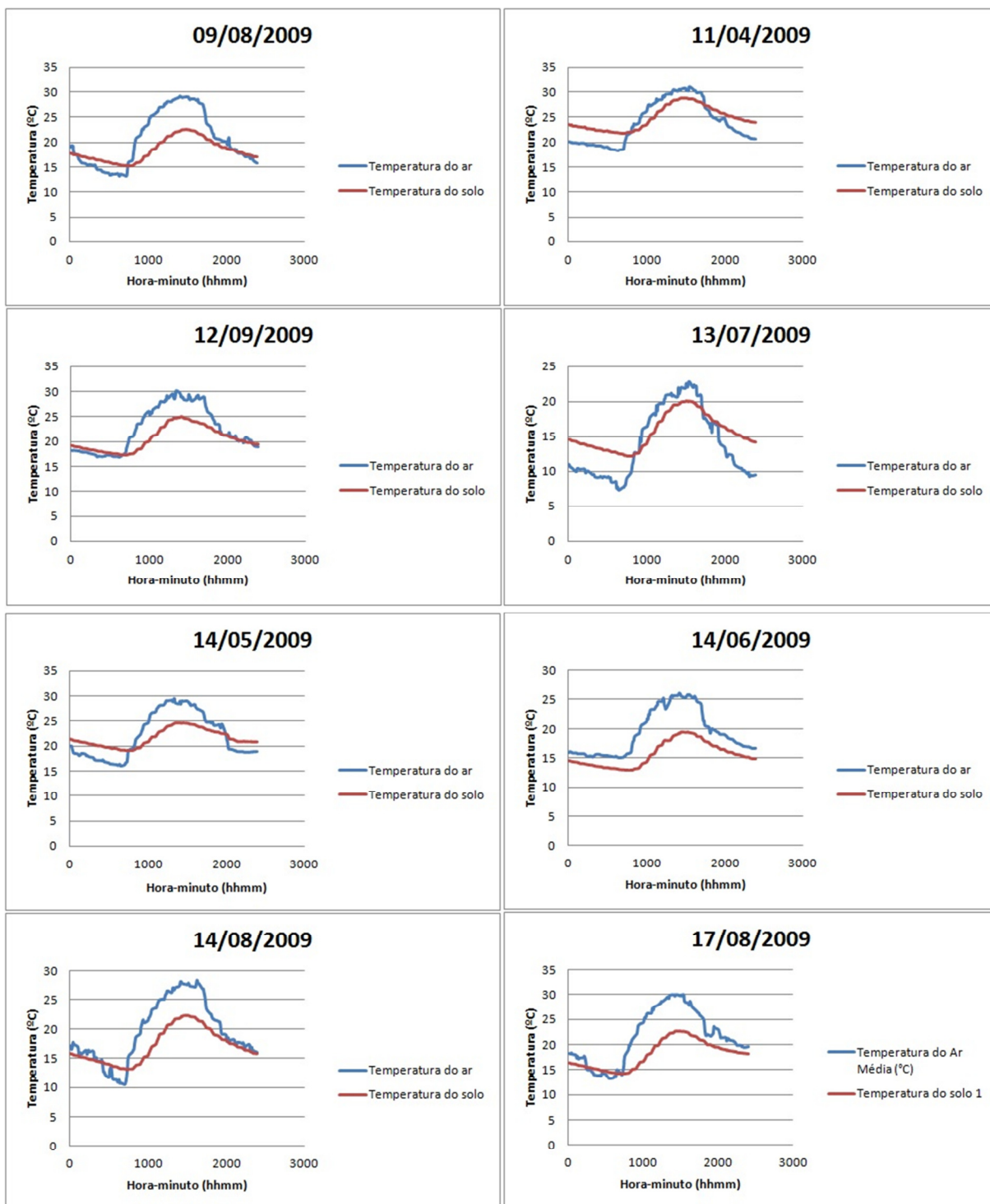


Figura D.3: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°) em 09/08/2009, 11/04/2009, 12/09/2009, 13/07/2009, 14/05/2009, 14/06/2009, 14/08/2009 e 17/08/2009.

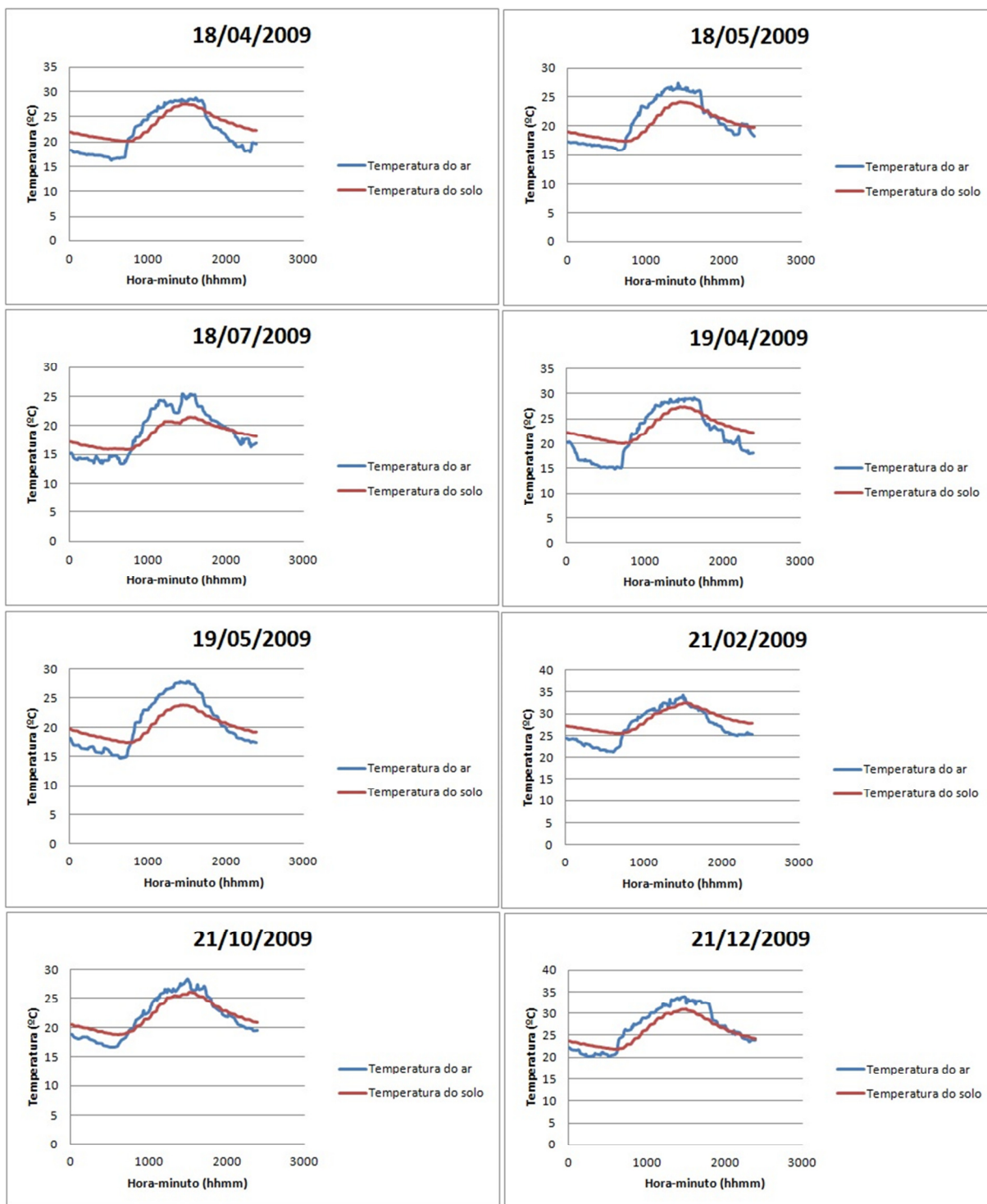


Figura D.4: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°) em 18/04/2009, 18/05/2009, 18/07/2009, 19/04/2009, 19/05/2009, 21/02/2009, 21/10/2009 e 21/12/2009.

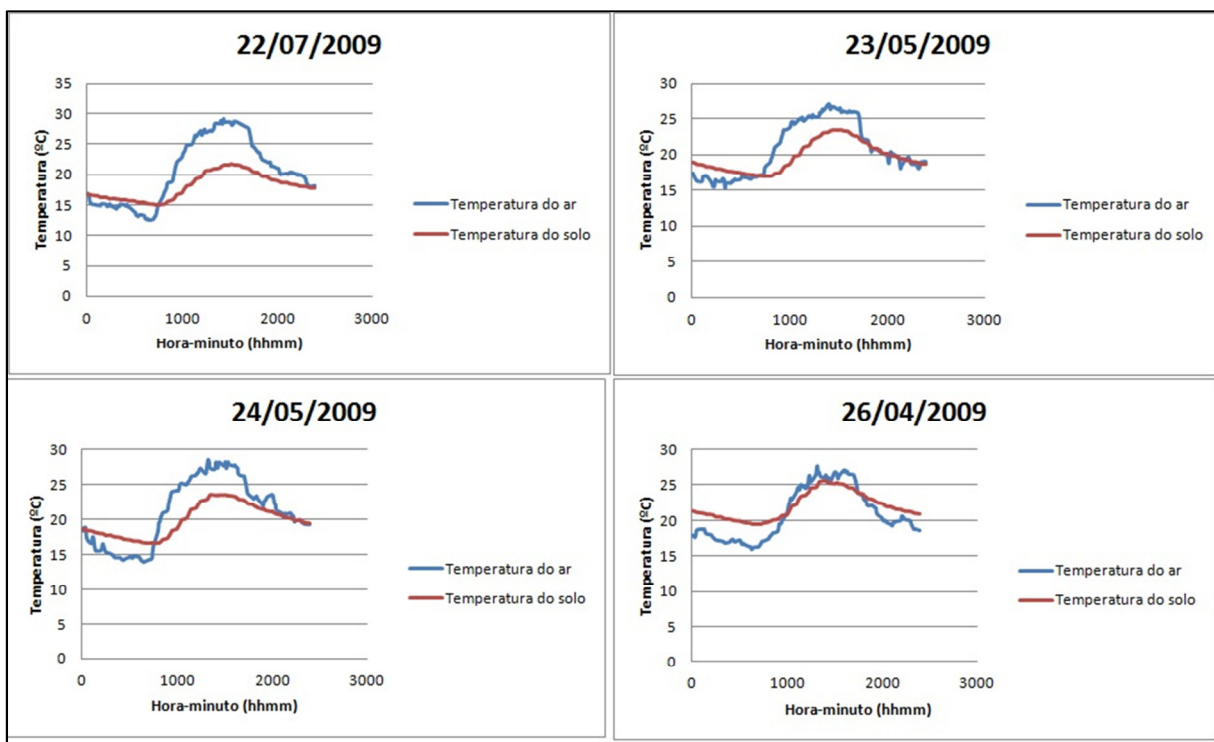


Figura D.5: Variação da temperatura do solo e do ar ao longo do dia na estação meteorológica de Campinas (22,82°S, 47,05°) em 22/07/2009, 23/05/2009, 24/05/2009 e 26/04/2009.

ANEXOS

A1. Fotoperíodo

Tabela A1: Fotoperíodo diário, N, em função da latitude e época do ano (adaptado de Pereira *et. al.* 1997).

N (horas)												
Latitude	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
2°N	12,0	12,0	12,1	12,2	12,2	12,2	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0
Equador	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1	12,1
2°S	12,2	12,2	12,1	12,1	12,0	12,0	12,0	12,0	12,1	12,1	12,2	12,2
4°S	12,3	12,2	12,1	12,0	11,9	11,8	11,9	12,0	12,1	12,2	12,3	12,4
6°S	12,4	12,3	12,1	12,0	11,9	11,7	11,8	11,9	12,1	12,2	12,4	12,5
8°S	12,5	12,4	12,1	11,9	11,7	11,6	11,7	11,9	12,1	12,3	12,5	12,6
10°S	12,6	12,4	12,1	11,9	11,7	11,5	11,6	11,8	12,0	12,3	12,6	12,7
12°S	12,7	12,5	12,2	11,8	11,6	11,4	11,5	11,7	12,0	12,4	12,7	12,8
14°S	12,8	12,6	12,2	11,8	11,5	11,3	11,4	11,6	12,0	12,4	12,8	12,9
16°S	13,0	12,7	12,2	11,7	11,4	11,2	11,2	11,6	12,0	12,4	12,9	13,0
18°S	13,0	12,7	12,2	11,7	11,3	11,1	11,1	11,5	12,0	12,5	13,0	13,1
20°S	13,1	12,8	12,2	11,6	11,2	10,9	11,0	11,4	12,0	12,5	13,2	13,2
22°S	13,4	12,8	12,2	11,6	11,1	10,8	10,9	11,3	12,0	12,6	13,2	13,5
24°S	13,5	12,9	12,3	11,5	10,9	10,7	10,8	11,2	11,9	12,6	13,3	13,6
26°S	13,6	12,9	12,3	11,5	10,8	10,5	10,7	11,2	11,9	12,7	13,4	13,8
28°S	13,7	13,0	12,3	11,4	10,7	10,4	10,6	11,1	11,9	12,8	13,5	13,9
30°S	13,9	13,1	12,3	11,4	10,6	10,2	10,4	11,0	11,9	12,8	13,6	14,1
32°S	14,0	13,2	12,3	11,3	10,5	10,5	10,3	10,9	11,9	12,9	13,7	14,2
34°S	14,2	13,3	12,3	11,3	10,3	9,8	10,1	10,9	11,9	12,9	13,9	14,4
36°S	14,3	13,4	12,4	11,2	10,2	9,7	10,0	10,7	11,9	13,0	14,0	14,6
38°S	14,5	13,5	12,4	11,1	10,1	9,5	9,8	10,6	11,8	13,1	14,2	14,8
40°S	14,7	13,6	12,4	11,1	9,9	9,3	9,6	10,5	11,8	13,1	14,3	15,0

A2. Emissividade

Tabela A2: Emissividades para diferentes tipos de cobertura. Os valores são válidos para bandas espectrais no intervalo de 10,2 a 12,5 μ m (adaptado de GUPTA *et al.* 1999)

Tipo de cobertura	Emissividade
Florestas acículas permanentes	0,9898
Florestas latifoliadas permanentes	0,9898
Florestas acículas decíduas	0,9733
Florestas latifoliadas decíduas	0,9733
Florestas mistas	0,9815
Vegetação rasteira fechada	0,9663
Vegetação rasteira aberta	0,9362
Savana arborizada	0,9853
Savana	0,9853
Gramado	0,9853
Áreas permanentemente úmidas	0,9870
Áreas de cultivo	0,9853
Área urbana	1,0000
Mosaico	0,9834
Neve/Gelo	0,9997
Árido	0,9210
Água	0,9886
Tundra	0,9920