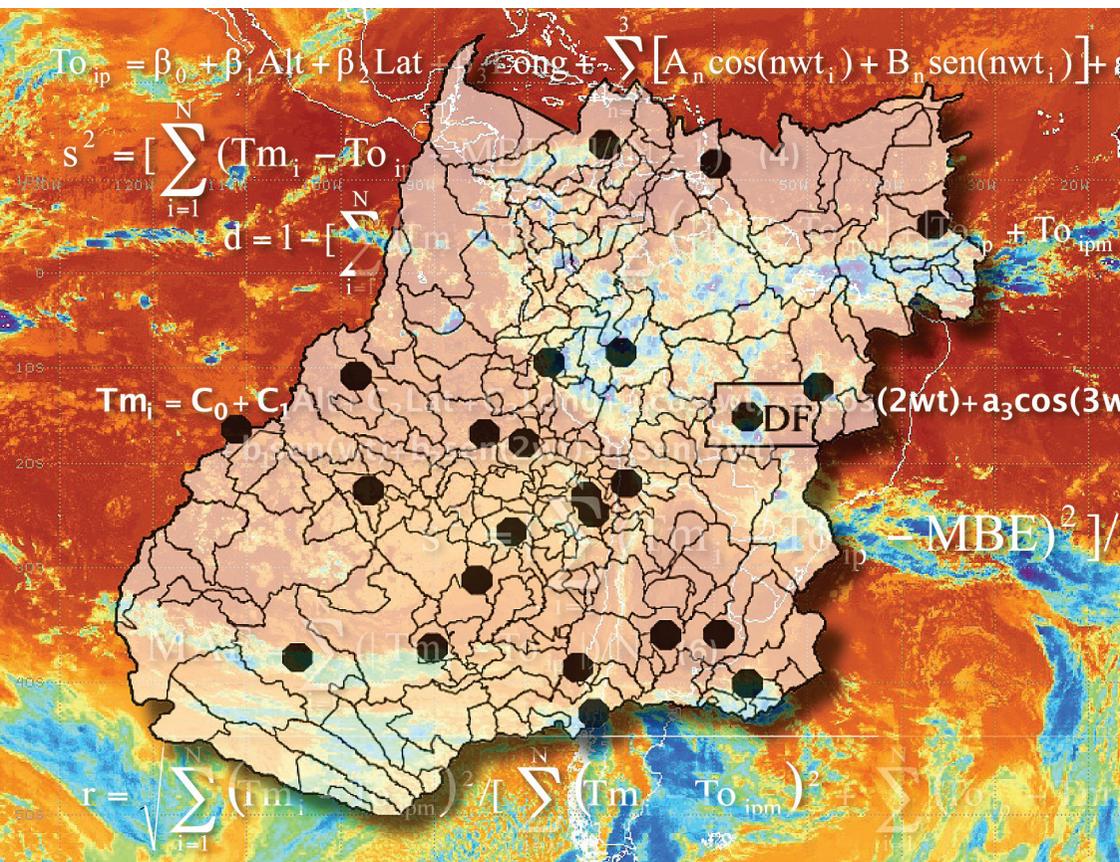


Modelo de Estimativa da Temperatura Média Diária do Ar no Estado de Goiás



***Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento* 282**

Modelo de Estimativa da Temperatura Média Diária do Ar no Estado de Goiás

Jorge Cesar dos Anjos Antonini

Euzebio Medrado da Silva

Edson Eyji Sano

Luiz Fernando Coutinho de Oliveira

Giuliano Marchi

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina, DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: *Fernando Antônio Macena da Silva*

Secretária-Executiva: *Marina de Fátima Vilela*

Secretária: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Jussara Flores de Oliveira Arbués*

Equipe de revisão: *Francisca Elijani do Nascimento*

Jussara Flores de Oliveira Arbués

Assistente de revisão: *Elizelva de Carvalho Menezes*

Normalização bibliográfica: *Paloma Guimarães Correa de Oliveira*

Edição eletrônica: *Fabiano Bastos*

Capa: *Fabiano Bastos*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*

Alexandre Moreira Veloso

1ª edição

1ª impressão (2010): tiragem 100 exemplares

1ª edição online (2010)

Todos os direitos reservados

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Cerrados

A945 Modelo de estimativa da temperatura média diária do ar no estado de Goiás / Jorge Cesar dos Anjos Antonini... [et al.]. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2010.
27 p. — (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Cerrados, ISSN 1676-918X, ISSN online 2176-509X ; 282).

1. Clima. 2. Ar - temperatura. 3. Modelo matemático.
I. Antonini, Jorge Cesar dos Anjos. II. Série.

551.6 - CDD 21

© Embrapa 2010

Sumário

Resumo	5
Abstract.....	6
Introdução.....	7
Material e Métodos.....	10
Resultados e Discussão.....	17
Conclusões.....	24
Referências	25

Modelo de Estimativa da Temperatura Média Diária do Ar no Estado de Goiás

Jorge Cesar dos Anjos Antonini¹

Euzebio Medrado da Silva²

Edson Eyji Sano³

Luiz Fernando Coutinho de Oliveira⁴

Giuliano Marchi⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo matemático de estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás que considere simultaneamente as variações espaciais e temporais. O modelo foi desenvolvido utilizando-se uma combinação linear dos valores de altitude, latitude, longitude e do tempo na escala diária representado pela série trigonométrica de Fourier, incompleta, com os três primeiros harmônicos. Os parâmetros do modelo foram ajustados aos dados de 21 estações meteorológicas, por meio de regressão linear múltipla, e o seu desempenho avaliado com os dados de três estações de altitudes diferentes: elevada (1.100 m), média (554 m) e baixa (431 m). O coeficiente de correlação resultante do ajuste do modelo foi de 0,91 e o índice de concordância Willmott foi igual a um. O desempenho foi considerado mediano para altitudes baixa e elevada, muito bom para altitude média.

Termos de indexação: modelagem climática, regressão linear múltipla, série de Fourier.

¹ Engenheiro Agrícola, D.Sc., pesquisador da Embrapa Cerrados, jorge.antonini@cpac.embrapa.br

² Engenheiro Agrônomo, Ph.D., pesquisador aposentado da Embrapa Cerrados

³ Geólogo, Ph.D., pesquisador da Embrapa Cerrados, sano@cpac.embrapa.br

⁴ Engenheiro Agrícola, D.Sc., professor da Universidade Federal de Lavras - UFLA, coutinho@deg.ufla.br

⁵ Engenheiro Agrônomo, D.Sc., pesquisador da Embrapa Cerrados, giuliano.marchi@cpac.embrapa.br

Mathematical Model for Estimating Daily Average Air-Temperature in the Goiás State, Brazil

Abstract

The objective of this work was to develop a mathematical model to predict daily average air temperature in Goiás State, Brazil, that considers the spatial and temporal variations simultaneously. The model was developed, using a linear combination of the values of altitude, latitude, longitude, and time in a daily scale, represented by the incomplete trigonometric Fourier series with the first three harmonic coefficients. The parameters of the model were adjusted with the data obtained from 21 weather stations, using the multiple linear regression and its performance was evaluated through the data from three stations at different altitudes: high (1.100 m), medium (559 m), and low (431 m). The resulting correlation coefficient of the fitted model was 0.91 and the Willmott's index of agreement was equal to 1. The performance of the model was reasonable for both high and low altitude stations, and very good for the medium altitude.

Index terms: climatic modeling, multiple linear regression, Fourier series.

Introdução

O conhecimento das variáveis meteorológicas é importante nos estudos relacionados ao desempenho das culturas agrícolas, e a temperatura do ar é a que mais interfere nos processos fisiológicos que ocorrem nas plantas, influenciando, principalmente, na velocidade das reações químicas e nos processos internos de translocação de assimilados (PEREIRA et al., 2002; BENAVIDES et al., 2007). Também, o conhecimento das temperaturas mínimas e máximas pode auxiliar no zoneamento agrícola de uma região (GALVANI et al., 2000), na estimativa do ciclo das culturas e na definição da época de semeadura.

A temperatura do ar é um dos efeitos mais importantes da radiação solar. Parte da energia radiante que atinge a superfície terrestre é utilizada para aquecer o solo, o qual, por sua vez, aquece o ar em contato com sua superfície, por meio do transporte do calor sensível por condução molecular e difusão turbulenta na massa de ar (OMETTO, 1981). Na camada de ar em contato com o solo, as temperaturas máximas do solo e do ar ocorrem simultaneamente, no entanto, à medida que se afasta da superfície, o instante de ocorrência da máxima temperatura do ar vai sendo retardado em relação ao instante de ocorrência da máxima temperatura do solo (PEREIRA et al., 2002). Em média, essa defasagem é de 2 horas a 2 m de altura do solo. No período noturno, o solo sofre resfriamento contínuo provocado pela interrupção da radiação solar e pelo constante processo da irradiação do solo, chegando à condição de inversão do fluxo de calor, ou seja, a atmosfera mais aquecida passa a transferir calor para o solo. A temperatura mínima do ar ocorre em função desse resfriamento e atinge seu menor valor antes do nascer do sol (VIANELLO; ALVES, 1991).

A variação, ao longo do ano, da temperatura do ar, em um determinado local, ocorre devido ao movimento de translação da Terra, processo esse que se repete, de uma forma cíclica ou periódica, de um ano para outro. Essa marcha anual da temperatura do ar responde claramente

à intensidade da radiação solar que chega à superfície do solo, com valores consideravelmente superiores nos meses de verão e inferiores nos meses de inverno (SILVA, 2006). A variação de temperatura do ar entre locais depende também de outros fatores tais como: altitude, latitude, longitude e distância dos oceanos (PEREIRA et al., 2002).

O monitoramento da temperatura do ar é feito nas estações meteorológicas convencionais ou automáticas, em suas diversas modalidades (máxima, mínima e atual), por meio de medições diárias. No entanto, quando a rede de estações meteorológicas com disponibilidade de dados de temperatura do ar é insuficiente para permitir uma adequada caracterização térmica do local, a estimativa dessa grandeza termodinâmica pode ser feita com base na altitude, latitude, longitude e dia do ano (PINTO et al., 1972; COELHO et al., 1973; PINTO; ALFONSI, 1974; ALMEIDA; SÁ, 1984; MARIN et al., 2003; ANTONINI et al., 2009).

O ajuste de séries históricas de dados de temperatura pode ser feito em função da altitude, latitude e longitude, utilizando a técnica estatística de regressão linear múltipla, que possibilita a estimativa de temperaturas mínima, média e máxima, mensais e anuais, respectivamente, com aceitável grau de precisão (PEDRO JÚNIOR et al., 1991). Com base nessa consideração, Lima e Ribeiro (1998) desenvolveram um método empírico para estimar a média mensal da temperatura máxima, mínima e média do ar para o Estado do Piauí, ajustando os dados de uma série histórica de temperatura pelo método de regressão linear múltipla, em função da altitude, latitude e longitude. Os coeficientes de determinação obtidos variaram de 0,43 a 0,81 para a temperatura média, de 0,29 a 0,77 para a temperatura máxima e de 0,50 a 0,84 para a temperatura mínima. Observaram, ainda, que a latitude e longitude tiveram influência pouco significativa, se comparada com a altitude.

Cargnelutti Filho et al. (2008) desenvolveram equações para a estimativa da temperatura média e máxima decendial do ar para o Estado do Rio Grande do Sul. Observaram que os coeficientes de

determinação variaram de 0,71 a 0,89 para a temperatura máxima decendial e de 0,75 a 0,93 para a temperatura média decendial, e concluíram que essas modalidades de temperatura podem ser estimadas em qualquer local do Estado por meio da altitude, latitude e longitude.

Nessa mesma linha de pesquisa, Oliveira Neto et al. (2002) ajustaram equações de regressão para estimar os valores médios mensais de temperaturas mínima, média e máxima, do território brasileiro situado entre 16° e 24° de latitude Sul e 48° e 60° de longitude Oeste, utilizando-se como variáveis independentes: altitude, latitude e longitude. Os coeficientes de determinação das equações de regressão ajustadas variaram de 0,68 a 0,86 para estimar a temperatura mínima, de 0,75 a 0,91 para estimar a temperatura média e de 0,72 a 0,91 para estimar a temperatura máxima.

Ferreira et al. (2006), utilizando as coordenadas geográficas e a altitude como variáveis independentes e os dados históricos de temperatura média do ar como variável dependente, ajustaram, com auxílio da regressão linear múltipla, modelos numéricos de estimativa da temperatura média mensal do ar para os estados de Minas Gerais e Pará. Observaram que os coeficientes de determinação das equações ajustadas variaram de acordo com o mês considerado, tendo apresentado os menores valores nos meses de inverno, tanto em Minas Gerais como no Pará.

A variação temporal da temperatura do ar observada em um dia ou em determinado número de dias, na ausência de nebulosidade ou chuvas, é periódica e pode ser representada teoricamente por uma série trigonométrica de senos e cossenos (VIANELLO; ALVES, 1991). Segundo Carvalho et al. (2005), para o estudo de séries históricas ou séries temporais que apresentam variações periódicas sazonais, pode-se recorrer à análise harmônica por séries de Fourier. McCutchan (1976) desenvolveu um modelo matemático, com base na série trigonométrica de Fourier, utilizando os primeiros dois harmônicos, para estimar a temperatura do ar em qualquer hora do dia, nas superfícies de terrenos

montanhosos. Esse autor obteve valores de coeficientes de correlação entre 0,56 e 0,90, ao comparar os dados observados em diferentes horas do dia com os estimados pelo modelo.

Os vários modelos propostos para a estimativa da temperatura do ar foram desenvolvidos, utilizando variáveis espaciais ou temporais, separadamente. No entanto, em várias aplicações, como, por exemplo, no zoneamento agrícola de risco climático (ASSAD et al., 2001), há necessidade de modelos matemáticos de simples utilização que permitam estimar a variação da temperatura do ar, utilizando simultaneamente, variáveis espaciais e temporais. Portanto este trabalho propõe um modelo matemático para a estimativa adequada da temperatura média diária do ar considerando, de forma combinada, suas variações espaciais, em função da altitude, latitude e longitude, e temporais, em função da sequência de dias do ano, para as condições climáticas do Estado de Goiás.

Material e Métodos

O estudo foi realizado no Estado de Goiás, localizado entre as latitudes de 12° 00' 00"S e 19° 45' 44"S e longitudes de 45° 45' 32"W e 53° 30' 00"W. Os dados utilizados no presente estudo foram obtidos junto às bases do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), do Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (SIMEHGO) e da Embrapa Arroz e Feijão, totalizando 24 estações meteorológicas distribuídas dentro do Estado de Goiás e do Distrito Federal (Figura 1).

A seleção das estações para ajuste e validação do modelo proposto foi feita considerando a disponibilidade de séries históricas com, no mínimo, oito e três anos de observação, respectivamente (Tabela 1). As falhas de registros nas séries históricas analisadas foram preenchidas de acordo com os procedimentos usados no programa Clima (FARIA et al., 2002).

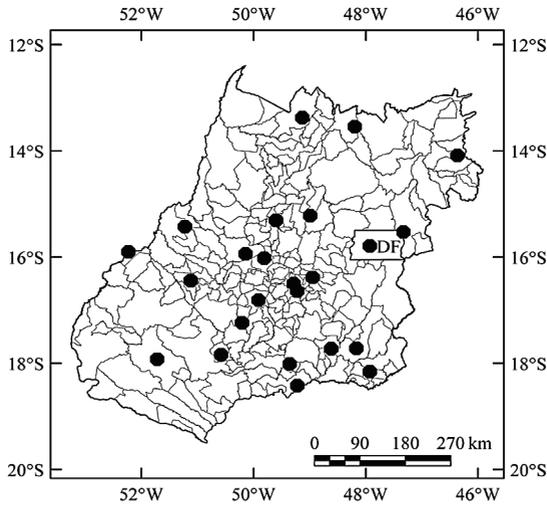


Figura 1. Localização das estações meteorológicas no Estado de Goiás e no Distrito Federal.

Tabela 1. Altitude, localização e período de observação das estações meteorológicas consideradas neste estudo (Estado de Goiás e Distrito Federal).

Nº de Ordem	Localidade	Altitude (m)	Latitude Sul (°)	Longitude Oeste (°)	Período (ano)
1	Aragarças ⁽¹⁾	311	15,900	52,230	1985 – 2000
2	Brasília ⁽¹⁾	1161	15,789	47,926	1985 – 2000
3	Britânia ⁽²⁾	284	15,429	51,220	2000 – 2007
4	Caldas Novas ⁽²⁾	706	17,726	48,616	2000 – 2007
5	Catalão ⁽¹⁾	886	18,158	47,926	2000 – 2007
6	Ceres ⁽²⁾	589	15,308	49,598	2000 – 2007
7	Formosa ⁽¹⁾	899	15,530	47,330	1985 – 2000
8	Goianésia ⁽¹⁾	665	15,220	48,990	1985 – 2000
9	Goiânia ⁽¹⁾	722	16,643	49,222	1985 – 2000
10	Goiás ⁽¹⁾	512	15,939	50,141	1985 – 2000
11	Goiatuba ⁽²⁾	774	18,013	49,357	2000 – 2007
12	Ipameri ⁽¹⁾	743	17,717	48,167	1985 – 2000
13	Iporá ⁽²⁾	596	16,442	51,118	2000 – 2007
14	Itaberaí ⁽²⁾	701	16,020	49,810	2000 – 2007
15	Itumbiara ⁽²⁾	455	18,420	49,218	2000 – 2007
16	Jataí ⁽¹⁾	669	17,924	51,718	1985 – 2000
17	Palmeiras de Goiás ⁽²⁾	621	16,810	49,911	2000 – 2007

Continua...

Tabela 1. Continuação.

Nº de Ordem	Localidade	Altitude (m)	Latitude Sul (°)	Longitude Oeste (°)	Período (ano)
18	Porangatu ⁽²⁾	368	13,374	49,128	2000 – 2007
19	Posse ⁽¹⁾	824	14,089	46,366	1985 – 2000
20	Santa Helena ⁽²⁾	590	17,839	50,576	2000 – 2007
21	Santo Antônio de Goiás ⁽³⁾	829	16,500	49,282	1983 – 2006
22	Anápolis ⁽²⁾	1100	16,381	48,945	2004 – 2007
23	Jandaia ⁽²⁾	554	17,240	50,203	2005 – 2007
24	Minaçu ⁽²⁾	431	13,544	48,195	2005 – 2007

⁽¹⁾Instituto Nacional de Meteorologia – Inmet; ⁽²⁾ Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás – SIMEHGO; ⁽³⁾ Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão – CNPAF.

A World Meteorological Organization preconiza que, na análise de séries históricas de dados climáticos, sejam utilizados dados de pelo menos 30 anos de observações (MARTIN et al., 2008). As séries históricas de dados oficiais de temperatura do ar, disponíveis no Estado de Goiás, com densidade aceitável, não atingem esse número de anos de observações. Porém, resultados satisfatórios têm sido obtidos com séries históricas, com o número de anos de observações abaixo do preconizado (LIMA; RIBEIRO, 1998; PEZZOPANE et al., 2004; GOMES et al., 2005).

Para compor o modelo de estimativa da temperatura média diária do ar, em função do espaço e do tempo, utilizaram-se, como variável dependente, os valores médios da temperatura média diária do ar (To_{ip}) observados em cada dia do ano, do período de registro das séries históricas consideradas. Como variáveis independentes, utilizaram-se a altitude (Alt), a latitude (Lat), a longitude (Long) e a sequência dos dias do ano (t_i). O modelo foi desenvolvido por meio de uma combinação linear da Alt, Lat e Long, representando a variação espacial, com a série trigonométrica de Fourier incompleta com os três primeiros harmônicos, representando a variação temporal:

$$To_{ip} = \beta_0 + \beta_1 Alt + \beta_2 Lat + \beta_3 Long + \sum_{n=1}^3 [A_n \cos(nwt_i) + B_n \sin(nwt_i)] + \varepsilon_i \quad (1)$$

em que, To_{ip} é a temperatura média do ar observada no dia i (°C); i é o i -ésimo dia do ano; β_0 é o coeficiente linear e β_1 , β_2 e β_3 são os

coeficientes angulares das variáveis espaciais; Alt é a altitude do local (m); Lat é a latitude do local em valores positivos (graus decimais); Long é a longitude do local em valores positivos (graus decimais); A_n e B_n são os coeficientes dos termos da série trigonométrica de Fourier incompleta; t_i é o dia do ano da observação i , que varia de 1 a 365 dias; n é o número de harmônicos da série trigonométrica de Fourier; w é a frequência angular fundamental igual a $2\pi/365$ e ε_i o erro.

Com os coeficientes angulares A_n e B_n da série trigonométrica de Fourier, pode-se obter a amplitude de cada harmônica, igual a $(a_n^2 + b_n^2)^{1/2}$, $(A_n^2 + B_n^2)^{0,5}$ que representaria as amplitudes anual, semestral e quadrimestral da temperatura média diária do ar.

Para ajustar o modelo proposto, foram utilizados os valores diários de temperatura média diária do ar (To_{ip}), de períodos não uniformizados, com, no mínimo, oito anos de observações registradas nas séries históricas das primeiras 21 estações meteorológicas listadas na Tabela 1. Portanto, o modelo ajustado se aplica somente ao Estado de Goiás, dentro dos limites de altitude de 284 m e 1.161 m, em função do menor e maior valor de altitude das estações meteorológicas estudadas.

A consistência dos dados e o preenchimento de falhas das séries históricas foram feitos empregando-se o programa Clima (FARIA et al., 2002). Em cada estação meteorológica, a partir dos dados diários de temperatura máxima e mínima do ar, medidos em abrigo meteorológico, e considerando os dias do ano em uma sequência de 1 dia a 365 dias, foi calculada a temperatura média do ar do dia i no ano j (To_{ij}) de cada série histórica analisada. Com os valores de To_{ij} , foi calculada a temperatura média para cada dia do ano (To_{ip}), referente ao período de observação da série histórica de dados, com o uso da equação:

$$To_{ip} = \sum_{i=1}^{PO} (To_{ij}/P_o) \quad (2)$$

em que: j é o j -ésimo ano de observação; To_{ij} é a temperatura média diária referente ao i -ésimo dia do ano j ; P_o é o número de anos de observação da série histórica de cada estação.

Os valores de To_{ip} (°C) totalizaram 7.665 dados, juntamente com os valores de latitude, longitude e altitude e os valores dos componentes dos três primeiros harmônicos da série trigonométrica de Fourier: $\cos(wt)$, $\cos(2wt)$, $\cos(3wt)$, $\sin(wt)$, $\sin(2wt)$ e $\sin(3wt)$, formaram uma matriz com 7.665 linhas e 10 colunas, obtida com o programa Excel para efetuar a estimativa dos coeficientes do modelo de regressão linear múltipla pelo método dos mínimos quadrados. O teste de significância do modelo estimado e dos coeficientes de regressão foi realizado, respectivamente, pelas estatísticas F – Snedcor e t-Student, para um nível de significância de 5%. O grau de ajuste do modelo foi avaliado pelo coeficiente de determinação. Para a definição da qualidade do ajuste do modelo, foi verificada a existência das suposições de homocedasticidade, normalidade dos resíduos, bem como a não correlação das variáveis independentes. A verificação da homocedasticidade foi feita através da análise do gráfico dos resíduos versus valores ajustados. A normalidade dos resíduos foi verificada através de gráficos de probabilidade normal acumulada. Para verificar a existência de correlação entre as variáveis independentes, foi aplicado o teste de correlação de Pearson.

Para avaliar o grau de desvio do modelo, foi utilizado o recurso da regressão linear simples aplicado aos pares de valores estimados (equação 9) e observados. A quantificação das diferenças entre os valores médios diários de temperatura do ar, estimados pelo modelo e os observados, nas estações meteorológicas estudadas, foi feita aplicando-se as estatísticas: média dos erros (MBE), variância dos erros (s^2), raiz do quadrado médio dos erros (RMSE) e média dos erros absolutos (MAE), definidos, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$MBE = \sum_{i=1}^N (Tm_i - To_{ip}) / N \quad (3)$$

$$s^2 = \left[\sum_{i=1}^N (Tm_i - To_{ip} - MBE)^2 \right] / (N-1) \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\text{Tm}_i - \text{To}_{ip})^2 / N} \quad (5)$$

$$\text{MAE} = \sum_{i=1}^N (|\text{Tm}_i - \text{To}_{ip}|) / N \quad (6)$$

Para a validação do modelo, foram feitas comparações entre a temperatura média diária observada e a estimada com o modelo ajustado (eq. 9), utilizando-se os dados das três estações meteorológicas não pertencentes ao grupo de estações usadas na determinação dos coeficientes lineares e angulares do modelo. Essas três estações foram selecionadas, de modo que cada uma representasse, respectivamente, altitudes elevadas, médias e baixas. Para representar essas condições, foram selecionadas as estações localizadas nos municípios de Anápolis (1.100 m de altitude), Jandaia (554 m de altitude) e Minaçu (431 m de altitude), respectivamente (Tabela 1).

A qualidade preditiva do modelo foi avaliada quanto à precisão, exatidão e desempenho. A precisão foi quantificada pelo coeficiente de correlação de Pearson r , calculado por meio da seguinte equação:

$$r = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\text{Tm}_i - \text{To}_{ipm})^2 / [\sum_{i=1}^N (\text{Tm}_i - \text{To}_{ipm})^2 + \sum_{i=1}^N (\text{To}_{ip} - \text{Tm}_i)^2]} \quad (7)$$

em que N é o número total de observações; To_{ipm} é a média dos valores de temperatura média diária do ar, observados nas séries históricas estudadas ($^{\circ}\text{C}$).

A exatidão foi quantificada pelo índice de concordância d de Willmott (WILLMOTT, 1982), calculado por meio da equação:

$$d = 1 - \left[\sum_{i=1}^N (\text{Tm}_i - \text{To}_{ip})^2 / \sum_{i=1}^N (|\text{Tm}_i - \text{To}_{ipm}| + |\text{To}_{ip} - \text{To}_{ipm}|)^2 \right] \quad (8)$$

O desempenho do modelo foi quantificado pelo índice $c = r.d$ (CAMARGO; CAMARGO, 2000). Os indicadores de concordância e de desempenho foram interpretados de acordo com Santos (2007) e Camargo e Sentelha (1997), respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Critério de interpretação do índice de desempenho c e do coeficiente de correlação linear r .

	Valor	Interpretação
Índice de desempenho c	$> 0,85$	Desempenho ótimo
	$0,76$ a $0,85$	Desempenho muito bom
	$0,66$ a $0,75$	Desempenho bom
	$0,61$ a $0,65$	Desempenho mediano
	$0,51$ a $0,60$	Desempenho sofrível
	$0,41$ a $0,50$	Desempenho Mau
	$\leq 0,40$	Desempenho Péssimo
Coeficiente de correlação r	$r = 1,0$	Correlação perfeita positiva
	$0,8 \leq r < 1,0$	Correlação forte positiva
	$0,5 \leq r < 0,8$	Correlação moderada positiva
	$0,1 \leq r < 0,5$	Correlação fraca positiva
	$0,0 \leq r \leq 0,1$	Correlação ínfima positiva
	$r = 0,0$	Correlação nula
	$-0,1 < r < 0,0$	Correlação ínfima negativa
	$-0,5 < r \leq -0,1$	Correlação fraca negativa
	$-0,8 < r \leq -0,5$	Correlação moderada negativa
	$-1,0 < r \leq -0,8$	Correlação moderada negativa
$r = -1,0$	Correlação perfeita negativa	

Fonte: Camargo e Sentelha (1997); Santos (2007).

Resultados e Discussão

O modelo de regressão estimado pelo método dos mínimos quadrados é apresentado na equação (9):

$$Tm_i = C_0 + C_1 \text{Alt} + C_2 \text{Lat} + C_3 \text{Long} + a_1 \cos(wt) + a_2 \cos(2wt) + a_3 \cos(3wt) + b_1 \text{sen}(wt) + b_2 \text{sen}(2wt) + b_3 \text{sen}(3wt) \quad (9)$$

Em que Tm_i é a temperatura média do ar estimada no dia i ($^{\circ}\text{C}$); C_0 , C_1 , C_2 , C_3 , a_1 , a_2 , a_3 , b_1 , b_2 , e b_3 são os coeficientes estimados.

Pela análise das Figuras 2 e 3, podemos, respectivamente, afirmar que existe um forte indicativo de distribuição normal e variância constante dos resíduos. Portanto podemos tratar os dados como paramétricos e aplicar a análise de variância.

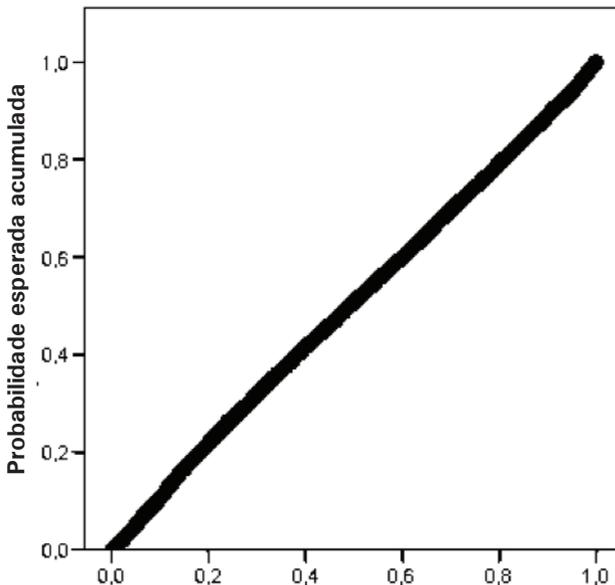


Figura 2. Gráfico de probabilidade normal acumulada dos resíduos.

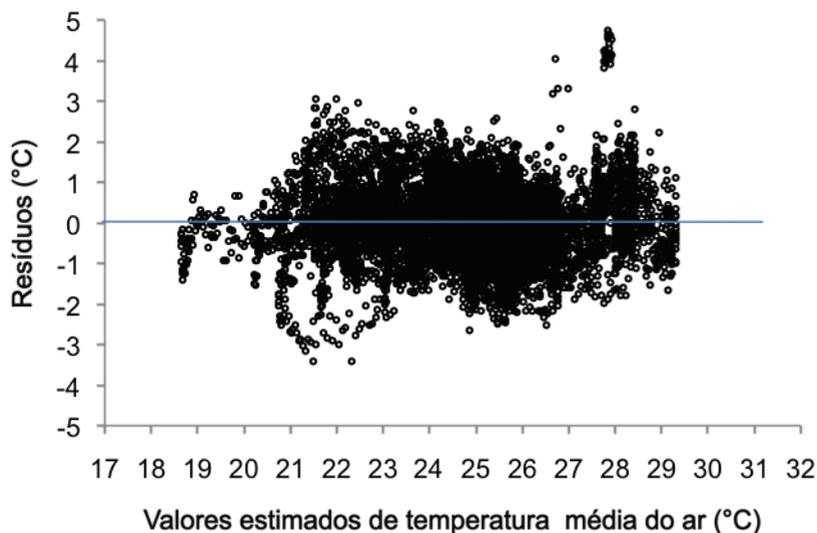


Figura 3. Gráfico dos resíduos versus os valores estimados pelo modelo proposto da temperatura média do ar no Estado de Goiás.

Observando a matriz de correlação de Pearson (Tabela 3), constata-se que a variável longitude correlaciona-se moderadamente com a altitude e fracamente com a latitude, sugerindo que a variável longitude pode ser excluída do modelo. No entanto, esta variável deve permanecer para possibilitar a definição espacial de cada local onde se queira aplicar o modelo proposto.

Tabela 3. Matriz de correlação Pearson entre as variáveis componentes do modelo proposto.

Variáveis	To _{ip}	Alt	Lat	Long	coswt	cos2wt	cos3wt	senwt	sen2wt	sen3wt
To _{ip}	1									
Alt	-.64	1								
Lat	-.24	.16	1							
Long	.35	-.68	.17	1						
coswt	.47	.00	.00	.00	1					
sen3wt	.03	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1

Continua...

Tabela 3. Continuação.

Variáveis	Toip	Alt	Lat	Long	coswt	cos2wt	cos3wt	senwt	sen2wt	sen3wt
cos2wt	-.38	.00	.00	.00	.00	1				
cos3wt	.07	.00	.00	.00	.00	.00	1			
senwt	-.13	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1		
sen2wt	.04	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1	
sen3wt	.03	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.00	1

Observa-se, na Tabela 4, que o valor-p do teste de significância do modelo de regressão estimado é menor que o nível de significância adotado (5%), logo há forte evidências estatísticas para considerar que a temperatura média do ar, no Estado de Goiás, seja linearmente dependente, pelo menos, de uma das variáveis independentes que compõem o modelo proposto.

Tabela 4. Estatística do modelo de regressão estimado.

Fonte de variação	GI1	SQ2	MQ3	F3	Valor p5
Regressão	9	29.957,07	3.328,56	3.915,77	0,00
Residual	7.655	6.507,06	0,85		
Total	7.664	36.464,13			

¹ Graus de liberdade; ² Soma de quadrados; ³ Quadrado médio; ⁴ Estatística F; ⁵ Nível descritivo

Os testes individuais de significância dos coeficientes do modelo (Tabela 5) indicam que os valores-p são extremamente menores que o nível de significância adotado. Dessa forma, conclui-se que esses coeficientes são estatisticamente significativos e, portanto, as variáveis independentes incluídas no modelo têm efeitos significativos no valor da temperatura média diária do ar na região limitada pelo Estado de Goiás. Resultado semelhante foi encontrado por Ferreira et al. (2006), ao desenvolverem equações para a estimativa da temperatura média mensal dos estados de Minas Gerais e Pará, onde, consideraram apenas variáveis espaciais: altitude, latitude e longitude; e obtiveram todos os coeficientes dessas variáveis significativos.

Tabela 5. Estatísticas dos coeficientes individuais do modelo de regressão estimado.

Variáveis	Coeficientes	Erro-padrão	Estatística t	Valor p	Intervalo de confiança	
					95% inferior	95% superior
Intercepto	$C = 39,863$	0,536	74,381	0,000	38,812	40,913
Altitude	$C_1 = -0,007$	0,000	-96,449	0,000	-0,007	-0,007
Latitude	$C_2 = -0,185$	0,009	-21,439	0,000	-0,202	-0,168
Longitude	$C_3 = -0,145$	0,011	-13,291	0,000	-0,166	-0,123
coswt	$a_1 = 1,449$	0,015	97,263	0,000	1,419	1,478
cos2wt	$a_2 = -1,183$	0,015	-79,403	0,000	-1,212	-1,153
cos3wt	$a_3 = 0,224$	0,015	15,013	0,000	0,194	0,253
senwt	$b_1 = -0,407$	0,015	-27,352	0,000	-0,437	-0,378
sen2wt	$b_2 = 0,119$	0,015	8,017	0,000	0,090	0,149
sen3wt	$b_3 = 0,100$	0,015	6,711	0,000	0,071	0,129

Analisando a contribuição de cada componente do modelo linear para o resultado da temperatura (Tabela 5), constata-se que, no caso do componente altitude, o coeficiente C_1 indica que a Tm_i decresce $0,7\text{ }^\circ\text{C}$ para cada 100 m de variação positiva em altitude. Esse valor, apesar de ter sido derivado de uma regressão linear, é coerente, pois está entre os valores do gradiente adiabático seco e o úmido da troposfera, $0,98\text{ }^\circ\text{C}$ e $0,40\text{ }^\circ\text{C}$ de decréscimo, para cada 100 m de variação positiva em altitude, respectivamente e não difere muito do valor médio de $0,62\text{ }^\circ\text{C}$, encontrados por Cargnelutti Filho et al. (2008), para temperatura média decendial no Rio Grande do Sul, também com uso de regressão. No caso do coeficiente da latitude C_2 , o aumento de 1° de latitude correspondeu à diminuição aproximada de $0,19^\circ\text{C}$ na temperatura do ar. Resultados semelhantes foram encontrados por Pezzopane et al. (2004), ao desenvolverem modelos matemáticos para estimativa das médias mensais das temperaturas mínimas, médias e máximas do ar, no Espírito Santo. Em relação à longitude, observou-se o decréscimo da temperatura de $0,14\text{ }^\circ\text{C}$ para cada aumento de 1° de longitude, comportamento esse, também, observado por Lima e Ribeiro (1998), no Piauí.

O coeficiente de determinação r^2 reflete quanto por cento da variação de Tm_i é explicada pelas variáveis que compõem o modelo. Nesse caso,

o valor encontrado foi de 0,82, ou seja, 82% (Tabela 6). Assim, 18% da variabilidade de T_{m_i} pode ter ocorrido em razão de outros fatores que podem ser: deslocamento de massas de ar, nebulosidade, ventos e chuvas (PEREIRA et al., 2002). Esse valor de r^2 está dentro da faixa de 0,75 a 0,86, encontrada por Oliveira Neto et al. (2002), ao ajustarem equações de regressão em função da Alt, Lat e Long, para estimar os valores médios mensais de temperatura média entre 16° e 24° S e 48° e 60° W, no Brasil; e, dentro da faixa de 0,75 a 0,93, encontrada por Cargnelutti et al. (2008), ao ajustarem equações de regressão, com essas mesmas variáveis espaciais, para estimar os valores médios decendiais de temperatura média do Rio Grande do Sul. Ao analisar as diferenças entre os valores estimados de temperatura média diária do ar (equação 9) e os observados nas séries históricas, verifica-se que a magnitude do erro médio absoluto foi apenas de $0,71^\circ\text{C}$. Esse valor abrange 58,9% das 7.665 diferenças observadas. Dessas diferenças, 74,4% são menores do que 1°C e 90,7% são menores do que $1,5^\circ\text{C}$.

Tabela 6. Medidas estatísticas da avaliação do grau de ajuste do modelo proposto e de sua validação na estimativa da temperatura média diária nas condições espaciais e climáticas do Estado de Goiás.

Descrição da medida estatística	Simbologia	Ajuste modelo	Condição de altitude		
			Elevada	Média	Baixa
Média dos erros ($^\circ\text{C}$)	BEM	0,00	-1,14	0,31	0,59
Variância dos erros	s^2	0,85	0,95	0,96	0,84
Raiz do quadrado médio dos erros ($^\circ\text{C}$)	RMSE	0,92	1,12	0,22	0,43
Erros médio absoluto ($^\circ\text{C}$)	MAE	0,71	1,27	0,78	0,82
Valores abaixo de MAE (%)	-	58,90	53,70	57,53	60,82
Valores abaixo de 1°C (%)	-	74,59	38,08	72,88	67,67
Valores abaixo de $1,5^\circ\text{C}$ (%)	-	90,97	65,48	86,03	80,82
Média dos valores observados ($^\circ\text{C}$)	$T_{o_{ipm}}$	24,82	22,85	25,05	26,64
Média dos valores estimados ($^\circ\text{C}$)	$T_{m_{im}}$	24,83	21,70	25,36	27,23
Coefficiente de determinação	r^2	0,82	0,62	0,75	0,60
Coefficiente de correlação	r	0,91	0,79	0,87	0,77
Coefficiente de Willmott	d	1,00	0,77	0,97	0,84
Índice de desempenho	c	0,91	0,66	0,84	0,65
Número de observações	N	7665	365	365	365

O grau de correlação entre os valores estimados e observados dá uma ideia da dispersão das estimativas em relação à regressão linear dos dados. Essa medida, no entanto, não expressa totalmente o grau de confiabilidade do modelo, pois o valor de r não está necessariamente relacionado com a magnitude do desvio entre o valor padrão (linha 1:1) e o valor estimado pelo modelo de regressão. Nessa comparação, quanto mais próximo de 1 for o coeficiente angular e mais próximo de zero for o coeficiente linear, menor é o desvio em relação à linha 1:1 e maior é a concordância entre os valores observados e os estimados pelo modelo. No presente trabalho, o coeficiente angular foi de 0,8215, o coeficiente linear de 4,4313 (Figura 4), a variância dos erros foi de apenas 0,85 (Tabela 6), o que indica que a dispersão média dos dados foi menor do que 1°C . A aplicação do modelo no ajuste aos dados espaciais, temporais e climáticos, dentro dos limites do Estado de Goiás, resultou em $d = 1$ e $r = 0,91$, o que reflete o alto grau de exatidão e precisão do modelo, respectivamente.

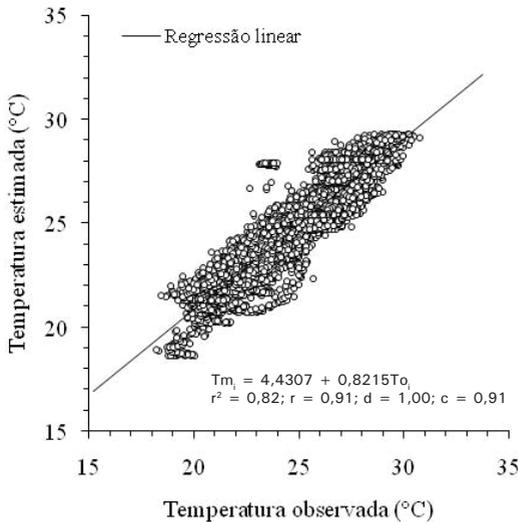


Figura 4. Diagrama de dispersão dos 7665 valores de temperatura média diária do ar, observados (T_{o_i}) e estimados (T_{m_i}) pelo modelo proposto e os correspondentes índices estatísticos de avaliação do ajuste (d = coeficiente de Willmott; r = coeficiente de correlação de Pearson; e c = índice de desempenho).

O modelo descreveu bem o curso anual de variação da temperatura média diária do ar das três estações meteorológicas de altitudes diferentes (Figuras 5 A, B e C). No entanto, notou-se tendência do modelo, nos primeiros seis meses do ano, em subestimar os valores de temperatura na estação de maior altitude e em superestimar na de menor altitude. Observou-se boa correlação (Figuras 5 D, E, F) entre os valores observados e estimados de temperatura média diária do ar. A precisão, representada pelo coeficiente de correlação r foi de 0,79, 0,87 e 0,77 nas estações de elevada, média e baixa altitude, respectivamente. Essas correlações podem ser interpretadas como moderada a forte (SANTOS, 2007). Quanto à exatidão, representada pelo coeficiente de Willmott d na escala de zero a um, os valores encontrados foram de 0,77, 0,90 e 0,84, respectivamente, nas estações de elevada, média e baixa altitude. Esses valores demonstram que o modelo foi capaz de estimar a temperatura média diária do ar com boa exatidão.

O desempenho do modelo, representado pelo índice de consistência c , variou com a altitude da estação meteorológica (Figura 5 D, E, F), e pode ser classificado como mediano (0,61 a 0,65), para as estações de altitudes baixa e elevada; e muito bom (0,76 a 0,85) para a estação de altitude média. O melhor desempenho do modelo na estação de altitude média pode estar relacionado à maior densidade de estações meteorológicas usadas na fase de ajuste do modelo para essa altitude. No caso de altitudes elevadas foram utilizados apenas dados de uma estação, o que limitou a capacidade do modelo estimar valores mais próximos dessa realidade.

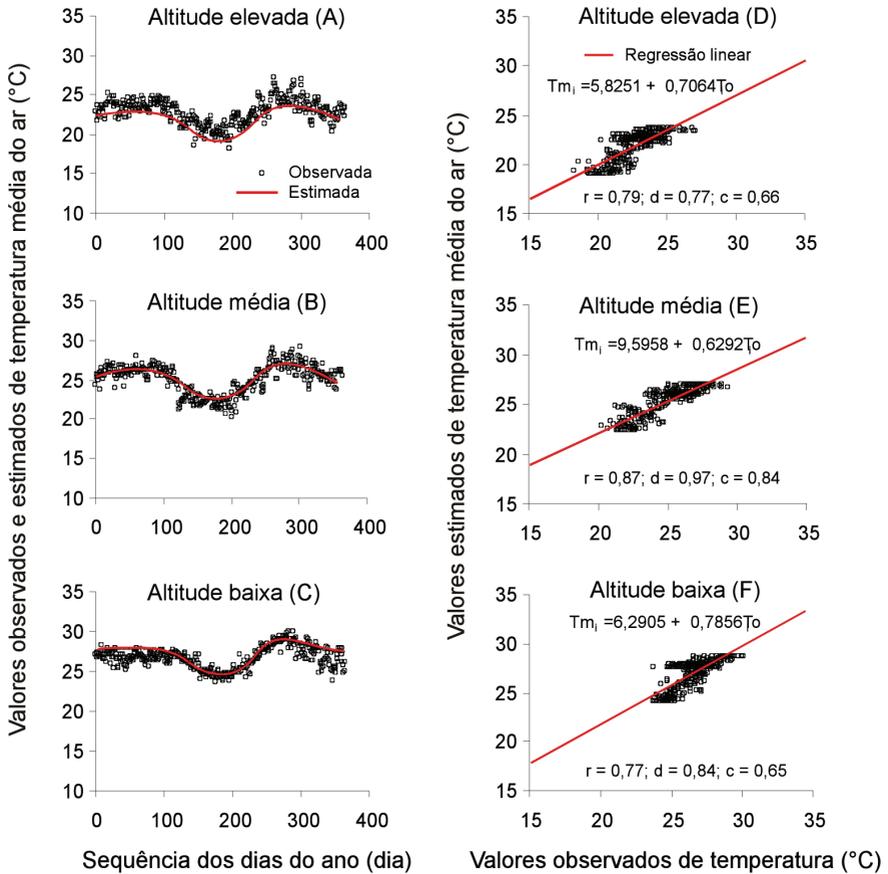


Figura 5. Variação anual da temperatura média diária do ar (A, B, C) e os respectivos diagramas de dispersão (D, E, F) dos valores observados (T_{o_i}) e estimados (T_{m_i}), nas estações meteorológicas de altitudes elevada, média e baixa e os correspondentes índices estatísticos de avaliação do modelo desenvolvido (r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de Willmott; e c = índice de desempenho).

Conclusões

A combinação linear dos efeitos da altitude, latitude e longitude, com a série trigonométrica de Fourier, mostrou-se satisfatória para modelar a variação espacial e temporal da temperatura média diária do ar.

O modelo desenvolvido e parametrizado prevê adequadamente a variação espaço-temporal da temperatura média diária no Estado de Goiás, com desempenho mediano para as altitudes baixas (431 m) e elevadas (1.100 m) e desempenho muito bom para as altitudes médias (554 m).

Referências

- ALMEIDA, H. A.; SÁ, D. F. Estimativa das temperaturas médias, máximas e mínimas mensais e anuais do sudoeste da Bahia. **Revista Theobroma**, v. 14, n. 2, p. 135-142, 1984.
- ANTONINI, J. C. dos A.; SILVA, E. M. da; OLIVEIRA, L. F. C. de; SANO, E. E. Modelo matemático para estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n.4, p. 331-338, 2009.
- ASSAD, E. D.; EVANGELISTA, B.; SILVA, F. A. M.; CUNHA, S. A. R.; ALVES, E. R., LOPES, T. S. S.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J. Zoneamento agroclimático para a cultura do café (*Coffea arabica* L.) no Estado de Goiás e sudoeste do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, p. 510-518, 2001.
- BENAVIDES, R.; MONTES, F.; RUBIO, A.; OSORO, K. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 146, p. 173-188, 2007.
- CAMARGO, A. P. de; CAMARGO, M. B. P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação de desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n.1, p. 89-97, 1997.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; MALUF, J. R. T.; MATZANAUER, R. Coordenadas geográficas na estimativa das temperaturas máxima e médias decendiais do ar no Estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, v. 38, n. 9, p. 2448-2456, 2008.
- CARVALHO, L. G. de; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P. R.; ALVES, H. M. R. Aplicação da análise harmônica por série de Fourier para a previsão de produtividade da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 732-741, 2005.
- COELHO, D. T.; SEDIYAMA, G.; VIEIRA, M. Estimativas das temperaturas médias mensais e anuais no Estado de Minas Gerais. **Revista Ceres**, v. 20, n. 112, p. 455-459, 1973.
- FARIA, R. T. de; CARAMORI, P. H.; CHIBANA, E. Y.; BRITO, L. R. de S.; NAKAMURA, A. K.; FERREIRA, A. R. **Clima**: programa computacional para organização e análise de dados meteorológicos. Londrina, PR: IAPAR, 2002. 29 p. (IAPAR. Boletim Técnico, 66)

FERREIRA, W. P. M.; VALADARES, G. S.; HOTT, M. C. Estimativa da temperatura média mensal do ar para o Estado de Minas Gerais e do Pará, utilizando-se modelos originais de elevação. **Engenharia na Agricultura**, v. 14, n. 4, p. 293-303, 2006.

GALVANI, E.; KLOSOWSKI, E. S.; ESCOBEDO, J. F.; CUNHA, A. R. da. Modelo de estimativa de temperatura mínima do ar para a região de Maringá – PR. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, n. 1, p.105-110, 2000.

GOMES, A. A. N.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; MEDEIROS, R. M. de. Evapotranspiração de referência mensal para o Estado do Piauí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 560-564, 2005.

LIMA, M. G. de; RIBEIRO, V. Q. Equações de estimativa da temperatura do ar para o Estado do Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, n.2, p. 221-227, 1998.

MARIN, F.; PANDORFI, H.; FERREIRA, A. S. Estimativas das temperaturas máximas, médias e mínimas mensais para o Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOLOGIA, 13., 2003, Santa Maria, **Anais...** Santa Maria, RS: CBA, 2003, p.761-762.

McCUTCHAN, M. H. Diagnosing and predicting surface temperature in mountainous terrain. **Monthly Weather Review**, v. 104, p. 1044-1051, 1976.

OLIVEIRA NETO, S. N. de; REIS, G. G. dos; REIS, M. das G. F.; LEITE, H. G.; COSTA, J. M. N. da. Estimativa de temperaturas mínima, média e máxima do território brasileiro situado entre 16 e 24° latitude sul e 48 e 60° longitude oeste. **Engenharia na Agricultura**, v. 10, n. 1, p. 8-17, 2002.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo, SP: Agronômica Ceres 1981. 440 p.

PEDRO JÚNIOR, M. J.; MELLO, M. H. A.; ORTOLANI, A. A.; ALFONSI, R. R.; SENTELHAS, P. C. **Estimativa das temperaturas médias mensais das máximas e das mínimas para o Estado de São Paulo**. Campinas, SP: IAC, 1991. 11 p. (Boletim Técnico, 142).

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p.

PEZZOPANE, J. E. M.; SANTOS, E. A.; ELEUTÉRIO, M. M.; REIS, E. F. dos; SANTOS, A. R. dos. Espacialização da temperatura do ar no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 12, n. 1, p. 151-158, 2004.

PINTO, H. S.; ALFONSI, R. R. Estimativa das temperaturas médias e mínimas mensais no Estado do Paraná, em função da altitude e latitude. **Caderno de Ciência da Terra**, n. 23, 20 p., 1974.

PINTO, H. S.; ORTOLONI, A. A.; ALFONSI, R. R. Estimativa das temperaturas médias mensais do Estado de São Paulo. **Caderno de Ciência da Terra**, n. 2, 29 p., 1972.

MARTIN, T. N.; DOURADO NETO, D.; STORCK, L.; BURAUUEL, P.; SANTOS, E. A. Regiões homogêneas e tamanho de amostra para atributos do clima no Estado de São Paulo, Brasil. **Ciência Rural**, v. 38, p. 690-697, 2008.

SANTOS, C. **Estatística descritiva**: manual de auto-aprendizagem. Lisboa: Edições Sílabo, 2007. 264 p.

SILVA, R. G. da. Predição da configuração de sombras de árvores em pastagens para bovinos. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 268-281, 2006.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG: UFV, Imprensa Universitária, 1991. 449 p.

WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.

Embrapa

Cerrados

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento



CGPE 9105