

COMPORTAMENTO TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA EM MUNICÍPIOS DE SÃO PAULO E PROVÍNCIAS DE CUBA

ESTEBAN CHOQUE CONDE¹; RAMILOS RODRIGUES DE BRITO²; RANSES JOSÉ VÁZQUEZ MONTENEGRO³ E RODRIGO MÁXIMO SÁNCHEZ ROMÁN⁴

¹Doutorando em Irrigação e Drenagem, UNESP/FCA, Botucatu, Brasil. email: condesteban@hotmail.com

²Eng. Agrônomo, Doutorando em Irrigação e Drenagem, UNESP/FCA, Botucatu, Brasil.

³Especialista em Meteorologia Agrícola, Instituto de Meteorologia La Habana, Cuba.

⁴Doutor em Engenharia Agrícola, Professor UNESP/FCA, Botucatu, Brasil.

1 RESUMO

A importância de determinar e modelar o comportamento temporal da Evapotranspiração de Referência (ET_o) constitui-se na grande necessidade de gerar uma margem de confiança na programação e disponibilidade de água para irrigação, frente ao déficit hídrico das culturas agrícolas. O estudo foca-se na estimativa da ET_o mediante a equação Penman-Monteith FAO-56, e a modelagem da tendência e comportamento temporal, mediante o método geoestatístico, baseado na análise de semivariograma e krigagem, nas localidades de Cuba (Güira de Melena, Bauta e Batabanó) e do Brasil (Franca, Piracicaba e São Paulo). Os resultados do ET_o mostraram diferentes cenários, maiores amplitudes durante o solstício de verão e menores no solstício de inverno.

Palavras chave: Evapotranspiração de referência, Geoestatística, Krigagem

CHOQUE C., E.; BRITO, R. R.; VAZQUEZ M., R. J.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.
TEMPORAL BEHAVIOR OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION IN THE
STATE OF SÃO PAULO AND PROVINCES OF CUBA

2 ABSTRACT

The importance of determining and modelling the temporal behavior of Reference Evapotranspiration (ET_o) lies in the need to generate a margin of confidence in programming and assess the availability of water for irrigation, considering future demands to diminish the water deficit for agricultural crops. The study focuses on the estimation of ET_o by Penman-Monteith FAO-56 equation, and modeling the tendency and temporal behavior, by using semivariogram analysis and kriging as geo-statistical methods. The areas of study were Güira de Melena, Bauta and Batabanó in Cuba, and Franca, Piracicaba and São Paulo in Brazil. The results of the ET_o showed several scenarios, larger amplitudes during the summer solstice and smaller in the winter solstice.

Keywords: Reference evapotranspiration, Geostatistic, Kriging

3 INTRODUÇÃO

As atividades agrícolas demandam grandes quantidades de água e, sendo cada vez mais preocupante a sua escassez, esforços têm sido empregados no desenvolvimento de pesquisas que possibilitem a sua economia, em todo o planeta. (DE CARVALHO et al., 2011). Pois sabemos que a grande problemática da irrigação são os baixos índices de eficiência, devido a diversos fatores técnicos, climatológicos, de manejo do solo e dos cultivos (BRITO, R.R; GOMES, E. R.; LUDWIG, R., 2012).

Em relação aos fatores climatológicos, tem-se o conceito de Evapotranspiração de Referência (ET_o), que representa a demanda evaporativa da atmosfera em função das condições climáticas locais para uma cultura padrão. A temática surge da necessidade, tanto em Cuba quanto no Brasil, de gerar conhecimentos a respeito da variabilidade climática e seu impacto na atividade agropecuária.

Nesta pesquisa, interessa estudar o comportamento da Evapotranspiração de referência e seus efeitos na produção de alimentos na escala de bacia hidrográfica e áreas circundantes destas bacias. E para isso existem diversos métodos de estimativa que estão divididos em diretos (balanço de água no solo) e indiretos (modelos matemáticos), no entanto, os métodos diretos são pouco utilizados por serem bastante onerosos e impróprios para medidas rotineiras. Por isso adota-se os métodos indiretos de estimativa da Evapotranspiração de referência, e estes devem estar condicionados a uma série de fatores, dentro os quais: a disponibilidade de dados meteorológicos, a escala de tempo e as condições climáticas para as quais o método foi desenvolvido.

O método de Penman-Monteith é recomendado como o único método padrão FAO-56 de determinação de ET_o. Este método foi selecionado por representar bem o processo da ET_o em qualquer região e condições climáticas, e por incorporar os parâmetros termodinâmicos e aerodinâmicos em seu equacionamento.

As aplicações práticas dos dados de Evapotranspiração seja para o planejamento de irrigação, modelagem hidrológica e ambiental, dentre outras, exigem quase sempre que estes sejam avaliados de forma distribuída espacialmente (VILANOVA; SIMÕES; TRANNIN, 2012), e essa distribuição pode ser utilizando técnicas adequadas para modelar essa variabilidade.

Alguns trabalhos têm sido publicados utilizando métodos de interpolação para áreas com distintas variáveis regionalizadas em: Voltan et al. (2011), analisando a distribuição espacial da temperatura do ar em uma casa de vegetação; Perboni et al. (2014), utilizando a geoestatística nos ensaios de uniformidades de irrigação; Sartori et al. (2010), no mapeamento dos dados climáticos; Lessa et al. (2012), analisando o conteúdo de água de uma bacia hidrográfica; Moraes, Zimback e Spadotto (2012) na espacialização das estimativas de contaminação das águas subterrâneas; e Santos et al. (2015), na modelagem geoestatística da temperatura do ar. Esses trabalhos apontaram o potencial da geoestatística, utilizando a krigagem como instrumento de interpolação das variáveis de interesse.

De acordo com Ribeiro Junior (1995), o processo de krigagem se diferencia dos outros métodos de interpolação pela forma de atribuição de pesos aos valores amostrais, já que neste método não se utiliza a distância euclidiana entre os pontos, mas sim uma "distância estatística" que expressa tanto a distância como a estrutura de variabilidade (semivariância ou covariância). Não apenas a distância dos vizinhos ao ponto a ser estimado é considerada, mas também as distâncias entre os mesmos têm influência na distribuição dos pesos. Assim, os vizinhos agrupados têm importância individual relativamente menor do que aqueles isolados.

Diante do exposto, pretendeu-se estimar o comportamento temporal da Evapotranspiração de referência para algumas províncias de Cuba e cidades do estado de São Paulo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização das Regiões de Estudo

O estudo foi realizado em áreas localizadas em hemisférios diferentes. No hemisfério sul, as localidades do Brasil: Franca, Piracicaba e São Paulo (Figura 1). No hemisfério norte, as localidades do país de Cuba: Bauta, Güira de Melena e Batabanó (Figura 2), cada qual com cenários climáticos distintos.

Figura 1. Localização das estações meteorológicas base de estudo do Estado de São Paulo Brasil (Franca, Piracicaba e São Paulo).

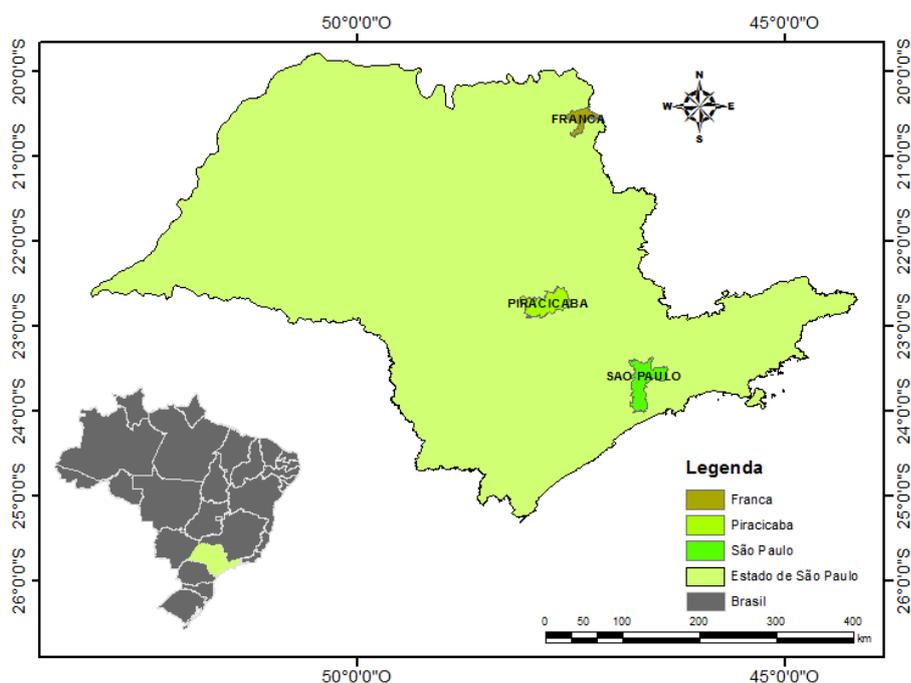
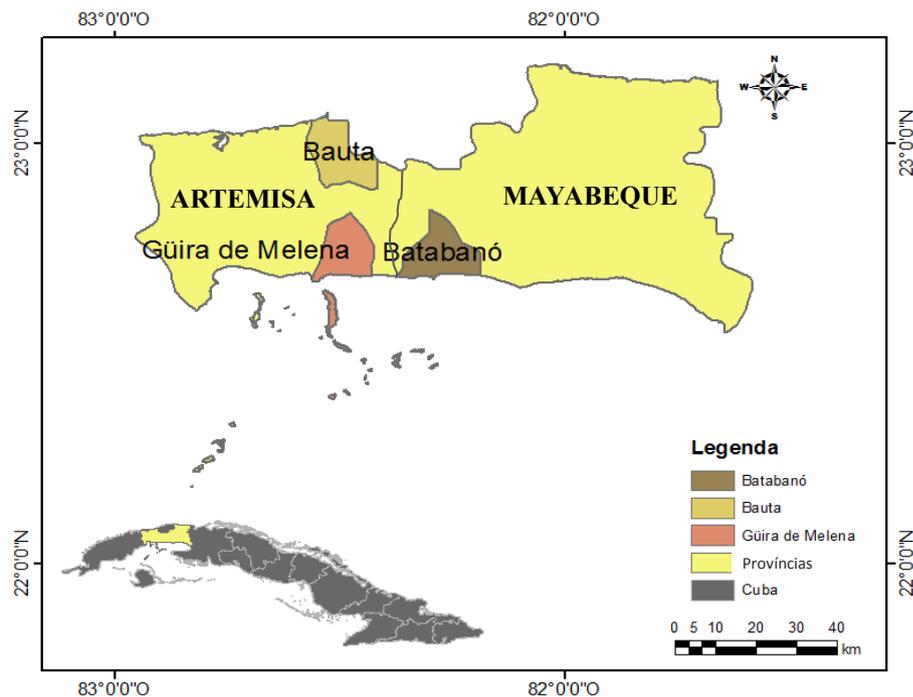


Figura 2. Localização das estações meteorológicas base de estudo de Cuba (Bauta, Güira de Melena e Batabanó).



As coordenadas geográficas das localizações das estações meteorológicas mostram-se na Tabela 1, com coordenadas expressadas em graus decimais.

Tabela 1. Localização geográfica das estações meteorológicas, com coordenadas em graus decimais.

País	Estado/ Província	Estação Meteorológica	Longitude	Latitude	Altitude (m)
Brasil	São Paulo	Franca	-47,36	-20,58	1026,20
Brasil	São Paulo	Piracicaba	-47,64	-22,70	546,00
Brasil	São Paulo	São Paulo	-46,61	-23,50	792,06
Cuba	Artemisa	Güira de Melena	-82,51	22,78	10,00
Cuba	Artemisa	Bauta	-82,53	22,96	65,00
Cuba	Mayabeque	Batabanó	-82,28	22,71	7,18

Fonte: INMET Brasil, INSMET Cuba. 2015.

4.2 Fontes de Informações e Dados

A série de dados meteorológicos históricos foi obtida acessando a página do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET, 2015), no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) dados convencionais. Porém, em Cuba foram obtidos do Instituto de Meteorologia da República de Cuba (INSMET) fornecido pelo pessoal técnico. No total, foram utilizados dados de seis estações meteorológicas convencionais, com período histórico de 30 anos (1983 - 2012), utilizadas as médias mensais de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e insolação.

4.3 Estimativa da Evapotranspiração de Referência

Para a estimativa da ET_0 , foi utilizada a equação de Penman-Monteith FAO-56, sendo o método padrão para o cálculo da ET_0 de dados meteorológicos. Segundo Allen et al. (2006), esta equação foi desenvolvida utilizando a definição da cultura de referência como uma cultura hipotética, com uma altura de 0,12 m, e uma resistência de superfície de 70 sm^{-1} e um albedo de 0,23. A Evapotranspiração representa uma extensa superfície de grama de altura uniforme, crescendo ativamente e adequadamente regada. A equação é:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

Em que: ET_0 é a Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}), Rn o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), T a temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$), U_2 a velocidade média diária do vento a 2 m de altura (m s^{-1}), e_s a pressão de saturação do vapor média diária (kPa), e_a a pressão atual de vapor média diária (kPa), Δ a declividade da curva de pressão de vapor no ponto correspondente a temperatura ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ o constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

A estimativa do saldo de radiação (Rn) foi calculada com a equação de Angstrom, utilizando os mesmos coeficientes ($a = 0,22$ e $b = 0,56$) para as estações meteorológicas de Güira de Melena, Bauta e Batabanó; no entanto, os coeficientes utilizados para as cidades do estado de São Paulo foram diferentes, por apresentarem altitudes e cenários climáticos distintos. A estação de São Paulo e Piracicaba: $a = 0,26$ e $b = 0,51$; estação Franca: $a = 0,25$ e $b = 0,50$.

4.4 Análise geoestatística

A análise geoestatística foi realizada com propósito de constatar a existência e estimar o grau de dependência temporal entre as observações, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela Equação 2.

$$\gamma(h) = \left(\frac{1}{2N(h)} \right) \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

Em que: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações e $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os pares de pontos separados por uma distância h . Com o ajuste do variograma, por meio de um modelo matemático teórico, é possível estimar os valores calculados de $\gamma^*(h)$ para os parâmetros de efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$) e alcance (a).

A estimativa foi utilizando o programa geoestatístico GS+7 (ROBERTSON, 1998), onde os variogramas foram ajustados e obtidos os valores referentes ao alcance (a), efeito pepita (C_0), patamar ($C_0 + C$).

Foi analisado o grau de dependência temporal utilizando o índice de dependência temporal (IDT) proposto por Zimback (2001), segundo Equação 3. Os valores de $IDT \leq 25\%$ indicam fraca dependência temporal; $25\% < IDT < 75\%$ moderada dependência temporal e $IDT \geq 75\%$ forte dependência temporal.

$$DT = \frac{C}{C_0 + C} \times 100 \quad (3)$$

Em que: IDT é o Índice de dependência temporal, C é a componente estrutural e C₀ o efeito pepita.

A qualidade dos ajustes dos modelos foi verificada por meio da validação cruzada (LEENAERS, H.; OHX, J. P.; BURROUGH, P. A, 1990), que consiste na comparação entre os valores observados e os estimados pelos modelos.

$$DP_{est} = DP_{real} \times (1 - r^2)^{0,5} \quad (4)$$

Em que: DP_{est} é o desvio padrão da estimação; DP_{real} é o desvio padrão dados atuais; r² é o coeficiente de determinação.

Após comprovar a dependência temporal das variáveis, e com os parâmetros dos modelos ajustados realizou-se a interpolação, pelo método da krigagem ordinária, com intuito de representar a distribuição temporal da Evapotranspiração de referência.

4.5 Regressão linear simples

A identificação da linha de tendência da evapotranspiração de Referência (ET₀) no período histórico de 30 anos, é feita mediante a metodologia de regressão linear simples de mínimos quadrados, baseado na equação:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i \quad (5)$$

Em que: Y_i é a ET₀ como variável de resposta ou dependente; X_i, os anos históricos como a variável independente; β₁ coeficiente angular da representa a pendente da reta da ET₀; β₀ é o coeficiente linear na posição da ET₀ para o ano inicial.

A análise de correlação das variáveis ET₀ versus anos históricos, ambos considerados como variáveis aleatórias, forem feitas mediante o modelo estatístico do coeficiente de correlação (R). Sabendo que este modelo segundo Lahura (2003) é uma estatística que fornece informações sobre a relação linear entre duas variáveis. Basicamente, esta informação refere-se a duas características da relação linear: a direção ou sentido e proximidade ou força.

Para definir o coeficiente de correlação, Canavos (1998) assume que tanto X_i como Y_i são variáveis aleatórias. Seja a distribuição X_i e Y_i a normal bivariada, e sejam (X₁, Y₁), (X₂, Y₂)..., (X_n, Y_n), dados aleatórios de tamanho n desta distribuição. Então se pode conferir que o estimador de máxima verossimilhança de R (denominada o coeficiente de correlação da amostra) dada por:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

Em que: X_i, são os anos históricos; Y_i e a ET₀ em mm dia⁻¹; \bar{X} é a média dos anos históricos; \bar{Y} a média da ET₀ em mm dia⁻¹.

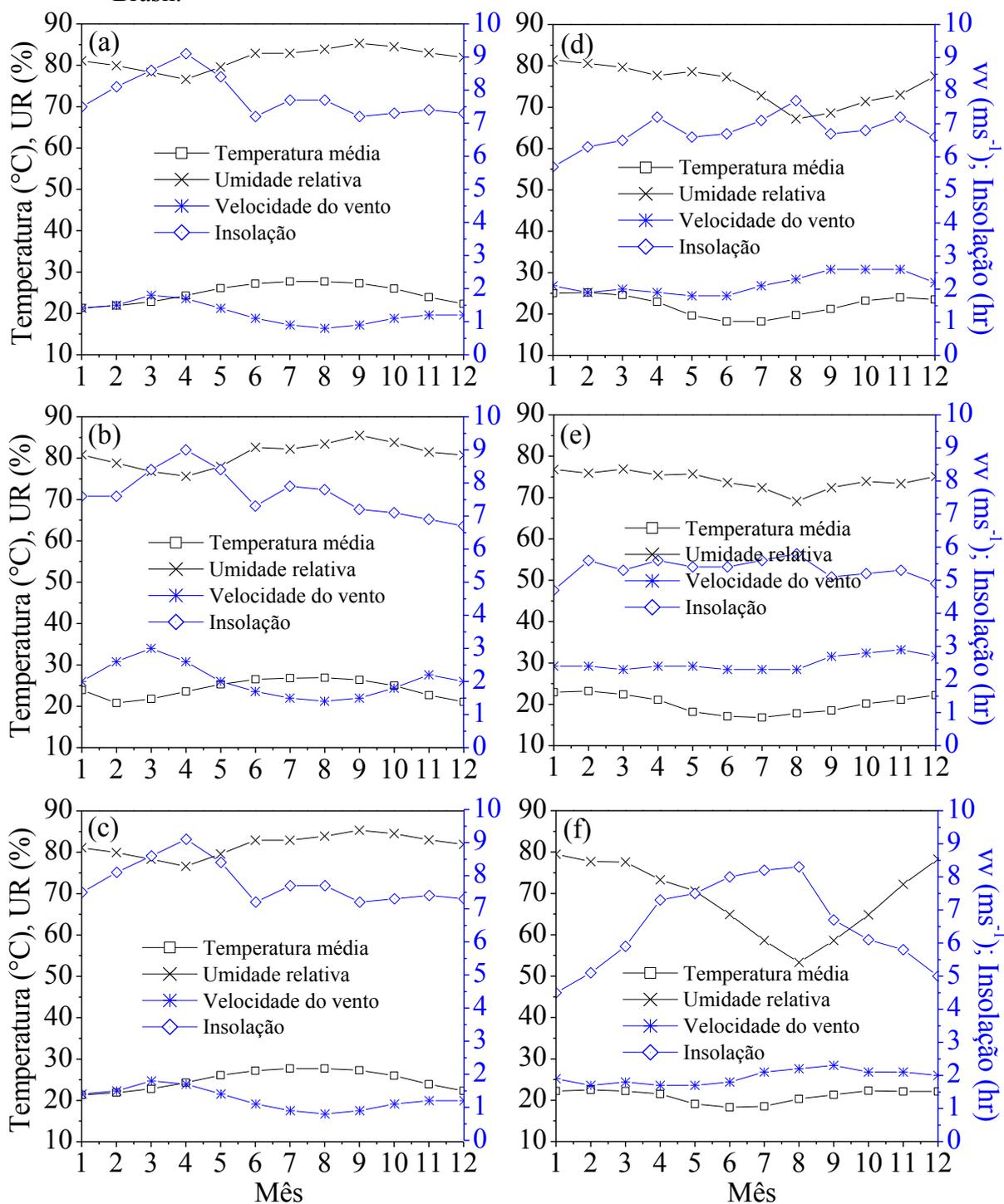
O Propósito da utilização deste indicador na presente pesquisa, nem sempre é avaliar o grau de aleatoriedade entre variáveis, mas a identificação da mudança da evapotranspiração de referência no tempo, mediante a mera projeção de tendência histórica.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Descrição das condições climáticas

As variáveis climáticas da Figura 3 (a), (b) e (c), refletem as do território cubano, devido suas condições ecossistêmicas homogêneas, mostrando comportamentos anuais da temperatura média do ar com maiores valores nos meses de junho – outubro, evidenciando a umidade relativa com médias mais altas (84%), a velocidade do vento comportou-se inversamente com mínima média de $0,7 \text{ m s}^{-1}$ tendo uma insolação média de 7 horas dia^{-1} . As condições climáticas nas localidades selecionadas do Estado de São Paulo da Figura 3 (d), (e) e (f), mostram cenários diferentes de comportamento ao longo do ano, devido a sua amplitude territorial e sua diversidade de ecossistemas, conforme classificação de Köppen.

Figura 3. Elementos climáticos (a) Güira de Melena, (b) Bauta, (c) Batabanó, localidades de Cuba, e (d) Piracicaba, (e) São Paulo, (f) Franca, localidades do Estado São Paulo, Brasil.



5.2 Evapotranspiração de Referência (ET_o)

A ET_o é fortemente influenciada pela temperatura do ar e pela umidade relativa, quanto maior temperatura e maior umidade relativa do ar, maior será a demanda atmosférica por água. Durante o verão tem-se menores horas de insolação devido a presença de

nebulosidade atmosférica, com pequenas velocidades do vento, porem com altas temperaturas e altas umidades relativa.

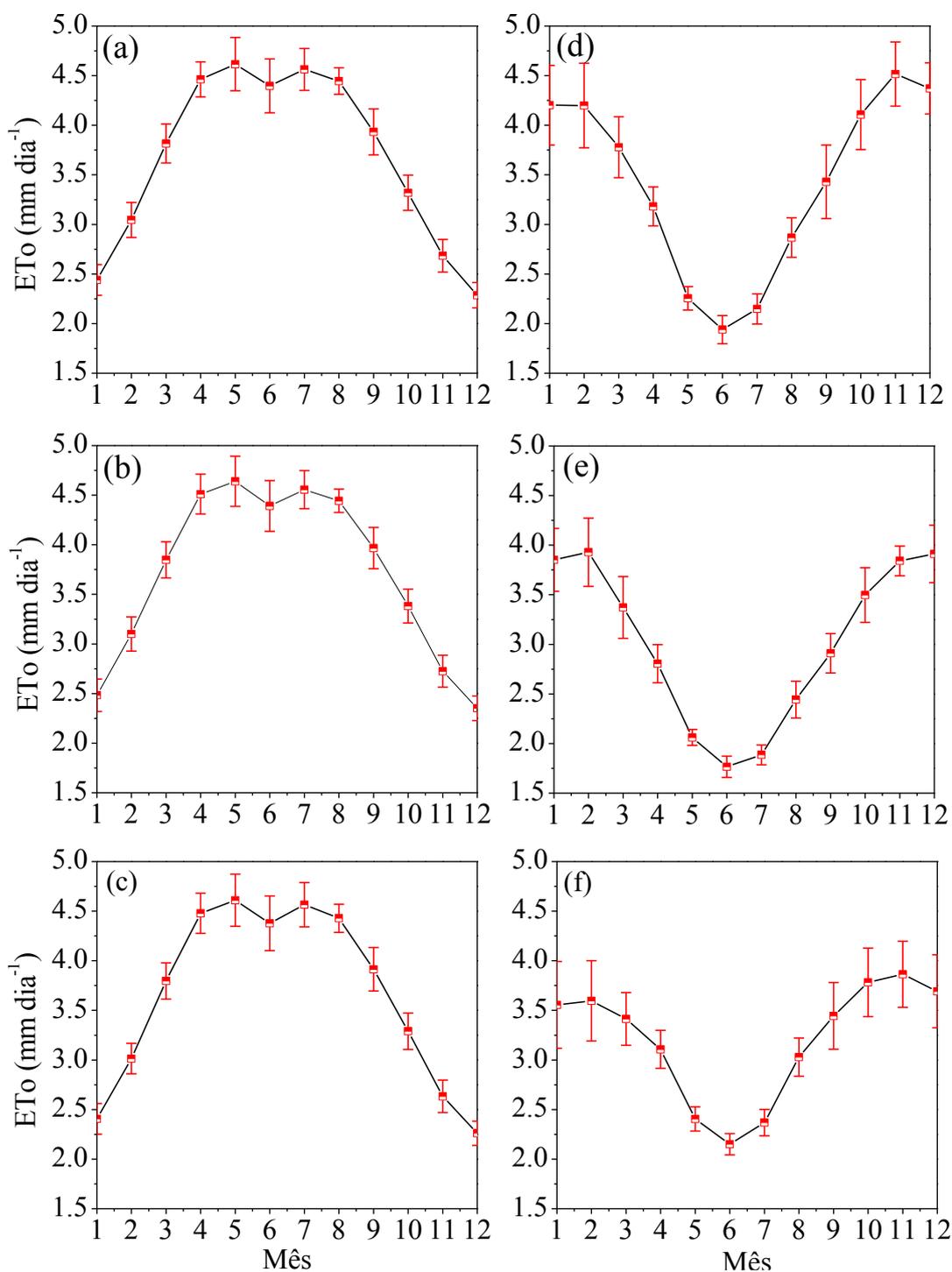
A Figura 4 ilustra o comportamento das ETo média mensais e seus respectivos desvios padrão, de janeiro até dezembro, as estações do ano nestas regiões são inversamente proporcionais, pois são consequência dos fenômenos atmosféricos que determinam a sazonalidade do ano devido as suas posições geográficas de hemisfério Norte e Sul.

Além disso, a ETo, no transcorrer do ano apresentou diferentes amplitudes de variação em relação à média, onde as localidades estudadas durante o solstício de verão (dezembro em Cuba e junho no Brasil) apresentaram maiores amplitudes na Figura 4 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) de $1,29 \text{ mm dia}^{-1}$; $1,20 \text{ mm dia}^{-1}$; $1,20 \text{ mm dia}^{-1}$; $1,46 \text{ mm dia}^{-1}$; $1,58 \text{ mm dia}^{-1}$ e $1,70 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente. O inverso ocorreu no solstício de inverno, com amplitudes de $0,52 \text{ mm dia}^{-1}$; $0,48 \text{ mm dia}^{-1}$; $0,48 \text{ mm dia}^{-1}$; $0,55 \text{ mm dia}^{-1}$; $0,31 \text{ mm dia}^{-1}$ e $0,41 \text{ mm dia}^{-1}$, respectivamente.

Os graus de variação ou dispersão é diretamente proporcional ao desvio padrão (Figura 4), em geral apresentam baixos valores no inverno, mais próximos à média, entretanto, durante o período de verão são mais dispersos, os que ficam espalhados por uma gama de valores, assim as localidades estudadas apresentam desvios padrão máximos e mínimos como: 0,128 a 0,272 em (a); 0,118 a 0,256 em (b); 0,122 a 0,276 em (c); 0,118 a 0,427 em (d); 0,080 a 0,344 em (e); e de 0,107 a 0,439 em (f).

Em síntese os desvios padrão nas localidades do Estado de São Paulo, Brasil, apresentam pelo geral maiores amplitudes em relação às localidades de Cuba, significando que estas últimas – localidades de Cuba- ficarem mais confiáveis para fins de planejamento da irrigação, permitindo estabelecer maior certeza na programação de água pelos agricultores.

Figura 4. Desvio padrão localidades de Cuba (a) Güira de Melena, (b) Bauta, (c) Batabanó, e localidades do Estado de São Paulo, Brasil (d) Piracicaba, (e) São Paulo e (f) Franca.

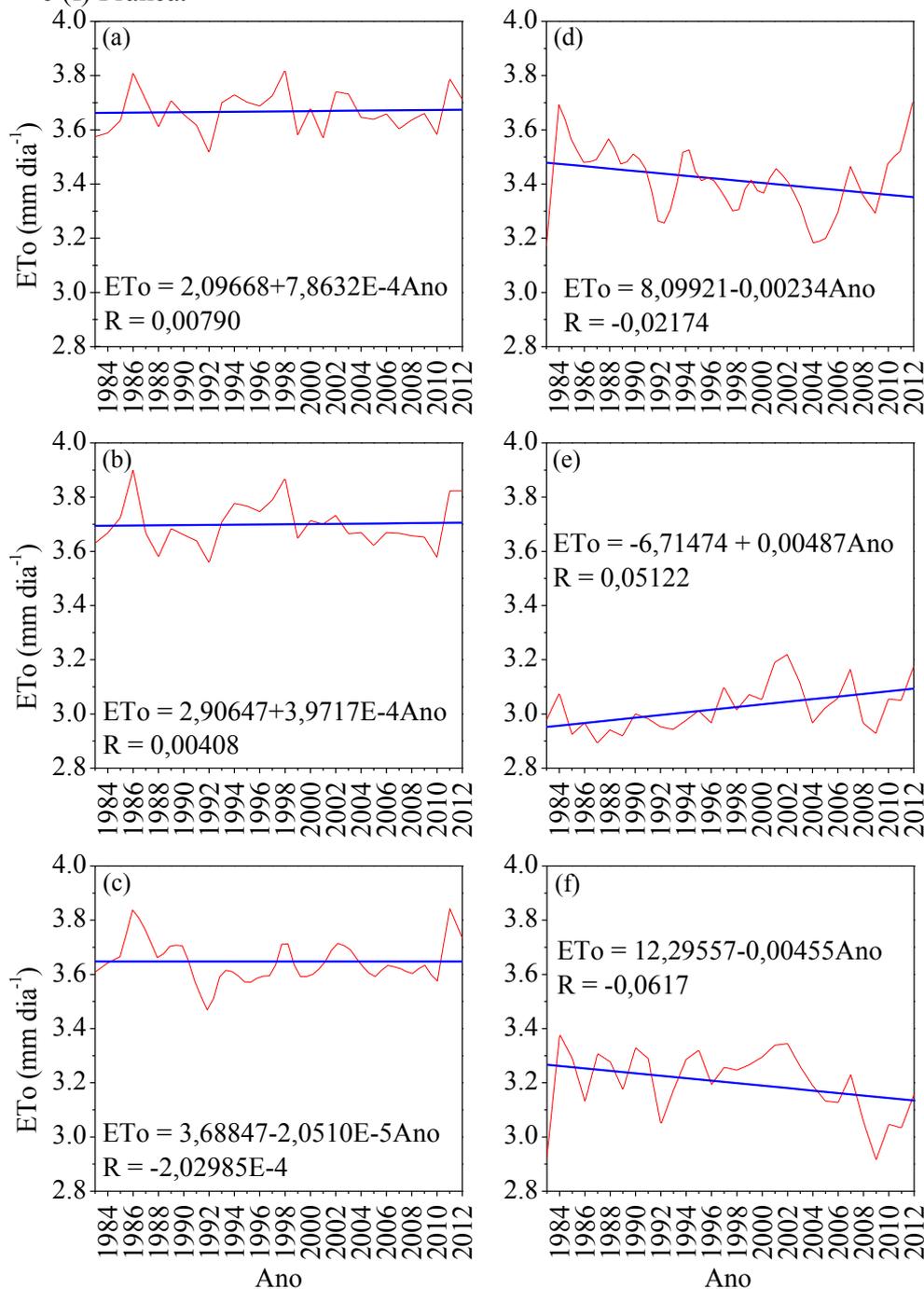


A projeção da tendência da ETo da Figura 5 conforme a regressão linear simples, determinaram que anualmente as localidades cubanas mudaram em: Güira de Melena ($0,0007863 \text{ mm dia}^{-1}$), Bauta ($0,0003972 \text{ mm dia}^{-1}$) e Batabanó ($-0,0000205 \text{ mm dia}^{-1}$) cujo valor está abaixo de zero. Nas cidades brasileiras, as tendências se deram da mesma forma,

como em Piracicaba ($-0,00234 \text{ mm dia}^{-1}$), São Paulo ($0,00487 \text{ mm dia}^{-1}$) e Franca ($-0,00455 \text{ mm dia}^{-1}$), considerando que os valores positivos representam os acréscimos e os negativos representam os decréscimos da ETo em 30 anos.

Então as ETo, em um período de 30 anos históricos, sofreram acréscimos de $0,0274 \text{ mm dia}^{-1}$ em Güira de Melena (a), $0,0138 \text{ mm dia}^{-1}$ em Bauta (b), e $0,1696 \text{ mm dia}^{-1}$ em São Paulo (e); e revelou decréscimo de $-0,0007 \text{ mm dia}^{-1}$ em Batabanó (c), $-0,0816 \text{ mm dia}^{-1}$ em Piracicaba (d) e $-0,1585 \text{ mm dia}^{-1}$ em Franca (f).

Figura 5. Mudanças anuais, nas localidades de Cuba (a) Güira de Melena, (b) Bauta, (c) Batabanó, e localidades de Estado São Paulo, Brasil (d) Piracicaba, (e) São Paulo e (f) Franca.



5.3 Ajuste de Variograma e krigagem ordinária

A Tabela 2 caracteriza os modelos encontrados para a ETo das regiões em estudo. O modelo de semivariograma teórico melhor ajustado foi o gaussiano, que pode ser verificado na Figura 6.

Obteve-se um pequeno valor de efeito pepita (C_0), que segundo Valente (1989), esse efeito reflete a variação de pequena escala não detectada pela amostragem, devido à presença de erros de medida. Sendo assim, os dados não apresentaram erros significativos de medição, já que todas as estações mostram valores com tendência ao zero, principalmente em Piracicaba e São Paulo.

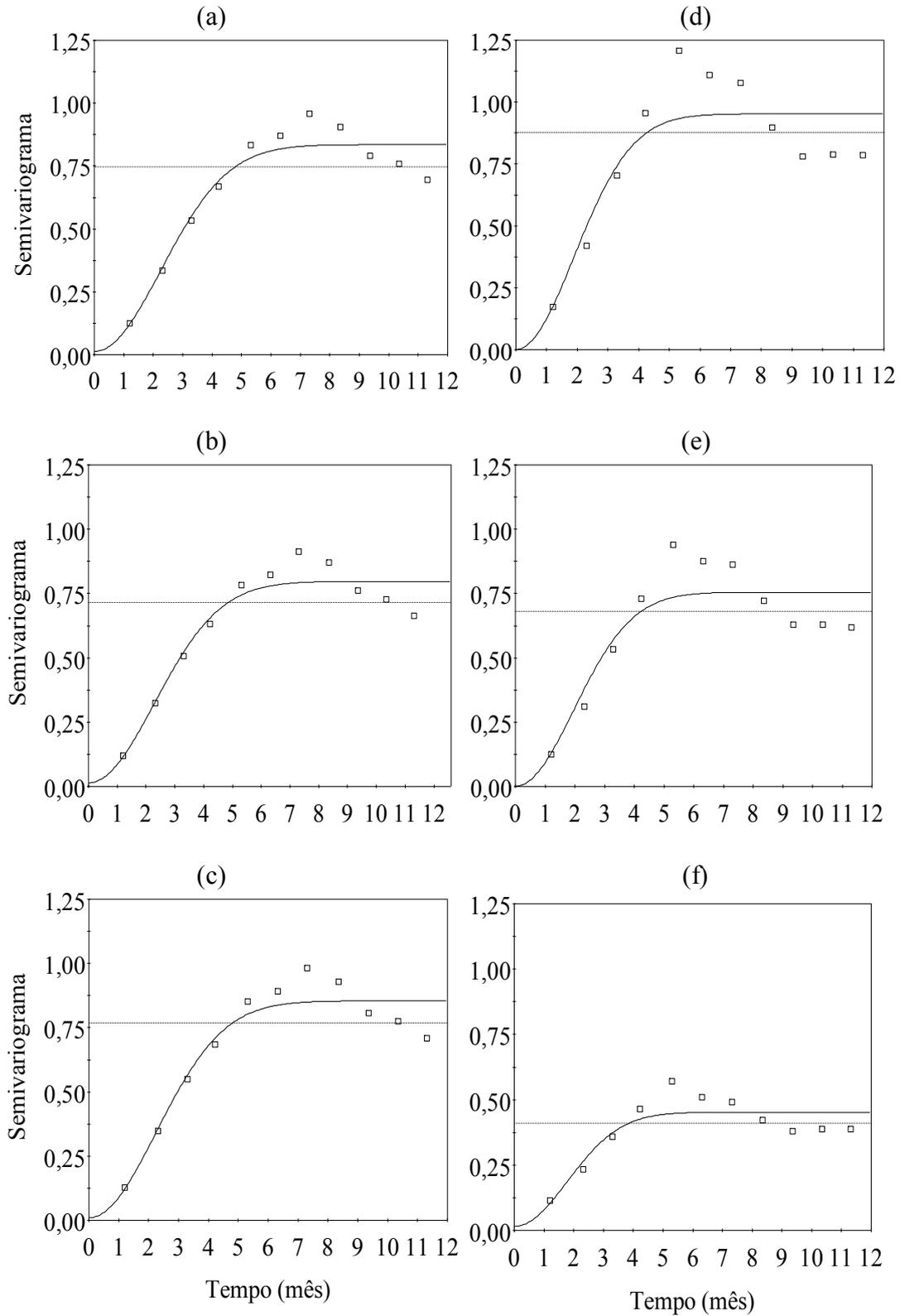
Tabela 2. Parâmetros do semivariograma obtido por krigagem ordinária para a distribuição da ETo, pelo modelo gaussiano

Estações meteorológicas	Modelo do semivariograma	C_0	C_0+C	A_0	r^2	SQR	IDT
Güira de Melena	Gaussiano	0,025	0,871	3,49	0,977	0,019	97,13
Bauta	Gaussiano	0,027	0,832	3,53	0,979	0,016	96,75
Batabanó	Gaussiano	0,024	0,891	3,47	0,977	0,020	97,31
Franca	Gaussiano	0,033	0,467	2,75	0,906	0,019	92,93
Piracicaba	Gaussiano	0,001	0,933	2,88	0,904	0,107	99,89
São Paulo	Gaussiano	0,001	0,789	3,00	0,917	0,060	99,87

C_0 Efeito pepita; ($C_0 + C$) Patamar; A_0 Alcance; r^2 Coeficiente de determinação; SQR Soma do quadrado dos resíduos; IDT Índice de dependência temporal (%).

Os valores de SQR encontraram-se próximos ao zero, que prediz um bom ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental, pois quanto menor o valor de SQR, melhor o ajuste. O coeficiente de determinação (r^2) apontou-se próximo a um, o que demonstra que o modelo escolhido foi eficiente ao modelar a dependência temporal das variáveis. O IDT indicou forte dependência temporal (IDT > 75%), isso mostra que o número de pontos amostrados nas estações meteorológicas foi suficiente para a realização de estimativas através da interpolação.

Figura 6. Semivariogramas dos modelos teóricos ajustados à distribuição espacial da Evapotranspiração de referência nas localidades de Cuba: Estação Güira de Melena (a); Estação Bauta (b); Estação Batabanó (c), e Brasil: Estação Piracicaba (d); Estação São Paulo (e); Estação Franca (f) de 1983-2012.



Percebe-se, por meio da Figura 7, que os gráficos de validação cruzada foram bem ajustados para todas as regiões avaliadas, obtendo assim uma boa validação do modelo variográfico.

Figura 7. Validação cruzada da ETo, localidades de Cuba (a) Güira de Melena, (b) Bauta, (c) Batabanó, e localidades de Estado de São Paulo, Brasil (d) Piracicaba, (e) São Paulo e (f) Franca.

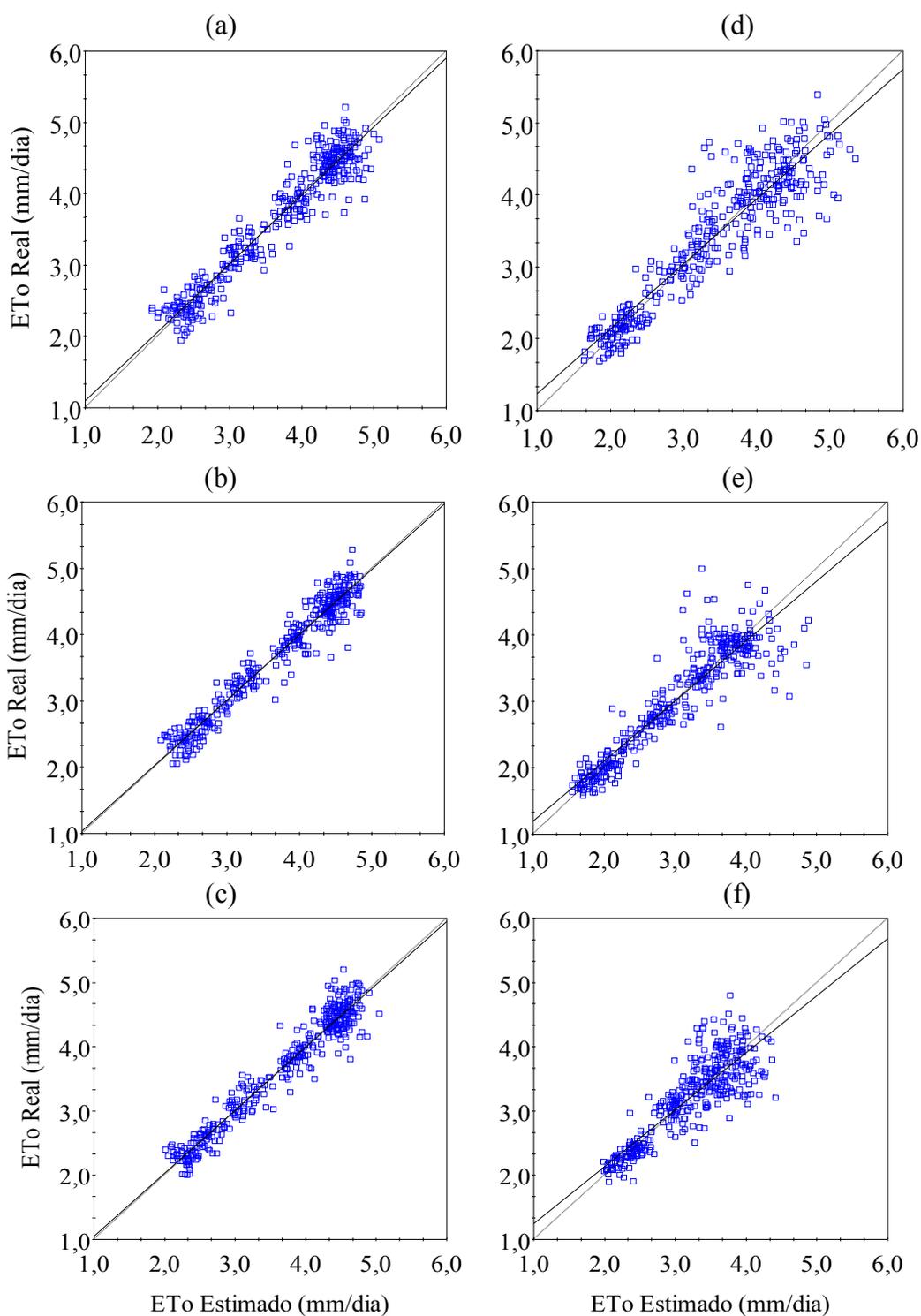


Tabela 3. Indicadores estatísticos de validação cruzada

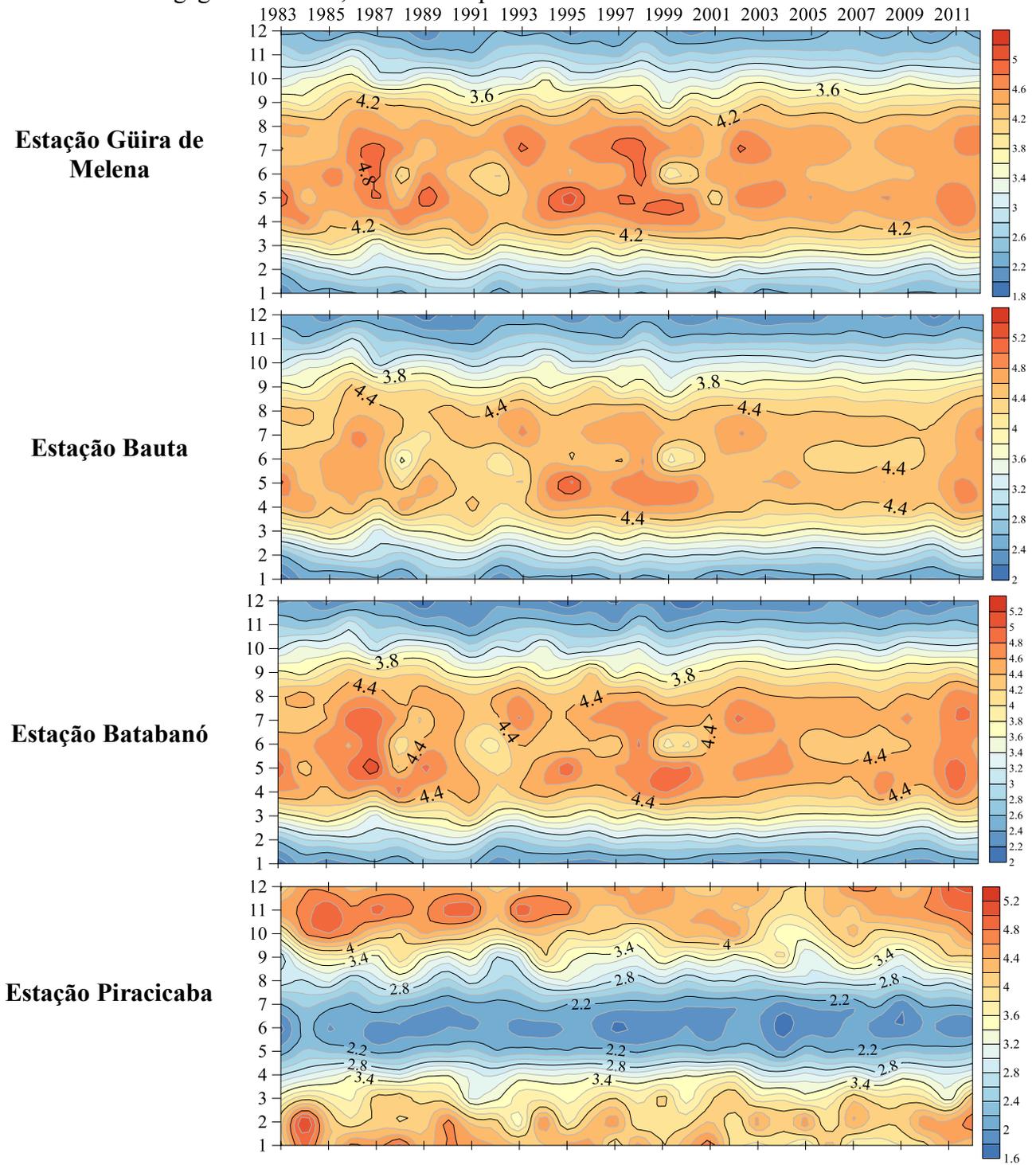
Cidade	β_1	SE	r^2	β_0
Güira de Melena	0,962	0,015	0,917	0,140
Bauta	0,985	0,013	0,944	0,060
Batabanó	0,983	0,013	0,940	0,060
Piracicaba	0,902	0,021	0,843	0,340
São Paulo	0,908	0,020	0,850	0,280
Franca	0,889	0,028	0,735	0,350

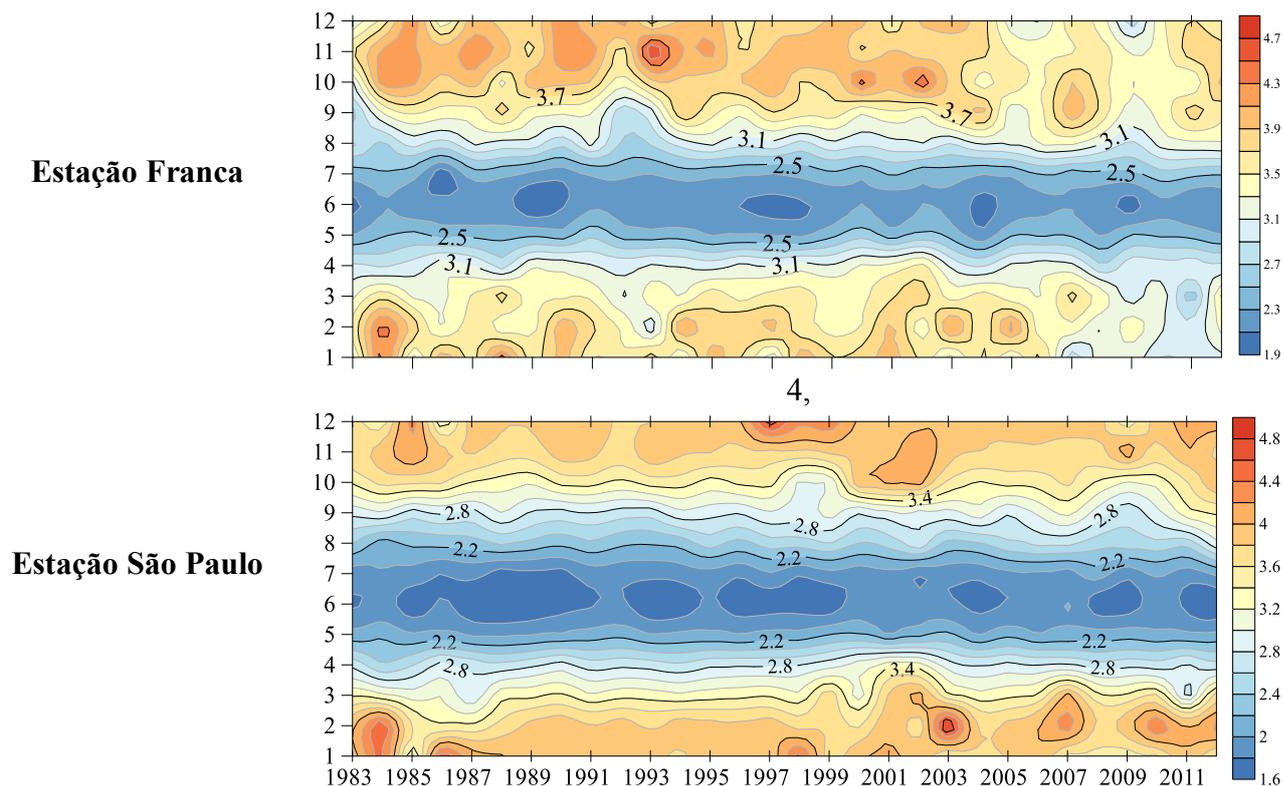
β_1 Coeficiente de regressão ou angular; SE Erro reduzido; r^2 Coeficiente de determinação ou ajuste; β_0 Coeficiente de intercepto ou linear.

Os indicadores estatísticos de validação cruzada demonstram variáveis (ETo estimado e o real) altamente aleatórias, com coeficientes angular de correlação (β_1) próximos a 1, mesmo, coeficientes de determinação (r^2) quase exatos, também próximos a 1, principalmente das localidades de Cuba. Além disso, o Erro padrão (SE) e coeficiente de interceptos ou linear β_0 próximos a 0 (zero), mas também os valores estimados superestimam os reais, em síntese, demonstram ser ótimos estimadores, sem tendências e com mínimas variâncias.

Os mapas temáticos são apresentados na Figura 8, e representam a interpolação da variável ETo mediante a krigagem ordinária, mapeada em duas dimensões: nas abscissas estão os anos (1983-2012), e nas ordenadas os meses (12 meses), a visualização da modelagem do horizonte evidencia o caráter côncavo e convexo nos hemisférios Norte e Sul, ou seja, no hemisfério Norte (Güira de Melena, Bauta e Batabanó) as legendas dos mapeamentos indicam, que os maiores ETo ficam no mês junho e os menores em dezembro e janeiro. Porém no hemisfério Sul fica perfeitamente o contrário, ou seja, em Piracicaba, São Paulo e Franca têm-se os menores ETo no junho e maiores no dezembro e janeiro.

Figura 8. Modelagem do comportamento temporal da ETO em duas dimensões, feito pela krigagem ordinária, com ETO expressa em mm dia^{-1} .





Através dos processos de interpolação realizados pela krigagem pôde-se mapear com grande acurácia os valores de ETo, sendo este o principal componente para os cálculos de demanda hídrica para as culturas, bem como no dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação.

6 CONCLUSÕES

A ETo sofreu acréscimos e decréscimos na média de 30 anos históricos, com mínima expressão, o que não influencia na produção agrícola a nível de bacia hidrográfica.

O grau de dispersão anual da ETo, nas localidades de Cuba ficaram mais confiáveis para fins de planejamento da irrigação, que as localidades de interior de São Paulo, Brasil, permitindo estabelecer maior certeza na poupança de água pelos agricultores.

A ETo exprimiu forte índice de dependência temporal.

O modelo gaussiano foi o melhor ajustado para todas as regiões

A interpretação das variações de ETo é facilitada quando essas variáveis são apresentadas como mapas temáticos, permitindo tomadas de decisões ágeis no zoneamento agrícola e manejo adequado da irrigação.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa CAPE/MES-Cuba #177/2012, ao CNPq, a UNESP/FCA, INMET e INSMET.

8 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Rome, Food & Agriculture Org., 2006. 322 p. Estudio FAO: Riegos y Drenajes.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia. Obtenido de Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Disponível em:
<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/> Acesso em: 15 fev. 2015.

BRITO, R. R.; GOMES, E. R.; LUDWIG, R. Uso da água na irrigação. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, Tupã, v. 8, n. 2, nov. 2012. DOI:
dx.doi.org/10.17271/19800827822012266.

CANAVOS, G. C. **Probabilidad y estadística: Aplicaciones y métodos**. 2. ed. Ciudad de México: McGraw-Hill, 1998. 650 p.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, Cidade, v. 41, n. 3, 2011.

CUBA. Instituto de Meteorología de la República de Cuba. Disponível em:
<www.insmet.cu>. Acesso em: 10 fev. 2015.

LAHURA, E. **Econometria básica, teoría y aplicaciones: el coeficiente de correlación y correlaciones espúreas**. Lima, 2003. 64 p.

LEENAERS, H.; OHX, J. P.; BURROUGH, P. A. comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution. **Catena**, v. 17, p. 535-550, 1990.

LESSA, L. G. F.; SILVA, A. F.; ZIMBACK, C. R. L.; MACHADO, R. E. Análise espacial do conteúdo de água da bacia hidrográfica do Rio Pardo. **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 3, p. 376-386, set. 2012.

MORAES, D. A. C.; ZIMBACK, C. R. L.; SPADOTTO, C. A. Espacialização das Estimativas de Contaminação de Águas Subterrâneas por Tebuthiuron. **Irriga**, Botucatu, v. 17, n. 3, p. 299-312, set. 2012.

PERBONI, A.; JOSÉ, J. V.; ULLMANN, M. N.; SOCCOL, O. J.; FRIZZONE, J. A. Geoestatística e simulações condicionais aplicadas a ensaios de uniformidade de aspersão convencional. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 1, p.115-134, 30 abr. 2014. DOI:
[10.15809/irriga.2014v19n1p115](http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2014v19n1p115)

RIBEIRO JÚNIOR, P. J. **Método geoestatístico no estudo da variabilidade espacial do parâmetros de solo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995. 99 p.

ROBERTSON, G. P. **GS+**: Geostatistics for the environmental sciences - GS+ User's Guide. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.

SANTOS, C. M.; TERAMOTO, E. T.; BRITO, R. R.; SILVA, M. B. P.; SANTOS, F. Modelagem Geoestatística da Temperatura do Ar no Estado de São Paulo, Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 4., 2015, Botucatu. **Anais...** Botucatu, 2015. p. 1 - 6. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.12702/IV-SGEA-a43>>. Acesso em: 15 fev. 2015.

SARTORI, A. A. da C.; SILVA, A. F. da; RAMOS, C. M. C.; ZIMBACK, C. R. L. Variabilidade temporal e mapeamento dos dados climáticos de Botucatu-SP. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 2, p. 131-146, 5 set. 2010. DOI: 10.15809/irriga.2010v15n2p131

VALENTE, J. M. G. P. **Geomatemática**: lições de geoestatísticas. Ouro Preto: Fundação Gorceix, 1989.

VILANOVA, M. R. N.; SIMÕES, S. J. C.; TRANNIN, I. C, B. Interpolação geoespacial da evapotranspiração de referência (ET_o) em regiões com escassez de dados: estudo de caso no Sul de Minas Gerais. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 179-194, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.763>

VOLTAN, D. S.; VOLTAN, D. S.; BARBOSA, R. Z.; MARTINS, J. E. M. P.; ZIMBACK, C. R. L. **Análise da distribuição espacial da temperatura do ar em uma casa de vegetação**. In: SIMPÓSIO DE GEOESTATÍSTICA APLICADA EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, 2., 2011, Botucatu. **Anais...** Botucatu, 2011. 1-7 DOI: <http://dx.doi.org/10.12702/II-SGEA-a01>

ZIMBACK, C. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.