

JORGE CESAR DOS ANJOS ANTONINI

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA VARIAÇÃO ESPAÇO-
TEMPORAL DA TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA E DO CICLO DO
ALGODOEIRO HERBÁCEO NO ESTADO DE GOIÁS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia, área de concentração: Solo e Água.

Orientador:

Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler

Co-Orientadores:

Dr. Euzebio Medrado da Silva

Prof. Dr. Luiz F. Coutinho de Oliveira

Prof. Dr. Virlei Álvaro de Oliveira

Goiânia, GO – Brasil
2009

JORGE CESAR DOS ANJOS ANTONINI

**“MODELAGEM MATEMÁTICA DA VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA
TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA E DO CICLO DO ALGODOEIRO
HERBÁCEO NO ESTADO DE GOIÁS”**

Tese DEFENDIDA e APROVADA em 14 de agosto de 2009, pela banca examinadora
constituída pelos membros:

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, em primeiro lugar, por ter me dado a capacidade de persistir na busca de novos conhecimentos e de estar sempre ao meu lado nas horas mais difíceis.

À Universidade Federal de Goiás, pela oportunidade de realizar este curso de Doutorado em Agronomia.

À Embrapa Cerrados, por ter proporcionado todo o apoio logístico e, em especial, à equipe do Laboratório de Biofísica Ambiental.

Ao Sistema de Meteorologia e Hidrologia do Estado de Goiás (SIMEHGO), por ter cedido, gentilmente, as séries históricas de dados de temperatura.

Ao Gerente Geral da Embrapa Transferência de Tecnologia, José Roberto Rodrigues Peres, pela viabilização das condições necessárias à realização deste trabalho.

Ao orientador deste trabalho, Professor Dr. Nori Paulo Griebeler, pela orientação e contribuições dadas.

Ao co-orientador Professor Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira, pela orientação dada neste trabalho e na minha formação profissional.

Ao co-orientador Professor Dr. Virlei Álvaro de Oliveira, pela orientação dada.

Um agradecimento especial ao co-orientador, Dr. Euzebio Medrado da Silva, pela dedicada orientação e pela amizade e confiança em mim depositada.

Ao pesquisador da Embrapa Arroz e Feijão, Mestre em Agronomia, Silvano Carlos da Silva e a Mestre em Informações Espaciais, Edneya Gomes da Silva Soares, por terem contribuído na realização deste trabalho.

Aos pesquisadores da Embrapa Cerrados, Dr. Edson Eyji Sano e Dr. Fernando Antônio Macena da Silva, pela contribuição e disponibilização de dados necessários ao desenvolvimento do trabalho.

Aos pesquisadores da Embrapa Cerrados, Heleno da Silva Bezerra e Balbino Antônio Evangelista, pelo apoio no Laboratório de Biofísica Ambiental.

Aos Engenheiros Agrônomos da Fundação GO, Davi L. Egídio Garcia e Marcio Antonio de Oliveira e Silva pela contribuição no levantamento de dados de lavouras.

Aos pesquisadores da Embrapa Algodão, Núcleo de Pesquisa do Cerrado, Alexandre Cunha de Barcelos Ferreira, Camilo Lelis Morello, José Ednilson Miranda e Maria da Conceição Santana Carvalho, pela disponibilização de dados referentes à cultura do algodoeiro no Estado de Goiás.

À minha esposa e filhas, que me incentivaram na realização deste trabalho.

Ao meu pai Ermenegildo (In Memoriam), à minha mãe
Jurema, aos meus irmãos, Inez (In Memoriam),
Getulio (In Memoriam), João e Paulo, à minha
esposa Ione, às minhas filhas Luciane,
Raquel e Ana Carolina e às netas e netos
Isadora, Eduarda, Maria Clara,
Eduardo e Pedro.

Dedico

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	7
LISTA DE TABELAS.....	8
RESUMO GERAL.....	9
GENERAL ABSTRACT.....	10
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 A CULTURA DO ALGODOEIRO HERBÁCEO.....	13
2.2 TEMPERATURA DO AR ATMOSFÉRICO.....	16
2.3 TEMPERATURA BASE.....	19
2.4 GRAUS-DIA E CICLO DE DESENVOLVIMENTO DA CULTURA.....	20
3 MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DO AR NO ESTADO DE GOIÁS.....	23
RESUMO.....	23
ABSTRACT.....	23
3.1 INTRODUÇÃO.....	24
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
3.4 CONCLUSÕES.....	34
4 MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA DA DURAÇÃO DO CICLO DO ALGODOEIRO PARA O ESTADO DE GOIÁS.....	35
RESUMO.....	35
ABSTRACT.....	35
4.1 INTRODUÇÃO.....	36
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.4 CONCLUSÕES.....	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
6 REFERÊNCIAS.....	49

LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1.** Localização das estações meteorológicas no Estado de Goiás e no Distrito Federal 25
- Figura 3.2.** 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) 32
- Figura 3.3.** 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) .. 33
- Figura 4.1.** Comparação entre os valores observados (GDo_i) e estimados (GDM_i) de graus-dia do algodoeiro e os correspondentes índices estatísticos de avaliação do ajuste (r^2 = coeficiente de determinação; r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de Willmott; e c = índice de desempenho) 44
- Figura 4.2.** Diagrama de dispersão dos valores de duração da fase de desenvolvimento do algodoeiro entre a emergência e 90% de capulhos abertos, observados nas lavouras comerciais (F_o) e estimados pelo modelo desenvolvido (F_e), e os índices estatísticos de avaliação (r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de Willmott; e c = índice de desempenho) 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.	Altitude, localização e período de observação das estações meteorológicas consideradas neste estudo (Estado de Goiás e Distrito Federal)	26
Tabela 3.2.	Critério de interpretação do índice de desempenho c e do coeficiente de correlação linear r	29
Tabela 3.3.	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	31
Tabela 4.1.	Localização geográfica das estações meteorológicas e período das observações dos dados de temperatura	38
Tabela 4.2.	Cultivares de algodoeiro, conduzidos em lavouras comerciais e duração do ciclo entre a emergência e 90% de capulhos abertos, no Estado de Goiás.....	41

RESUMO GERAL

ANTONINI, J. C. dos A. **Modelagem matemática da variação espaço-temporal da temperatura média diária e do ciclo do algodoeiro herbáceo no Estado de Goiás.** 2009. 57 f. Tese (Doutorado em Agronomia: Solo e Água)-Escola de Agronomia e Engenharia de alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009¹.

As condições climáticas regionais do Estado de Goiás são favoráveis ao cultivo do algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* hutch), contudo, para alcançar as melhores produtividades, é imprescindível que a semeadura e o período de frutificação coincidam com o período de maior disponibilidade de água no solo e os períodos de abertura dos capulhos e da colheita coincidam com o período seco. Assim, o conhecimento acerca do ciclo da cultura em função do local de cultivo, é muito importante na definição da melhor época de plantio. Nesse contexto, é a temperatura do ar, uma das variáveis climáticas, que mais influencia o desenvolvimento do algodoeiro. No entanto, a baixa densidade de estações meteorológicas com capacidade de medição da temperatura tem limitado os estudos de modelagem de estimativa do ciclo deste cultivo. Este trabalho foi conduzido com o objetivo de desenvolver e validar modelos matemáticos para estimar a temperatura média diária do ar e, com base na teoria de graus-dia, o ciclo do algodoeiro herbáceo no Estado de Goiás, considerando, simultaneamente, suas variações no espaço e no tempo. Ambos os modelos basearam-se em uma combinação linear da altitude, latitude, longitude e da variação temporal diária, representada pela série trigonométrica incompleta de Fourier. Os parâmetros dos modelos foram ajustados aos dados de 21 estações meteorológicas disponíveis no Estado de Goiás e Distrito Federal, por meio de regressão linear múltipla, com observações variando de 8 a 24 anos. No caso da modelagem de graus-dia, os dados de temperatura máxima e mínima ficaram restritos ao intervalo de 15°C a 40°C, cujos limites foram adotados como os valores de temperatura de base inferior e superior, respectivamente. O modelo de temperatura foi validado, considerando os dados observados de temperatura em estações localizadas em condições de altitudes diferentes: elevada (1100 m), média (554 m) e baixa (431 m). Os coeficientes de determinação resultantes do ajuste dos modelos aos dados de temperatura média diária ou aos de graus-dia foram 0,82 e 0,84, respectivamente. O desempenho do modelo foi mediano nas altitudes baixas e elevadas e muito bom nas altitudes médias. A validação do modelo de graus-dia foi feita comparando-se a duração observada do período entre a emergência e 90% de capulhos abertos de cultivares de algodoeiro, plantados em lavouras comerciais, resultando em um índice de desempenho de 0,85, classificado como muito bom. Os modelos desenvolvidos estimaram adequadamente a temperatura média diária do ar e a duração do ciclo dos cultivares de algodoeiro herbáceo no Estado de Goiás.

Palavras chave: *Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* hutch, graus-dia, série de Fourier, regressão linear múltipla.

¹ Orientador: Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler. EA-UFG.

Co-Orientadores: Dr. Euzébio Medrado da Silva. Embrapa Cerrados.

Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira. UFLA.

Prof. Dr. Virlei Álvaro de Oliveira. IBGE.

GENERAL ABSTRACT

ANTONINI, J. C. dos A. **Mathematical modeling of the spatio-temporal variation of the daily average temperature and of the herbaceous cotton cycle in the State of Goiás-Brazil.** 2009. 57 f. Thesis (Doctorate in Agronomy: Soil and Water)-Escola de Agronomia e Engenharia de alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009¹.

The regional climatic conditions in the State of Goiás – Brazil are favorable for herbaceous cotton (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch) cultivation. However, for achieving the best productivities, it is important that both the planting date and the fruiting period be matched with the adequate soil-water availability as well as that the period from open bull to harvesting be coincident with the dry period. Thus, the knowledge of cotton cycle as function of planting location is very important for choosing the optimum planting date. In this context, the air temperature is one of the climatic variables that mostly influence the cotton growth. Nevertheless, the low density of meteorological stations with capability for measuring temperature has restricted the modeling studies for estimating cotton cycle. This work was carried out with the objective of developing and validating mathematical models to estimate average daily air temperature and based on the degrees-day theory, the cycle of herbaceous cotton in the State of Goiás, considering altogether its variations in space and time. Both models were based on a linear combination of elevation, latitude, longitude, and the daily time variation, represented by an incomplete Fourier series. The parameter models were adjusted to the data from 21 meteorological stations available in the State of Goiás and Federal District of Brazil, using multiple linear regressions with observations varying from eight to twenty four years. In the case of modeling degrees-day, the maximum and minimum temperature data were limited between 15°C and 40°C, which were taken as the lower and upper threshold temperatures, respectively. The air-temperature model was validated against the measured data from three meteorological stations from different elevations: high (1100 m), medium (554 m) and low (431 m). The coefficients of determination obtained from fitting the models for both daily air-temperature and daily degrees-day were 0.82 and 0.84, respectively, resulting in a medium performance for both low and high altitudes and very good for intermediate altitudes. The validation of the degrees-day model was conducted by comparing the period duration running from crop emergence to 90% open bulls observed from cotton cultivars, cropped in commercial fields. The results showed an overall performance index of 0.85, which was considered as very good. The models developed in this study adequately estimated the average daily air temperature and the cycle of herbaceous cotton cultivars in the State of Goiás.

Key words: *Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch, degrees-day, Fourier series, multiple linear regression.

¹ Adviser: Prof. Dr. Nori Paulo Griebeler. EA-UFG.

Co-Advisers: Dr. Euzebio Medrado da Silva. Embrapa Cerrados.

Prof. Dr. Luiz Fernando Coutinho de Oliveira. UFLA.

Prof. Dr. Virlei Álvaro de Oliveira. IBGE.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cultura do algodoeiro herbáceo representa uma das dez maiores fontes de riquezas do setor agropecuário brasileiro e tem relevante importância econômica e social no Brasil. O total da área nacional, colhida em 2007, foi de 1,12 milhões de hectares com uma produção de 4,10 milhões de toneladas de algodão em caroço, resultando em um valor de produção de R\$ 3,95 bilhões. Neste mesmo ano, a área colhida de algodão no Estado de Goiás foi de 82,9 mil hectares, com produtividade de 3.581 kg.ha⁻¹ e valor de produção de R\$ 378,08 milhões, ocupando, assim, o quarto lugar na geração de riqueza em relação às principais culturas anuais do Estado.

A atividade de produção de algodão se caracteriza por uma oferta quase contínua de empregos durante praticamente o ano todo, em virtude da necessidade de atividades adicionais ao cultivo como a de destruição dos restos culturais, logo após a colheita, e, também, das vagas geradas nas usinas de beneficiamento. Com base na taxa média de ocupação de mão-de-obra para o cultivo do algodoeiro, estima-se que no Estado de Goiás, em 2007, essa atividade produtiva gerou, diretamente, em torno de dez mil empregos.

Na cotonicultura goiana a partir da safra 97/98, foram efetuados grandes investimentos na busca de novas tecnologias, na organização dos produtores e na geração de pesquisas. Esse esforço resultou em modernização do sistema de produção e de beneficiamento do algodão, bem como no desenvolvimento de cultivares adaptados às condições ambientais do Estado. No entanto, o preço de mercado, praticado atualmente, tem desestimulado essa atividade, o que tem pressionado ainda mais este setor agrícola na busca de maiores produtividades. Nos últimos dez anos, a produtividade do algodoeiro no Estado de Goiás cresceu 157%, sendo uma parcela significativa deste avanço atribuído principalmente ao melhoramento genético.

Apesar da oferta relativamente grande de cultivares de algodoeiro com potencial genético para altas produtividades, é imprescindível que a semeadura e o período de frutificação coincidam com o período de maior disponibilidade de água no solo. Além

disso, o período seco deve coincidir também com a abertura dos capulhos e com o momento da colheita para que o cultivar expresse seu potencial de produção e de qualidade de fibra. Em geral, o estabelecimento da melhor época de semeadura pode ser feito com a ajuda da técnica de zoneamento de risco climático que utiliza, conjuntamente, informações do solo, da planta e do clima. Nessa técnica, uma das informações requeridas, quanto às necessidades hídricas da planta, é a duração do ciclo de desenvolvimento da cultura que normalmente é baseado na quantidade de dias transcorridos após seu plantio ou emergência até uma determinada fase de seu desenvolvimento. No entanto, a duração do ciclo, avaliada pelo número de dias, varia de acordo com o local, ano e data de semeadura, em razão de estar associada às variações climáticas de cada local.

Uma alternativa para caracterizar o ciclo das culturas é a utilização de variáveis meteorológicas apropriadas que influenciam o crescimento e o desenvolvimento das plantas cultivadas, sendo que, nesse caso, a temperatura do ar é a que exerce maior influência nos processos fisiológicos da planta. Sua relação com o desenvolvimento da cultura pode ser feita por meio do uso da teoria de graus-dia, que se baseia na premissa de que a planta necessita de certa quantidade de energia, representada pela soma de graus-dia, para completar seu ciclo (constante térmica). Nessa associação, admite-se que existe uma relação linear entre o acréscimo de temperatura e o desenvolvimento vegetal. No entanto, a rede de estações meteorológicas no Estado de Goiás é ainda insuficiente para uma adequada caracterização térmica dos locais com potencial de cultivo do algodoeiro. Essa deficiência de dados de temperatura pode ser suprida, adequadamente, por meio da modelagem.

Tendo em vista esse contexto, este trabalho foi conduzido com o objetivo de desenvolver e validar modelos matemáticos para estimar a temperatura média diária do ar e, com base na teoria de graus-dia, o ciclo do algodoeiro herbáceo no Estado de Goiás, considerando, simultaneamente, suas variações no espaço e no tempo.

Para atingir o objetivo proposto, essa tese foi dividida em duas fases acomodadas em dois capítulos. No primeiro capítulo, foi realizado um estudo de modelagem da temperatura média diária do ar, em função do espaço e do tempo, considerando conjuntamente essas variações. No segundo capítulo, foi realizado também um estudo de modelagem para estimar, com base na teoria de graus-dia, o ciclo dos cultivares de algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* hutch), no Estado de Goiás, em função do local de cultivo e da época de semeadura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nos estudos de modelagem, envolvidos nessa tese, foram destacados alguns tópicos, considerados essenciais na revisão bibliográfica, para contextualizar adequadamente o estado da arte dessa pesquisa. Os tópicos selecionados foram os seguintes: principais aspectos agronômicos da cultura do algodoeiro herbáceo; a variação diária da temperatura do ar atmosférico e seu potencial de modelagem; os limites inferiores e superiores da temperatura do ar atmosférico que mais favorecem o desenvolvimento do algodoeiro herbáceo, conhecidos como temperatura base; e a teoria dos graus-dia e seu potencial de modelagem na estimativa do ciclo de cultivares do algodoeiro.

2.1 A CULTURA DO ALGODOEIRO HERBÁCEO

O algodoeiro é uma planta de origem tropical, classificada como uma dicotiledônea pertencente à ordem das Malvales, à família das Malvaceae, ao tribo Hibisceae e ao gênero *Gossypium*. Este gênero é bastante variado e inclui aproximadamente cinquenta espécies distribuídas em regiões áridas e semi-áridas dos trópicos e subtropicais (Wendel & Cronn, 2003). São conhecidas quatro espécies de algodoeiros cultivados: *Gossypium arboreum*, *Gossypium herbaceum*, *Gossypium hirsutum* e *Gossypium barbadense*. As duas primeiras são conhecidas como algodoeiro do velho mundo e as outras duas conhecidas como algodoeiro do novo mundo (Fuzatto, 1999). Cerca de 90% da produção mundial de algodão são devida à espécie *Gossypium hirsutum*, conhecida como algodoeiro de terras altas, com distribuição, praticamente, em todos os países produtores. No Brasil, esta espécie representa quase a totalidade do algodoeiro cultivado comercialmente, em especial os cultivares de algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* hutch) (Beltrão & Souza, 1999).

O cultivo do algodoeiro herbáceo, no Brasil, iniciou-se em 1860, mas consolidou-se a partir do início da década de 1930, em razão de ter sido a cultura alternativa para a crise na produção do café, marcando a época do grande crescimento da cotonicultura no Estado de São Paulo e elevando o Brasil à condição de importante

exportador de pluma (Coelho, 2004). Contudo, em razão de políticas de exportação e importação adotadas pelo Governo Federal, aliadas aos problemas de infestações de pragas em regiões tradicionais de cultivo e perda de competitividade frente à pluma importada, o cultivo do algodoeiro sofreu decréscimo expressivo em área e produção, levando o país a passar da condição de exportador para importador de fibra na década de 1990 (Nogueira Júnior & Barbosa, 2005).

A partir da segunda metade da década de 1990, começou a recuperação da atividade algodoeira no Brasil, com a produção nacional deslocando-se das Regiões tradicionais de cultivo para a Região dos Cerrados, estabelecendo-se nos Estados de Mato Grosso, Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais (Alves, 2006).

Atualmente, a cultura do algodoeiro herbáceo tem relevante importância econômica e social no Brasil, estando entre as dez maiores fontes de riquezas do setor agropecuário brasileiro. O total da área colhida em 2007 foi de 1,12 milhões de hectares com produtividade média de $3.659 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, resultando numa produção de 4,10 milhões de toneladas de algodão em caroço e um valor de produção de R\$ 3,95 bilhões. Neste mesmo ano, a área colhida pelo Estado de Goiás foi de 82,9 mil hectares, com produtividade de $3.581 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e valor da produção de R\$ 378,08 milhões, ocupando, assim, o terceiro lugar na classificação da produção nacional (IBGE, 2008).

Apesar de ser uma cultura totalmente mecanizada em todas as etapas da produção, ela apresenta a vantagem de favorecer a oferta de empregos durante praticamente o ano todo, motivada pela necessidade da incorporação dos restos culturais, logo após a colheita, e também das vagas geradas nas usinas de beneficiamento. Considerando que, em média, a demanda de mão-de-obra para o cultivo do algodoeiro é de 0,13 homens-dia por hectare (Balsadi & Borin, 2006; FACUAL, 2008), estima-se que, no Estado de Goiás, em 2007, esta atividade gerou diretamente, em torno de dez mil empregos.

Na cadeia do agronegócio, a produção do algodoeiro acaba gerando ainda mais empregos indiretos pela utilização dos seus vários produtos. A fibra que é o principal produto do algodoeiro é utilizada em diversas aplicações da indústria têxtil. O linter e o óleo extraído durante o processo de beneficiamento da semente, são utilizados na indústria para diversos fins, entre eles a fabricação de papel, algodão hidrófilo, filtros e explosivos. A semente, que é rica em óleo (14% a 25%) e proteína bruta (20% a 25%), é utilizada na indústria de alimentos. O óleo é utilizado tanto na alimentação humana como na fabricação

de sabão e margarina. O bagaço, subproduto da extração do óleo, é empregado na alimentação animal, devido ao alto valor protéico, contendo cerca de 40% a 45% de proteína (Beltrão, 1999; Caminha, 2000).

Para o cultivo do algodoeiro, foram desenvolvidos cultivares com variadas características agronômicas, adaptadas às diferentes condições de clima e solo do Estado de Goiás. Em relação ao ciclo de desenvolvimento, os cultivares mais utilizados são os de ciclo médio e tardio, com produtividades de 3.925 kg.ha⁻¹ e 4.547 kg.ha⁻¹ de algodão em caroço, respectivamente, obtidas em ensaios experimentais (Freire et al., 2004a; Freire et al., 2004b). No cerrado do Centro-Oeste, em condições de sequeiro, o ciclo dos cultivares precoces varia de 100 a 120 dias, enquanto o dos ciclos considerados médios varia de 131 a 160 dias e o dos ciclos tardios de 161 dias a 180 dias (Morello et al., 2006). No entanto, quando cultivado em altitudes acima de mil metros, o ciclo pode ser alongado em 30 dias ou mais (Fusatto et al., 2005). Por outro lado o ciclo pode ser abreviado com a aplicação de reguladores de crescimento, aumentando a precocidade e a eficiência da colheita. (Kerby et al., 1985; Cia et al., 1996; Nagashima, 2005). Em casos de extrema deficiência hídrica ou distribuição irregular das precipitações, o ciclo do algodoeiro é, também, abreviado (Ferry et al., 1967; Santos et al., 2006). O algodoeiro suporta níveis baixos de disponibilidade de água no solo, podendo se desenvolver, normalmente, até atingir um esgotamento de 85% da água disponível no solo (Guerra et al., 2002). Em condições normais, o ciclo do algodoeiro pode ser dividido em cinco fases: a primeira fase compreende do plantio à emergência, variando de quatro a nove dias; a segunda fase, da emergência ao aparecimento do primeiro botão floral, variando de vinte e sete a trinta e oito dias; a terceira fase, do aparecimento do primeiro botão floral ao aparecimento da primeira flor, variando de vinte a vinte e cinco dias; a quarta fase, do aparecimento da primeira flor ao primeiro capulho, variando de quarenta e cinco a sessenta e seis dias; e finalmente, a quinta fase, do aparecimento do primeiro capulho até a abertura completa das maçãs, variando de vinte e quatro a quarenta e dois dias (Rosolem, 2001).

As condições ambientais de clima, solo e localização geográfica influem na produção do algodoeiro, tanto no aspecto quantitativo como qualitativo e, em condições naturais, as plantas exteriorizam seu potencial produtivo quando esses fatores entram em equilíbrio ecológico. Fatores climáticos como chuva, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e intensidade de luz, interferem na cultura do algodoeiro, de modo que o plantio deve ser feito no período mais propício ao início do cultivo, quando os fatores

climáticos forem menos desfavoráveis (Beltrão et al., 2007). Plantios tardios aumentam o número de dias para abertura dos primeiros capulhos devido a temperaturas mais baixas, causando retardamento no desenvolvimento da cultura e atraso do ponto de colheita (Gridi-Papp et al., 1985).

Em trabalhos de pesquisa realizados no Estado de Goiás, as épocas de plantio, efetuadas na primeira e segunda quinzena de novembro, foram as que apresentaram maiores produtividades e percentagens de fibra e de finura (Medeiros et al., 2001). Os mesmos autores observaram, ainda, que houve uma clara tendência de redução destes índices, à medida que se retardou a época de plantio. Freire & Morello (2003) relataram que a segunda quinzena de dezembro e a primeira de janeiro são indicadas de maneira marginal, pois o plantio entre primeiro de novembro a quinze de dezembro é recomendado para o melhor controle do ataque de bicudo (*Anthonomus grandis*).

O algodoeiro herbáceo requer bastante calor e disponibilidade de água no solo para completar seu ciclo vegetativo, mas o final do ciclo deve coincidir com o período seco a fim de possibilitar a perfeita secagem do fruto e sua deiscência (Amorim Neto et al., 2001). Um dos fatores climáticos que mais interfere no crescimento e no desenvolvimento do algodoeiro é a temperatura, por afetar significativamente a fenologia, expansão foliar, alongação dos internos, produção de biomassa e a partição de assimilados em diferentes partes da planta (Reddy et al., 1991; Larcher, 2000). Noites frias ou temperaturas diurnas baixas restringem o crescimento das plantas, levando à emissão de poucos ramos frutíferos, por isso, recomenda-se que a semeadura seja feita em regiões ou épocas em que as temperaturas fiquem entre 18°C e 30°C, nunca ultrapassando os limites, inferior de 14°C e superior de 40°C (Doorenbos & Kassam, 1979). No estágio de frutificação e maturação, temperaturas médias inferiores a 20°C paralisam o desenvolvimento e o crescimento das maçãs e reduzem o comprimento e outras características intrínsecas da fibra (Beltrão et al., 2007).

2.2 TEMPERATURA DO AR ATMOSFÉRICO

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, esta defasagem é de duas horas a dois metros 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 deste resfriamento e atinge seu menor valor antes do nascer do sol (Vianello & Alves, 1991).

A variação anual da temperatura do ar, em um determinado local, ocorre devido ao movimento de translação da Terra, processo este que se repete, de uma forma cíclica ou periódica de um ano para outro. Esta 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 distribuição dos oceanos (Pereira et al., 2002).

O monitoramento da temperatura do ar é feito nas estações meteorológicas convencionais ou automáticas, em suas diversas modalidades (máximas, mínimas 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 desta grandeza termodinâmica pode ser feita com base na altitude, latitude e longitude (Pinto et al., 1972; Coelho et al., 1973; Pinto & Alfonsi, 1974; Almeida & Sá, 1984; Marin et al., 2003).

O ajuste de séries históricas de dados 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 & 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 co-senos (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 primeiro dois harmônicos, para estimar a temperatura do ar em qualquer hora do dia, nas superfícies de terrenos montanhosos. 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.

2.3 TEMPERATURA BASE

Todos os processos fisiológicos e funções de seres vivos ocorrem dentro de determinados limites térmicos no ambiente em que eles se desenvolvem (Lozada & Angelocci, 1999). O desenvolvimento de uma planta é nulo ou muito reduzido, quando a temperatura cai abaixo de um valor mínimo (temperatura base inferior) ou excede a um valor máximo (temperatura base superior), mesmo tendo condições favoráveis de radiação solar (Fox Jr. et al., 1992). Entre estes limites, existe um ótimo de temperatura no qual o crescimento se dá com maior rapidez. Esses três valores são conhecidos como temperaturas cardeais (Ometto, 1981), as quais variam em função da espécie, cultivar e fases fenológicas da planta (Wutke et al., 2000), apesar de, comumente, ser adotado uma única temperatura base, superior ou inferior, para todo o ciclo da planta (Prett, 1992).

Para a determinação da temperatura base inferior, tem-se utilizado, praticamente, quatro métodos: menor desvio-padrão em graus-dia; menor desvio-padrão em dias; coeficiente de variação em graus-dia, e coeficiente de regressão (Yang et al., 1995; Barbano et al., 2001; Lima & Silva, 2008). A complexidade fisiológica da planta impede a determinação precisa desta temperatura. Além das aproximações contidas nestas formas de cálculo, pode existir, ainda, diferença entre a temperatura base fisiológica e a obtida por estes métodos estatísticos (Lozada & Angelocci, 1999). Contudo, a temperatura base inferior tem sido determinada com a aplicação destes métodos para várias espécies vegetais como: algodão (Bolonhezi, 2000), milho (Barbano et al., 2001), triticale (Pedro Júnior et al., 2004), batata (Paula et al., 2005) e melancia (Trentin et al., 2008).

Os trabalhos realizados para determinação da temperatura base inferior do algodoeiro demonstram que não existe concordância nos resultados obtidos. Este fato pode ser constatado nas determinações feitas em diferentes locais, utilizando o método do menor desvio-padrão em dias: McMahon & Low (1972), na Austrália, obtiveram valores de 9,72°C. Morey et al. (1984), na Índia, encontraram o valor de 19°C e Bolonhezi et al. (1997), no Brasil, estudando o comportamento de três cultivares de ciclo longo, médio e precoce, encontraram valores de 12°C, 13°C e 14°C, respectivamente. Apesar desta variação, vários trabalhos utilizam o valor de 15°C para a temperatura base inferior (Damario & Pascale, 1983; Peng et al., 1989; Abaye et al., 1998; Oosterhuis, 1998; Rosolem, 2001; Silva et al., 2005).

Quanto à temperatura base superior, as informações encontradas na literatura também apresentam valores diferenciados. Kerby et al. (1985) mencionaram que, no Novo México (EUA), utiliza-se, para determinar a soma térmica requerida para o algodoeiro, à faixa de temperatura entre 12,8°C e 32°C e que os modelos utilizados para a estimativa do crescimento desta cultura, na Califórnia (EUA), adotam o intervalo de temperatura entre 15,6°C e 47,8°C. Gonçalves et al. (1999) estimaram, no Estado do Paraná, a duração da fase de desenvolvimento do algodoeiro da emergência à colheita, através do conceito de graus-dia acumulados entre 12,7°C e 37°C. Jost & Brown (2003) relataram que o crescimento e desenvolvimento do algodoeiro abaixo de 15°C e acima de 32°C são insignificantes e, portanto, consideram estes valores, respectivamente, como limite inferior e superior de temperatura para o desenvolvimento do algodoeiro. Em geral, no Brasil, utiliza-se, para o algodoeiro, a temperatura base inferior de 15°C e temperatura base superior de 40°C, admitindo-se que abaixo e acima destes valores, respectivamente, o desenvolvimento do algodoeiro é nulo ou muito lento (Viator et al., 2005; Lima & Silva, 2008; Beltrão et al., 2007).

2.4 GRAUS-DIA E CICLO DE DESENVOLVIMENTO DA CULTURA

A duração do ciclo de uma cultura depende, basicamente, da espécie, do cultivar, da fertilidade do solo, da incidência de pragas e das condições climáticas (Azevedo et al., 1999). Entre os elementos climáticos, a temperatura do ar é um dos mais importantes. Existem vários métodos que relacionam o grau de desenvolvimento de uma cultura com a temperatura do ar, sendo o mais empregado o de graus-dia ou unidades térmicas (Lozada & Angelocci, 1999; Lima & Silva, 2008).

Graus-dia é definido como o acúmulo diário da energia que se situa acima da condição de temperatura mínima e abaixo da máxima, exigida pela planta (Ometto, 1981). A energia acumulada nesse intervalo de temperatura (acúmulo de graus-dia ou soma térmica) é utilizada pela planta no desenvolvimento das diferentes fases fenológicas.

Os estudos relacionados às interações clima-planta foram iniciados por Reaumur, na França, por volta de 1735 (Pereira et al., 2002). Eles observaram, em diferentes anos, que o somatório das temperaturas do ar durante o ciclo de várias espécies era praticamente constante. Neste método, a unidade de graus-dia era definida como a temperatura média do dia e a “constante térmica” ou quantidade de graus-dia requerida pela cultura, para completar o seu ciclo vegetativo, era calculada a partir da soma das

temperaturas médias diárias acima de 0°C, admitindo-se, desta forma, que todas as plantas se desenvolviam, normalmente, a partir desta temperatura. Esse método foi denominado de método direto e apresentava o inconveniente de variar o valor da constante térmica da planta, segundo as localidades consideradas. Para superar este problema, foi desenvolvido o método residual (Arnold, 1959), que consiste no somatório das diferenças entre os valores da temperatura média diária do ar e a temperatura base inferior da cultura considerada.

Devido à redução das taxas de crescimento da planta associadas com baixas e altas temperaturas, foram propostos vários ajustes para o método residual (Ometto, 1981; Snyder, 1985; Dufault, 1997). O ajuste é feito quando as temperaturas mínimas ou máximas registradas nas estações meteorológicas forem inferiores ou superiores, respectivamente, à temperatura base inferior ou superior da planta considerada. Segundo Silva et al. (2007), o ajuste pode ser feito assumindo, como valor limite das temperaturas mínimas e máximas registradas, os valores das temperaturas base inferior e superior da cultura considerada, respectivamente.

Trabalhos como os de Gadioli et al. (2000), Silva et al. (2001), Melo et al. (2006) têm demonstrado a grande utilidade do uso de graus-dia que, ao se acumularem, podem ser especificados como de desenvolvimento, para previsão das fases fenológicas. Segundo Pereira et al. (2002), esta forma de “quantificar” as fases fenológicas da planta tem como característica o fato de que a quantidade de graus-dia requerida pela cultura (constante térmica), para completar uma determinada fase de seu desenvolvimento, independe da época e do local do plantio.

Assim, conhecendo a constante térmica do ciclo total ou das respectivas fases fenológicas da cultura e as temperaturas diárias, máxima e mínima esperadas, é possível prever a duração do ciclo em diferentes ambientes, proporcionando maior precisão em relação ao uso do calendário diário, no planejamento da época de semeadura (Gadioli et al., 2000; Calve et al., 2005). Segundo Ometto (1981), depois de realizado o cálculo das constantes térmicas por um ou dois anos, obtém-se precisão suficiente para que, acompanhando a marcha dos valores dos graus-dia, seja possível prever a data da maturação (colheita) de qualquer cultura.

São poucos os trabalhos, realizados no Brasil, a respeito da determinação das constantes térmicas para os cultivares de algodoeiro e a comparação entre os resultados obtidos é prejudicada pelo fato dos trabalhos disponíveis utilizarem diferentes valores de

temperaturas base inferior na sua determinação. Os cultivares utilizados nos Estados Unidos, quando se utiliza no cálculo da constante térmica o valor de temperatura base inferior de 15°C acumulam entre 1575°C a 1675°C na fase da emergência à abertura do primeiro capulho (Oosterhuis, 1998). No Brasil, considerando a mesma fase e temperatura base, os cultivares ITA 90 e BRS Antares acumulam 1287°C (Rosolem, 2001) e, usando-se a temperatura base inferior de 13°C, 12°C e 15°C, os cultivares IAC 22, CNPA Acala 1 e CNPA Precoce 2 acumulam, respectivamente, 1364°C, 1539°C e 1085°C (Bolonhezi, 2000). Utilizando-se a temperatura base inferior de 12,7°C, o algodoeiro herbáceo, em geral, necessita acumular 1650°C para completar o ciclo (Gonçalves et al., 1999).

3 MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA MÉDIA DIÁRIA DO AR NO ESTADO DE GOIÁS

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 (1100 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 altitude baixa e elevada e muito bom para altitude média.

Palavras chave: modelagem climática, regressão linear múltipla, série de Fourier.

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, utilizing 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 (1100 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.

Key words: climatic modeling, multiple linear regression, Fourier series.

3.1 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; Benevides 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.

O monitoramento da temperatura do ar é feito diariamente nas estações meteorológicas convencionais ou automáticas. No entanto, quando a rede de estações meteorológicas é insuficiente para permitir a caracterização térmica da região, a temperatura do ar pode ser estimada por equação de regressão múltipla, com base na altitude, latitude e longitude (Coelho et al., 1973; Pinto & Alfonsi, 1974; Feitoza et al., 1979; Almeida & Sá, 1984; Camargo & Ghizzi, 1991; Luiz & Silva, 1995; Sediya et al., 1998; Cargnelutti Filho et al., 2006).

A estimativa da temperatura média mensal, em função da altitude, longitude e latitude, com uso de modelos lineares, tem sido feita com aceitável grau de precisão (Medeiros et al., 2005; Stahl et al., 2006). Citam-se como exemplos os trabalhos de Lima & Ribeiro (1998) no Estado do Piauí; Ferreira et al. (2006) em Minas Gerais e Pará; Pezzopane et al. (2004) no Espírito Santo; Oliveira Neto et al. (2002) na área situada entre 16° e 24°S e entre 48° e 60°W; Cargnelutti Filho et al. (2008) no Rio Grande do Sul, para estimar as temperaturas média e máxima na escala decenal; Antonié et al. (2001) na República da Croácia, utilizando redes neurais.

A temperatura média diária do ar varia continuamente ao longo do ano e apresenta uma nítida sazonalidade. Para o estudo de séries temporais que apresentam variações periódicas ou sazonais, pode-se recorrer à análise harmônica por séries de Fourier para o desenvolvimento de modelos de estimativa (Carvalho et al., 2005).

Os modelos propostos, encontrados na literatura, para a estimativa da temperatura do ar, foram desenvolvidos com uso de variáveis espaciais ou temporais, separadamente. No entanto, para aplicação no zoneamento agrícola de risco climático (Assad et al., 2001)

há necessidade de modelos matemáticos de simples utilização que utilizem simultaneamente, variáveis espaciais e temporais.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo matemático de estimativa da temperatura média diária do ar no Estado de Goiás, que considera, simultaneamente, as variações espaciais e temporais.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Estado de Goiás, localizado entre $12^{\circ} 00' 00''\text{S}$ e $19^{\circ} 45' 44''\text{S}$ e $45^{\circ} 45' 32''\text{W}$ e $53^{\circ} 30' 00''\text{W}$. 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 3.1).

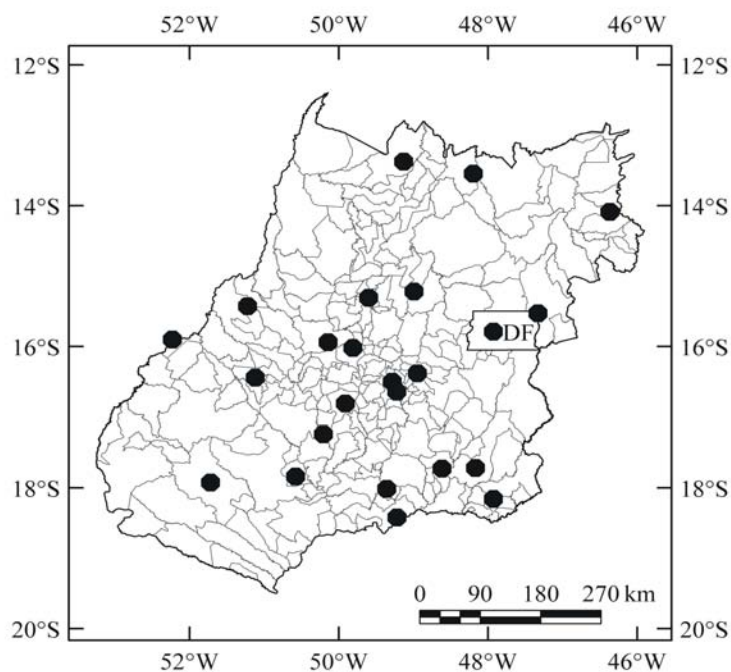


Figura 3.1. Localização das estações meteorológicas no Estado de Goiás e no Distrito Federal.

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 3.1).

Tabela 3.1. 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
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 observação (Martin et al., 2008). As séries históricas de dados oficiais de temperatura do ar, disponíveis no Estado de Goiás, com densidade aceitável, não atingem este 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, para cada dia do ano ($T_{o;ip}$) do período de observação das séries históricas consideradas. Como variáveis independentes, utilizou-se a altitude (Alt), a latitude (Lat), a longitude (Long) e a seqüência dos dias do ano (t_i). O modelo foi desenvolvido por meio de uma combinação linear da Alt, Lat e Long com a série trigonométrica de Fourier incompleta com os três primeiros harmônicos:

$$Tm_i = \beta_0 + \beta_1 \text{Alt} + \beta_2 \text{Lat} + \beta_3 \text{Long} + \sum_{n=1}^3 [a_n \cos(nwt_i) + b_n \text{sen}(nwt_i)] \quad (1)$$

em que, Tm_i é a temperatura média do ar do dia i ($^{\circ}\text{C}$); 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; e w é a frequência angular fundamental igual a $2\pi/365$.

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

Para ajustar o modelo proposto, foram utilizados os valores diários de temperatura máxima e mínima do ar, de períodos não uniformizados, com, no mínimo, oito anos de observações de séries históricas das primeiras 21 estações meteorológicas listadas na Tabela 3.1. Portando o modelo ajustado se aplica somente ao Estado de Goiás, dentro dos limites de altitude de 284 e 1.161 metro, em função do menor e maior valor de altitude das estações meteorológicas estudadas.

A consistência dos dados e o preenchimento de falhas nas 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 seqüência 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:

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

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 $T_{o_{ip}}$ ($^{\circ}\text{C}$) 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 determinação dos coeficientes do modelo pela análise de regressão linear múltipla. O grau de ajuste do modelo foi avaliado pelo coeficiente de determinação e a verificação da significância dos coeficientes pelo teste de t de Student a 5% de probabilidade de erro.

Para avaliar o grau de desvio do modelo, em relação à linha 1:1, foi utilizado o recurso da regressão linear simples aplicado aos pares de valores estimados (eq. 1) e observados. A quantificação das diferenças entre os valores de temperatura média diária do ar, estimados pelo modelo (eq. 1), e observados, nas estações meteorológicas estudadas, foi feita aplicando-se os seguintes índices estatísticos: 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:

$$\text{MBE} = \sum_{i=1}^N (T_{m_i} - T_{o_{ip}}) / N \quad (3)$$

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

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (T_{m_i} - T_{o_{ip}})^2 / N} \quad (5)$$

$$\text{MAE} = \sum_{i=1}^N (|T_{m_i} - T_{o_{ip}}|) / N \quad (6)$$

Para o teste do modelo, foram feitas comparações entre a temperatura média diária observada e a estimada com o modelo ajustado (eq. 1), 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 (1100 m de altitude), Jandaia (554 m de altitude) e Minaçu (431 m de altitude), respectivamente (Tabela 3.1).

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:

$$r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Tm_i - To_{ipm})^2}{[\sum_{i=1}^N (Tm_i - To_{ipm})^2 + \sum_{i=1}^N (To_{ip} - Tm_i)^2]}} \quad (7)$$

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 ($^{\circ}C$).

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

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Tm_i - To_{ip})^2}{\sum_{i=1}^N (|Tm_i - To_{ipm}| + |To_{ip} - To_{ipm}|)^2} \right] \quad (8)$$

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 & Sentelha (1997), respectivamente (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. 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 & Sentelha (1997); Santos (2007).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ajuste do modelo (eq. 1) feito por meio de análise de regressão linear múltipla, resultou em 10 coeficientes significativos ($\beta_0 = 39,862522$; $\beta_1 = -0,007314$; $\beta_2 = -0,185049$; $\beta_3 = -0,144706$; $a_1 = 1,448522$; $a_2 = -1,182537$; $a_3 = 0,223580$; $b_1 = -0,407352$; $b_2 = 0,119402$; $b_3 = 0,099942$), com valores de p-valor próximos de zero, o que indica que os componentes são todos necessários para representar a variação espaço-temporal da temperatura média diária do ar (Tm_i) no Estado de Goiás. Ao desenvolver equações para a estimativa da temperatura média mensal dos Estados de Minas Gerais e Pará, Ferreira et al. (2006) consideraram apenas variáveis espaciais: altitude, latitude e longitude e, também, obtiveram todos os coeficientes dessas variáveis significativos.

Cada componente, de um modelo linear, contribui para o resultado na proporção da magnitude dos valores de seu coeficiente. Por exemplo, no caso da componente altitude, o coeficiente β_1 indica que a Tm_i decresce $0,73^\circ\text{C}$ para cada cem metros de variação positiva em altitude. Este 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, $0,98^\circ\text{C}$ e $0,40^\circ\text{C}$ de decréscimo, para cada cem metros de variação positiva em altitude, respectivamente e não difere muito do valor médio de $0,62^\circ\text{C}$, 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 β_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 desenvolver 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 $0,14^\circ\text{C}$ para cada aumento de 1° de longitude, comportamento este, também, observado por Lima & 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 3.3). Assim, 18% da variabilidade de Tm_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). Este 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°

Tabela 3.3. 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 ⁽¹⁾	Ajuste modelo	Condição de altitude		
			Elevada	Média	Baixa
Média dos erros (°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 (°C)	RMSE	0,92	1,12	0,22	0,43
Erros médio absoluto (°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 °C (%)	-	90,97	65,48	86,03	80,82
Média dos valores observados (°C)	$T_{o_{ipm}}$	24,82	22,85	25,05	26,64
Média dos valores estimados (°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

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 (eq. 1) e os observados nas séries históricas, verificaram-se que a magnitude do erro médio absoluto foi apenas de 0,71°C. Esse valor abrange 58,9% das 7665 diferenças observadas. Dessas diferenças 74,4% são menores do que 1,0°C e 90,7% são menores do que 1,5°C.

O grau de correlação entre os valores estimados e observados dá uma idéia 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 um 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 3.2), a variância dos erros, foi de apenas 0,85 (Tabela 3.3), o que indica que a dispersão média dos dados foi menor do que 1°C. A aplicação do modelo no ajuste aos dados espaciais 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.

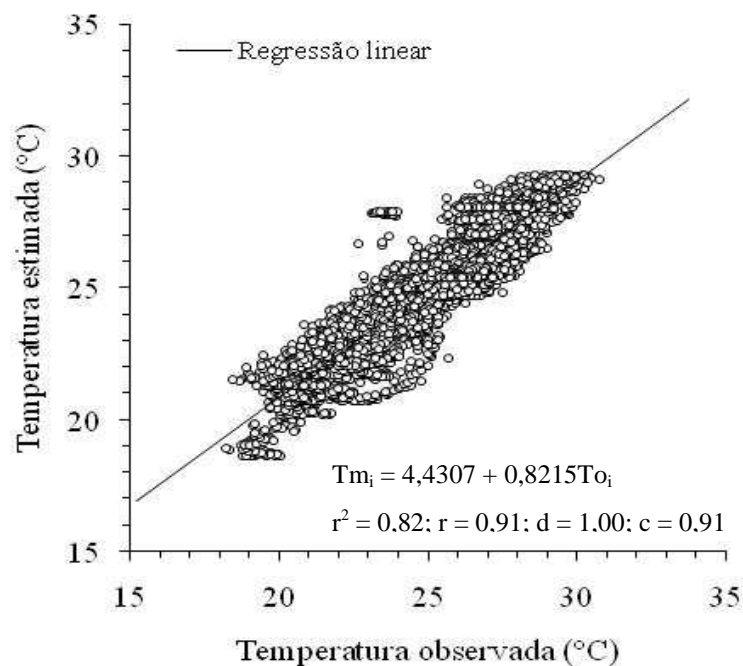


Figura 3.2. Diagrama de dispersão dos 7665 valores de temperatura média diária do ar, observados (To_i) e estimados (Tm_i) pelo modelo proposto e os correspondentes índices estatísticos de avaliação do ajuste (d = coeficiente de Willmott; r = coeficiente de correlação de Pearson; e c = índice de desempenho)

O modelo descreveu bem o curso anual de variação da temperatura média diária do ar das três estações meteorológicas de altitudes diferentes (Figuras 3.3 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 3.3 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 3.3 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. Foram utilizados dados de apenas uma estação de altitude elevada, o que limita a capacidade de o modelo de estimar valores mais próximos dessa realidade.

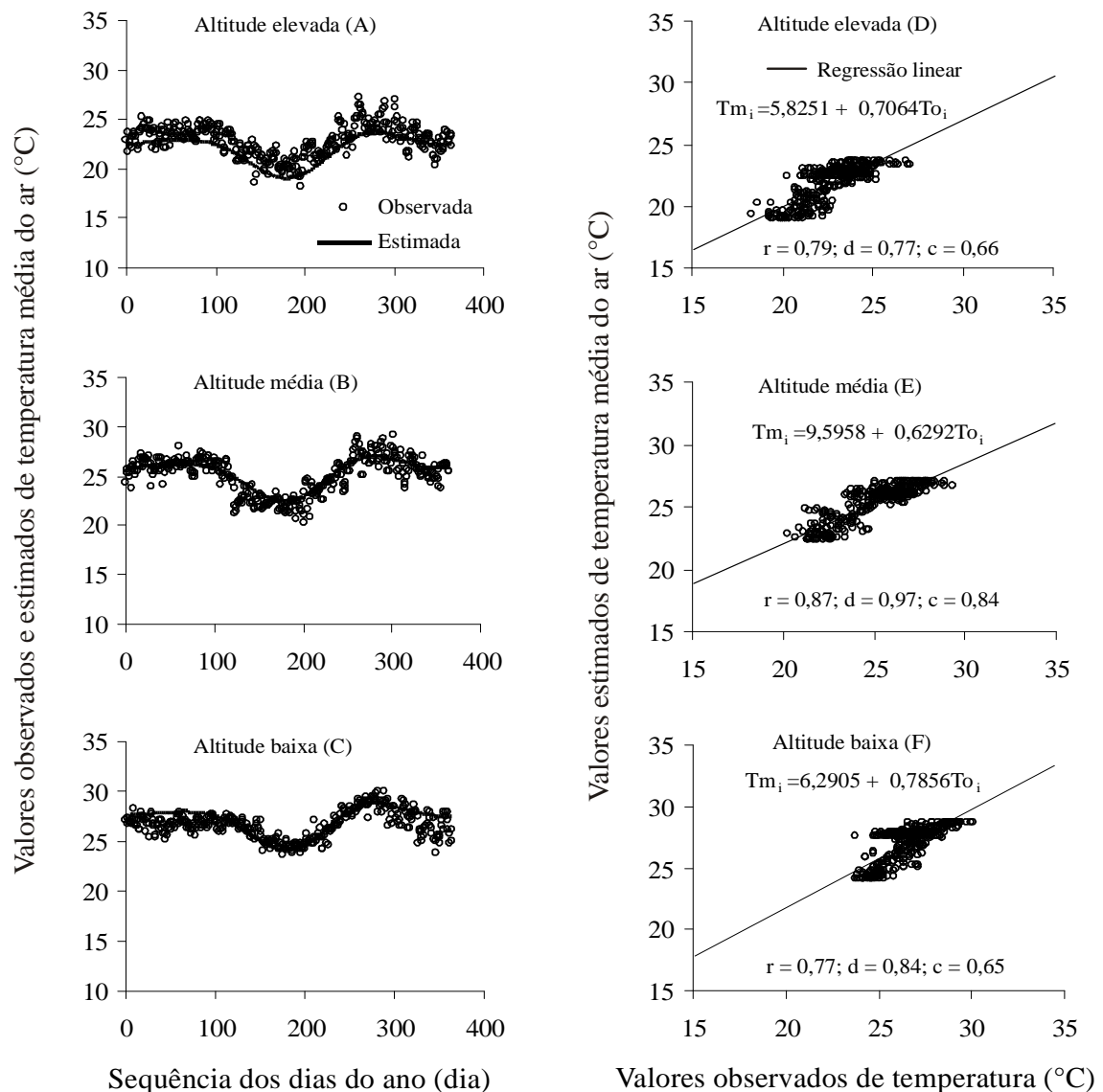


Figura 3.3. Variação anual da temperatura média diária do ar (A, B, C) e os respectivos diagramas de dispersão (D, E, F) dos valores observados (T_{o_i}) e estimados (T_{m_i}), nas estações meteorológicas de altitudes elevada, média e baixa e os correspondentes índices estatísticos de avaliação do modelo desenvolvido (r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de Willmott; c = índice de desempenho).

3.4 CONCLUSÕES

1. 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.

2. 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 (1100 m) e desempenho muito bom para as altitudes médias (554 m).

4 MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA DA DURAÇÃO DO CICLO DO ALGODOEIRO PARA O ESTADO DE GOIÁS

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar um modelo matemático para estimar a duração do ciclo do algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch) no Estado de Goiás, aplicando-se a teoria de graus-dia (GD) e considerando sua variação espaço-temporal. O modelo foi desenvolvido por meio de uma combinação linear entre altitude, latitude, longitude e a variação temporal diária representada pela série trigonométrica, incompleta, de Fourier. Os parâmetros do modelo foram ajustados com regressão linear múltipla aos dados de GD para o algodoeiro, acumulados entre 15°C e 40°C. Os dados utilizados de temperatura máxima e mínima foram obtidos de séries históricas de 21 estações meteorológicas, com observações variando de oito a vinte e quatro anos. A validação do modelo foi feita comparando-se a duração da fase entre a emergência e 90% de capulhos abertos de cultivares de algodoeiro, plantados em lavouras comerciais. O coeficiente de determinação resultante do ajuste do modelo aos dados observados foi de 0,84. Os resultados da validação mostraram que o modelo proposto teve um desempenho muito bom, conforme indicado pelo índice de desempenho de 0,85, resultante do produto do coeficiente de correlação de Pearson de 0,90 e do índice de concordância de Willmott de 0,94.

Palavras chave: graus-dia, temperatura base, requerimento térmico, série de Fourier.

MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING THE DURATION OF THE COTTON CYCLE IN THE STATE OF GOIÁS, BRAZIL

ABSTRACT

The objective of this work was to develop and validate a mathematical model to estimate the duration of cotton (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch) cycle in the State of Goiás, Brazil, by applying the theory of growing degree-days (GD), and considering, simultaneously, its spatio-temporal variation. The model was developed as a linear combination of altitude, latitude, longitude, and daily temporal variation represented by incomplete, Fourier series. The model parameters were adjusted by using multiple linear regression to the cotton's GD data, accumulated between 15°C and 40°C. The minimum and maximum temperature records were obtained from 21 meteorological stations, with time series varying from 8 to 20 years. The validation of the model was done comparing the duration of the cycle between emergency and 90% of bolls opened, planted in commercial crop fields. The coefficient of determination resulted from the adjustment of the model to the observed data was 0.84. The results of the validation showed that the

proposed model presented a very good performance, as indicated by the performance index of 0.85, derived from the product between Pearson correlation coefficient of 0.90 and Willmott agreement index of 0.95.

Key words: degree-days, base temperature, thermal requirement, Fourier series.

4.1 INTRODUÇÃO

A cotonicultura brasileira convive com custos elevados de produção e preços baixos no mercado. Nesse contexto de risco, o ponto de equilíbrio tem sido o aumento constante da produtividade (Almeida, 2006; IBGE, 2008). Entretanto, para que o algodoeiro expresse o seu potencial em termos de produção e qualidade de fibra, é necessário que sua semeadura seja feita quando o solo tenha umidade suficiente para uma boa germinação, procurando, também, coincidir o período de maior exigência hídrica da cultura com os meses de maior oferta hídrica e o período seco com a abertura dos capulhos e colheita (Amorim Neto et al., 2001). Para a definição da melhor época de semeadura tem se utilizado a técnica do zoneamento de risco climático, na qual a disponibilidade hídrica do solo, as características agronômicas da planta, a oferta climática, são equacionadas, de modo a minimizar os impactos negativos do clima (Assad et al., 2001; Silva et al., 2007).

No zoneamento de risco climático, é necessário conhecer, entre outros parâmetros, a duração do ciclo da cultura, que depende basicamente do cultivar, da fertilidade do solo, da incidência de pragas e das condições meteorológicas (Azevedo et al., 1999). Os três primeiros fatores são controláveis, enquanto que o último depende da oferta ambiental de cada local, sobretudo da temperatura do ar (Rosolem, 2001). Quando a relação entre a temperatura e a taxa de desenvolvimento da planta é linear, a teoria de graus-dia (GD) tem sido empregada, para relacionar o desenvolvimento do cultivo com as condições térmicas locais (Prela et al., 2006). O conceito de GD se baseia no fato de que existem duas temperaturas base, uma mínima (T_b) e outra máxima (T_B), entre as quais, a planta se desenvolve normalmente. No caso da cultura do algodoeiro, em geral, utiliza-se como temperatura base inferior 15°C e temperatura base superior 40°C , admitindo-se que abaixo e acima destes valores, respectivamente, o desenvolvimento do algodoeiro é nulo ou muito lento (Viator et al., 2005; Beltrão et al., 2007; Lima & Silva, 2008).

O acúmulo de GD que a planta necessita é considerado como uma constante térmica característica do cultivar e que independe da época e do local do plantio (Pereira et al., 2002). O conhecimento da constante térmica nas respectivas fases fenológicas é

fundamental para a previsão da duração do ciclo da cultura em diferentes ambientes, proporcionando maior precisão no planejamento da época de semeadura (Gadioli et al., 2000; Calve et al., 2005). Os cultivares americanos, quando se utiliza T_b de 15°C , acumulam entre 1575°C a 1675°C na fase da emergência à abertura do primeiro capulho (Oosterhuis, 1999). No Brasil, nessa mesma fase, com T_b de 15°C , os cultivares ITA 90 e BRS Antares necessitam de 1287°C (Rosolem, 2001); com T_b de 13°C , 12°C e 15°C , os cultivares IAC 22, CNPA Acala 1 e CNPA Precoce 2 necessitam, respectivamente, de 1364°C , 1539°C e 1085°C (Bolonhezi, 2000); e com T_b de $12,7^{\circ}\text{C}$, o algodoeiro herbáceo, em geral, necessita acumular 1650°C para completar o ciclo (Gonçalves et al., 1999).

A quantificação de GD é feita a partir de dados de temperaturas mínimas e máximas diárias, registrados em estações meteorológicas. No entanto, nem sempre existem dados disponíveis em todos os locais para a caracterização bioclimática da região. Essa carência de informações pode ser contornada, estimando-se GD, por meio de modelos matemáticos, baseados em dados climáticos de séries históricas, à semelhança do que tem sido feito para estimar a temperatura do ar (Carvalho et al., 2005; Stahl et al., 2006; Cargnelutti Filho et al. 2006), em função das coordenadas geográficas e de um determinado período de tempo.

Buriol & Estefanel (1976) estimaram a soma de GD mensal e anual no Rio Grande do sul, em função da altitude, latitude, longitude, utilizando T_b de 0°C , 5°C , 10°C , 15°C e 20°C e obtiveram coeficientes de determinação variando de 0,92 a 0,97, dependendo do mês e da T_b utilizada. Pedro Júnior et al. (1977) correlacionaram GD com a altitude e latitude, por meio de uma regressão linear múltipla e obtiveram coeficientes de determinação variando entre 0,81 a 0,88, em função do mês analisado. Apesar da relevante contribuição destes trabalhos, a modelagem de GD foi feita considerando as variáveis espaciais e temporais separadamente, e apenas na escala anual ou mensal.

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar um modelo matemático para estimar a duração do ciclo do algodoeiro no Estado de Goiás, aplicando a teoria de graus-dia na escala diária, considerando, conjuntamente, a sua variação no espaço e no tempo.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido no Estado de Goiás, área delimitada pelas latitudes de $12^{\circ} 00' 00''\text{S}$ e $19^{\circ} 45' 44''\text{S}$ e pelas longitudes de $45^{\circ} 45' 32''\text{W}$ e $53^{\circ} 30' 00''\text{W}$, com

dados climáticos obtidos de 21 estações meteorológicas instaladas em diferentes municípios e altitudes (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Localização geográfica das estações meteorológicas e período das observações dos dados de temperatura.

Ordem	Municípios	Altitude (m)	Latitude Sul (°)	Longitude Oeste (°)	Período (ano)
1	Aragarças-GO ⁽¹⁾	311	15,900	52,230	1985 – 2000
2	Brasília-DF ⁽¹⁾	1161	15,789	47,926	1985 – 2000
3	Britânia-GO ⁽²⁾	284	15,429	51,220	2000 – 2007
4	Caldas Novas-GO ⁽²⁾	706	17,726	48,616	2000 – 2007
5	Catalão-GO ⁽¹⁾	886	18,158	47,926	2000 – 2007
6	Ceres-GO ⁽²⁾	589	15,308	49,598	2000 – 2007
7	Formosa-GO ⁽¹⁾	899	15,530	47,330	1985 – 2000
8	Goianésia-GO ⁽¹⁾	665	15,220	48,990	1985 – 2000
9	Goiânia-GO ⁽¹⁾	722	16,643	49,222	1985 – 2000
10	Goiás-GO ⁽¹⁾	512	15,939	50,141	1985 – 2000
11	Goiatuba-GO ⁽²⁾	774	18,013	49,357	2000 – 2007
12	Ipameri-GO ⁽¹⁾	743	17,717	48,167	1985 – 2000
13	Iporá-GO ⁽²⁾	596	16,442	51,118	2000 – 2007
14	Itaberaí-GO ⁽²⁾	701	16,020	49,810	2000 – 2007
15	Itumbiara-GO ⁽²⁾	455	18,420	49,218	2000 – 2007
16	Jataí-GO ⁽¹⁾	669	17,924	51,718	1985 – 2000
17	Palmeiras de Goiás-GO ⁽²⁾	621	16,810	49,911	2000 – 2007
18	Porangatu-GO ⁽²⁾	368	13,374	49,128	2000 – 2007
19	Posse-GO ⁽¹⁾	824	14,089	46,366	1985 – 2000
20	Santa Helena de Goiás-GO ⁽²⁾	590	17,839	50,576	2000 – 2007
21	Santo Antônio de Goiás-GO	829	16,500	49,282	1983 – 2006

⁽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 partir dos dados de temperatura média diária do ar proveniente das séries históricas analisadas, calcularam-se os valores de graus-dia, correspondentes a cada dia do ano, por meio da seguinte equação (Oosterhuis, 1999):

$$GDo_{ij} = 0,5 (T_{max_{ij}} + T_{min_{ij}}) - T_b \quad (9)$$

em que, GDo_{ij} é o valor de graus-dia observado no dia i do ano j ($^{\circ}C$); $T_{max_{ij}}$ é o valor observado da temperatura máxima diária do ar no dia i do ano j ($^{\circ}C$); $T_{min_{ij}}$ é o valor observado da temperatura mínima diária do ar no dia i do ano j ($^{\circ}C$); e T_b é a temperatura base inferior da cultura ($^{\circ}C$).

A temperatura base inferior considerada para o algodoeiro foi de $15^{\circ}C$ e a superior de $40^{\circ}C$ (Beltrão et al., 2007), sendo estes valores estabelecidos como os limites de temperatura mínima e máxima do ar, para cálculo de GDo_{ij} .

Para modelar a estimativa de graus-dia, em função do espaço e do tempo, adotou-se como variável dependente, a média dos valores de GDo_{ij} , observados diariamente em cada ano da série histórica analisada, e como variáveis independentes, a altitude (Alt), a latitude (Lat), a longitude (Long) e a seqüência dos dias do ano (i), seguindo o procedimento adotado em Antonini et al. (2009). As primeiras três variáveis independentes respondem pela variação espacial dos valores de graus-dia, enquanto que a última descreve sua variação temporal. Por se tratar de um fenômeno periódico, essa variação temporal pode ser representada por uma série trigonométrica de Fourier (Carvalho et al., 2005), e de acordo com Queiroz et al. (2001), é possível se obter bom ajuste, utilizando-se apenas os primeiros três harmônicos dessa série. Considerando as variáveis espaciais e temporais, simultaneamente, a modelagem de GD foi feita, em escala diária, da seguinte forma:

$$GD_i = \beta_0 + \beta_1 Alt + \beta_2 Lat + \beta_3 Long + \sum_{n=1}^3 [a_n \cos(nwt_i) + b_n \sin(nwt_i)] \quad (10)$$

em que, GD_i é o valor estimado ou modelado de graus-dia do dia i ($^{\circ}C$); i o i -ésimo dia do ano, variando de um dia a 365 dias; β_0 o coeficiente linear; β_1 , β_2 e β_3 são os coeficientes angulares das variáveis espaciais; Alt é a altitude do local (m); Lat a latitude do local em valores positivos (graus decimais); Long a longitude do local em valores positivos (graus

decimais); a_n e b_n são os coeficientes dos termos da série de trigonométrica de Fourier; n o número de harmônicos da série trigonométrica de Fourier; e w a frequência angular igual a $2\pi/365$.

Os coeficientes angulares a_n e b_n , denominados de amplitude harmônica, representam nessa modelagem, as amplitudes anual, semestral e quadrimestral de graus-dia diário, quando n for igual a um, dois e três, respectivamente.

Para ajustar o modelo GD_i , utilizaram-se os valores de graus-dia de períodos não uniformizados com, no mínimo, oito anos de observações. Com os valores de GDo_{ij} , calcularam-se as médias dos valores de graus-dia, observados diariamente em cada ano, da série histórica analisada (GDm_{ip}), considerando os dias do ano como uma sequência de 1 dia a 365 dias e utilizando-se a equação:

$$GDm_{ip} = \sum_{j=1}^{p_o} (GDo_{ij}/p_o) \quad (11)$$

em que, j é o j -ésimo ano de observação; e p_o o número de anos de observação da série histórica de dados de cada estação.

Os valores de GDm_{ip} ($^{\circ}C$), totalizando 7.665 dados, juntamente com os valores de latitude, longitude e altitude e os componentes da série trigonométrica de Fourier desenvolvida para os primeiros três harmônicos: $\cos(wi)$, $\cos(2wi)$, $\cos(3wi)$, $\sin(wi)$, $\sin(2wi)$ e $\sin(3wi)$, formaram uma matriz com 7.665 linhas e dez colunas, onde se utilizaram os recursos de computação estatística da planilha eletrônica do programa Excel™ para efetuar a determinação dos coeficientes do modelo pela análise de regressão linear múltipla. O grau de ajuste do modelo foi avaliado pelo coeficiente de determinação e a verificação da significância dos coeficientes pelo teste de t de Student a 5% de probabilidade de erro.

Para estimar a duração do ciclo, através da teoria de graus-dia, utilizou-se a eq. (10) para obter a soma dos graus-dia requeridos em uma determinada fase ($SGD_{Ini-Fin}$), compreendida entre dois estádios de desenvolvimento da cultura, da seguinte maneira:

$$SGD_{Ini-Fin} = \sum_{i=Ini}^{Fin} GD_i \quad (12)$$

em que, Ini corresponde ao dia do ano em que se deu a caracterização de um dado estágio de desenvolvimento da cultura e Fin corresponde ao dia em que se deu a caracterização do estágio seguinte considerado.

Considerando-se que a eq. (10) é contínua e periódica, no intervalo de um dia a 365 dias, constata-se que ela se repete a partir do início do ano seguinte, de modo que, a contagem dos dias pode continuar, sem solução de continuidade, a partir do dia 366. Por isso, a função GD_i pode ser usada, sem modificações, para estimar o ciclo de cultivos que se estendem de um ano para outro, bastando, para tanto, numerar com 366 o primeiro dia do ano subsequente. É importante destacar que nessa modelagem, o número de dia do ano será sempre de 365 dias, independentemente dele ser bissexto ou não.

A somatória indicada pela eq. (12) pode ser expressa na forma de uma integração da seguinte maneira:

$$SGD_{Ini-Fin} = \int_{i=Ini}^{Fin} GD_i di \quad \text{para } GD_i \geq 0 \quad (13)$$

Assim, conhecendo-se as variáveis espaciais (Alt, Lat, Long) do local do cultivo, a data do estágio correspondente ao valor de Ini e a quantidade de graus-dia requerida na fase considerada, equivalente a $SGD_{Ini-Fin}$, então é possível calcular o valor de Fin, utilizando-se recursos de otimização linear, como, por exemplo, a rotina “Solver” do programa ExcelTM, a qual foi empregada nesse trabalho. Ao final, a diferença Fin-Ini corresponde ao período de duração da fase considerada.

Os cultivares de algodoeiro utilizados na validação do modelo proposto foram: Delta Opal, Nu Opal, Fibermax 993, FMT 701 e BRS 269 Buriti (Tabela 4.2), sendo os primeiros quatro plantados em lavouras comerciais, nas safras 2006/2007 e 2007/2008, em diferentes municípios do Estado de Goiás e o último plantado em uma área experimental na safra 2006/2007.

Tabela 4.2. Cultivares de algodoeiro, conduzidos em lavouras comerciais e duração do ciclo entre a emergência e 90% de capulhos abertos, no Estado de Goiás.

Município/Fazenda	Cultivar	Altitude (m)	Latitude (°)	Longitude (°)	Ciclo (dia)
Palmeiras de Goiás/Santana	Delta Opal	670	16,8852	49,8909	155
Ipameri/Califórnia II	Delta Opal ⁽¹⁾	835	17,7329	48,2103	169
Luziânia/Macaé	Delta Opal	960	16,3507	47,6797	188
Mineiros/Rio Grande	Delta Opal	847	17,8551	53,0374	160
Chapadão do Céu/Lucas	Delta Opal	780	18,3907	52,5263	171
Acreuna/Mutuca	Nu Opal	553	17,4855	50,3900	146

Montividiu/São Sebastião	Nu Opal ⁽¹⁾	830	17,2886	51,2580	183
Campo Alegre de Goiás/Paineras	Nu Opal	960	17,2967	47,8418	190
Campo Alegre de Goiás/Entre Rios	Nu Opal	800	17,6321	47,6513	176
Morrinhos/Bom Jardim	Nu Opal ⁽¹⁾	742	17,5935	49,0481	170
Piracanjuba/Nossa Senhora	Nu Opal	677	17,5417	48,9813	165
Inaciolândia/Faceira	Nu Opal	480	18,5469	49,8638	149
Parauna/São Geraldo	Fibermax 993	777	16,9611	51,0141	172
Ipameri/Gávea	Fibermax 993 ⁽²⁾	956	17,3006	48,3169	185
Caiapônia/Nova	Fibermax 993	670	16,7601	51,7189	153
Ipameri/Santo Antônio	Fibermax 993	840	17,6816	48,2830	198
Silvânia/Cedro	Fibermax 993	908	16,4888	48,3754	183
Rio Verde/Pai Manoel	FMT 701 ⁽²⁾	860	17,7535	51,3000	189
Cristalina/Pamplona	FMT 701	970	16,2536	47,6789	200
Sta. Helena de Goiás/Fundação Go	BRS 269 Buriti ⁽²⁾	569	17,8362	50,5779	157

⁽¹⁾ Cultivares de ciclo médio utilizados para a determinação da soma de graus-dia entre a emergência e 90% de capulhos abertos; ⁽²⁾ Idem para cultivares

Os cultivos, tanto das lavouras como da área experimental, foram conduzidos com práticas agrônômicas adequadas e não sofreram déficit hídrico que comprometesse seu desenvolvimento. As observações e determinações da duração do ciclo e da quantidade de graus-dia requerida pela planta foram feitas apenas na fase entre os estádios de emergência e o de 90% de capulhos abertos, representados, respectivamente por Ini e Fin. No caso das lavouras comerciais, a colheita teve seu registro devidamente apontado, porém não foi feito um acompanhamento minucioso da fenologia da cultura para definir com exatidão o momento em que ocorreu o estágio de 90% de capulhos abertos. Estabeleceu-se, portanto, que esse momento ocorreu vinte dias antes da colheita, devido às práticas de aplicações de desfolhantes e de promotores de maturação, nessas lavouras comerciais. de ciclo tardio.

Em termos práticos, os cultivares avaliados foram agrupados em duas categorias, de acordo com a duração de seu ciclo de desenvolvimento: ciclo médio (Delta Opal e Nu Opal) e ciclo tardio (BRS 269 Buriti, Fibermax 993 e FMT 701).

O requerimento de graus-dia, de cada grupo na fase considerada, foi estabelecido como a média dos valores calculados para cada cultivar pertencente ao grupo. No grupo de ciclo médio utilizaram-se, como repetições, os valores calculados de requerimento de graus-dia dos cultivares: Delta Opal, plantados na fazenda Califórnia II, em Ipameri; Nu Opal plantado nas fazendas Bom Jesus, e São Sebastião, em Morrinhos e Montividiu, respectivamente. No grupo de ciclo tardio as repetições foram os valores de requerimento de graus-dia dos cultivares: Fibermax 993 plantado na fazenda Gávea, em Ipameri; FMT 701 plantado na fazenda Pai Manoel, em Rio Verde; e BRS 269 Buriti plantado na área experimental da Fundação GO, em Santa Helena de Goiás. O

requerimento médio de graus-dia do grupo de ciclo médio e tardio foi de $1519^{\circ}\text{C} \pm 35^{\circ}\text{C}$ e $1609^{\circ}\text{C} \pm 69^{\circ}\text{C}$, respectivamente, sendo diferentes estatisticamente com nível de probabilidade de erro de 4,1%. A escolha dessas áreas de lavouras se deu em função de estarem localizadas em municípios com disponibilidade de dados de temperatura média diária.

Para avaliar o desempenho do modelo na estimativa da duração do ciclo de desenvolvimento da cultura do algodoeiro no Estado de Goiás, correlacionaram-se os valores estimados com os observados nas lavouras comerciais selecionadas. A qualidade da estimativa foi avaliada estatisticamente quanto à precisão, exatidão e desempenho. A precisão foi quantificada pelo coeficiente de correlação r de Pearson e interpretada de acordo com Santos (2007). A exatidão foi quantificada pelo índice de concordância d de Willmott que varia de zero, para nenhuma concordância, a um, para concordância perfeita (Willmott, 1982). O desempenho foi quantificado pelo índice c , definido como o produto de r por d (Camargo & Camargo, 2000) e interpretado de acordo com Camargo & Sentelha (1997).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes do modelo de estimativa de graus-dia, GD_i (eq. 10), obtidos por meio de análise de regressão linear múltipla, aplicado para o algodoeiro cultivado no Estado de Goiás, foram os seguintes: $\beta_0 = 21,34268$; $\beta_1 = -0,00708$; $\beta_2 = -0,14031$; $\beta_3 = -0,08713$; $a_1 = 1,12030$; $a_2 = -0,96597$; $a_3 = 0,11965$; $b_1 = -0,41280$; $b_2 = 0,17409$; $b_3 = 0,08571$. Todos os coeficientes foram altamente significativos com valores de p -valor aproximadamente zero.

O coeficiente de determinação da comparação entre os valores estimados pelo modelo e os calculados com base nas temperaturas máximas e mínimas das séries históricas utilizadas foi de 84% (Figura 4.1), ou seja, apenas 16% da variabilidade de GD_i não é descrita pela variação da altitude, latitude, longitude e dias do ano.

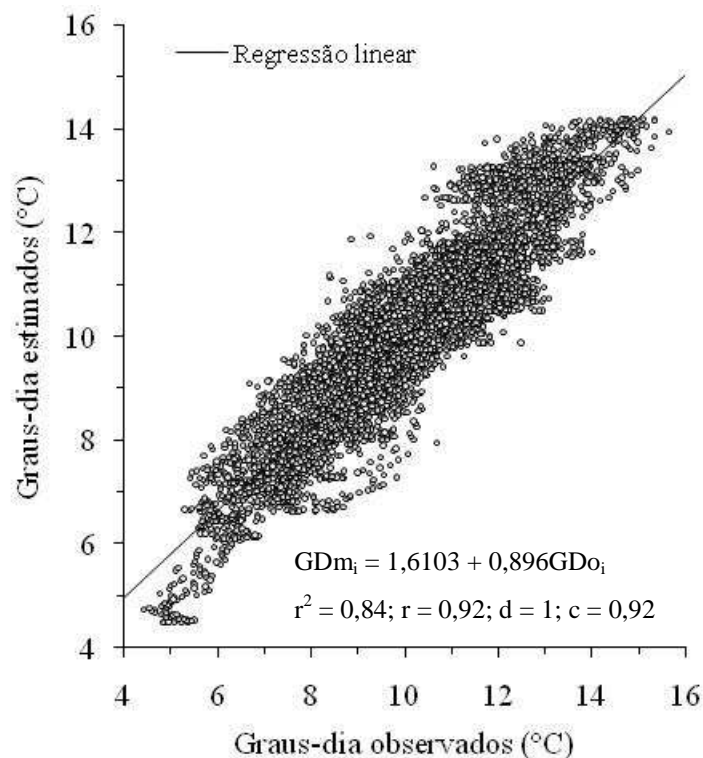


Figura 4.1. Comparação entre os valores observados (GDo_i) e estimados (GDm_i) de graus-dia do algodoeiro e os correspondentes índices estatísticos de avaliação do ajuste (r^2 = coeficiente de determinação; r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de Willmott; e c = índice de desempenho).

Resultado semelhante foi encontrado por Buriol & Estefanel (1976) que obtiveram coeficientes de determinação que variaram de 92% a 97%, ao desenvolverem equações de regressão para estimar a soma de GD mensal e anual para o Rio Grande do Sul, utilizando diferentes valores de T_b e tendo como variáveis independentes: altitude, latitude, longitude e um fator de continentalidade. Pedro Júnior et al. (1977), ao estabelecerem equações mensais de estimativa de GD, em função da altitude e latitude, também obtiveram coeficientes de determinação elevados, com valores que variaram de 0,81 a 0,88, dependendo do mês considerado.

Analisando-se, em especial, o coeficiente β_1 , depreende-se que a oferta de graus-dia decresce $0,7^\circ\text{C}$ para cada cem metros de elevação. Este decréscimo é coerente com a diminuição da temperatura média do ar com o aumento da altitude, cuja média teórica é de $0,6^\circ\text{C}$ por cem metros de elevação (Pereira et al., 2002). Com relação ao coeficiente β_2 , verifica-se pelo seu valor, que a cada grau de aumento na latitude, haverá uma diminuição de aproximadamente de $0,14^\circ\text{C}$ na oferta de graus-dia. Este decréscimo de temperatura do ar em relação à latitude se deve à diminuição da radiação solar com o

aumento da latitude, ocasionados pelos movimentos de rotação e translação da Terra em relação ao Sol (Silva, 2006). Observou-se, também, decréscimo de 0,09°C na oferta de graus-dia por grau de aumento na longitude.

O requerimento de graus-dia, na fase entre a emergência e 90% de capulhos abertos, dos cultivares utilizados na validação do modelo proposto, foi de 1519°C ± 35°C, para o grupo de ciclo médio (Delta Opal e Nu Opal) e de 1609°C ± 69°C, para o tardio (BRS 269 – Buriti, Fibermax 993 e FMT 701). Não foram encontrados relatos na literatura a respeito do requerimento de graus-dia, especificamente, para esta fase. No entanto, esses resultados estão coerentes ao comparar os valores de graus-dia obtidos em cultivares e fases diferentes, em outros estudos. Rosolem (2001) encontrou o requerimento de 1287°C para os cultivares de ciclo médio (CNPA ITA 90 e BRS Antares) na fase entre a emergência e o primeiro capulho aberto e Gonçalves et al. (1999) encontraram o requerimento de 1650°C para o algodão na fase da emergência ao final do ciclo, considerando o total de GD acumulado entre 12,7°C e 37°C. Em vista da carência de informações sobre os requerimentos de graus-dia para o algodoeiro nas suas diferentes fases de desenvolvimento, os resultados encontrados não encerram a questão, mas evidenciam a necessidade de pesquisa sobre o assunto, bem como a necessidade de padronização de um método para a determinação das temperaturas base da cultura.

A integração da eq. (13) resulta em uma expressão matemática analítica que permite obter o final da duração de uma determinada fase de desenvolvimento da cultura. O resultado dessa integração pode ser expresso da seguinte maneira, considerando os valores já determinados dos coeficientes de ajuste do modelo:

$$\text{SGD}_{\text{Ini-Fin}} = (\text{Fin} - \text{Ini})(21,34268 - 0,00708.\text{Alt} - 0,14031.\text{Lat} + 0,08571.\text{Long}) + \sum_{n=1}^3 (1/nw) \{ \alpha_n [\text{sen}(nw\text{Fin}) - \text{sen}(nw\text{Ini})] - \beta_n [\text{cos}(nw\text{Fin}) - \text{cos}(nw\text{Ini})] \} \quad (14)$$

Aplicando a eq. (14), é possível determinar o valor da variável Fin correspondente ao estágio de 90% de capulhos abertos, para uma data de plantio e um local de cultivo. Deve-se salientar que, ao estabelecer os limites de temperatura média diária entre 15°C e 40°C, a integração deste modelo automaticamente resulta em uma equação que contabiliza os graus-dia somente neste intervalo de temperatura. Caso contrário, se a temperatura média diária do ar fosse menor do que 15°C ou maior do que 40°C, o modelo

(eq. 14) consideraria incorretamente as unidades térmicas abaixo (negativa) ou acima (positiva) desses limites.

A Figura 4.2 mostra a relação entre os valores observados e estimados de duração do ciclo de cultivares de algodoeiro em lavouras comerciais no Estado de Goiás, na fase compreendida entre os estádios de emergência e 90% de capulhos abertos.

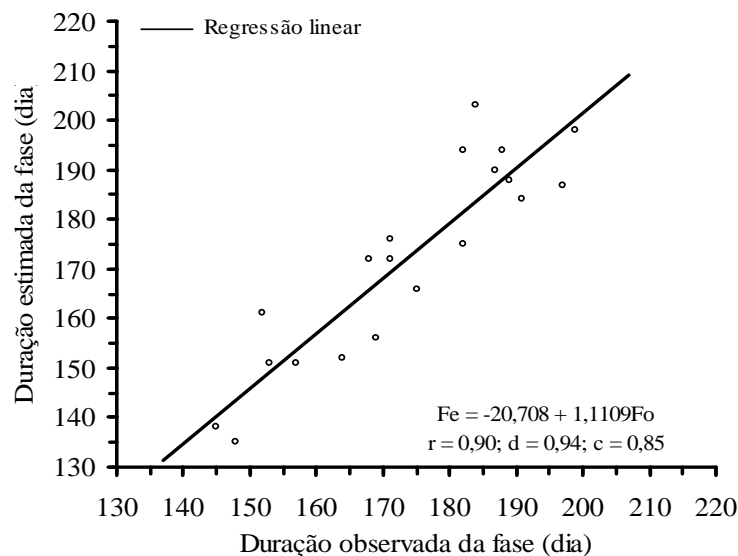


Figura 4.2. Diagrama de dispersão dos valores de duração da fase de desenvolvimento do algodoeiro entre a emergência e 90% de capulhos abertos, observados nas lavouras comerciais (F_o) e estimados pelo modelo desenvolvido (F_e), e os índices estatísticos de avaliação (r = coeficiente de correlação de Pearson; d = coeficiente de Willmott; e c = índice de desempenho).

Verifica-se que a precisão da estimativa feita pelo modelo, aferida pelo coeficiente de correlação de Pearson r , foi de 0,90, a qual, de acordo com Santos (2007), pode ser interpretada como uma correlação forte e positiva. Quanto ao índice de concordância de Willmott, d , que se refere à exatidão ou aproximação dos dados estimados aos observados, seu valor foi de 0,94, demonstrando que os valores estimados pelo modelo estão muito próximos dos observados. Verifica-se, ainda, pelo valor do índice, $c = 0,85$, que o desempenho do modelo foi muito bom (Camargo & Sentelha, 1997).

4.4 CONCLUSÕES

Considerando os resultados obtidos da comparação dos valores observados e estimados pelo modelo de cálculo da soma de graus-dia, no Estado de Goiás, utilizando os

dados de temperatura oriundos de estações meteorológicas e de duração do ciclo de cultivares de algodoeiro em lavouras comerciais, pode-se concluir que o modelo proposto:

1. Ajusta-se adequadamente aos valores anuais observados de graus-dia para cultivares de algodoeiro;

2. Estima, adequadamente, o requerimento de graus-dia necessário para completar a fase da emergência a 90% de capulhos abertos, dos cultivares de algodoeiro utilizados no Estado de Goiás;

3. Apresenta ótimo desempenho na estimativa da duração do ciclo dos cultivares de algodoeiro, conhecida a necessidade de graus-dia da fase de desenvolvimento considerada e a época de plantio.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A realização deste estudo permitiu dar um passo importante no avanço do conhecimento na aplicação de ferramentas de modelagem para estimativa do ciclo do algodoeiro no Estado de Goiás. Os modelos desenvolvidos, apesar de ajustados e validados, para as condições climáticas e espaciais deste Estado, podem ser facilmente empregados para a modelagem de outras realidades geográficas e culturais. O destaque dessa modelagem foi juntar as variáveis espaciais e temporais na escala diária em uma só

expressão matemática linear de fácil ajuste, utilizando procedimentos estatísticos de regressão linear múltipla, prontamente disponível.

A utilização do conceito de graus-dia para a estimativa dos ciclos das culturas possibilita melhor planejamento de época de semeadura e colheitas, uma vez que permite estimar com maior precisão a duração das fases de desenvolvimento ou ciclo total da cultura e o uso de uma função periódica para representar a variação da temperatura ou de graus-dia, ao longo do ano. Isso é muito importante, visto que suas variações são periódicas, ou seja, tendem a se repetirem de um ano para outro.

O conhecimento detalhado do ciclo da cultura em cada localidade de cultivo fornece elementos essenciais para o estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola para a otimização da produtividade. Um exemplo é na simulação do balanço hídrico da cultura para a realização do zoneamento de risco climático. Neste caso, a estimativa, com maior precisão, da duração das fases de desenvolvimento da planta, aumenta a chance de definir uma data de semeadura que proporcione uma época adequada para o desenvolvimento da cultura e que favoreça a coincidência do seu período de maior requerimento de água, com o período de maior oferta hídrica ambiental de cada localidade. Desta forma, o zoneamento de risco climático é feito considerando a variação espaço-temporal do ciclo da cultura, fazendo com que ele deixe de ser estático e passe a ser dinâmico.

Com o desenvolvimento deste trabalho, foi possível vislumbrar uma série de estudos que poderão ser realizados com vistas ao aperfeiçoamento desse tipo de modelagem, os quais são destacados a seguir:

1. Como esperado, a eficácia da estimativa da temperatura média diária do ar e de graus-dia, em função da altitude, coordenadas geográficas e dos dias do ano, pode ser bastante melhorada, se as séries históricas de dados de temperatura diária forem disponíveis com boa distribuição na região de estudo e com o maior número de anos de observação possível;

2. É necessário selecionar um método de determinação da temperatura base inferior das plantas, para ser usado como padrão, permitindo, desta forma, a comparação entre resultados obtidos em trabalhos de pesquisa;

3. Para melhor utilização do conceito de graus-dia, na estimativa do ciclo da cultura do algodoeiro, é necessário desenvolver trabalhos de pesquisa para determinar a

temperatura base inferior dos cultivares utilizados, bem como a determinação da constante térmica de cada fase e do ciclo total de desenvolvimento desses cultivares; e

4. A título de refinamento do zoneamento de risco climático do algodoeiro, recomenda-se que no modelo de balanço hídrico seja incorporada, a variação espaço-temporal do ciclo de desenvolvimento do cultivar considerado.

Como contribuições relevantes deste trabalho pode-se destacar:

1. Geração de modelos matemáticos de estimativa da temperatura e de Graus-dia que consideram, simultaneamente as variações espaço-temporal em uma só equação.

2. Possibilidade de refinar o programa de zoneamento agrícola de risco climático do MA com a inserção do modelo de cálculo do ciclo da cultura.

3. Potencial de aplicação dos modelos propostos para outras culturas ou regiões.

6 REFERÊNCIAS

ABAYE, A. O.; PHILIPPS, P. M.; KEELING, B. B.; OOSTERHUIS, D. M. Heat units (DD60'S) and cotton growth stages. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCE, 1998, São Diego. **Proceedings...** v. 2, 1485 p.

ALMEIDA, H. A.; SÁ, D. F. Estimativa das temperaturas médias, máximas e mínimas mensais e anuais do sudoeste da Bahia. **Revista Theobroma**, Ilhéus, v. 14, n. 2, p. 135-142, 1984.

ALMEIDA, W. P. de. Conjuntura exige produção sustentável a custos baixos. **Visão Agrícola**, Piracicaba, v. 3, n. 6, p. 32-34, 2006.

ALVES, L. R. A. **A reestruturação da cotonicultura no Brasil: fatores econômicos, institucionais e tecnológicos**. 2006. 121 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

AMORIM NETO, M. da S.; ARAUJO, A. E. de; CARAMORI, P. H.; GONÇALVES, S. L.; WREGE, M. S.; LAZZAROTTO, C.; LAMAS, F. M.; SANS, L. M. A. Zoneamento agroecológico e definição da época de semeadura do algodoeiro no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 422-428, 2001.

ANTONIÉ, O.; KRIZAN, J.; MARKI, A.; BUCOVEC, D. Spatio-temporal interpolation of climatic variables over large region of complex terrain using neural networks. **Ecological Modelling**, Amsterdam, v. 138, n.1-3, p. 255-263, 2001.

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**, Brasília, v. 43, n. 4, p. 331-338, 2009.

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature on a linear heat unit system. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Califórnia, v. 74, n. 1, p. 430-445, 1959.

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**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 510-518, 2001.

AZEVEDO, D. M. P. de; BELTRÃO, N. E. de M.; VIEIRA, D. J.; NOBREGA, L. B. da. Manejo cultural. In: BELTRÃO, N. E. de M. (Org.). **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999, v. 2, cap. 20, p. 509-551.

BALSADI, O. V.; BORIN, M. R. Ocupações agrícolas e não-agrícolas no rural paulista: análise das evoluções no período 1990-2002. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 155-174, 2006.

BARBANO, M. T.; DUARTE, A. P.; BRUNINI, O.; RECO, P. C.; PATERNIANI, M. E. A. G. Z.; KANTHACK, R. A. D. Temperatura-base e acúmulo térmico no subperíodo semeadura-florecimento masculino em cultivares de milho no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 261-268, 2001.

BELTRÃO, N. E. de M. Algodão brasileiro em relação ao mundo: situação e perspectivas. In: BELTRÃO, N. E. de M. (Org.). **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. v. 1, cap. 1, p. 17-27.

BELTRÃO, N. E. de M.; FIDELES FILHO, J.; VALE, L. S. do. In: FREIRE, E. C. (Ed.). **Algodão no cerrado do Brasil**. Brasília: ABRAPA, 2007. cap. 5, p. 175-191.

BELTRÃO, N. E. de M.; SOUZA, J. G. de. Fitologia do algodão herbáceo (sistemática, organografia e anatomia). In: BELTRÃO, N. E. de M. (Org.). **O agronegócio do algodão no Brasil**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia, 1999. v. 1, cap. 1, p. 55-86.

BENAVIDES, R.; MONTES, F.; RUBIO, A.; OSORO, K. Geostatistical modelling of air temperature in a mountainous region of Northern Spain. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 146, n. 3-4 p. 173-188, 2007.

BOLONHEZI, D. **Época de semeadura do algodoeiro: características agronômicas, tecnológicas da fibra, determinação da temperatura base e graus-dia**. 2000. 182 f. Dissertação (Mestre em Agronomia: Produção Vegetal)-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2000.

BOLONHEZI, D.; ATHAYDE, M. L. F.; FUZZATTO, M. G.; BOLONHESI, A. C.; BRUNINI, O.; BORTOLETTO, N. CASTRO, J. L.; SORDI, G. de. Estimativa de temperatura base e graus-dia em diferentes fases fenológicas para três cultivares de algodoeiro herbáceo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 1., 1997, Fortaleza. **Resumos...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 1997. p. 40-43.

BURIOL, G. A.; ESTEFANEL, V. Estimativa das temperaturas efetivas do Estado do Rio Grande do Sul em função de fatores geográficos. **Revista Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v. 6, n. 3, p. 265-273, 1976.

CALVE, L.; ALFONSI, R. R.; ASSAD, E. D. Planilhas de cálculo para estimativa do ciclo de culturas, a partir de graus-dia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: SBA, 2005. 1 CD-ROM.

CAMARGO, A. P. de.; CAMARGO, M. B. P. de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, 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**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMINHA, I. O. **Conservação de sementes de algodão herbáceo (*Gossypium hirsutum* L. r. *latifolium* Hutch) colhidas em diferentes horários**. 2000. 33 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Agronomia). Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2000.

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**, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 2448-2456, 2008.

CARGNELUTTI FILHO, A.; MALUF, J. R. T.; MATZANAUER, R.; STOLZ, A. P. Altitude e coordenadas geográficas na estimativa da temperatura mínima média decendial do ar no Estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 893-901, 2006.

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**, Jaboticabal, v. 25, n. 3, p. 732-741, 2005.

CIA, E.; ALLEONI, L. R. F.; FERRAZ, C. A. M.; FUZATTO, M. G.; KONDO, J. I.; CARVALHO, L. H.; CHIAVEGATO, E. J.; SABINO, N. P. Densidade de plantio associada ao uso de reguladores de crescimento na cultura do algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, v. 55, n. 2, p. 309-316, 1996.

CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. **Cultura do algodoeiro**. Piracicaba: Potafós, 1999. 286 p.

COELHO, A. B. A cultura do algodão e a questão da integração entre preços internos e externos. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 01, p. 153-169, 2004.

COELHO, D. T.; SEDYAMA, G.; VIEIRA, M. Estimativas das temperaturas médias mensais e anuais no Estado de Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 20 n. 112, p. 455-459, 1973.

DAMARIO, E. A.; PASCALE, A. J. Disponibilidades calóricas regionales para diferentes cultivos en la Argentina. **Revista Facultad de Agronomía de Buenos Aires**, Buenos Aires, v. 4, n. 1, p. 45-58, 1983.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efectos del agua em el rendimiento de los cultivos**. Roma: FAO, 1979. 212 p. (Estúdio FAO. Riego y Drenage, 33).

DUFAULT, R. J. Determining heat unit requirements for broccoli in coastal South Carolina. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Califórnia v. 122, n. 2, p. 169-174, 1997.

FACUAL. FUNDO DE APOIO À CULTURA DO ALGODÃO. **Breve histórico da cultura do algodão**. Disponível em: <<http://www.facual.org.br/home/proalmat>>. Acesso em: 8 dez. 2008.

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**, Viçosa, v. 14, n. 4, p. 293-303, 2006.

FERRY, G. V.; GEORGE, A. G.; JONHSON, C. E.; WcCUTHEON, O. D.; STROMBERG, L. K.; BOHER, L. J.; HOOVER, M. **Guides in cotton irrigtion**. Califórnia: University of Califórnia, 1967. 25 p.

FOX Jr.; F. A.; SHERER, T.; SLACK, D. C.; CLARK, L. J. **Arizona Irrigation Scheduling – AZSCHED ver. 1. 01 – Users Manual**. Arizona: The University of Arizona/Cooperative Extension/ Agricultural and Biosystems Engineering, 1992. 36 p.

FREIRE, E. C.; MORELLO, C. de L. **Cultura do algodoeiro em Goiás**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2003. 32 p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, 68).

FREIRE, E. C.; MORELLO, C. de L.; ANDRADE, F. P. de; SANTOS, J. W. dos; ASSUNÇÃO, J. H. de; BEZERRA, W.; FERNANDES, J. I. **Desempenho dos cultivares de algodoeiro avaliados no estado de Goiás, nas safras 2001/02 e 2002/03**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004a. 8 p. (Embrapa Algodão. Comunicado Técnico, 204).

FREIRE, E. C.; MORELLO, C. De L.; CARVALHO, M. da C. S.; MIRANDA, J. E.; MATOS, J. P.; SENHORELO, W. L. P.; NEVES, A. C. das. **Diagnóstico da cultura do algodoeiro em Goiás: Safra 2002/2003**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004b. 40 p. (Embrapa Algodão. Documento, 124).

FUZATTO, M. G. Melhoramento genético do algodoeiro. In: CIA, E.; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. (Org). **Cultura do Algodoeiro**. Piracicaba: POTAFOS, 1999. 286 p.

FUSATTO, M. G.; CARVALHO, L. H.; CIA, E.; SILVA, N. M. da.; CHIAVEGATO, E. J.; LÜDERS, R. R. **Algodão**. Campinas, Centro de Grão e Fibras – IAC, 2005. (Boletim 200).

GADIOLI, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA, A. G. y; BASANTA, M. del V. Temperatura do ar, rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma calórica. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 57, n. 3, p. 377-383, 2000.

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**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 105-110, 2000.

GERRA, A. F.; RODRIGUES, G. C.; NAZARENO, R. B.; SARAIVA, M. A. de P. **Manejo de irrigação e fertilização nitrogenada para a cultura do algodoeiro na região do cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 16 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de pesquisa e desenvolvimento).

GONÇALVES, S. L.; CARAMORI, P. H.; WREGE, M. S.; OLIVEIRA, D.; MARUR, C. J.; ALMEIDA, W. P.; PIRES, J. R.; YAMAOKA, R. S.; ABUCARUB NETO, M.; BORROZINO, E. Regionalização e época de semeadura do algodão no Estado do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO ALGODÃO, 2., 1999, Ribeirão Preto. **Anais...** Campina Grande: EMBRAPA-CNPA, 1999. p. 15-17.

GRIDI-PAPP, I. L.; PASSOS, S. M. de G.; CARVALHO, L. H.; CHIAVEGATO, E. J.; SILVA, N. M.; CAVALIERI, P. A. **Instruções sumárias sobre épocas de plantio de variedades de algodoeiro**. Campinas: CATI, 1985. 6 p. (Comunicado Técnico, 62).

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**: Agropecuária: Produção Agrícola Municipal: lavoura temporária = algodão herbáceo (em caroço). Disponível em: <http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&o=1&i=P&e=1&c=1612>. Acesso em: 4 dez. 2008.

JOST, P.; BROWN, S. M. **Cotton: defoliation, harvest-aids and crop maturity**. Georgia: Cooperative Extension Service: Universidade da Georgia, 2003. 11 p. (Bulletin, 1239).

KERBY, T. A. Cotton response to mepiquat chloride. **Agronomy Journal**, Madison, v. 72, n. 4, p. 515-518, 1985.

KERBY, T. A.; WILSON, L. T.; JOHSON, S. Upper threshold for heat unit calculation for cotton growth in the Far West. In: BELTWIDE COTTON CONFERENCES, 1985, New Orleans. **Proceeding...** p. 366-368.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RIMA Artes e Textos, 2000, 531 p.

LIMA, E. D.; SILVA, E. L. da. Temperatura base, coeficiente de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v, 12, n. 3, p. 266-273, 2008.

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

LOZADA, B. I.; ANGELOCCI, L. R. Determinação da temperatura base e de graus-dia para estimativa da duração do subperíodo da sementeira à floração de um híbrido de milho (*Zea mays*). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 31-36, 1999.

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

McCUTCHAN, M. H. Diagnosing and predicting surface temperature in mountainous terrain. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 104, n. 8, p. 1044-1051, 1976.

McMAHON, J.; LOW, A. Growing degree days as a measure of temperature effects on cotton. **Cotton Growing Review**, London, v. 49, n. 1, p. 39-49, 1972.

MEDEIROS, J. da C. de; FREIRE, E. C.; CUNHA, H. F. da; QUEIROZ, J. C. de; DEL'ACQUA, J. M.; PEDROSA, M. B.; ASSUNÇÃO, J. H. de. **Resultados do projeto de pesquisa e difusão de tecnologia para o algodoeiro desenvolvido no estado de Goiás – safra 1999/2000**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2001. 92 p. (Embrapa Algodão. Documento, 79).

MEDEIROS, S. de S.; CECÍLIO, R. A.; MELO JÚNIOR, J. C. de; SILVA JÚNIOR, J. L. C. da. Estimativa e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas na Região Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 247-255, 2005.

MELO, L. A. M. P. de; TENENTE, R. C. V.; OLIVEIRA, M. R. V. de. **Cálculo de graus-dia acumulados para subsidiar ações de gerenciamento de risco de pragas**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2006. 13 p. (Embrapa Recursos Genéticos. Comunicado Técnico, 145).

MORELLO, C. de L.; FARIAS, F. J. C.; SILVA FILHO, J. L. da.; FREIRE, E. C. **Cultivares do algodoeiro para o cerrado**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 8 p. (Embrapa Algodão. Circular Técnica, 93).

MOREY, D. K.; PATIL, M. S.; KHEDEKAR, P. K. Determination of base temperature for different crops. **PKV Research Journal**, Maharashtra, v. 8, n. 2, p. 26-28, 1984.

NAGASHIMA, G. T. **Regulador de crescimento (Cloreto de Mepiquat) na embebição de sementes de algodão: crescimento, desenvolvimento inicial e produção**. 2005. 62 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Faculdade de Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2005.

NOGUEIRA JÚNIOR, S.; BARBOSA, M. Z. O papel da pesquisa e a importância do Cerrado para a reorganização da cotonicultura brasileira. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v. 52, n. 2, p. 87-98, 2005.

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**, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 8-17, 2002.

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

OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of cotton plant. In: CIA, E; FREIRE, E. C.; SANTOS, W. J. dos (Eds). **Cultura do algodoeiro**, Piracicaba: Potafos, 1999. p. 35-55.

OOSTERHUIS, D. M. Growth and development of cotton plant. In: SIMPÓSIO SOBRE A CULTURA DE ALGODÃO, 1998, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: POTAFOS/ESALQ, 1998. p. 53.

PAULA, F. L. M. de.; STRECK, N. A.; HELDWEIN, A. B.; BISOGNIN, D. A.; PAULA, A. L. de.; DELLAI, J. Soma térmica de algumas fases do ciclo de desenvolvimento da batata (*Solanum tuberosum* L.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 5, p. 1034-1042, 2005.

PEDRO JÚNIOR, M. J.; BRUNINI, O.; ALFONSI, R. R.; ANGELOCCI, L. R. Estimativa de graus-dia em função da altitude e latitude para o Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 36, n. 5, p. 89-92, 1977.

PEDRO JÚNIOR, M. J.; CAMARGO, M. B. P. de.; MORAIS, A. V. de C.; FELÍCIO, J. C.; CASTRO, J. L. de. Temperatura-base, graus-dia e duração do ciclo para cultivares de triticales. **Bragantia**, Campinas, v. 63, n. 3, p. 447-453, 2004.

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: IAC, 1991. 11 p. (Boletim Técnico, 142).

PENG, S.; KRIEG, D. R.; HICKS, S. K. Cotton lint yield response to accumulated heat units and soil water supply. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 19, n. 3, p 253-262, 1989.

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**, Santa Maria, 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**, São Paulo, n. 23, 1974, 20 p.

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

PRELA, A.; GARCIA, B. I. L.; PEREIRA, A. R. Variação de graus-dia em Piracicaba (SP), em anos de El Niño e La Niña. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 3, p. 527-532, 2006.

PRETT, S. Comparison of seasonal thermal indices for measurement of corn maturity in a prairie environment. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 72, n. 4, p. 1157-1162, 1992.

QUEIROZ, E. F. de; SILVA, R. J. B. da; OLIVEIRA, M. C. de. Modelo de análise de regressão periódica da precipitação mensal, da bacia atlântico sudeste, no Estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 5, p. 727-742, 2001.

REDDY, V. R.; REDDY, K. R.; BAKER, D. N. Temperature effect on growth and development of cotton during the fruiting period. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, n. 1, p. 211-217, 1991.

ROSOLEM, C. A. **Ecofisiologia e manejo da cultura do algodão**. Piracicaba: POTAFOS, 2001. (Potafos. Informações Agronômicas, 95).

SANTOS, A. C. dos; ANDRADE, A. P. de; SILVA, I. de F. da; AZEREDO, G. A. de. Variabilidade temporal da precipitação pluviométrica e rendimento do algodoeiro herbáceo em diferentes sistemas de manejo de solo e de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 36, n. 2, p. 123-129, 2006.

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

SILVA, A. V.; PASCULLI, D. C.; CHIAVEGATO, E. J. Exigência térmica e características morfológicas de cultivares de algodoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ALGODÃO, 5., 2005, Salvador. **Anais eletrônicos...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2005. Disponível em: <http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/algodao/publicacoes/trabalhos_cba5/index.html>. Acesso em: 21 jan. 2008.

SILVA, J. C. da; HELDWEIN, A. B.; MARTINS, F. B.; STRECK, N. A.; GUSE, F. I. Risco de stresse térmico para o feijoeiro em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 3, p. 643-648, 2007.

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

SILVA, W. C. M. da; RICIÉRE, R. P.; AMORIM, R. C. F. de; GRIGOLETO, M. W.; DALLACORT, R. Temperatura do ar e a duração dos estádios fenológicos do milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE BIOMETEOROLOGIA, 3., 2001, Maringa. **Anais...** Maringa: UEM, 2001. 1 CD-ROM.

SILVA, W. C. M. da; RICIÉRE, R. P.; SOUZA, J. L. de; RIBEIRO, A. Caracterização agroclimática da região de Cascavel-Paraná para o cultivo do milho. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 54, n. 313, p. 341-348, 2007.

SNYDER, R. L. Hand calculating degree days. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 35, n.1-4, p. 353-358, 1985.

STAHL, K.; MOORE, R. D.; FLOYER, I. A.; ASPLIN, M. G.; MECKENDRY, I. G. Comparison of approaches for spatial interpolation of daily air temperature in a large region with complex topography and highly variable station density. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 139, n.1-4 p. 224-236, 2006.

TRENTIN, R.; SCHREIBER, F.; STRECK, N. A.; BURIOL, G. A. Soma térmica de subperíodos do desenvolvimento da planta de melancia. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 2464-2470, 2008.

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

VIATOR, R. P.; NUTI, R. C.; EDNISTEN, K. L.; WELLS, R. Predicting cotton boll maturation period using degree days and other climatic factors. **Agronomy Journal**, Mdison, v. 97, n. 2, p. 494-499, 2005.

WENDEL, J. F.; CRONN, R. C. Polyploidy the evolutionary history of cotton. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 78, p. 139-186, 2003.

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

WUTKE, E. B.; BRUNINI, O.; BARBANO, M. T.; CASTRO, J. L. de.; GALLO, P. B.; KANTHACK, R. A. D.; MARTINS, A. L. M.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; NELSON, B.; PAULO, E. M.; SAKAI, M.; SAES, L. A.; AMBROSANO, E. J.; CARBONELL, S. A. M.; SILVEIRA, L. C. P. Estimativa da temperatura base e graus-dia para feijoeiro nas diferentes fases fenológicas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 55-61, 2000.

YANG, S.; LOGAN, J.; COFFEY, D. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree-days. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 74, n. 1, p. 61-74, 1995.