

Estimativa da E_t pelo modelo Penman-Monteith FAO com dados mínimos integrada a um Sistema de Informação Geográfica¹

Estimating E_t using Penman-Monteith FAO model with minimum data integrated with a Geographic Information System

Érika da Justa Teixeira Rocha^{2*}, Sílvia Roberto Medeiros Evangelista³, Sérgio César de França Fuck Júnior⁴ e Rubens Sonsol Gondim^{4*}

Resumo - O objetivo do presente trabalho foi avaliar a metodologia de estimativa da $E_{t,PM}$ utilizando dados mínimos integrados a um Sistema de Informação Geográfica, na bacia do Jaguaribe, Ceará. Foi utilizado o sistema integrado de modelagem regional PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*), versão 1.2, utilizando as condições de contorno do Modelo Climático Global, HadAM3P, acoplado ao Modelo Climático Regional (HadRM3P), através da técnica dinâmica de redução de escala (*downscaling*). Dados mensais de temperaturas máxima e mínima e precipitação foram gerados para o período de 1961-1990, os quais foram analisados quanto a sua variabilidade espacial (latitude/longitude), utilizando-se geoestatística (*krigagem*). Para validação, foi aplicada regressão linear entre $E_{t,PM}$ estimada com dados mínimos e estimada com dados medidos através de uma estação meteorológica de referência. A média da $E_{t,PM}$ anual estimada com dados mínimos situou-se em 1.719 mm. A metodologia funcionou satisfatoriamente na região estudada, considerando-se os resultados da regressão (coeficiente angular de 0,95, coeficiente de determinação de 0,902, resíduos menores que 0,45 mm dia⁻¹ e Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME) igual a 0,067 mm dia⁻¹).

Palavras-chave - Evapotranspiração. Sistema de Informação Geográfica. Temperatura.

Abstract - The objective of this work was to evaluate $E_{t,PM}$ using limited climate data integrated with a Geographic Information System in the Jaguaribe basin, Ceará State, Brazil. Regional climate modeling system PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*), using boundary conditions of the *Hadley Centre Atmospheric Model* version 3 - HadAM3, nested to the *Hadley Centre Regional Circulation Model* - HadRM3P, was used. Monthly time series for minimum and maximum temperature and rainfall were generated for the 1961-1990 period. Variables were analyzed according to spatial variability using kriging geostatistics methodology. A validation was performed, correlating $E_{t,PM}$ estimated with minimum data and with a complete dataset from a reference weather station by linear regression. Average annual estimated $E_{t,PM}$ was 1,719 mm, mapped over the target region. It was demonstrated that the limited data methodology worked satisfactory for the region (linear coefficient of 0.95, determination coefficient of 0.902, errors less than 0.45 mm day⁻¹ and root square error of 0.067 mm day⁻¹).

Key words - Evapotranspiration. GIS. Temperature.

* Autor para correspondência

¹Recebido para publicação em 17/03/2010; aprovado em 07/02/2011

Projeto de pesquisa financiado pela Embrapa

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recursos Hídricos/UFC, Fortaleza-CE, Brasil, erikarocha@hotmail.com

³Embrapa Informática Agropecuária, Campinas-SP, Brasil, silvio@cnptia.embrapa.br

⁴Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza-CE, Brasil, sergiofuck@cnpat.embrapa.br, rubens@cnpat.embrapa.br

Introdução

Evaporação é o processo em que, água líquida é convertida em vapor e removida de uma superfície evaporante, tais como lagos, rios, solos e vegetação. A transpiração consiste da vaporização de água líquida contida nos tecidos vegetais e sua remoção para a atmosfera. A evapotranspiração é o processo de evaporação e transpiração ocorrendo simultaneamente. O painel de *experts* da FAO recomendou a adoção do método de Penman-Monteith, que ficou conhecido como o método combinado FAO Penman-Monteith, como modelo global padrão para estimativa da evapotranspiração da cultura de referência (ALLEN et al., 1998).

Muitos trabalhos de estimativa da evapotranspiração de referência, utilizando o método de Penman-Monteith FAO (E_{t_0} PM) como padrão (MENDONÇA; DANTAS, 2010) têm sido desenvolvidos.

Dada a pouca disponibilidade de estações meteorológicas de referência, definida como estação agrometeorológica rodeada por área vegetada, capazes de mensurar todos elementos climáticos envolvidos, trabalhos como os de Popova et al. (2006); Cai et al. (2007); Jabloun e Sahli (2008) e Sentelhas et al. (2010), em que é avaliada a metodologia para estimativa da E_{t_0} PM empregando dados mínimos, têm comprovado que os resultados são aceitáveis para as diferentes condições climáticas.

O efeito do clima nas necessidades hídricas das plantas é dado pela evapotranspiração de referência (E_{t_0}), a qual é a correção da diferença entre a evaporação de uma superfície e a evapotranspiração da superfície de referência, definida como aquela coberta com grama de 0,12 m de altura, em ativo crescimento, cobrindo totalmente o solo, cultivada sem restrição de água. O efeito da cultura é dado pelo coeficiente de cultivo (Kc), o qual é o coeficiente de correção entre a evapotranspiração da cultura e da superfície de cultura de referência (ALLEN et al., 1998).

A importância em torno do tema deve-se à necessidade de se buscar melhorias na estimativa e aplicação da água para irrigação. De fato, o conhecimento das necessidades hídricas das espécies irrigadas, estimadas pelo coeficiente de cultivo (Kc) e evapotranspiração de referência (E_{t_0}) é de fundamental importância para gestão sustentável dos recursos hídricos (GONDIM et al., 2005).

As ferramentas computacionais de geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), permitem a realização de análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e criar bancos de dados georreferenciados (CÂMARA; MEDEIROS, 1998).

O objetivo do presente trabalho é avaliar a metodologia de estimativa da E_{t_0} PM utilizando dados de temperatura máxima e mínima do ar integrados com um Sistema de Informação Geográfica, na bacia do Jaguaribe, Ceará.

Material e métodos

A área objeto do estudo foi então delimitada entre 4°39'30" S e 5°40'00" S de latitude e 37°35'30" W e 38°27'00" W de longitude, abrangendo o trecho do vale do rio Jaguaribe, situado entre a barragem do Castanhão, até a barragem de Itaiçaba.

O trabalho compreendeu 160 km do rio Jaguaribe, envolvendo os seguintes municípios: Alto Santo, Jaguaruana, Limoeiro do Norte, São João do Jaguaribe, Tabuleiro do Norte, Itaiçaba, Quixeré e Russas.

O modelo matemático completo de Penman-Monteith para estimativa das necessidades hídricas das plantas pode ser encontrado em Allen et al. (1998), sendo a equação básica da evapotranspiração de referência (E_{t_0}) dada por :

$$E_{t_0} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

onde,

E_{t_0} - evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹;

Rn - radiação líquida na superfície das culturas, MJ m² dia⁻¹;

G - fluxo de calor no solo, MJ m² dia⁻¹;

T - média diária da temperatura do ar a 2 m de altura, °C;

u_2 - velocidade do vento a 2 m de altura, m s⁻¹;

e_s - pressão da saturação de vapor, kPa;

e_a - pressão de vapor atual, kPa;

$e_s - e_a$ - déficit de saturação de vapor, kPa;

Δ - inclinação da curva da pressão de vapor *versus* temperatura, kPa °C⁻¹.

γ - constante psicrométrica, kPa °C⁻¹.

Os elementos climáticos para estimativa da E_{t_0} Penman-Monteith FAO (E_{t_0} PM) compõem um conjunto contendo temperatura máxima e mínima, pressão de vapor real ou atual, radiação líquida e velocidade do vento. Com este conjunto torna-se possível estimar as diversas variáveis, conforme equações a seguir:

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P_{atm} \quad (2)$$

onde,

P_{atm} é a pressão atmosférica, kPa.

$$P_{atm} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,26} \quad (3)$$

onde,

z é a altitude da estação em relação ao nível do mar (m)

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \frac{17,27T}{T + 237,3} \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (4)$$

onde,

exp - base do logaritmo natural, 2,7183;

T é a média da temperatura do ar, °C;

$$e^o(T) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T}{T + 237,3} \right] \quad (5)$$

onde,

$e^o(T)$ - pressão de saturação de vapor em determinada temperatura do ar T , kPa;

T - temperatura do ar, °C.

$$e_s = \frac{e^o(T_{máx}) + e^o(T_{mín})}{2} \quad (6)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (7)$$

onde,

R_{ns} é a radiação de onda curta líquida que chega à superfície terrestre (MJm^2dia^{-1});

R_{nl} é a radiação de onda longa líquida que sai da superfície terrestre ($MJm^2 dia^{-1}$).

$$R_{ns} = R_s (1 - \alpha) \quad (8)$$

onde,

α - albedo, 0,23.

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{máx}K^4 + T_{mín}K^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) (1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35) \quad (9)$$

onde,

σ - constante de Stefan-Boltzmann, $4,903 \times 10^{-9} MJ m^2 dia^{-1}$;

$T_{máx}K$ - temperatura máxima absoluta durante período de 24 h, °K;

$T_{mín}K$ - temperatura mínima absoluta durante período de 24 h, °K;

R_s - radiação solar medida ou calculada, $MJ m^2 dia^{-1}$;

R_{so} - radiação de céu claro medida ou calculada, $MJ m^2 dia^{-1}$.

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (10)$$

onde,

z - altitude da estação em relação ao nível do mar, m;

R_a - radiação extraterrestre, $MJ m^2 dia^{-1}$.

A altitude foi gerada utilizando-se o Global Mapper®, para inserir os dados georreferenciados do levantamento da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) que obteve dados de elevação do terreno em escala global aproximada, gerando uma completa base de dados digital de alta resolução do planeta. SRTM consistiu de um sistema de radar específico e modificado que sobrevoou sobre a nave especial Endeavour durante uma missão de onze dias em Fevereiro de 2000 (NASA, 2007).

A radiação extraterrestre (R_a) do décimo-quinto dia do mês para o hemisfério sul foi utilizada, conforme Allen et al. (1998), interpolando-se para a região de estudo. Os autores propuseram modelo de estimativa da E_t PM com dados limitados. Para sua utilização assume-se que:

1. ao amanhecer, a temperatura está próxima da temperatura mínima e esta por sua vez considera-se que esteja próxima do ponto de orvalho, o ar está próximo da saturação com vapor d'água e a umidade relativa próxima de 100%. Esta temperatura é empregada para estimativa da pressão de vapor real (e_a), então:

$$e_a = e^o(T_{mín}) = 0,611 \exp \left[\frac{17,27T_{mín}}{T_{mín} + 237,3} \right] \quad (11)$$

onde,

e_a - pressão de vapor real, kPa;

$e^o(T_{mín})$ - pressão de saturação de vapor na temperatura mínima, kPa;

$T_{mín}$ - temperatura mínima, °C;

2. a diferença entre a temperatura máxima e mínima está relacionada com o grau de cobertura de nuvens de uma localidade. Condições de céu claro resultam em altas temperaturas durante o dia (T_{\max}) por causa da transparência atmosférica à radiação solar que chega e temperaturas mais baixas durante a noite (T_{\min}) por causa de menos radiação de onda longa refletida que é absorvida pela atmosfera. Por outro lado, em dias nublados, T_{\max} é relativamente menor porque parte significativa da radiação solar nunca atinge a superfície da Terra e é absorvida e refletida pelas nuvens. De forma similar, T_{\min} será relativamente mais alta, uma vez que a cobertura de nuvens age como uma coberta que diminui a radiação de onda longa líquida refletida. Desta forma, o cálculo da radiação é baseado pela diferença entre temperaturas máxima e mínima:

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} R_a \quad (12)$$

onde,

R_s - radiação solar, MJ m⁻² dia⁻¹;

R_a é a radiação extraterrestre, MJ m⁻² dia⁻¹;

T_{\max} é a temperatura máxima, °C;

T_{\min} é a temperatura mínima, °C;

k_{R_s} é o coeficiente de ajuste, °C^{-0.5}.

3. na ausência de dados, u_2 é considerado 2 m s⁻¹ que é a média de mais de 2.000 estações ao redor do globo;
4. o efeito do fluxo de calor no solo (G) é ignorado para cálculos diários, uma vez que sua magnitude é pequena;
5. K_R varia de 0,16 para o interior, e massas de ar que não sofrem influência de um grande corpo hídrico a 0,19 para locais costeiros onde as massas de ar são influenciadas por um corpo hídrico próximo, segundo Allen et al. (1998), sendo necessária a sua validação local.

De maneira geral, os dados de clima têm maior utilidade quando comparados com valores padrões ou normais. Para que sejam consideradas como *normais climatológicas*, as médias das variáveis meteorológicas devem se referir aos períodos padronizados de pelo menos trinta anos. As médias mensais são obtidas a partir dos valores diários e em seguida faz-se uma análise de homogeneidade que inclui verificação de tendências, desvios, valores alterados e outros problemas que evidenciem a heterogeneidade dos dados. Em seguida, analisa-se a origem da variação e descontinuidades não climáticas (BRASIL, 1992).

Identificou-se, na área de estudo, que a estação de Jaguaruana-CE (4°47'S e 37°36'W) do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET possui dados disponíveis de temperatura e precipitação (normais climatológicas) de 1961-1990 (BRASIL, 1992), os quais foram comparados com a climatologia do modelo adotado.

Para comparação dos dados, utilizou-se como método, a *Distância Euclidiana*, a qual é uma consequência do teorema de Pitágoras e permite a conveniência de se trabalhar em termos de distâncias quadradas, sem nenhuma informação perdida, uma vez que não existe distância negativa (WILKS, 2006), a qual é a diferença entre cada média mensal da variável climática avaliada, para a normal climatológica e *hindcast* do modelo climático.

No presente estudo foi utilizado o sistema integrado de modelagem regional PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*), versão 1.2, utilizando as condições de contorno do Modelo Climático Global, HadAM3P, acoplado ao Modelo Climático Regional (HadRM3P), através da técnica dinâmica de redução de escala (*downscaling*).

Os dados, composto de uma climatologia de base do modelo de 1961-1990 (*baseline*) foram processados no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE-CPTEC (ALVES, 2007), foram então extraídos, considerando-se as coordenadas geográficas da região em estudo, com resolução espacial de 0,44° x 0,44°, gerando-se então, dados para as quadrículas para cada variável, a fim de abranger toda a região estudada.

Os dados foram analisados quanto a sua variabilidade espacial (latitude/longitude), utilizando-se geoestatística (*krigagem*), o que foi possível graças à integração a um sistema de informação geográfica. A mesma metodologia foi empregada para estimar a demanda de água para irrigação de arroz no Sri Lanka citado por Silva et al. (2007) e na bacia do Guadalquivir, Espanha por Díaz et al. (2007).

Para validação do modelo, foi aplicada regressão linear entre $E_t PM$ estimada com dados mínimos e estimada com dados de uma estação de referência localizada em Limoeiro do Norte, Ceará.

Resultados e discussão

Nas Tabelas 1 e 2, são apresentados os valores espacializados das temperaturas máxima e mínima mensais (°C) modelados para a climatologia de 1961-1990, bem como mínimos, máximos, média e desvio padrão observados na área objeto de estudo.

Tabela 1 - Temperatura máxima mensal (°C) modelada pelo PRECIS HadRM3P para 1961-1990 mínimos, máximos, média e desvio padrão observados

1961-90	Jan	Fev	Mar	Abril	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Mínimo	28,8	28,5	28,2	27,8	28,4	28,7	28,9	29,1	29,2	29,4	29,6	29,3
Máximo	34,3	32,7	30,4	29,0	30,3	32,0	34,1	36,0	37,0	37,5	37,4	36,0
Média	32,6	31,2	29,4	28,5	29,3	30,6	32,5	34,1	34,8	35,3	35,2	34,1
Desv. P.	1,9	1,4	0,7	0,4	0,6	1,1	1,8	2,4	2,7	2,8	2,7	2,3

Tabela 2 - Temperatura mínima mensal (°C) modelada pelo PRECIS HadRM3P para 1961-1990 - mínimos, máximos, média e desvio padrão observados

1961-90	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Mínimo	21,4	21,2	21,3	21,3	21,0	20,6	20,9	21,6	22,1	22,8	22,8	22,2
Máximo	25,4	25,3	25,2	25,3	25,3	25,0	24,7	24,7	25,0	25,6	25,6	25,6
Média	22,8	22,5	22,5	22,6	22,4	22,2	22,3	22,7	23,0	23,8	23,8	23,4
Desv. P.	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,2	1,0	0,9	0,9	0,9	1,1

A seguir, através das Tabelas 3 e 4, são demonstradas comparações da climatologia de base do modelo HadRM3P-PRECIS, com as normais climatológicas da estação de Jaguaruana, CE, localizada dentro da área de estudo. Os resultados demonstram que o modelo subestima as máximas, notadamente nos meses

de abril e maio (3,63 °C e 3,14 °C, respectivamente), conforme já preconizado por Alves (2007).

Já para as temperaturas mínimas, pode-se observar uma boa concordância para os meses de novembro a maio, sendo superestimada nos meses de junho a outubro (menos de 2 °C).

Tabela 3 - Comparação da média das temperaturas máximas (°C) da climatologia de base do modelo PRECIS HadRM3P (1961-1990) com normal climatológica da estação de Jaguaruana-CE (1961-1990)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Climatologia de Base do Modelo 1961-90 (CB)	31,0	30,1	28,9	28,1	28,8	29,5	30,6	31,7	32,4	32,8	32,9	32,1
Normal Climatológica 1961-90 (NC)	33,0	32,9	29,4	31,8	32,0	31,5	32,0	33,2	34,0	34,1	33,7	32,7
Distância Euclidiana (Diferença CB-NC)	2,0	2,8	0,5	3,6	3,1	1,9	1,3	1,4	1,5	1,2	0,7	0,5

Tabela 4 - Comparação da média das temperaturas mínimas (°C) da climatologia de base do modelo PRECIS HadRM3P (1961-1990) com normal climatológica da estação de Jaguaruana-CE (1961-1990)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
CB (1961-90)	23,4	23,3	23,4	23,5	23,3	23,0	22,8	23,0	23,3	23,8	24,0	23,8
NC (1961-90)	23,7	23,5	23,5	23,4	22,9	21,8	21,2	21,1	21,8	22,6	23,8	23,5
Diferença CB-NC	0,2	0,1	0,0	0,1	0,4	1,2	1,6	1,9	1,5	1,2	0,2	0,3

Para estimar a $E_{t_{PM}}$ com dados limitados, primeiramente foi validado localmente por regressão linear, o melhor K_R coeficiente de ajuste, o qual varia de 0,16 a 0,19, segundo Allen et al., (1998). Comparou-se a E_{t_0} de Penman-Monteith FAO, estimada com dados mínimos e utilizando conjunto completo de dados completos disponíveis, referentes ao ano de 2006, da estação meteorológica de referência, localizada em Limoeiro do Norte (CE), sendo 0,17 o melhor valor de K_R com R^2 de 0,90 e $b=1,07$ (FIG. 1), quando comparado à qualidade de ajuste para um K_R de 0,16; 0,18 ou 0,19.

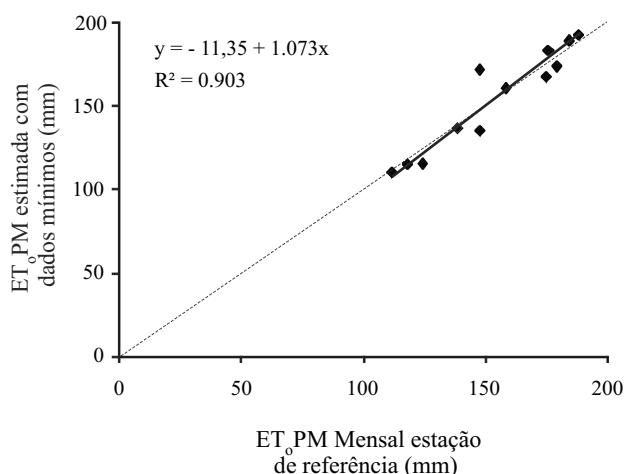


Figura 1 - Regressão linear entre $E_{t_0}PM$ estimada com dados da estação de referência localizada em Limoeiro do Norte-CE e com dados limitados utilizando $K_R=0,17$

A Tabela 5 apresenta a radiação extraterrestre (R_a) do décimo-quinze dia do mês para o hemisfério sul, conforme Allen et al. (1998), interpolando-se para a região de estudo. A Figura 2 apresenta o mapa temático de altitude gerado, utilizando-se o *Global Mapper®*. O mapa temático de altitude foi então empregado para a estimativa da $E_{t_0}PM$.

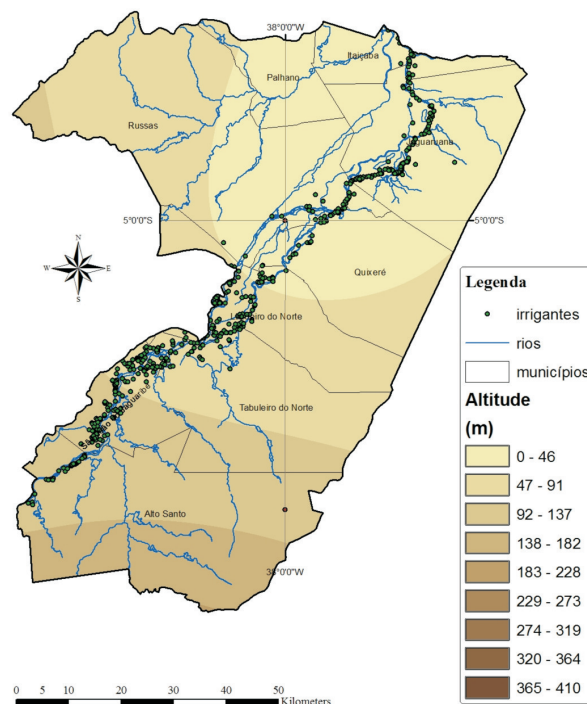


Figura 2 - Altitude (m) da área de estudo

Na Tabela 6, são apresentados os valores espacializados da evapotranspiração de referência média mensal, segundo Penman-Monteith FAO estimadas com dados mínimos, para a climatologia modelada pelo PRECIS HadRM3P para o período de 1961-1990, bem como E_{t_0} mínima, máxima, média e desvio padrão observados. Esses dados são resultados da espacialização de dez pontos estimados sobre a região estudada. Vale ainda salientar que a $E_{t_0}PM$ anual para a região diferiu da estimada por BARBOSA et al. (2005), a qual atingiu 2.131,6 mm para Limoeiro do Norte. Por outro lado, os autores empregaram a interpolação pelo método do Inverso do Quadrado da Distância, utilizando dados secundários, cabendo uma validação posterior com dados medidos por estação de referência e possível ajuste, se necessário.

Tabela 5 - Radiação extraterrestre ($MJ m^{-2} dia^{-1}$) para cada mês, segundo a latitude

R_a ($MJm^2 dia^{-1}$)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
4°	37,6	38,3	38,0	36,0	33,4	31,8	32,3	34,6	37,0	38,0	37,6	37,2
6°	38,3	38,7	38,0	35,6	32,7	30,9	31,5	34,0	36,8	38,2	38,2	38,0
Fator para interpolação	0,35	0,20	0,00	-0,20	-0,35	-0,45	-0,40	-0,30	-0,10	0,10	0,30	0,40
4,66°	37,8	38,4	38,0	35,9	33,2	31,5	32,0	34,4	36,9	38,1	37,8	37,5
5,67°	38,2	38,6	38,0	35,7	32,8	31,0	31,6	34,1	36,8	38,2	38,1	37,9
R_a ($MJm^2 dia^{-1}$)	38,0	38,5	38,0	35,8	33,0	31,3	31,8	34,3	36,9	38,1	37,9	37,7

Tabela 6 - Evapotranspiração espacializada - E_t Penman-Monteith mensal (mm) estimada com dados mínimos para o período de referência (1961-1990) - mínimos, máximos, média e desvio padrão observados e o total anual (mm)

1961-90	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Mínimo	88	76	80	72	73	73	79	87	88	92	101	89	
Máximo	160	141	130	106	116	117	148	171	182	197	187	181	
Média	158	131	122	101	107	107	138	160	170	183	173	169	1.719
Desv. P.	15	11	8	6	8	8	12	14	16	18	16	16	

Na Figura 3 é apresentado o mapa temático dos totais anuais da evapotranspiração de referência (mm), segundo Penman-Monteith FAO, estimada com dados limitados, para 1961-1990.

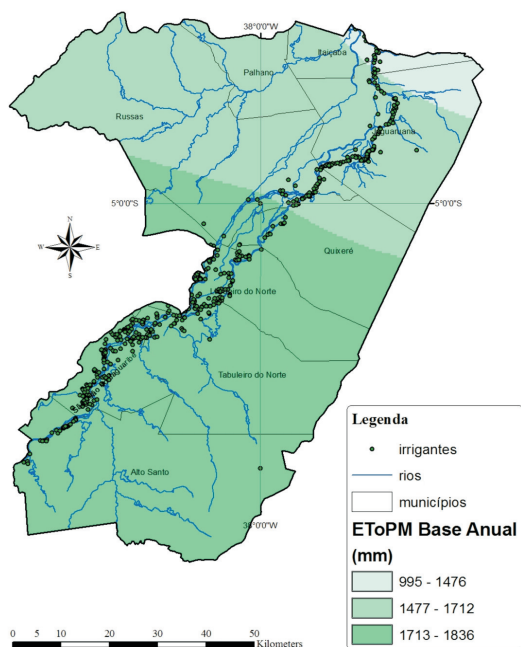


Figura 3 - Mapa temático da E_t PM anual média (mm) para o período de 1961-1990

Em seguida, as estimativas foram comparadas, através de regressão linear, resultando num coeficiente de regressão R^2 de 0,85, coeficiente angular $b = 0,61$ e intervalo de confiança de 95% (FIG. 4).

Considerando-se que o coeficiente linear da equação (53,06) não é desprezível para a variável em análise, há desvios quando se utiliza a equação de regressão, conforme demonstra a Figura 5. Os resíduos variam entre aproximadamente 1,3 e 18,2 mm mensais em valores absolutos e representam as diferenças entre as

$E_{t_{os}}$ estimadas e previstas pela regressão. A $E_{t_{os}}$ apresenta-se ora superestimada, ora subestimada pela equação de regressão, em relação às temperaturas máximas e mínimas oriundas da climatologia de base do modelo. É possível que decorram das divergências das temperaturas máximas e mínimas da normal climatológica e estimadas pelo modelo, conforme se mencionou anteriormente.

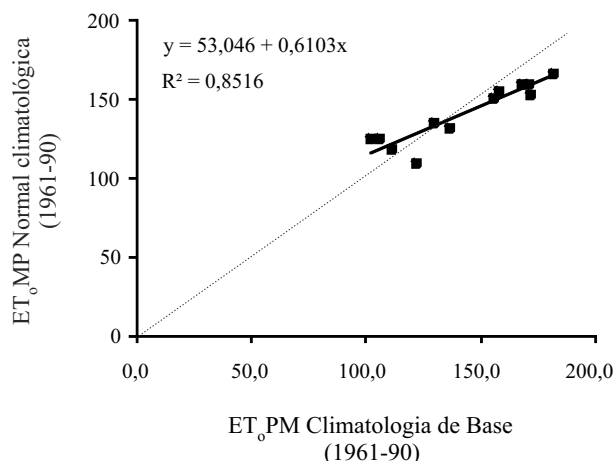


Figura 4 - Regressão linear entre a $E_{t_{os}}$ (mm mês⁻¹) estimada com dados da normal climatológica e com dados de referência (baseline) do modelo PRECIS HadRM3P (1961-1990)

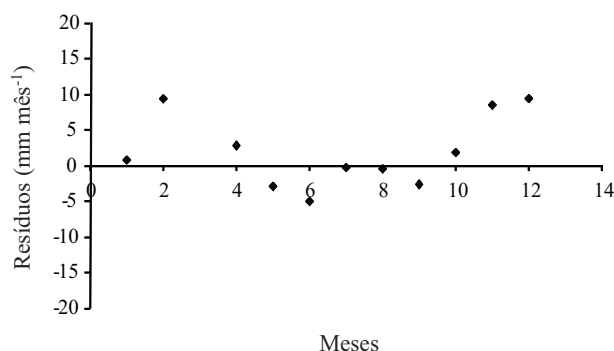


Figura 5 - Resíduos da regressão linear da $E_{t_{os}}$ (mm mês⁻¹) estimada com dados da normal climatológica e dados do modelo PRECIS HadRM3P (1961-1990)

Considerando-se a inexistência de dados climáticos passados da região suficientes para estimativa da Et_0 pela equação de Penman Monteith FAO, comparou-se ainda, a média das Et_0 PM de 2002-2006, estimada com a única fonte de conjunto de dados completos disponível na região (estação de Limoeiro do Norte, CE), com a Et_0 PM estimada com dados limitados (temperatura máxima e mínima do modelo, período de 1961-1990). Para isto, parte-se da suposição que não houve mudanças significativas entre o período de 1961-1990 e 2006. Apesar das limitações da regressão anterior, foi observado um coeficiente de determinação (R^2) de 0,902 (FIG. 6) e coeficiente angular (b) = 0,95, havendo uma leve tendência de se subestimar a Et_0 PM quando se utiliza dados modelados. Enquanto a Et_0 PM anual foi estimada em 2.131,6 mm para Limoeiro do Norte por Barbosa et al. (2005), os dados da estação meteorológica resultaram numa Et_0 PM anual de 1.852 mm, esta última aproximando-se do máximo de 1.836 mm anuais estimada pela metodologia de dados mínimos.

Tal resultado assemelha-se aos obtidos por Popova et al. (2006) que obtiveram R^2 0,96; 0,85 e 0,98 com a metodologia de dados mínimos ao comparar estimativas com dados completos de uma estação de referência para três localidades do sul da Bulgária, por Jabloun e Sahli, (2008) que obtiveram R^2 maiores que 0,90 para oito locais na Tunísia e finalmente, por Sentelhas et al. (2010) R^2 entre 0,96 e 0,99 para doze localidades no Canadá.

A Tabela 7 e Figura 7 apresentam os desvios da Et_0 PM estimada via regressão linear, com variação

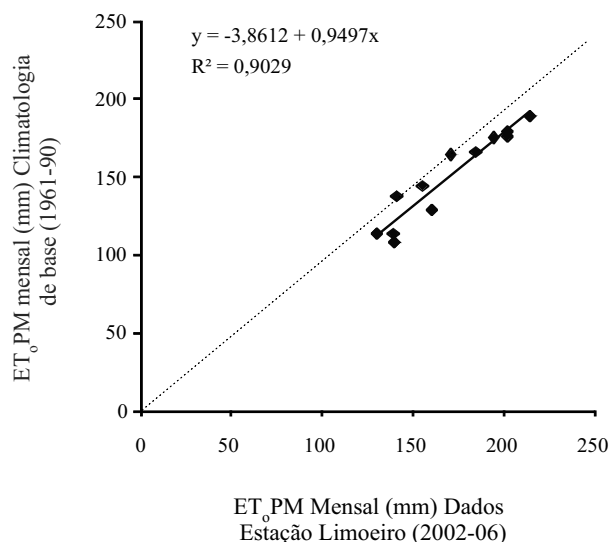


Figura 6 - Regressão linear da Et_0 (mm mês⁻¹) estimada com conjunto completo de dados medidos (2002-2006) e *hindcasts* do modelo de mudanças climáticas (1961-1990)

de 0,30 mm dia⁻¹ em abril e maio a 0,42 mm dia⁻¹ em outubro e novembro, com desvio médio de 0,36 mm dia⁻¹ (menores que 0,45 mm dia⁻¹, níveis portanto aceitáveis, segundo Jabloun e Sahli, (2008) e Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME) igual a 0,067 mm dia⁻¹ e erro relativo (relação entre RQME e a média dos dados observados) igual a 0,014, menor que 0,2 e portanto aceitável segundo Cai et al. (2007). Sentelhas et al. (2010) obtiveram erros menores que 0,6 mm dia⁻¹ para a região de Ontário, Canadá, considerando aceitável a estimativa da Et_0 PM com dados

Tabela 7 - Comparação entre Et_0 PM mensal (mm) estimada com dados limitados da climatologia de base do modelo e dados completos da estação de Limoeiro do Norte - CE

Mês	Et_0 (mm mês ⁻¹) 1961-1990	Et_0 (mm mês ⁻¹) Estação 2002-06	Et_0 Predita pela regressão (mm mês ⁻¹)	Desvios absolutos (mm dia ⁻¹)	Desvios absolutos (mm mês ⁻¹)
1	158	156	146	0,38	11,8
2	131	127	121	0,37	10,4
3	122	146	112	0,32	10,0
4	101	125	92	0,30	8,9
5	107	125	98	0,30	9,2
6	107	116	98	0,31	9,2
7	138	141	127	0,35	10,8
8	160	170	148	0,38	11,9
9	170	187	158	0,41	12,4
10	183	200	170	0,42	13,0
11	173	187	161	0,42	12,5
12	169	180	157	0,40	12,3

mínimos. Os desvios representam as diferenças entre as $E_{t_{PM}}$ estimadas pelo modelo PRECIS HadRM3P, pela estação meteorológica e predita pela equação de regressão.

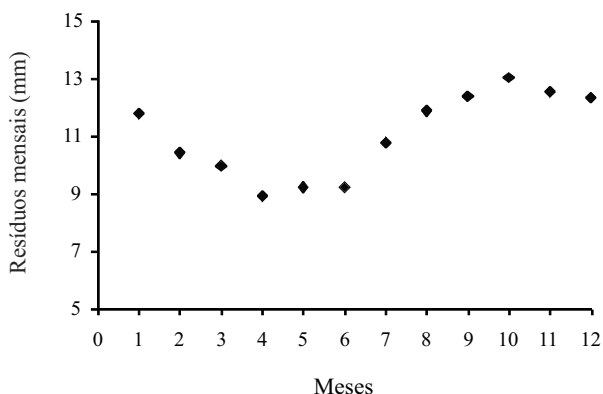


Figura 7 - Desvios mensais da regressão linear entre $E_{t_{PM}}$ mensal (mm) estimada com dados limitados da climatologia de base do modelo e dados completos da estação de Limoeiro do Norte - CE

Uma das formas de aperfeiçoar a estimativa da $E_{t_{PM}}$ com dados mínimos para regiões áridas e semiáridas é utilizar o critério da relação entre a precipitação (P) e a E_{t_o} , proposto por Allen et al. (1998). Isto porque em regiões de baixa umidade relativa, a temperatura mínima pode ser maior que a temperatura do ponto de orvalho e pode resultar numa superestimativa da E_{t_o} , devido a uma superestimativa da temperatura do ponto de orvalho e da diferença da pressão de vapor.

Conclusões

1. A metodologia para estimativa da $E_{t_{PM}}$ com dados mínimos funcionou satisfatoriamente na região estudada;
2. O uso de modelo especializado integrado a um sistema de informação geográfica possibilitou a elaboração de mapas temáticos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA e ao e ao CNPq Repensa Melão pelo apoio financeiro para realização da pesquisa.

Referências

ALLEN, R. G *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements.** Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVES, L. M. **Simulações da variabilidade do clima presente sobre a América do Sul utilizando um modelo climático regional.** 2007. 92 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

BARBOSA, F. C.; TEIXEIRA, A. dos S.; GONDIM, R. S. Espacialização da evapotranspiração de referência e precipitação efetiva para estimativa das necessidades de irrigação na região do Baixo Jaguaribe - CE. **Revista Ciência Agronômica**, v. 36, n. 01, p. 24-33, 2005.

BRASIL. Ministério da agricultura e reforma agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas (1961-1990).** Brasília, 1992. 84 p.

CAI, J. *et al.* Estimating reference evapotranspiration with FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 145, n. 01/02, p. 22-35, 2007.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. de. Princípios básicos em geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. **Sistemas de informações geográficas: aplicações na agricultura** 2. ed. Brasília: EMBRAPA-SPI/EMBRAPA SPAC, 1998. 434 p.

DÍAZ, J. A. R. *et al.* Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. **Regional Environmental Change**, v. 07, n. 03, p. 149-159, 2007.

GONDIM, R. S. TEIXEIRA, A. dos S.; BARBOSA, F. C. Novo paradigma para a água e coeficientes de cultivos aplicados à gestão de recursos hídricos em nível de bacia hidrográfica. **Revista Item Irrigação e Tecnologia**, n. 67, p. 14-18, 2005.

JABLOUN, M.; SAHLI, A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. **Agricultural Water Management**. v. 95, n. 06, p. 707-715, 2008.

MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 02, p.196-202, 2010

NASA. **SRTM.** Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em: 29 mar. 2007.

POPOVA, Z.; KERCEVA, M.; PEREIRA, L.S. Validation of the FAO methodology for computing E_{t_o} with limited data. Application to South Bulgaria. **Irrigation and Drainage**. v. 55, n. 02, p. 201-215, 2006.

SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**. v. 97, n. 05, p. 635-644, 2010.

SILVA, C.S. *et al.* Predicting the impacts of climate change - A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. **Agricultural Water Mement**, v. 93, n. 01-02, p. 19-29, 2007.

WILKS, D.S. **Statistical methods in the atmospheric sciences.** New York: Elsevier. 630 p. 2006.