

Modelos físico-matemáticos para estimativa da umidade relativa do ar a partir de dados de temperatura¹

Rafael Coll Delgado², Gilberto C. Sedyama², Sérgio Zolnier², Marcos H. Costa²

RESUMO

A determinação da umidade relativa do ar e o conhecimento de suas interações com outras variáveis meteorológicas são imprescindíveis nas mais diversas atividades agrícolas. Neste trabalho, três modelos físico-matemáticos foram avaliados para a estimativa da umidade relativa do ar a partir de dados de temperatura média horária (T_m) e/ou de um valor de temperatura (T_a) ponderada pelo déficit de pressão de vapor d'água no ar. Valores estimados de umidade relativa do ar foram comparados com os observados em 22 estações meteorológicas automáticas, situadas no Estado de Minas Gerais, durante um período de três meses (10/09/2006 a 10/12/2006). Os resultados demonstraram que a umidade relativa do ar pode ser estimada, satisfatoriamente, a partir de dados de temperatura do ar exclusivamente, desde que a ausência da temperatura do ponto de orvalho (T_{po}) seja substituída pela temperatura mínima (T_n) ou " $T_n - 2$ ", dependendo do modelo de estimativa. Com base no cálculo do erro médio de estimativa (EME), o modelo denominado UR₃, cujos dados de entrada foram T_m , T_a e T_n , proporcionou melhor desempenho de estimativa, com valores deste indicador variando de -1,18 a 1,96%. Nesse modelo, a umidade relativa foi ligeiramente sub e superestimada em 9 e 13 localidades, respectivamente. Estes resultados sugerem que, para o período considerado, esse método não requer ajustes adicionais para a estimativa da umidade relativa do ar no Estado de Minas Gerais e, portanto, a T_n pode ser utilizada para substituir a ausência de dados da T_{po} .

Palavras-chave: Climatologia, psicrometria, déficit de pressão de vapor d'água.

ABSTRACT

Physico-mathematical models to estimate air relative humidity from air temperature data

Determination of the air relative humidity and the knowledge of its interaction with other meteorological variables are crucial in many agricultural activities. In this work, three physic-mathematical models were evaluated for estimating hourly values of air relative humidity by using average hourly data of air temperature (T_m) and/or a temperature value (T_a) weighed by the air saturation vapor pressure deficit. Estimated values of air relative humidity were compared with observed values obtained from 22 automatic weather stations, located in the State of Minas Gerais, during a three month period (10/09/2006 a 10/12/2006). The results demonstrated that the relative humidity can be satisfactorily estimated by using air temperature exclusively, provided that the absence of dew point temperature (T_{po}) is replaced by the minimum daily air temperature (T_n) or " $T_n - 2$ ", depending on the estimating model. Based on the mean bias error (MBE), the model whose input data were T_m , T_a and T_n provided the best estimating performance with values of this

Recebido para publicação em abril de 2008 e aprovado em abril de 2009

¹ Projeto financiado pelo CNPq

² Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Viçosa, Av. P. H. Rolfs s/n 36570-000 - Viçosa, MG - E-mails: rcdelgado@hotmail.com; g.sedyama@ufv.br; zolnier@ufv.br; mhcosta@ufv.br

statistical indicator ranging from -1.18 to 1.96%. In this model, relative humidity was slightly under and overestimated in 9 and 13 locations, respectively. These results suggest that for the considered period, this method does not require further adjustments for estimating relative humidity in the State of Minas Gerais and, therefore, T_n can be used to replace missing data of T_{po} .

Key words: climatology, psychometrics, water vapor pressure deficit.

INTRODUÇÃO

A determinação da umidade relativa do ar e o conhecimento de suas interações com outros elementos meteorológicos são imprescindíveis nas mais diversas atividades agrícolas. Neste contexto, destacam-se o manejo de sistemas de irrigação, a operação de sistemas de aeração durante o período de armazenamento dos cereais e o acionamento de sistemas de climatização de instalações agrícolas destinadas à produção de animais e de plantas.

Em cultivos irrigados, a determinação da umidade relativa do ar tem grande importância para a quantificação da demanda evaporativa da atmosfera. A umidade relativa abaixo de 60% pode ser prejudicial para algumas plantas, por aumentar excessivamente a taxa de transpiração. Por outro lado, a umidade relativa acima de 90% reduz a absorção de nutrientes, devido à diminuição da transpiração, além de favorecer a proliferação de doenças fúngicas (Cunha, 2000). Segundo Jolliet (1994), a umidade relativa do ar afeta diretamente a evapotranspiração e indiretamente a fotossíntese e produção de matéria seca, em razão de alterações na condutância estomática.

No que concerne ao armazenamento de cereais, a umidade do ar próxima da saturação pode favorecer o desenvolvimento de fungos na massa de grãos se os equipamentos de aeração forem acionados. Por outro lado, se o produto for armazenado com teor de umidade abaixo de 14%, ocorre o risco de ataque de insetos (Lasseran, 1981). Normalmente, o desenvolvimento de fungos ocorre quando a umidade relativa do ar estiver acima de 68%, ocasionando, assim, aumento da umidade do produto armazenado, pois esse entra em equilíbrio com a pressão de vapor d'água no ar utilizado durante o processo de aeração. Nessas condições, a longevidade de armazenamento é afetada significativamente (Popingis, 1977). De acordo com Puzzi (1986), dependendo do cereal armazenado há uma relação definida entre o teor de umidade do grão e a umidade relativa do ar que o produto pode ser exposto sem afetar as condições prévias de equilíbrio.

Em instalações agrícolas, a utilização de equipamentos de climatização é fundamental para a manutenção de condições ambientais que permitam maximizar a produção, pois os efeitos dos valores extremos de umidade relativa, quando combinados com outras variáveis meteorológicas como,

baixas temperaturas, chuvas fortes e ventos intensos, compõem um quadro de desconforto ambiental.

Do ponto de vista conceitual, quando se menciona a palavra umidade, faz-se referência à umidade relativa, que é a relação entre a quantidade de vapor d'água existente no ar e o total necessário para a sua saturação, em condições constantes de temperatura e pressão. Para um mesmo conteúdo de vapor d'água no ar, a umidade relativa é inversamente proporcional à temperatura, sendo também um indicador da condição de saturação (Seeman, 1979).

Infelizmente, poucas publicações e registros de umidade do ar estão disponíveis na literatura, especialmente para o Estado de Minas Gerais. Além disso, a maioria das estações climatológicas faz somente observações rotineiras de temperatura do bulbo seco e do bulbo molhado por meio de psicrômetros (Castellví *et al.*, 1996). Portanto, a avaliação de diferentes métodos para estimativa da umidade relativa do ar, visando a sua aplicação no setor agrícola, pode ser de grande utilidade.

Diante das considerações apresentadas, este trabalho teve por objetivo principal avaliar diferentes modelos físico-matemáticos para estimativa da umidade relativa a partir de dados de temperatura do ar exclusivamente. Como objetivo complementar, a partir dos valores obtidos com os modelos de estimativa também foram elaborados mapas de umidade relativa do ar para o Estado de Minas Gerais, os quais foram comparados com o mapa gerado por meio de valores observados.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliação do desempenho estatístico dos modelos de estimativa da umidade relativa do ar, foram utilizados dados meteorológicos de 22 estações automáticas (Figura 1) pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Todas elas estão situadas no Estado de Minas Gerais, entre os paralelos 14°13'57" e 22°55'22" de latitudes Sul e os meridianos 39°51'23" e 51°02'45" de longitudes Oeste de Greenwich. Foram utilizados valores médios horários de temperatura e umidade relativa do ar determinados a partir dos valores máximos e mínimos em cada período de uma hora, os quais foram obtidos a partir dos arquivos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET - 5° DISME). Os valores de umidade relativa observados nas estações meteorológicas foram usados para avaliação do desempenho dos modelos

de estimativa, enquanto os de temperatura do ar foram usados como dados de entrada dos modelos.

Os dados meteorológicos utilizados para avaliação dos modelos de estimativa da umidade relativa do ar foram medidos no período compreendido entre 10 de setembro e 10 de dezembro de 2006. De acordo com Castellví *et al.* (1996), o período de três meses é satisfatório para teste de desempenho dos modelos a partir de dados de estações meteorológicas automáticas. As 22 estações adotadas para a realização deste trabalho foram selecionadas com base no critério de representatividade de condições típicas de temperatura e umidade do ar no Estado de Minas Gerais. Na Tabela 1, são apresentados o código e as coordenadas geográficas das localidades selecionadas para a realização do presente trabalho.

Castellví *et al.* (1996) propuseram três modelos distintos para o cálculo da umidade relativa do ar na Espanha, obtendo-se coeficientes de correlação aceitáveis com base nos dados observados. Por meio do método proposto pelos autores, foram utilizados três modelos físico-matemáticos, denominados neste trabalho de UR_1 , UR_2 e UR_3 , cujas equações estão descritas a seguir:

$$UR_1 = 100 \frac{e_s(T_{po})}{e_s(T_a)} \quad (1)$$

$$UR_2 = 100 \frac{e_s(T_{po})}{e_s(T_m)} \quad (2)$$

$$UR_3 = 100 \frac{e_s(T_{po})}{1/2[e_s(T_a) + e_s(T_m)]} \quad (3)$$

em que,

$e_s(T_{po})$ = pressão de vapor d'água de saturação no ar, avaliada à temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$), hPa;

$e_s(T_a)$ = pressão de vapor d'água de saturação no ar, avaliada a partir de uma temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ponderada pelo déficit de pressão de vapor d'água no ar, denominada de T_a , a qual foi obtida a partir do cálculo numérico, empregando-se o método trapezoidal, hPa; e

$e_s(T_m)$ = pressão de vapor d'água de saturação no ar, calculada a partir da temperatura média horária ($^{\circ}\text{C}$), hPa.

Como sugerido por Castellví *et al.* (1996), a temperatura do ponto de orvalho pode ser estimada como sendo a própria temperatura do ar mínima diária. No entanto, de acordo com Allen (1996), essa aproximação é satisfatória, principalmente durante o período chuvoso, quando o ar está próximo da saturação, fato que geralmente ocorre no início da manhã. Por outro lado, a T_{po} poderá ser severamente superestimada em regiões áridas e semi-áridas se esse procedimento for adotado. A partir de observações realizadas nos Estados Unidos, o autor sugeriu que T_{po} poderia ser estimada como sendo 2°C abaixo da temperatura mínima diária observada. Esse procedimento também foi adotado por Lima (2005) para a estimativa da evapotranspiração de referência, a partir do método de Penman-Monteith. Entre-

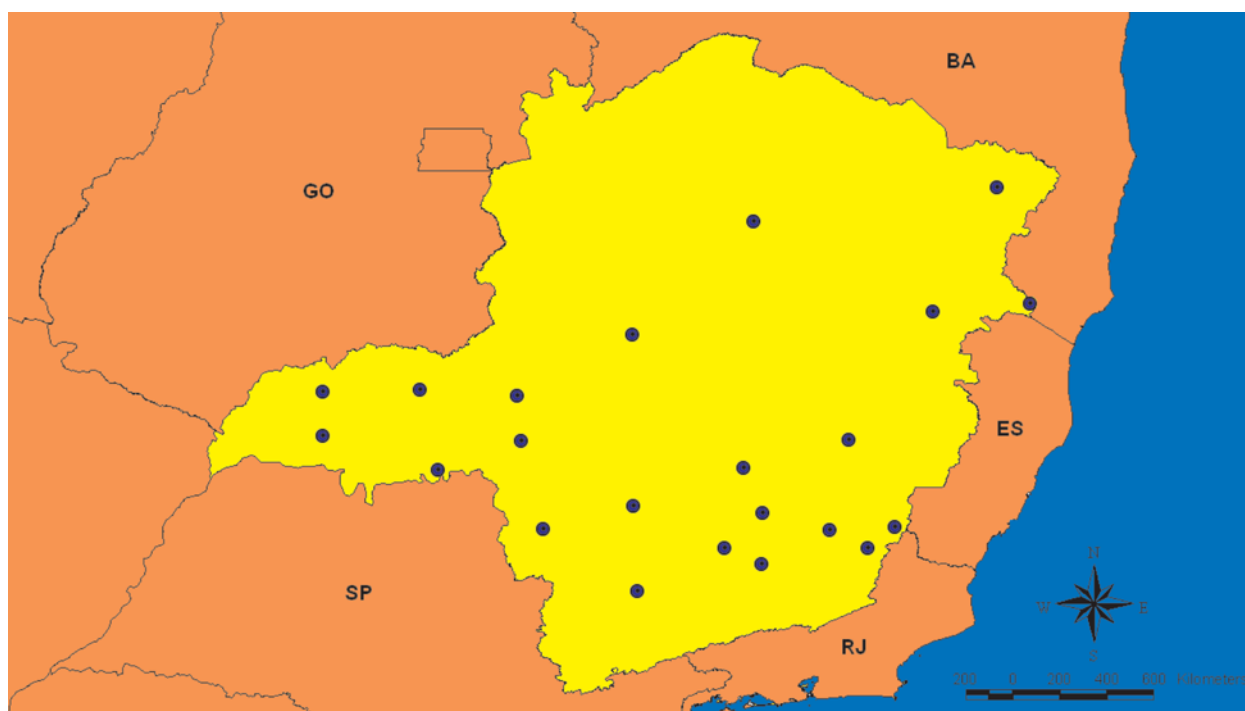


Figura 1. Localização geográfica das estações meteorológicas automáticas no estado de Minas Gerais, as quais fazem parte da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 1. Código de identificação e coordenadas geográficas das estações meteorológicas automáticas, as quais foram consideradas representativas de condições típicas de temperatura e umidade relativa do ar no Estado de Minas Gerais

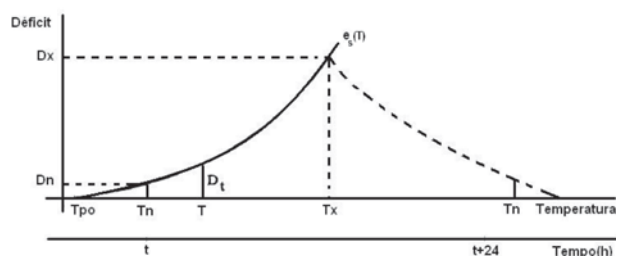
Localidade	Código	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
Almenara	A508	-16,27	-40,68	208
Araxá	A505	-19,60	-46,93	1.020
Barbacena	A502	-21,22	-43,77	1.155
Campina Verde	A519	-19,53	-49,53	547
Carangola	A503	-20,73	-42,02	399
Conceição das Alagoas	A520	-19,98	-48,02	568
Contagem	A501	-19,95	-44,00	981
Formiga	A524	-20,45	-45,45	878
Ituiutaba	A512	-18,95	-49,53	560
Montes Claros	A506	-16,72	-43,87	646
Muriaé	A517	-21,01	-42,38	270
Ouro Branco	A513	-20,55	-43,75	1.061
Passos	A516	-20,75	-46,63	875
Patrocínio	A523	-19,00	-46,98	963
São João del Rei	A514	-21,01	-44,25	991
Serra dos Aimorés	A522	-17,80	-40,25	208
Teófilo Otoni	A527	-17,90	-41,52	475
Timóteo	A511	-19,58	-42,63	333
Três Marias	A528	-18,20	-45,47	921
Uberlândia	A507	-18,92	-48,25	869
Varginha	A515	-21,57	-45,40	925
Viçosa	A510	-20,77	-42,87	689

tanto, valores distintos foram subtraídos da temperatura mínima, os quais variaram com a localidade e os meses do ano.

Com base nas recomendações apresentadas por Castellví *et al.* (1996) e Allen (1996), as duas propostas de estimativa de T_{po} foram adotadas no presente trabalho para aplicação dos modelos UR_1 , UR_2 e UR_3 . Portanto, a T_{po} foi estimada utilizando-se como referência a própria temperatura do ar mínima diária ou o seu valor subtraído de 2 °C. Tipicamente, a temperatura mínima diária é observada antes do nascer do sol.

A temperatura T_a foi computada avaliando-se numericamente a área compreendida entre os valores mínimo (D_n) e máximo (D_x) do déficit de pressão de vapor d'água no ar, conforme ilustrado na Figura 2. As curvas exibidas nesta Figura foram obtidas a partir do cálculo da pressão de vapor d'água no ar, utilizando-se a função $e_s(T)$, avaliada entre os limites T_x (Temperatura máxima) e T_n (Temperatura mínima). A integração da área situada entre os limites T_n e T_x foi realizada pelo método numérico. O processo interativo de cálculo numérico era concluído quando as áreas situadas entre T_n e T_x e T_x e T_n do dia seguinte eram aproximadamente idênticas.

Para a estimativa da temperatura T_a , foi utilizado o software Matlab 6.5 *RELEASE 13*, onde foi implementado um modelo simplificado de algoritmo, tendo como base o

**Figura 2.** Variação teórica diária da pressão de vapor d'água para o cálculo da temperatura T_a (adaptado de Castellví *et al.*, 1996)

método numérico do trapézio. As etapas para a obtenção de macros e para o cálculo da temperatura T_a são demonstradas na Figura 3.

Para a geração dos mapas temáticos, utilizou-se o software *ArcView GIS 3.2a*. O software *ArcView GIS 3.2a*, desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute (ESRI), foi adotado para a geoespacialização dos três modelos de umidade relativa do ar (UR_1 , UR_2 e UR_3), com resolução espacial dos mapas de 1.000 quilômetros.

Empregou-se o interpelador linear IDW do software, em que o peso da célula a ser interpolada (G_i) é dado por uma média que utiliza o peso dos pontos de controle mais próximos, ponderados pelo inverso da distância, elevado a um expoente m . A representação matemática dessa função é dada pela seguinte equação:

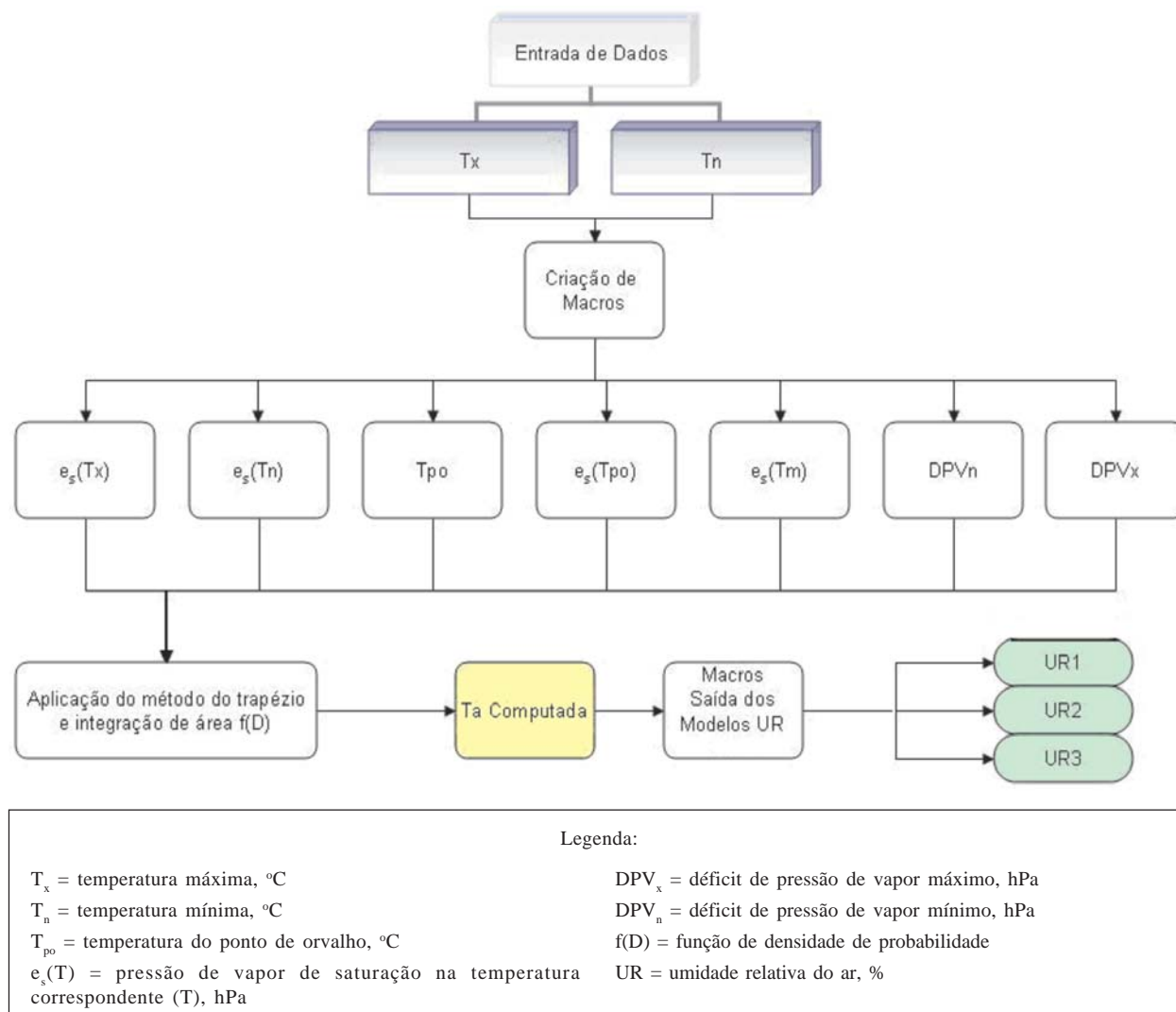


Figura 3. Representação esquemática dos procedimentos adotados para obtenção da temperatura (T_a), ponderada pelo déficit de pressão de saturação de vapor d'água, e estimativa da umidade relativa do ar pelos métodos UR_1 , UR_2 e UR_3 .

$$G_i = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{d_i^m} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^m} \right)} \quad (4)$$

em que,

x_i = peso do i -ésimo ponto amostrado;

d_i = distância euclidiana do i -ésimo ponto amostrado ao ponto atual; e

m = expoente da função da distância euclidiana.

Os pontos de controle e o expoente “ m ” são definidos pelo usuário. Foram considerados os 12 pontos mais próximos para interpolação, por meio da opção “nearest neighbors”, e utilizou-se a quarta potência para o cálculo da distância euclidiana, na opção power.

Objetivando avaliar o desempenho estatístico de cada método de estimativa da umidade relativa do ar, foram realizadas análises comparativas entre as metodologias propostas com base nos valores efetivamente medidos (observados) nas estações climatológicas do INMET. Para o teste dos modelos, foram adotados o coeficiente de determinação (r^2) e o índice de concordância (d), conforme descrito por Willmott *et al.* (1985). Adicionalmente, foram estimados os seguintes erros estatísticos: raiz do erro quadrático médio (REQM) e erro médio de estimativa (EME). As expressões utilizadas para estimativa de cada um dos índices e erros foram:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (UR_{i_{est}} - \overline{UR}_{obs})^2}{\sum_{i=1}^n (UR_{i_{obs}} - \overline{UR}_{obs})^2} \quad (5)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (UR_{i_{est}} - UR_{i_{obs}})^2}{\sum_{i=1}^n (|UR_{i_{est}} - \overline{UR}_{obs}| + |UR_{i_{obs}} - \overline{UR}_{obs}|)^2} \right] \quad (6)$$

$$REQM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (UR_{i_{est}} - UR_{i_{obs}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$EME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (UR_{i_{est}} - UR_{i_{obs}}) \quad (8)$$

em que:

$UR_{i_{est}}$ = umidade relativa do ar estimada pelos modelos em estudo, %;

$UR_{i_{obs}}$ = umidade relativa do ar observada nas estações meteorológicas, %; e

n = número de observações.

A barra sobre os símbolos apresentados anteriormente refere-se ao valor médio dos dados considerados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 2 e 3 encontram-se os valores do coeficiente de determinação (r^2), do índice de concordância (d), da raiz do erro quadrático médio (REQM) e do erro médio de estimativa (EME) de 22 localidades situadas no Estado de Minas Gerais. Na Tabela 2, a T_{po} foi estimada como sendo a própria temperatura mínima diária do ar, enquanto na Tabela 3 a T_{po} foi substituída por " $T_n - 2$ ". Os índices estatísticos foram determinados a partir dos valores da umidade relativa do ar observados em estações meteorológicas automáticas (EMA) e estimados pelos métodos UR_1 , UR_2 e UR_3 , de acordo com os modelos propostos por Castellví *et al.* (1996).

O índice "d" indica o grau de concordância entre os valores estimados e observados, ressaltando-se que quanto mais próximo de 1 melhor o desempenho do modelo em análise na previsão da variável meteorológica. Por outro lado, o coeficiente "r²" pode ser interpretado como a relação entre variância estimada pelo modelo e a variância total da umidade relativa do ar medida nas estações meteorológicas automáticas, mostrando, portanto, a adequação das variáveis independentes adotadas pelo método (Jacovides & Kontoyiannis, 1995). Uma vez que os índices estatísticos "r²" e "d" não quantificam a

Tabela 2. Coeficiente de determinação (r^2), índice de concordância (d), raiz do erro quadrático médio (REQM) e erro médio de estimativa (EME), referentes aos modelos de estimativa da umidade relativa do ar UR_1 , UR_2 e UR_3 , em localidades situadas no Estado de Minas Gerais. Nos três métodos, a temperatura do ponto de orvalho foi estimada como sendo o próprio valor da temperatura mínima do ar.

Localidades	UR_1				UR_2				UR_3			
	r^2	d	REQM	EME	r^2	d	REQM	EME	r^2	d	REQM	EME
Almenara	0,80	0,92	7,50	-0,61	0,78	0,71	17,19	4,09	0,84	0,87	9,71	1,41
Araxá	0,73	0,88	9,78	-0,08	0,67	0,68	17,95	2,05	0,77	0,78	8,44	0,90
Barbacena	0,79	0,89	6,63	-0,34	0,79	0,92	7,31	1,23	0,80	0,94	5,70	0,38
Campina Verde	0,72	0,84	11,92	-0,72	0,55	0,82	14,70	3,76	0,69	0,88	10,76	1,27
Carangola	0,70	0,91	7,81	0,42	0,68	0,87	11,92	3,14	0,71	0,92	8,50	1,64
Conceição das Alagoas	0,65	0,87	10,20	-1,46	0,75	0,94	8,52	1,23	0,72	0,94	7,81	-0,25
Contagem	0,68	0,83	9,96	0,84	0,72	0,75	16,19	3,27	0,72	0,81	12,29	1,96
Formiga	0,70	0,89	8,21	-0,68	0,78	0,91	8,88	1,41	0,77	0,92	7,20	0,27
Ituiutaba	0,70	0,88	11,05	-1,97	0,83	0,94	8,44	0,87	0,79	0,94	8,00	-0,69
Montes Claros	0,67	0,89	9,82	-1,89	0,80	0,86	11,69	1,01	0,76	0,90	9,11	-0,58
Muriaé	0,76	0,87	8,98	-1,26	0,85	0,94	7,53	1,67	0,84	0,95	6,13	0,07
Ouro Branco	0,78	0,87	8,07	-1,06	0,78	0,95	6,51	0,57	0,80	0,94	6,16	-0,31
Passos	0,71	0,89	8,83	-1,03	0,79	0,94	7,68	0,67	0,77	0,94	7,00	-0,26
Patrocínio	0,68	0,86	10,23	-1,71	0,74	0,92	8,91	0,15	0,73	0,91	8,61	-0,86
São João del Rei	0,87	0,91	6,97	-0,62	0,89	0,95	6,49	0,88	0,89	0,96	5,45	0,07
Serra dos Aimorés	0,84	0,82	11,24	-2,79	0,86	0,95	6,01	0,79	0,88	0,94	6,51	-1,18
Teófilo Otoni	0,75	0,85	9,99	-2,34	0,83	0,91	7,92	0,58	0,82	0,92	6,96	-1,01
Timóteo	0,64	0,87	7,06	-1,03	0,74	0,75	11,94	2,26	0,73	0,87	7,45	0,46
Três Marias	0,64	0,83	11,44	-1,73	0,66	0,87	10,85	1,05	0,67	0,88	9,96	-0,45
Uberlândia	0,62	0,85	10,39	0,31	0,61	0,77	16,17	3,04	0,63	0,83	12,13	1,56
Varginha	0,77	0,91	7,82	0,02	0,81	0,94	7,78	1,58	0,81	0,94	6,67	0,72
Viçosa	0,86	0,91	6,79	-0,61	0,83	0,92	8,09	2,12	0,87	0,95	5,33	0,63

Tabela 3. Coeficiente de determinação (r^2), índice de concordância (d), raiz do erro quadrático médio (REQM) e erro médio de estimativa (EME), referentes aos modelos de estimativa da umidade relativa do ar UR_1 , UR_2 e UR_3 , em localidades situadas no Estado de Minas Gerais. Nos três métodos, a temperatura do ponto de orvalho foi estimada como 2 °C abaixo do valor da temperatura mínima do ar.

Localidades	UR_1				UR_2				UR_3			
	r^2	d	REQM	EME	r^2	d	REQM	EME	r^2	d	REQM	EME
Almenara	0,82	0,92	7,70	-1,25	0,77	0,88	9,57	1,37	0,84	0,93	7,09	-0,07
Araxá	0,73	0,80	6,50	-0,08	0,69	0,82	8,56	2,05	0,77	0,80	8,45	0,90
Barbacena	0,80	0,78	9,09	-1,45	0,79	0,87	8,49	-1,29	0,80	0,84	8,53	-1,40
Campina Verde	0,73	0,81	13,47	-1,91	0,54	0,83	12,89	-0,04	0,68	0,84	12,34	-1,07
Carangola	0,70	0,89	8,21	-0,38	0,68	0,93	7,68	0,73	0,71	0,93	7,46	0,13
Conceição das Alagoas	0,67	0,83	11,70	-2,17	0,75	0,92	8,89	-1,05	0,73	0,89	10,12	-1,65
Contagem	0,70	0,86	8,22	-0,01	0,72	0,89	8,73	0,81	0,73	0,88	8,12	0,38
Formiga	0,73	0,83	9,58	-1,51	0,78	0,91	8,19	-0,92	0,77	0,88	8,63	-1,25
Ituiutaba	0,73	0,85	12,62	-2,65	0,83	0,94	8,44	-1,39	0,80	0,90	10,39	-2,06
Montes Claros	0,71	0,88	10,51	-2,58	0,80	0,93	8,14	-1,31	0,77	0,91	9,01	-1,99
Muriae	0,79	0,81	10,91	-1,97	0,85	0,93	7,16	-0,67	0,84	0,88	8,86	-1,37
Ouro Branco	0,79	0,78	10,97	-2,08	0,78	0,86	10,21	-1,88	0,80	0,83	10,39	-2,01
Passos	0,74	0,84	10,56	-1,90	0,79	0,91	9,04	-1,61	0,78	0,88	9,56	-1,79
Patrocínio	0,70	0,81	12,34	-2,60	0,74	0,87	11,31	-2,23	0,73	0,85	11,66	-2,45
São João del Rei	0,88	0,86	9,02	-1,62	0,89	0,92	8,14	-1,52	0,90	0,90	8,31	-1,60
Serra dos Aimorés	0,86	0,77	12,74	-3,47	0,85	0,90	8,86	-1,66	0,88	0,83	11,17	-2,61
Teófilo Otoni	0,77	0,80	12,13	-3,11	0,83	0,91	8,13	-1,84	0,82	0,86	10,02	-2,51
Timóteo	0,67	0,85	7,99	-1,76	0,74	0,91	6,22	-0,23	0,73	0,90	6,53	-1,03
Três Marias	0,65	0,80	13,03	-2,51	0,66	0,87	10,93	-1,41	0,67	0,84	11,82	-1,99
Uberlândia	0,62	0,85	10,13	-0,44	0,61	0,87	10,43	0,67	0,63	0,87	9,90	0,09
Varginha	0,79	0,86	9,18	-0,94	0,81	0,91	8,42	-0,75	0,82	0,90	8,49	-0,87
Viçosa	0,87	0,83	9,14	-1,44	0,82	0,91	7,77	-0,36	0,86	0,88	8,09	-0,94

grandeza dos erros, foi necessário também determinar os indicadores REQM e EME, conforme apresentado nas Equações 7 e 8.

Com relação à precisão dos modelos de estimativa da umidade relativa do ar, avaliada pelos indicadores r^2 e REQM, observa-se que, de forma geral, os três modelos propostos pelo autor apresentaram desempenho semelhante, sem efeito evidente da aproximação usada para estimativa da temperatura do ponto de orvalho. Na Tabela 2, os valores mínimo e máximo de r^2 estiveram compreendidos entre 0,55 e 0,89, os quais foram obtidos, respectivamente, em Campina Verde, por meio do modelo UR_2 , e na localidade São João del-Rei, a partir de estimativas realizadas com o modelo UR_3 . Similarmente, na Tabela 3 os valores mínimo e máximo de r^2 estiveram compreendidos entre 0,54 e 0,90 para os mesmos métodos de estimativa e localidades, sugerindo, portanto, que a aproximação usada na estimativa da T_{po} não reduziu a dispersão dos valores horários de umidade relativa do ar.

O comportamento da dispersão dos dados também pode ser avaliado pelo indicador REQM. Constata-se, na Tabela 2, que a precisão dos modelos UR_1 e UR_3 não diferiu expressivamente, tendo os valores variado, respectivamente, de 6,63 a 11,92% e de 5,33 a

12,29%. Entretanto, os de REQM variaram de 6,01 a 17,95% para as estimativas realizadas com o método UR_3 . Por outro lado, quando a T_{po} foi substituída pela temperatura " $T_n - 2$ " (Tabela 3), os três modelos de estimativa da umidade relativa do ar proporcionaram valores de REQM com a mesma ordem de magnitude. Neste caso, os de REQM variaram de 6,50 a 13,47%, de 6,22 a 12,89% e de 6,53 a 12,34% para os métodos UR_1 , UR_2 e UR_3 , respectivamente.

Dependendo da magnitude da temperatura do ar, erros de apenas 0,1 °C podem resultar em erros de cálculo da umidade relativa do ar em até 1% (DeFelice, 1998; Silva *et al.*, 2007). Portanto, em razão da sensibilidade da equação utilizada no cálculo da pressão de saturação de vapor d'água no ar, erros de medição da temperatura do ar aumentam o valor do indicador REQM e não podem ser atribuídos somente aos modelos de estimativa da umidade relativa.

Na Tabela 2, no que se refere ao índice de concordância "d", os valores mínimos deste indicador, correspondentes às estimativas realizadas a partir dos modelos UR_1 , UR_2 e UR_3 , foram, respectivamente, 0,82; 0,68; e 0,78. O primeiro resultado, proporcionado pelo método UR_1 , foi obtido na localidade de Serra dos Aimorés e os demais foram observados em Araxá, utilizando-se os métodos UR_2

e UR_3 . Em contraste, os valores máximos do indicador “d” foram 0,92; 0,95; e 0,96, referentes às localidades de Almenara, por meio do modelo UR_1 ; Ouro Branco, São João del Rei e Serra dos Aimorés, a partir de estimativas realizadas pelo modelo UR_2 ; e novamente São João del Rei, com o modelo UR_3 .

Embora o indicador “d” não tenha sido notoriamente afetado pela estimativa da temperatura do ponto de orvalho, por meio de T_n ou “ T_n-2 ”, os resultados do indicador EME, por sua vez, evidenciam um efeito

marcante da substituição de T_{po} na calibração dos modelos UR_1 , UR_2 e UR_3 .

Verifica-se que, quando a T_{po} foi estimada a partir da temperatura do ar mínima diária, conforme resultados apresentados na Tabela 2, o EME foi negativo em 18 das 22 localidades avaliadas a partir de estimativas realizadas pelo método UR_1 , com EME variando entre os extremos de -2,79 a 0,84%, respectivamente para as localidades de Serra dos Aimorés e Contagem. Estes resultados mostram que a umidade relativa foi subestimada pelo modelo UR_1

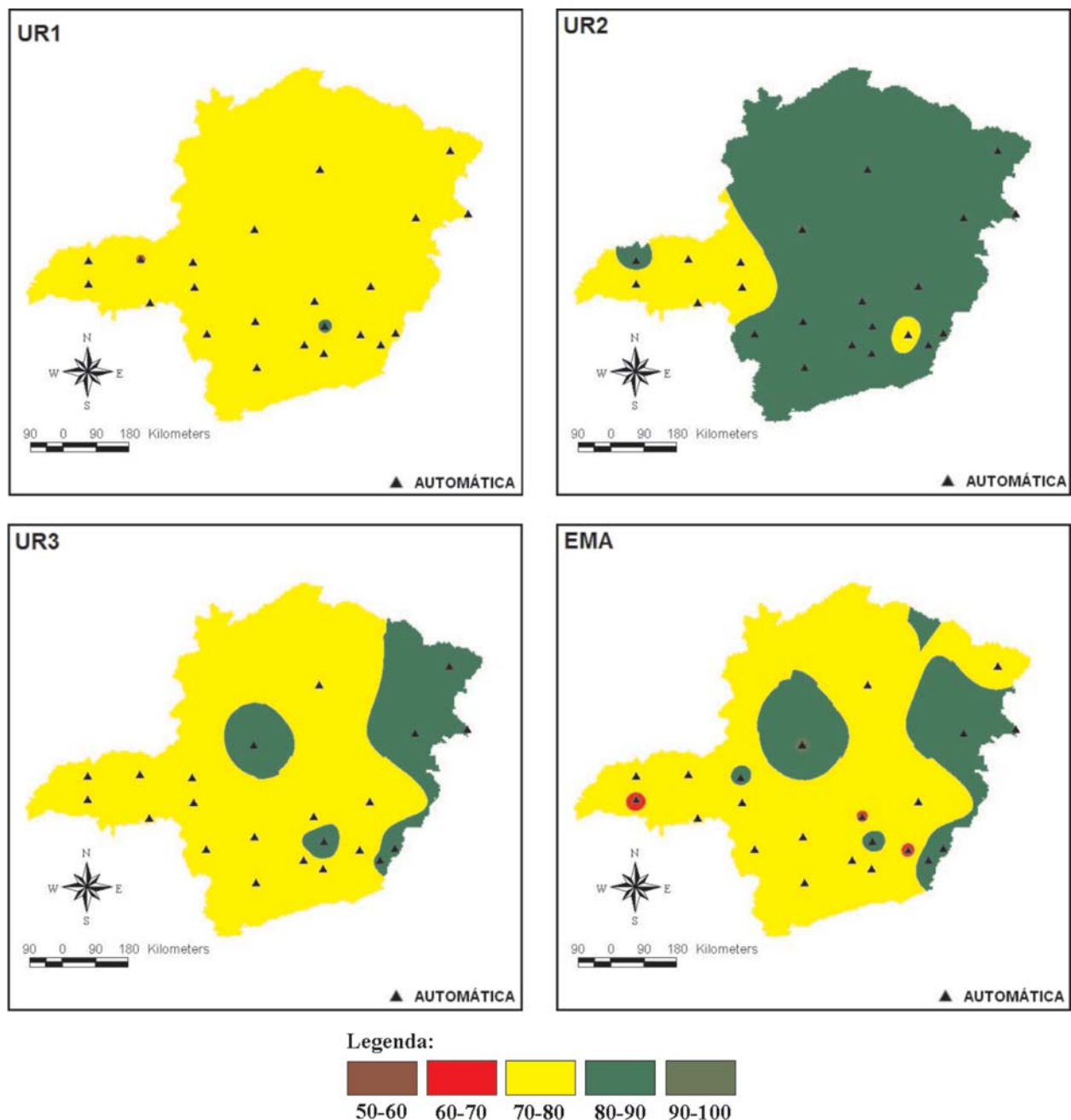


Figura 4. Espacialização da umidade relativa do ar observada nas estações meteorológicas automáticas (EMA) e estimada pelos métodos UR_1 , UR_2 e UR_3 no Estado de Minas Gerais. Os mapas resultantes correspondem aos valores percentuais referentes às 12:00 h UTC no dia 15 de outubro de 2006. Nos três métodos, a temperatura do ponto de orvalho foi estimada como sendo o valor da temperatura mínima do ar.

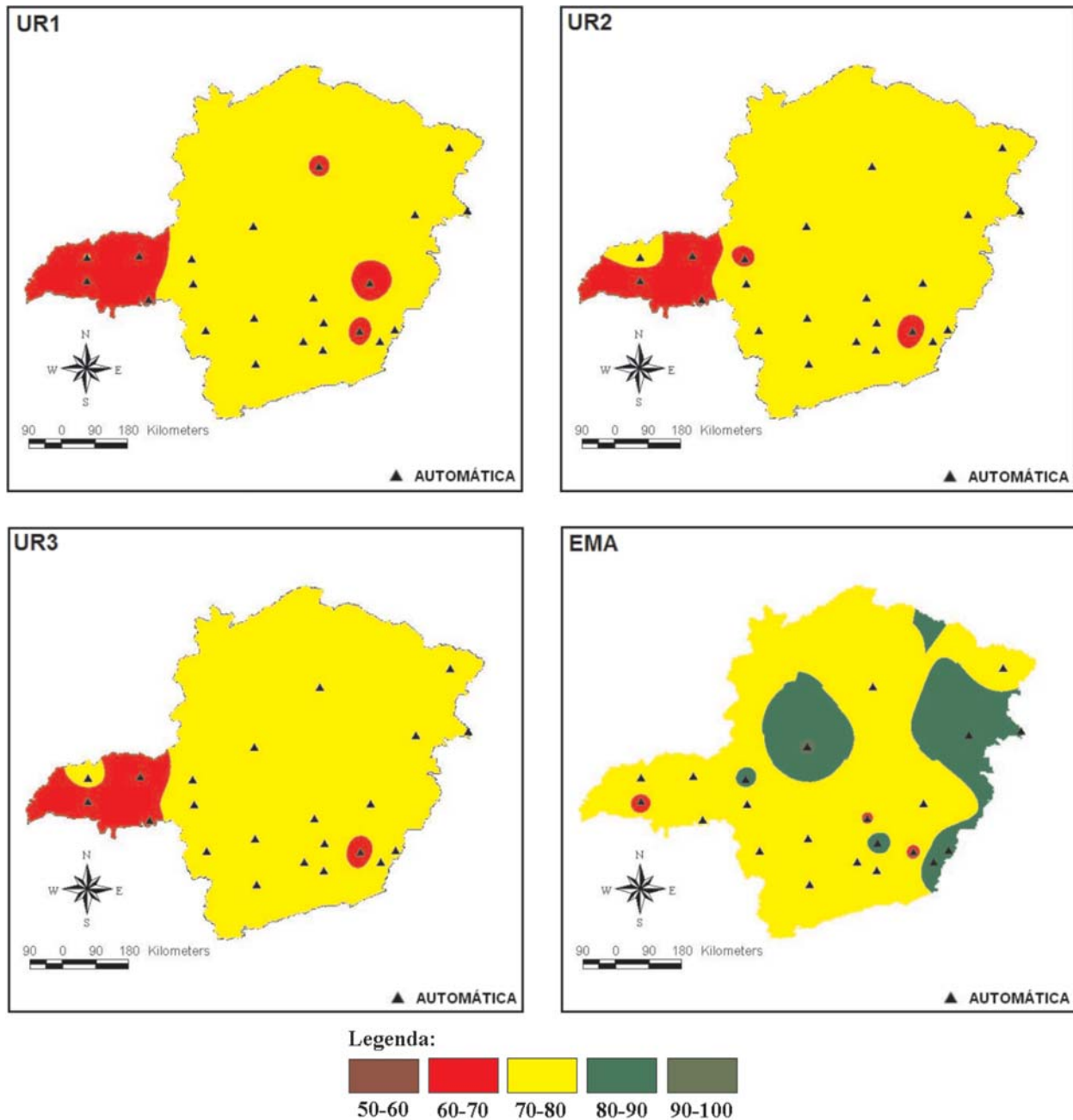


Figura 5. Espacialização da umidade relativa do ar observada nas estações meteorológicas automáticas (EMA) e estimada pelos métodos UR₁, UR₂ e UR₃ no Estado de Minas Gerais. Os mapas resultantes correspondem aos valores percentuais referentes às 12:00 h UTC no dia 15 de outubro de 2006. Nos três métodos, a temperatura do ponto de orvalho foi estimada como 2°C abaixo do valor da temperatura mínima do ar

na maioria das localidades avaliadas. Em contraste, o modelo UR₂ superestimou a umidade relativa em todas as localidades, com o EME variando de 0,15% em Patrocínio a 4,09% em Almenara. Entretanto, um resultado mais adequado nas estimativas de umidade relativa do ar foi obtido com a adoção do modelo UR₃. Neste caso, o EME variou de -1,18% em Serra dos Aimorés a 1,96% em Contagem, sendo a umidade relativa do ar, respectivamente, sub e superestimada em 9 e 13 localidades, sugerindo equilíbrio dos resultados.

Espacialização da umidade relativa do ar no Estado de Minas Gerais

Com o objetivo de comparar a adequação dos modelos para estimativa da umidade relativa do ar em escala regional, foi realizada a espacialização dos valores observados e estimados pelos métodos UR₁, UR₂ e UR₃, conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5, para T_{po} substituída por T_n e “ T_n-2 ”, respectivamente. O mapa elaborado com base nos valores de umidade relativa medidos na estação meteorológica automá-

tica, no dia 15 de outubro de 2006, às 12 h UTC, foi adotado aleatoriamente como referência para realização desta avaliação.

Observa-se que o mapa elaborado a partir dos valores estimados por meio do modelo UR_1 apresenta distribuição de classes de umidade não compatível com o mapa de referência, apresentando áreas com umidade entre 70 e 80% em praticamente todo o estado (Figura 4) e algumas com umidade entre 60 e 70% (Figura 5). Em contraste, áreas com umidade entre 80 e 90%, observadas no mapa de referência, principalmente na região de Três Marias e região leste do Estado, não estiveram presentes no mapa elaborado a partir das estimativas de UR_1 .

O mapa resultante de valores estimados pelo método UR_2 tendeu a intensificar as áreas com umidade entre 80 e 90% na maior parte do Estado (Figura 4) e, portanto, ampliou severamente as áreas observadas no mapa de referência (EMA). Entretanto, quando a T_{po} foi substituída pela diferença " T_n-2 ", o mapa gerado apresentou características mais próximas ao mapa elaborado com os dados da estação meteorológica automática (EMA).

O mapa obtido a partir de estimativas realizadas por meio do modelo UR_3 foi o que teve maior similaridade ao mapa gerado com os valores de umidade medidos na estação meteorológica, mas somente quando a T_{po} foi substituída pela temperatura do ar mínima diária (Figura 4). Por outro lado, a substituição de T_{po} pela diferença " T_n-2 " praticamente eliminou as áreas com umidade compreendida entre 80 e 90%, que estão presentes no mapa EMA. Neste caso, a espacialização da umidade teve características semelhantes ao mapa gerado pelo modelo UR_2 , mas com aparência bem distinta ao mapa elaborado com dados observados na EMA.

CONCLUSÕES

A umidade relativa do ar pode ser estimada de forma satisfatória no Estado de Minas Gerais, a partir de dados de temperatura do ar exclusivamente, desde que o modelo adotado para a realização das estimativas utilize aproximação adequada para substituir a ausência de dados da temperatura do ponto de orvalho.

Quando a T_{po} foi aproximada pela temperatura do ar mínima diária, somente o modelo UR_3 apresentou resultados consistentes com os valores observados, subestimando ou superestimando ligeiramente a umidade relativa verificada das localidades avaliadas. O mapa gerado a partir de dados estimados por esse modelo para um horário e dia específicos, adotado aleatoriamente, foi o que apresentou delimitações mais semelhantes ao mapa elaborado com dados observados. Por outro lado, de forma geral, os modelos UR_1 e UR_2 subestimaram e superestimaram, respectivamente, os valores verificados.

Quando a T_{po} foi aproximada empiricamente pela subtração de 2 °C nos valores diários de temperatura mínima do ar, esse procedimento aprimorou os resultados do modelo UR_2 , mas afetou negativamente o desempenho do modelo UR_1 , aumentando as diferenças entre os valores estimados e observados. Similarmente, o desempenho do modelo UR_3 foi afetado negativamente e também tendeu a subestimar a umidade relativa constatada na maioria das localidades avaliadas.

Os métodos avaliados neste trabalho podem ser aplicados para a estimativa da umidade relativa em locais que possuem dados de temperaturas do ar exclusivamente, possibilitando, assim, a reconstrução de séries meteorológicas incompletas, bem como o preenchimento de falhas esporádicas durante as observações rotineiras.

REFERÊNCIAS

- Allen RG, Pereira LS, Raes D & Smith M (1996) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Roma, FAO: Irrigation and Drainage Paper 56. 300p.
- Castellví F, Perez PJ, Villar JM & Rosell JL (1996) Analysis of methods for estimating vapor pressure deficits and relative humidity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 82: 29-45.
- Cunha OP (2000) Controle de qualidade da massa de grãos. Porto Alegre, Dryeration. 183 p.
- Defelice, TP (1998) An introduction to meteorological instrumentation and measurement. New Jersey, Prentice Hall. 229 p.
- Jacovides CP & Kontoyiannis H (1995) Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, 27:365-371.
- Jolliet O (1994) Hortitrans, a model for predicting and optimizing humidity and transpiration in greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Resources*, 57: 23-37.
- Lasseran RA (1981) Aeração de grãos. Viçosa, Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem. 131 p.
- Lima EP (2005) Evapotranspiração de referência de Penman-Monteith, padrão FAO (1998), a partir de dados de temperaturas máxima e mínima de Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 67 p.
- Popinigis F (1977) Fisiologia da Semente. Brasília, Agiplan. 289 p.
- Puzzi D (1986)- Abastecimento e armazenagem de grãos. Campinas, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola. 603 p.
- Seemann J (1979) Greenhouse Climate. In: Seeman J et al. *Agrometeorology*. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag. p. 165-178.
- Silva, TGF da, Zolnier S, Moura MSB de & Sediya GC (2007) Estimativa e espacialização da umidade relativa do ar para os estados de Alagoas, Bahia e Sergipe. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, 15:14-28.
- Willmott CJ, Ackleson SG, Davis RE, Feddema JJ, Klink KM, Legates DR, Odonnell J & Rowe CM (1985) Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 90: 8995-9005.