

# Determinação das temperaturas cardinais da manga cultivar Roxa através de simulação computacional utilizando um modelo não linear

## Determination of the cardinal temperatures of Purple mango cultivar through computer simulation using a nonlinear model

Ivan Julio Apolonio Callejas<sup>1(\*)</sup>  
Geraldo Aparecido Rodrigues Neves<sup>2</sup>  
Andreia da Silva Tavares<sup>3</sup>  
Ivanete Barbosa de Moura<sup>4</sup>  
Erondina Azevedo de Lima<sup>5</sup>

### Resumo

A mangaueira é uma espécie que se adaptou bem ao clima quente e úmido do Brasil e em especial na região do Mato Grosso. O seu crescimento e desenvolvimento está atrelado às condições ambientais em que está inserida, principalmente, a temperatura do ar, visto que esta inibe ou favorece o crescimento e desenvolvimento pela modificação das atividades enzimáticas. Alguns estudos têm utilizado dados de campo e simulação computacional como forma de avaliar as temperaturas mínima, máxima e ótima de crescimento e de desenvolvimento das plantas como resposta da ação da temperatura. Nesse sentido, este trabalho teve como objetivo avaliar as temperaturas cardinais para cultivar manga roxa, a partir de um modelo não linear de simulação computacional proposto por Wang-Engel (WE). A metodologia se mostrou eficiente, sendo que as temperaturas cardinais determinadas foram de 10,61 °C, 29,36 °C e 54,88 °C, para  $T_b$ ,  $T_{op}$  e  $T_B$ , respectivamente, e o valor de RMSE obtido foi de 0,098682, demonstrando um bom ajuste entre dados

- 
- 1 Dr.; Professor Adjunto I do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT; Endereço: Avenida Fernando Correa da Costa s/n., Boa Esperança, CEP: 78000-000, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil; E-mail: ivancallejas@ig.com.br (\*) Autor para correspondência.
  - 2 Dr.; Licenciado em Física; Técnico Administrativo da Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT; Endereço: Avenida Fernando Corrêa, s/n., Coxipó, CEP: 78060-900, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil; E-mail: geraldo\_neves@hotmail.com
  - 3 MSc.; Física; Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT; Endereço: Fernando Corrêa da Costa, 2367, Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, CEP: 78060-900, Cuiabá, Mato Grosso; E-mail: andreiasilvatavares@hotmail.com
  - 4 Dra.; Geóloga; Endereço: Avenida dos Trabalhadores, s/n, Santa Inês, Jardim Eldorado, CEP: 78048-000, Cuiabá, Mato Grosso. E-mail: ivanetem@cpd.ufmt.br
  - 5 MSc.; Licenciatura plena em Física Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, UFMT; Endereço: Avenida Fernando Corrêa da Costa, 2367, Cidade Universitária, Bloco de Física Ambiental, CEP: 78060-900, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. E-mail: erondinaazevedo@hotmail.com

Recebido para publicação em 22/06/2012 e aceito em 17/02/2014

simulados dados observados. Os frutos utilizados na simulação levaram 98 dias para atingir a maturidade fisiológica, o que resultou em soma térmica de 1.710,36 °C dia.

**Palavras-chave:** graus dias; temperaturas cardinais; manga.

## Abstract

The Mango is specie that has adapted well to the Brazil hot and humid climate, especially, in the region of Mato Grosso State. Their growth and development is related to the environmental conditions, mainly to the air temperature, since this in habits or promotes the mango growth and development, because of the modification of enzyme activities. Some studies have used field data and computer simulation as a way to assess the minimum maximum and optimum temperature to growth and development of plants in response to temperature action. Thus, this study aimed to evaluate the cardinal temperatures for "Purple Mango", using the nonlinear model of computer simulation proposed by Wang-Engel (WE). The proposed method was efficient and the cardinal temperatures determined were 10.61 °C, 29.36 °C and 54.88 °C for  $T_b$ ,  $T_{op}$  and  $T_B$ , respectively, and RMSE value obtained in the simulation was 0,098682, which demonstrated a good fit between simulated data to the observed data. The mango fruits utilized for simulation took 98 days to reach physiological maturity, resulting in thermal sum of 1710.36 °C day.

**Key words:** degree-days; cardinal temperatures; mango.

## Introdução

A mangueira (*Mangifera indica* L.) da família Anacardiaceae, originou-se na Ásia Meridional e Arquipélago Indiano, onde é cultivada há mais de quatro mil anos. Na América, o primeiro país a cultivar a manga foi o Brasil (SIMÃO, 1998). É uma planta de vegetação permanente, cuja parte aérea alcança um grande tamanho, dependendo da origem da planta, cultivar, clima, solo e tratamentos culturais. Apresenta porte grande, esparramada, sempre verde com uma densa copa de forma arredondada ou globular (MANICA, 1981).

Introduzido pelos portugueses no Nordeste no séc. XVI, difundiu-se por todo o Brasil, sendo este um dos maiores produtores mundiais. A mangueira adaptou-se ao clima quente e úmido do Brasil, sendo que existem

cerca de 500 variedades de manga. A cultivar roxa foi obtida pela Embrapa Cerrados, do cruzamento entre as cultivares Amrapali e Tommy Atkins. É monoembriônica, produtiva, tamanho médio (300 g), frutos com polpa adocicada, Brix 20% e acidez baixa 0,12%, com relação Brix/acidez alta (160) (ROSSETO, 2008).

A temperatura configura-se como um dos principais parâmetros ambientais para delimitar as condições de ambiente que permite o desenvolvimento de uma dada espécie, principalmente as mangueiras. Os organismos vivos têm seus processos metabólicos dependentes da temperatura, sendo que as principais modificações fisiológicas ocasionadas nas plantas ou no cultivar por esta variável são: alteração na taxa de fotossíntese, na taxa de respiração e na taxa de crescimento e desenvolvimento.

Na realidade, o efeito da temperatura nada mais representa do que a energia que está contida no meio. Esta variável inibe ou favorece o crescimento ou desenvolvimento das plantas pela da modificação das atividades enzimáticas. Temperaturas muito baixas ou muito elevadas não favorecem o desenvolvimento de determinadas reações enzimáticas nas plantas, sendo esta a razão pela qual elas apresentam temperaturas mínima, máxima e ótima de crescimento e de desenvolvimento como resposta da ação da temperatura (BONHOMME, 2000).

O conceito de crescimento e desenvolvimento é muito utilizado em modelos de simulação de plantas. O primeiro se refere ao aumento de peso, volume, comprimento ou área de alguma parte da planta, enquanto o segundo se relaciona com a idade fisiológica da planta e sua aparência morfológica (WANG; ENGEL, 1998). Uma das formas mais antigas de relacionar o efeito da temperatura no crescimento e desenvolvimento das plantas é utilizar o conceito de tempo térmico (unidade °C dia ou graus-dia). O grau-dia é uma forma simplificada de avaliar a energia que esteve à disposição da planta em cada dia. Trata-se de um acúmulo térmico diário dentro de determinados limites nos quais a planta se desenvolve. Para a sua avaliação, existe necessidade de se avaliarrem as temperaturas base inferior ( $T_b$ ) e superior ( $T_B$ ). Essas temperaturas se relacionam com a temperatura mínima e máxima necessárias às atividades enzimáticas descritas por Bonhomme (2000).

Na grande maioria dos trabalhos realizados sobre o tema, a temperatura base superior ( $T_B$ ) tem sido desprezada na avaliação dos graus-dia pelo fato de ser elevada e raramente atingida no campo durante o ciclo

de desenvolvimento das culturas (MÜLLER et al., 2009). Dessa forma, no cômputo dos graus-dias, não tem sido considerado, a temperatura de base superior, somente a temperatura de base inferior. Destaca-se que a aproximação de tempo térmico ou graus-dia tem sido bastante criticada por causa de a resposta ao desenvolvimento ser linear em relação à temperatura do meio (STRECK, 2004), o que, do ponto de vista biológico, não representa a realidade observada no desenvolvimento dos cultivares. Na prática, os processos biológicos, entre eles o desenvolvimento da planta, apresentam um comportamento não linear em resposta à temperatura, sendo que, apenas em pequenas partes desses processos, o comportamento é linear (WANG; ENGEL, 1998).

Streck (2004) destaca que a resposta ao desenvolvimento, devido ao efeito da temperatura, é mais bem explicada em termos de temperaturas cardinais, as quais são denominadas de mínima ( $T_{min}$ ), ótima ( $T_{ot}$ ) e máxima ( $T_{max}$ ), por meio de funções lineares e não lineares. As funções não lineares de resposta à temperatura têm sido utilizadas em muitos modelos de simulação e conseguido representar de forma mais precisa o crescimento e desenvolvimento de cultivares tais como: trigo (SCHRONDER; SONDGERATH, 1996), tomate (FLEISHER et al., 2006), milho (CUTFORTH; SHAYKEWICH, 1990), entre outros.

Uma alternativa citada em algumas bibliografias (STRECK et al., 2008; STRECK 2004) é a utilização do modelo não linear de simulação proposto por Wang e Engel (1998), denominado "WE". Neste modelo, os fatores ambientais são representados por uma função resposta à temperatura que vai de 0 a 1. O modelo WE é descrito pela

função beta, que é modelada a partir de três parâmetros os quais apresentam significado biológico, que são as temperaturas cardinais ( $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$ ,  $T_{\max}$ ) descritas anteriormente. De acordo com STRECK (2004), a função beta é ideal, pois os seus parâmetros de modelagem apresentam significado biológico, enquanto algumas outras funções que são utilizadas não apresentam essa característica, como é o caso da função exponencial dupla, usada na modelagem do Crisântemo (STRECK, 2004). Ela apresenta as seguintes características: quando a temperatura é igual ou inferior à temperatura-base mínima, a função apresenta, como resposta, o valor zero, indicando que não há desenvolvimento nestas condições. O mesmo acontece quando a temperatura é igual ou superior à temperatura base superior. A função beta é igual a um quando a temperatura do meio é igual à temperatura base ótima, e um valor menor que um e maior que zero nas condições intermediárias. O que foi descrito pode ser sistematizado como segue:

$$f(T) = 0, T \leq T_{\min} \text{ ou } T \geq T_{\max} \quad (1)$$

$$f(T) = [2 \cdot (T - T_{\min})^\alpha \cdot (T_{\text{opt}} - T_{\min})^\alpha - (T - T_{\min})^{2\alpha}] / (T_{\text{opt}} - T_{\min})^{2\alpha}, T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \quad (2)$$

$$\alpha = \ln(2) / \ln [(T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\text{opt}} - T_{\min})] \quad (3)$$

Sendo:

“ $T_{\min}$ ”, “ $T_{\text{opt}}$ ” e “ $T_{\max}$ ” são as temperaturas cardinais do desenvolvimento (mínima, ótima e máxima) e “ $T$ ” a temperatura do meio. Neste trabalho, a função beta utilizada foi a adotada com intuito de representar o crescimento e o desenvolvimento de frutos de manga da espécie roxa, da antese até a maturação.

Estimativas precisas dos estágios de desenvolvimento das plantas são importantes para os modelos de estimativa de colheita e na gestão das safras. Neste sentido, os modelos

de simulação oferecem a possibilidade de integrar o conhecimento da área experimental com a teórica, sendo uma ferramenta valiosa no campo das previsões, nas análises políticas, no manejo das safras, no planejamento das colheitas, no transporte de produtos para o mercado consumidor e para a seleção de cultivares apropriados em programas de reprodução. A horticultura no Brasil, assim como em outros países, é caracterizada por uma diversidade de sistemas de cultivo, tais como frutas, vegetais, flores, etc. No entanto, o que se observa, na literatura, é que apenas alguns cultivares o seu desenvolvimento foram simulados e modelados (BEZERRA et al., 2010). Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivo estimar, a partir de simulação computacional, as temperaturas basais mínima, máxima e ótima para mangueira roxa.

## Material e Métodos

O trabalho de campo foi realizado no cultivar da manga Roxa em um campo demonstrativo existente na Fazenda Experimental da UFMT, no município de Santo Antônio de Leverger, MT, próximo das coordenadas de 15° 47' de latitude Sul, e 56° 04' de longitude Oeste, e altitude de 140 m, na microrregião da Baixada Cuiabana. O experimento foi desenvolvido em três plantas da mesma variedade de mangueiras roxa, denominadas de 1, 2 e 3. O período de monitoramento foi 17 de agosto de 2009 até 28 de dezembro de 2009. Nesse período, a cada semana eram procurados e marcados novos frutos de comprimento e diâmetro iguais ou inferiores a 15 mm em três plantas de uma mesma variedade de manga Roxa. Foi feito também o acompanhamento do desenvolvimento desses frutos. Ao todo,

foram marcados sete frutos na mangueira 1, nove frutos na mangueira 2 e cinco frutos na mangueira 3. Ao final do experimento, somente cinco frutos da mangueira 1, um fruto da mangueira 2 e um fruto da mangueira 3 chegaram ao estágio final de desenvolvimento (maturação fisiológica). No desenvolvimento do trabalho, somente quatro mangas que haviam sido marcadas no mesmo dia e alcançaram a maturação nas mesmas datas foram utilizadas na simulação.

Os graus-dia, expressos em °C dia, para cada fruto, foi obtido pelo somatório dos graus-dias acumulados durante os dias necessários para completar o desenvolvimento do fruto utilizando o método de Arnold (1959):

$$GDA = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b) \quad (4)$$

Sendo:

“ $T_i$ ” a temperatura média do dia, “ $T_b$ ” a temperatura basal mínima de crescimento e “ $n$ ” o número de dias do período de desenvolvimento.

Com intuito de estimar a temperatura basal mínima, utilizou-se o método de menor desvio padrão, em dias (Sd), proposto por ARNOLD (1959):

$$Sd = \frac{Sdd}{(T - T_b)} \quad (5)$$

Sendo:

“Sd” o desvio padrão em graus-dia para a série de experimentos, “Sdd” o desvio padrão em graus-dia para toda a série de plantio, para cada valor de temperatura base inferior adotada; “ $T$ ” a temperatura média para toda a série de desenvolvimento dos frutos sobre a qual “Sdd” é baseada (período experimental); “ $T_b$ ” a temperatura de base adotada.

Alternativa utilizada para estimar a temperatura base inferior foi feita pelo método do desenvolvimento relativo (DR):

$$DR = a + b.T \quad (6)$$

Sendo:

“ $T$ ” a temperatura média em °C; “ $a$ ” e “ $b$ ” são os coeficientes linear e angular da regressão linear simples;  $DR = 100/n$ , onde “ $n$ ” é o dias do ciclo da cultura. Destaca-se que a temperatura base inferior é encontrada quanto “DR” for igual a zero. Ocorrendo isso, a equação (3) fica:

$$T_b = -\frac{a}{b} \quad (7)$$

Diante do insucesso do cálculo da temperatura base inferior a partir da metodologia da soma térmica, partiu-se para estimativa utilizando-se o conceito de unidades fototérmicas (UF) proposta por Villa Nova et al. (1983). A metodologia proposta pelos autores considera também o efeito fotoperíodo (N):

$$UF = \frac{\left(\frac{n}{2} GDA\right)^{\frac{N_f}{N_i} + 1}}{\frac{N_f}{N_i} + 1} \quad (8)$$

Sendo:

O número de unidades fototérmicas acumuladas no período expresso em “uf”; “ $n$ ” o número de dias no período; “ $N_f$ ” se refere ao valor do fotoperíodo (horas e décimos de horas) ao final do período de desenvolvimento dos frutos; “ $N_i$ ” ao valor do fotoperíodo no início do período de crescimento. O cálculo de  $N_f$  e  $N_i$  é feito através das seguintes equações:

$$N_f \text{ ou } N_i = 0, 133 \arcsin(-\text{tg}\delta.\text{tg}\varphi) \quad (9)$$

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ \left( \frac{360}{365} (D_j - 80) \right) \right] \quad (10)$$

Sendo:

Portanto, UF variável em função da latitude do local onde se realiza o estudo ( $\phi$ ), bem como a declinação solar ( $\delta$ ) em que se realizou o experimento,  $D_j$  o dia juliano e o termo GDA já definido na equação 1. Tanto o método de menor desvio padrão, do desenvolvimento relativo, como também das unidades fototérmicas não foram eficazes em estimar a temperatura base mínima para o cultivar manga roxa. Por este motivo, partiu-se para a utilização do modelo não linear de simulação proposto por Wang e Engel (1998).

Conforme destacam Wang e Engel (1998), o ciclo de desenvolvimento de uma cultura pode ser dividida em duas fases: a vegetativa, que inicia na germinação e vai até a emergência, e a reprodutiva, que vai da antese até a maturidade. Como os frutos da mangueira foram observados posteriormente à germinação e à emergência, serão apresentados somente os conceitos relativos à fase reprodutiva, visto que se pretende simular apenas o desenvolvimento dos frutos da mangueira roxa, da antese até a maturação.

O estágio do desenvolvimento do fruto " $S_{dev}$ " (da antese até a maturação) foi avaliado fazendo-se a soma das taxas diárias de desenvolvimento do fruto ( $\sum r_{diário}$ ). Na fase reprodutiva, " $S_{dev}$ " é igual a 1,0 no estágio final de maturação. De acordo com Wang e Engel (1998), a taxa de desenvolvimento do fruto é afetada pela temperatura do meio e o fotoperíodo. Na fase reprodutiva, a taxa de desenvolvimento ( $r_{dev,r}$ ) foi assumida ser apenas dependente da temperatura média diária do ar, ignorando-se o efeito do fotoperíodo, pois, conforme Streck et al.

(2008), esta abordagem é mais apropriada para o cálculo da função  $f(T)$  a partir das temperaturas médias mínimas e máximas diárias. É importante destacar que esta hipótese é válida para apenas algumas espécies. Assim, o modelo proposto WE para a fase reprodutiva fica expresso:

$$S_{dev} = \sum r_{diário} \quad (11)$$

$$r_{diário} = r_{max,r} f(T) \quad (12)$$

Sendo que:

" $r_{max,r}$ " é a taxa máxima de desenvolvimento por dia e  $f(T)$ , como já descrito, representa a função resposta à temperatura média diária ao meio, que varia de 0 a 1 (ver equações 8, 9 e 10). Como as medições em campo não se iniciaram no começo da antese (abertura das flores), o modelo foi modificado para levar em consideração este fato. Assim, a equação (11) ficou representada na simulação pela seguinte forma:

$$S_{dev} = S_{dev,i} + \sum r_{diário} \quad (13)$$

Sendo:

" $S_{dev,i}$ " é o desenvolvimento médio dos quatro frutos no início do período das medições. Esta alteração no modelo WE foi implementada devido ao fato de não ser possível estimar com exatidão o início da antese.

Para que o modelo "WE" pudesse ser implementado na planilha eletrônica, fez-se necessário determinar a taxa de desenvolvimento diário ( $r_{diário}$ ) apresentada pelos quatro frutos de mangas pesquisados durante a fase reprodutiva. Isso foi feito a partir das medições realizadas no período de 17/08 a 23/11/10, sendo este o último dia, em que foi observada a maturidade fisiológica dos frutos em campo. Calculou-

se, então, para cada dia de observação, o volume do fruto, assumindo-se a hipótese de que o volume ( $V_i$ ) da manga pudesse ser representado por um elipsoide de revolução. O volume do fruto obtido na última medição ( $V_f$ ), na ocasião da maturação, foi utilizado como referência para o cálculo do volume relativo do fruto em cada dia de medição ( $VR_i = V_i/V_f$ ). Procedendo-se dessa forma, em cada quinzena de medição, foi possível obter um conjunto de dados onde a abscissa representava o número de dias de desenvolvimento e, a ordenada, o volume relativo naquele dia do desenvolvimento ( $VR_i$ ). Este procedimento permitiu representar o desenvolvimento dos frutos durante todo o período de forma adimensional (Figura 1). Realizou-se com os dados uma análise de regressão, obtendo-se uma equação que representava o desenvolvimento do volume relativo do fruto ao longo do período. A derivada desta equação resulta na taxa diária de desenvolvimento dos frutos em estudo. Esta equação foi utilizada no modelo “WE” para representar a taxa de desenvolvimento diário dos frutos estudados ( $r_{\text{diário}}$ ). No entanto, ela não representa a taxa máxima diária ( $r_{\text{max,r}}$ ) de desenvolvimento dos frutos em estudo, para o que adotou-se o seguinte procedimento: com a taxa de desenvolvimento diário dos frutos avaliada a partir da análise de regressão dos dados, procurou-se encontrar uma curva que quando multiplicada pela função beta, se ajustasse de forma mais precisa possível à curva “ $r_{\text{diário}}$ ”. Variou-se a taxa de desenvolvimento para valores definidos e utilizando-se a estatística RMSE (Equação 14), adotou-se a curva de melhor ajuste entre os dados observados e simulados.

Os valores dos volumes relativos estimados pela equação 13 ao longo do desenvolvimento dos frutos foram comparados

com os valores observados em campo. Para aferir o desempenho do modelo de simulação proposto, utilizaram duas estatísticas: erro dos quadrados médios, denominado de “RMSE”, e o índice de concordância, denominado de “d”. O “RMSE” expressa a média dos erros produzida pelo modelo proposto. Quanto menor esta estatística, melhores os resultados fornecidos pelo modelo. Uma característica importante desta estatística é que a dimensionalidade do resultado apresentado por ela é a mesma dos dados observados em campo. No caso, como o modelo de simulação proposto estima o volume relativo do fruto ao longo do desenvolvimento, o valor calculado é adimensional. O “RMSE” é calculado através da seguinte equação:

$$\text{RMSE} = \left[ \frac{\sum(E_i - O_i)^2}{N} \right]^{0,5} \quad (14)$$

Sendo:

“ $E_i$ ” o valor estimado, “ $O_i$ ” o valor observado, “ $N$ ” o n° de observações e “ $i = 1 \dots N$ ”.

O índice de concordância “d” mede o grau com o qual os valores estimados pelo modelo estão livres de erro. Este índice é adimensional. Os valores encontrados variam de 0, que significa discordância total entre os dados estimados e observados, a 1, que significa concordância completa entre os dados em estudo. O índice “d” pode ser avaliado pela seguinte equação:

$$d = 1 - \frac{[\sum(E_i - O_i)^2]}{\sum[(E_i - \bar{O}) + (O_i - \bar{E})]^2} \quad (15)$$

Sendo

a média dos valores observados em campo. As estatísticas citadas foram implementadas no modelo de simulação desenvolvido.

Para realizar a simulação dos dados, foi utilizada a técnica de Monte Carlos com auxílio do programa Oracle Crystal Ball, uma ferramenta “add-in” do programa Microsoft Excel. Os seguintes passos foram realizados para fazer uma simulação: desenvolvimento de uma planilha no Excel que descrevesse o modelo do problema a ser analisado (previsão do desenvolvimento dos frutos) com a apresentação das variáveis que precisam ser estimadas, no caso as temperaturas cardinais ( $T_{min}$ ,  $T_{opt}$ ,  $T_{max}$ ); definição do modelo de previsão, feita através do estágio de desenvolvimento do fruto “ $S_{dev}$ ” que deve ser igual a 1,0; definição do objetivo a ser alcançado na simulação que no caso era representar o desenvolvimento do fruto o mais próximo possível do observado em campo. Este último passo foi definido impondo-se a condição que o valor final do “RMSE” fosse minimizada na análise. Juntamente com a definição do objetivo, foram feitas as definições dos requerimentos a serem alcançados na simulação, ou seja, definiu-se que o valor final do desenvolvimento fosse igual a 1,0 ( $S_{dev} = 1,0$ ).

Para a obtenção das variáveis pesquisadas, foi necessário definir intervalos nos quais se esperava que estas estivessem compreendidas. Sob o ponto de vista biológico, estes intervalos representam o possível comportamento da planta no meio. Eles são importantes para que o programa Crystal Ball pudesse definir as estratégias de busca das variáveis em estudo. Assim, com base nas bibliografias consultadas (MOSQUEDA-VÁZQUEZ et al., 1993; LUCENA, 2006), definiu-se que a temperatura mínima de desenvolvimento estivesse compreendida dentro do intervalo de 0 °C a 17,5 °C, a temperatura ótima entre 18 °C e 34,5 °C e a temperatura máxima entre 35 °C e 60 °C.

## Resultados e Discussões

Os dias de desenvolvimento, a temperatura média do período, o volume final e a equação de desenvolvimento dos frutos pesquisados são apresentados na tabela 1. Destaca-se que somente os quatro frutos que atingiram 98 dias até a maturação fisiológica foram utilizados na simulação computacional. É possível perceber pela derivada das equações que a taxa de crescimento diário dos frutos é representada por uma equação do primeiro grau, sendo que as taxas de variação do crescimento diário dos frutos pelo coeficiente angular destas equações. A curva sigmóide é, geralmente, utilizada para a modelagem de desenvolvimento dos frutos, no entanto, no presente trabalho, os dados não foram obtidos desde a antese, fato que não permitiu a utilização da mesma. Para os quatro frutos utilizados na pesquisa, o coeficiente angular das retas variaram de -0,00018 a -0,0004/ dia, sendo que o coeficiente negativo indica que o desenvolvimento do fruto se reduziu ao longo do tempo a uma taxa constante.

Na figura 1, apresenta-se o desenvolvimento relativo dos quatro frutos simulados no período de maturação. Nota-se que o coeficiente de correlação obtido para a taxa de desenvolvimento desses frutos foi  $R^2=0,9141$ , considerado bom pela análise dos seus resíduos, pois 83,71% da taxa de desenvolvimento podem ser explicadas pela variação do número de dias de desenvolvimento. Ao aplicar a estatística de Durbin-Watson, o valor obtido foi de 0,570 indicando autocorrelação positiva dos resíduos. Ao se testarem os pressupostos para regressão, percebeu-se em gráfico uma dispersão dos resíduos, mostrando homogeneidade nas variâncias.

Tabela 1 – Dados gerais dos frutos que chegaram ao estágio de maturação, entre os quais somente os frutos 1.1, 1.3, 1.4 e 3.1 foram utilizados na simulação

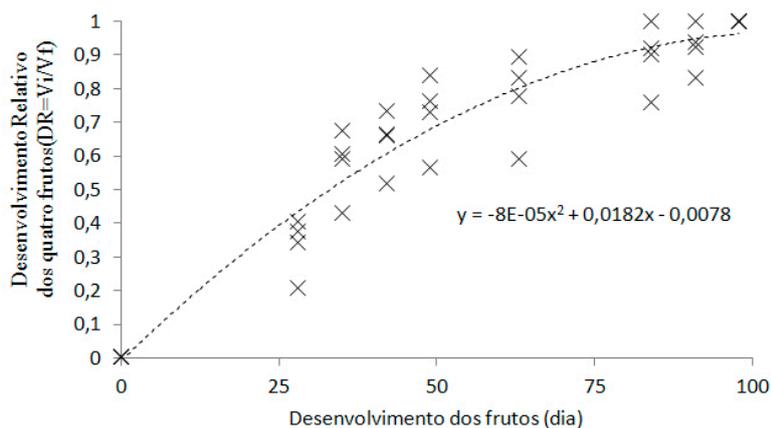
Fruto	Dias de Desenvolvimento	Temperatura Média °C	Equação de Ajustamento para o Desenvolvimento do fruto ("x" em dias)	R <sup>2</sup>	Volume Final (cm <sup>3</sup> ) (V <sub>F</sub> )
1.1	98	26,933	$y = -1E-4x^2 + 0,0203x + 0,002$	R <sup>2</sup> =0,975	347,60
1.2	85	26,861	$y = -1E-4x^2 + 0,0229x - 0,0136$	R <sup>2</sup> =0,987	253,15
1.3	98	26,933	$y = -0,9E-4x^2 + 0,0186x - 9E-05$	R <sup>2</sup> =0,981	366,65
1.4	98	26,933	$y = -2E-4x^2 + 0,0115x + 0,0021$	R <sup>2</sup> =0,955	355,55
1.5	91	27,080	$y = -1E-4x^2 + 0,0193x - 0,0036$	R <sup>2</sup> =0,967	361,24
2.1	95	27,295	$y = -1E-4x^2 + 0,0232x - 0,106$	R <sup>2</sup> =0,976	639,59
3.1	98	26,933	$y = -1E-4x^2 + 0,0222x - 0,0353$	R <sup>2</sup> =0,966	279,79

Fonte: Autores (2012).

A forte correlação entre as variáveis estudadas possibilitou avaliar a taxa de desenvolvimento diário dos frutos a partir da derivada da equação de ajuste do desenvolvimento dos frutos, como explicitado anteriormente. Esta equação é representada pela seguinte equação: “- 0,00016x+0,0182”. Esta foi utilizada para representar o desenvolvimento diário dos frutos ( $r_{diário}$ ). O desenvolvimento máximo diário ( $r_{max,r}$ ) foi obtido assumindo-se a hipótese de pudesse

também ser representado por uma reta. Para a sua obtenção, houve a necessidade de encontrar uma curva que, multiplicada pela função beta, ajuste-se a curva da taxa de desenvolvimento encontrada, ou seja,  $r_{diário} = r_{max,r} \cdot f(T)$ . O coeficiente angular (a) dessa reta bem como o seu termo independente (b) foi obtido a partir da implementação no modelo de simulação destas duas novas variáveis que foram assumidas estar compreendidas entre  $-0,00014 \leq a \leq -0,00018$  e  $0,0167 \leq b \leq 0,0205$ .

Figura 1 – Curva do desenvolvimento relativo (DR) dos frutos no período de maturação fisiológica



Fonte: Autores (2012).

Definiu-se que o programa fizesse ,inicialmente, mil interações na procura dos resultados que melhor se ajustassem às condições descritas: menor RMSE e soma do desenvolvimento  $S_{dev}=1,0$ . A primeira solução encontrada para 1.000 simulações é apresentada na tabela 2. Com intuito de avaliar a solução encontrada, aumentou-se o número de simulações para cinco mil e, posteriormente, para dez mil interações. Procedeu-se a novas simulações com o intuito de verificar se o programa conseguia encontrar uma melhor solução do que as apresentadas na tabela 2, sem, no entanto, obter sucesso. A solução para 10.000 simulações foi considerada como a que melhor ajusta os dados simulados com os

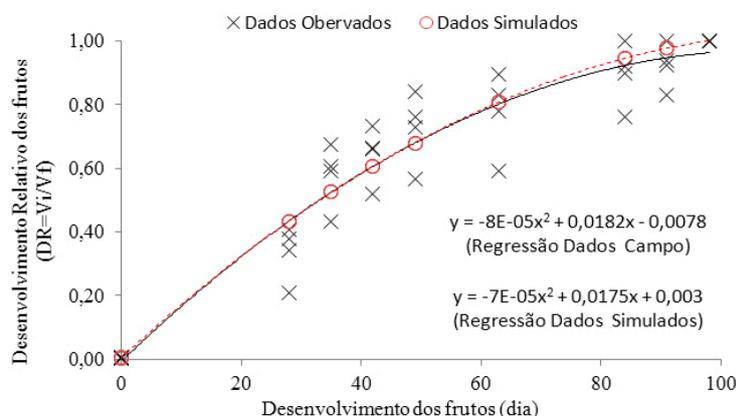
dados observados, pois a mesma apresenta o menor erro dos quadrados médios (RMSE). A título de comparação, são apresentados, na figura 2 os dados obtidos em campo, a curva de ajustamento obtida e os resultados obtidos na simulação pelo programa. As temperaturas cardinais correspondentes para a melhor solução foram de 10,61 °C, 29,36 °C e 54,88 °C, para  $T_b$ ,  $T_{op}$  e  $T_B$ , respectivamente (Tabela 2), com coeficientes “a” e “b” de -0,00016 e 0,0186 para a equação do máximo desenvolvimento diário ( $r_{max,r}$ ). Comparando os dados de campo e a curva ajustada, nota-se uma aproximação entre ambas. Essa aproximação é evidenciada pelo erro médio de 9,8682% na estimativa do volume relativo (Figura 2).

Tabela 2 – Resultados encontrados na Simulação

Numero de Simulações Realizadas	Equação taxa de desenvolvimento máximo		Temperatura Cardinais (°C)			Soma do desenv. Diário $S_{de}$	Estatísticas	
	Coef. “a”	Coef. “b”	$T_b$	$T_{op}$	$T_B$		RMSE	d
1000	-1,6E-4	0,0186	9,98	27,33	43,41	1,0	0,098793	0,9422
5000	-1,6E-4	0,0186	10,61	29,37	54,89	1,0	0,098683	0,9424
10000	-1,6E-4	0,0186	10,61	29,36	54,88	1,0	0,098682	0,9424

Fonte: Autores (2012).

Figura 2 – Dados observados, dados simulados e equação ajustada



Fonte: Autores (2012).

Analisando os valores de temperatura cardinais encontrados, verifica-se que o valor encontrado para a temperatura de base inferior se aproxima muito do valor de 10 °C utilizado por Lucena (2006) para o cálculo dos graus-dia para a manga 'Tommy Atkins'. Em um experimento realizado em mangas 'Alfa', no mesmo sítio experimental desta pesquisa, Barroset al. (2010) obteve o valor de 10 °C para a temperatura base inferior, através do método das unidades fototérmicas, valor este muito próximo do encontrado no presente trabalho.

Foi possível confirmar a hipótese utilizada em muitos trabalhos de desprezar a temperatura máxima na avaliação dos graus-dia, visto que a temperatura de base superior  $T_B = 54,88$  °C esteve longe da máxima temperatura do ar observada na região durante o período de realização dos experimentos (40,5 °C). No entanto, indaga-se se o valor encontrado não seria apenas uma solução matemática fornecida pelo programa, pois, conforme destaca Bonhomme (2000), existem poucos fenômenos biológicos ocorrendo acima de 45 °C. O máximo valor relatado para a temperatura base superior foi de 40 °C (WANG; ENGEL, 1998; STRECK, 1998; SILVA; LIMA, 2008; MULLER et al., 2009), valor bem inferior ao encontrado no presente trabalho.

Sob o ponto de vista biológico, a melhor solução encontrada seria a obtida com mil simulações,  $T_b = 9,98$  °C,  $T_{opt} = 27,33$  °C e  $T_B = 43,41$  °C, pois aproximam-se dos resultados encontrados no campo experimental e apresenta um valor de " $T_B$ " fisiologicamente compatível com os processos enzimáticos que se desenvolvem na planta. A temperatura ótima para esta solução está 2,04 °C abaixo da melhor solução encontrada, mas próxima da média da temperatura do

ar observada no período (26,99 °C), o que, de certa forma, indica que este cultivar está bem adaptado às condições climáticas da região da Baixada Cuiabana, região onde o experimento foi desenvolvido. Em termos estatísticos, a diferença entre a melhor solução encontrada com dez simulações e a de mil simulações é de apenas 0,011%, ou seja, uma linha tênue separa as duas soluções.

Os frutos simulados levaram 98 dias para alcançar a maturação, o que fornece um soma térmica de 1710,36 °C dia, considerando a temperatura base inferior estimada no presente trabalho. O valor encontrado está próximo do valor determinado por Lucena (2006) que foi de 1939,70 °C dia. É importante destacar que o fruto não foi avaliado desde o início da antese, fazendo com que este valor esteja subestimado.

## Conclusão

É importante destacar que, inicialmente, utilizou-se a própria taxa de desenvolvimento obtida pela análise de regressão para a simulação do desenvolvimento dos frutos. Entretanto, devido aos resultados obtidos e reflexões sobre o procedimento adotado, percebeu-se que seria uma incoerência multiplicar a taxa de desenvolvimento diário pela função beta, já que aquela já trazia intrinsecamente esta multiplicação, pois ela representava o desenvolvimento dos frutos medidos em campo, já ajustados, desta forma, pelo mecanismo termorregulador da planta.

A simulação computacional demonstrou bom ajuste dos dados simulados aos de campo, compatível com os encontrados por outros autores (STRECK, 2004; LAGO et al., 2008). O valor encontrado para a temperatura de base inferior ( $T_b = 10,61$  °C)

está coerente com os resultados encontrados por outros pesquisadores; a temperatura ótima ( $T_{op} = 29,36 \text{ }^\circ\text{C}$ ) se aproxima do valor médio da temperatura do ar para o período pesquisado, indicando que o meio oferece condições de desenvolvimento e crescimento para os frutos da mangueira. A temperatura de base superior obtida pelo método proposto está muito acima dos valores sugeridos e utilizados para outros cultivares. Questiona-se se a manga conseguiria suportar temperatura tão elevada ( $54,88 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Nesse sentido, é de fundamental importância na análise dos resultados da simulação computacional o conhecimento do comportamento do cultivar à luz das variáveis ambientais com vistas a validá-los, pois o mesmo pode fornecer respostas não condizentes com a realidade da região.

Os resultados encontrados demonstram a necessidade de se realizar em estudos mais sistematizados, utilizando-se de dados de frutos para períodos distintos e com amplo intervalo de variação de temperatura, com o intuito de determinar as temperaturas base, por meio de metodologias tradicionais, visto que o presente trabalho não obteve sucesso aplicando essas metodologias. Sugere-se para trabalhos futuros a introdução do efeito do fotoperíodo no modelo WE com intuito de avaliar o seu efeito no desenvolvimento das mangas.

### **Apoio**

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq.

### **Referências**

- ARNOULD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v.74, p.430-445, 1959.
- BARROS, M. P.; ZANETTI, V. B.; FRAGA, C. I. M.; NINCE, P. C. C.; CAMPELO JUNIOR, J. H.; LOBO, F. A. Unidades fototérmicas e temperatura-base inferior de frutos de Mangueira Alfa, na Baixada Cuiabana. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 32, n.2, 2010.
- BEZERRA, T. S.; COSTA, J. M. C.; AFONSO, M. R. A.; MAIA, G. M.; ROCHA, E. F. F. Comportamento higroscópico de pós de manga das variedades coité e espada e avaliação das características físico-químicas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.10, p. 2186-2192, 2010.
- BONHOMME, R. Bases and Limits to using 'degree.day' units. **European Journal of Agronomy**, Elsevier, n.13, p.1-10, 2000.
- BURONDKAR, M. M.; BHINGARDE, R. T.; KORE, V. N.; POWAR, A. G. Estimation of heat units as maturity indices for different mango varieties in Konkan region of Maharashtra. **Acta Horticulturae**, Leuven, n. 509, p. 297-299, 2000.

CHAUDHRI, S. A. Mango. In: GARDNER, R. S.; CHAUDHRI, S. A. **The propagation of tropical fruits trees**. England: CAB International, p. 403-474, 1976.

CUTFORTH, H. W.; SHAYKWICH, C. F. A temperature response function for corn development. **Agricultural Land Forest Meteorology**, v.50, p. 159-171, 1990.

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

FLEISHER, D. H.; SHILLITO, R. M.; TIMLIN, D. J.; KIM, S. H.; REDDY, V. R. Approches to modeling potato leaf appearance rate. **Agronomy Journal**, v.98, p.522-528, 2006.

LAGO, I.; GABRIEL, L. F.; SAMBORANHA, F. K.; STRECK, N. A. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, p.449-455, 2008.

LIMA, E. P.; SILVA, E. L. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.12, n.03, p.266-273, 2008.

LUCENA, E. M. P. **Desenvolvimento e maturidade fisiológica de manga 'Tommy Atkins' no Vale do São Francisco**. 2006. 152 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006.

MANICA, I.; MALAVOLTA, E.; ICUMA, I. M.; RAMOS, V. H. V.; OLIVEIRA JÚNIOR, E.; CUNHA, M.; JUNQUEIRA, N. T. V. **Tecnologia, produção, agroindústria e exportação de manga**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2001. 617p.

MOSQUEDA-VÁZQUEZ, R.; ROSA, F.; IRETA-OJEDA, A. Degree-Days and base temperatures required for inflorescence and fruit development in mango 'Manila'. **ISHS Acta Horticulturae 341: IV International Mango Symposium**, Miami, n. 341, p. 232-237, 1993.

MÜLLER, L.; MANFRON, P. A.; MEDEIROS, S. L. P.; STRECK, N. A.; MITTELMAN, A.; DOURADO NETO, D.; BANDEIRA, A. H.; MORAIS, K. P. Temperatura base inferior e estacionalidade de produção de genótipos diplóides e tetraplóides de azevém. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.5, p. 1343-48, 2009.

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

ROSSETO, C. J. **Variedades de manga**. Jaboticabal: 2008. Disponível em: <<http://www.todafruta.com.br/portal/icNoticiaAberta.asp?idNoticia=18323>>. Acesso em: 10 jan. 2011.

SCHRODER, U.; SONDEGERATH, D. The concept of biological time for computing the switching points of a growth model for winter wheat. **Ecological Modelling**, v. 88, p.1-8, 1996.

- SILVA, J. S. O. **Produção de manga**: manual. Viçosa: CPT,1996. 34 p.(Série Fruticultura nº 40).
- SIMÃO, S. **Tratado de fruticultura**. Piracicaba: FEALQ. 1998. 760p.
- SINGH, L. B. **The mango**: botany, cultivation and utilization. London: Leonard Hill, 1960.
- SNYDER, R. L. Hand calculating degree days. **Agriculture and Forest Meteorology**, v.35, n.1/4, p.353-358, 1985.
- STRECK, N. A.; LAGO, I.; GABRIEL, L. F.; SAMBORANHA, F. K. Simulating maize phenology as a function of air temperature with a linear and a nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.43, n.4, p.449-455, 2008.
- STRECK, N. A. A temperature response function for development of the chrysanthemum (*Chrysanthemum x Morifolium* Ramat.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.1, p.49-54, 2004.
- VILLA NOVA, N. A.; CARRETEIRO, M. V.; SCARDUA, R. Um modelo de avaliação do crescimento de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) em termos da ação combinada do fotoperíodo e da temperatura média do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEROLOGIA 2., 1983, Campinas. **Anais...** Campinas: Agromet, 1983. p.31-48.
- WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phonological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v.58, p.1-24, 1998.