

ENSAIO DE AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

Rubens S. Gondim¹, Aline de H.N. Maia², Marco A.H. de Castro³,
Sílvio R. de M. Evangelista⁴, Sérgio C. de F. Fuck Júnior⁵

Introdução

A demanda hídrica está em constante incremento devido ao aumento populacional e desenvolvimento econômico. Temperaturas mais elevadas causam maior demanda para evapotranspiração das plantas e a tendência seria em direção a um incremento da demanda de água para irrigação. Desta forma, mudança climática é outra fonte potencial de incremento de demanda de água que pode substancialmente afetar a retirada de água para a agricultura, a qual depende de como a evaporação e precipitação irão se comportar (IPCC, 2001). Döll (2002) concluiu que mudanças na precipitação, combinadas com elevação na evapotranspiração aumenta as necessidades hídricas da irrigação.

Binder (2006) recomendou detalhar mais os cenários disponíveis de mudanças climáticas para a escala de bacia hidrográfica, utilizando-se ainda modelos hidrológicos, a fim de se estudar impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos. Redução de escala dinâmica envolve o aninhamento de um Modelo de circulação regional (RCM) a uma resolução mais grosseira de um Modelo de circulação global (GCM). RCM utiliza o GCM para definir as condições de contorno atmosféricas variáveis com o tempo, em torno de um domínio finito, no qual a dinâmica física da atmosfera é modelada, utilizando-se uma malha horizontal espaçada de 20 – 50 km. A principal limitação dos RCMs é que são tão dependentes de computadores quanto os GCMs (impõem restrições ao tamanho de domínio viável, número de experimentos e duração das simulações). Os cenários produzidos por RCMs são também sensíveis à escolha das condições de contorno (como umidade do solo) utilizadas para iniciar experimentos. A principal vantagem de RCMs é sua capacidade de solução de características atmosféricas de menor escala, como precipitação orográfica e podem ser usados para explorar a significância

¹ Pesquisador Embrapa Agroindústria Tropical; Doutorando do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC. Rua Dra.Sara Mesquita 2270, 60.511-110 Fortaleza, CE, Brasil. E-mail: rubens@cnpat.embrapa.br.

² Pesquisadora. Doutora. Embrapa Meio Ambiente. Rodovia SP 340 - Km 127,5 Caixa Postal 69 13820-000 Jaguariúna - SP – Brasil. Email: ahmaia@cnpma.embrapa.br

³ Professor. Ph.D. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Universidade Federal do Ceará. Av.Mister Hull s/n. Blocos 713. 60455-760 Fortaleza, CE, Brazil. E-mail: marco@ufc.br.

⁴ Pesquisador. Doutor. Embrapa Informática Agropecuária. Av. André Tosello, 209 - Barão Geraldo Caixa Postal 6041- 13083-886 – Campina-SP, Brazil. Email: silvio@cnpia.embrapa.br

⁵ Analista. Embrapa Agroindústria Tropical. Rua Dra.Sara Mesquita 2270, 60.511-110 Fortaleza, CE, Brazil. E-mail: sergio@cnpat.embrapa.br.

relativa de diferentes forçantes externas, tais como ecossistema terrestre ou mudanças químicas atmosféricas (Wilby *et al.*, 2002).

A agricultura irrigada possui ligação direta com a disponibilidade da água numa bacia hidrográfica, especialmente numa região altamente dependente da irrigação. Conhecimento local sobre o assunto permitirá o desenvolvimento de políticas para reduzir impactos e vulnerabilidades. Perdas sociais, econômicas e ambientais causadas por planejamento deficiente e ausência de critérios de decisão para definir medidas de mitigação e adaptação tornariam a equidade de acesso e sustentabilidade do uso da água, incertos.

A bacia hidrográfica do Jaguaribe ocupa uma área de 74621km², cerca de 48% do território cearense, (estando subdividida em cinco sub-bacias: Salgado, Alto Jaguaribe, Médio Jaguaribe, Baixo Jaguaribe e Banabuiú). Os principais usos de água na região em estudo, por ordem de volume requerido de água, são: irrigação (72.94%), carcinicultura de água doce (22.64%), consumo humano (2.87%), piscicultura (0.97%) e consumo industrial (0.59%). (Figueiredo *et al.*, 2003).

O objetivo do presente trabalho foi analisar os impactos das mudanças climáticas na temperatura e na evapotranspiração de referência, considerando-se os cenários de mudanças climáticas fornecidos por modelo submetido à técnica de redução de escala dinâmica, aplicado em nível de bacia hidrográfica, (rio Jaguaribe, no trecho compreendido entre as barragens do Castanhão e de Itaiçaba, no Estado do Ceará, nordeste do Brasil).

Metodologia

A área de domínio foi delimitada entre 4°39'30" e 5°40'00" de latitude sul e 37°35'30" e 38°27'00" de longitude oeste, ocupando uma área de 6415.10 km².

No presente estudo foi utilizado o sistema integrado de modelagem regional PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*), versão 1.2, utilizando o modelo climático regional HadRM3P (Moberg e Jones, 2004). O modelo HadRM3P (*Hadley Regional Model 3, with Providing Regional Climates for Impacts Studies*) foi implementado pelo CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (Alves, 2007). Sua dinâmica é baseada no HadAM3P, uma versão mais recente da componente atmosférica do Modelo de Circulação Global HadCM3 (Johns *et al.*, 2003) do *Hadley Centre*, Inglaterra. Foi utilizado o período 1961-1990 para climatologia de base do modelo (período de referência).

O modelo regional HadRM3 possui uma resolução horizontal de 50 km com 19 níveis na vertical (da superfície até 30 km na estratosfera), e 4 níveis no solo. A resolução espacial é de 0.44° x 0.44° lat/long. Para fins de mudança climática, o modelo usa uma representação do ciclo de sulfato e de alguns outros aerossóis. Maiores detalhes das principais características HadRM3P implementado no CPTEC são descritos por Ambrizzi *et al.* (2007) e Alves (2007).

O sistema PRECIS é um sistema de modelagem regional que foi desenvolvido no *Hadley Centre*, Inglaterra, devido à crescente demanda dos países que necessitavam gerar cenários climáticos regionais com alta resolução espacial de forma relativamente barata e simples. Atualmente, o sistema PRECIS já é utilizado e consolidado como uma importante ferramenta para estudos de vulnerabilidade climática em vários países, a exemplos da Inglaterra, Índia, África do Sul e China. Maiores detalhes acerca do sistema PRECIS pode ser obtido em Jones *et al.* (2004).

A climatologia de base ou de referência (condições iniciais) pode ser definida como aquela através da qual a mudança climática é mensurada, o que torna a caracterização climática da região de suma importância. A escolha da climatologia de base e cenários podem fortemente

influenciar nos resultados de estudos de impactos de mudanças climáticas. Um dos critérios de validação de um modelo de circulação global é a avaliação de sua *performance* em simular o clima presente na região. Isto pode ser realizado comparando-se a climatologia de base do modelo com dados da região, determinando-se assim, a habilidade do modelo climático em simular padrões de circulação (Carter *et al.*, 2007).

Identificou-se que a estação de Jaguaruana-CE (4°47'S e 37°36'W) do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET possui dados disponíveis (normais climatológicas) de 1961-1990 (Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Departamento Nacional de Meteorologia, 1992), os quais foram comparados com dados do mesmo período oriundos da climatologia de base do modelo (1961-90). Para comparação das estimativas geradas pelo modelo e variáveis medidas em campo, utilizou-se como método a distância euclidiana (Eq. 1), 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):

$$\|x - y\| = \sqrt{\sum_{k=1}^k (x_k - y_k)^2} \quad (1)$$

onde: $\|x - y\|$ é a distância entre os pontos x e y ; K é igual ao número de dimensões e k refere-se às coordenadas dos pontos x e y .

Considerando-se que, para o setor de irrigação na área do estudo, mudanças concretas estão sendo esperadas para os próximos 30 anos, sendo as mesmas: operacionalização total do Projeto Tabuleiro de Russas com incremento da área irrigada em 10600 ha e incorporação de mais 2500 ha irrigados no Distrito de Irrigação Jaguaribe-Apodi (Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará, 2006). O horizonte temporal de interesse para avaliação dos impactos das mudanças climáticas considerado foi o ano de 2040.

As mudanças climáticas dependem das forçantes de emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, tais como população, intensidade de emissão de carbono das fontes de energia, emissões sulfúricas, modalidade de crescimento econômico, desenvolvimento tecnológico. Os cenários A1 e B1 possuem as mesmas projeções populacionais, assumindo-se baixas taxas de fertilidade e de mortalidade. O cenário A2 assume alta fertilidade e alta mortalidade e o cenário B2 é intermediário. Optou-se, então, por simular os cenários B2 e A2 para uma população global em 2040, entre 8.93 e 10.71 bilhões de habitantes e demais hipóteses de projeções futuras do Produto Interno Bruto (PIB), energia primária, emissões cumulativas de CO₂ e uso da terra, conforme Nakicenovic *et al.* (2000).

O modelo de mudanças climáticas (modelo de circulação global HadAM3P aplicado como condição de contorno do modelo regional HadRM3P, utilizando-se o sistema PRECIS) gerou dados mensais georreferenciados de temperaturas máximas e mínimas. Estes dados foram processados em programa elaborado no Statistical Analysis System – SAS® para estimativa da evapotranspiração de referência de Penman-Monteith FAO (ET_o-PM), pixel a pixel. Em seguida, foram transferidos para um Sistema de Informação Geográfica, onde foram analisados quanto a sua variabilidade espacial, considerando-se a latitude/longitude, utilizando-se a ferramenta de geoestatística de interpolação, conhecida como krigagem (Isaaks e Srivastava, 1989).

Alves *et al.* (2007) também empregou a metodologia de análise geoestatística para descrever a variabilidade temporal da precipitação pluvial ao longo dos anos, no município de Juiz de Fora – MG, no período de 2000 a 2099, referentes a cenários futuros de mudanças climáticas.

A mesma metodologia foi ainda empregada no Sri Lanka por Silva *et al.* (2007) e na bacia do Guadalquivir, Espanha por Díaz *et al.* (2007).

O efeito do clima nas necessidades hídricas das culturas irrigadas é dado pela evapotranspiração de referência (ET_o). O painel de especialistas da FAO recomendou a adoção da combinação do método de Penman-Monteith e ficou conhecido como o método FAO Penman-Monteith, válido globalmente como padrão para cálculo das necessidades hídricas das culturas (Allen *et al.*, 1998).

Considerando-se a insuficiência de dados (disponibilidade apenas das temperaturas máxima e mínima), utilizou-se o modelo de estimativa da ET_o Penman-Monteith FAO (ETo-PM) com dados limitados, conforme proposto por Allen *et al.* (1998). A metodologia foi empregada por Popova *et al.* (2006) na Bulgária e por Jabloun e Sahli (2008) na Tunísia. Esta metodologia estima a pressão de vapor actual a partir da temperatura mínima e a radiação global a partir da equação:

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a \quad (2)$$

onde

- R_s radiação global [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$],
- R_a radiação extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$],
- T_{max} temperatura máxima [$^{\circ}\text{C}$],
- T_{min} temperatura mínima [$^{\circ}\text{C}$],
- k_{Rs} coeficiente de ajuste (0.16 .. 0.19) [$^{\circ}\text{C}^{-0.5}$].

O valor de k_{Rs} foi ajustado às condições locais como descrito abaixo.

A altitude foi determinada para cada pixel, através do modelo de elevação do terreno do *Global Mapper*®. Uma validação das estimativas foi empregada, utilizando-se regressão linear.

Mapas temáticos mensais, evapotranspiração de referência para o período de 1961-90 e 2040, cenários A2 e B2 foram gerados.

Resultados e discussão

As Tabelas 1 e 2 demonstram uma comparação da climatologia de base do modelo PRECIS-HadRM3P, 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 (3.6°C e 3.1°C , respectivamente). Já para as temperaturas mínimas, pode-se observar uma boa coincidência para os meses de novembro a maio, sendo superestimada nos meses de junho a outubro (menos de 2°C). As Figs. 1 e 2 apresentam a comparação gráfica.

Tabela 1. Comparação da média das temperaturas máximas ($^{\circ}\text{C}$) da climatologia de base do modelo (1961-90) com normal climatológica da estação de Jaguaruana-CE (1961-90).

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Climatologia de base do	31.1	30.1	28.9	28.2	28.9	29.5	30.	31.	32.4	32.8	32.	32.
Normal climatológica (1961-90)	33.1	32.9	29.4	31.8	32.0	31.5	32.	33.	34.0	34.1	33.	32.
Distância Euclidiana	2.0	2.8	0.5	3.6	3.1	1.9	1.4	1.4	1.6	1.3	0.8	0.5

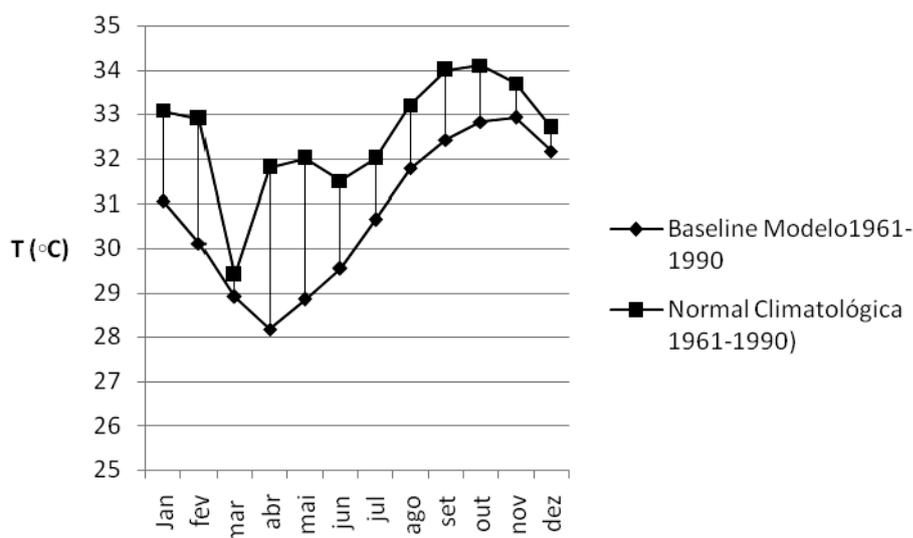


Fig. 1. Comparação da média das temperaturas máximas (°C) da climatologia de base do modelo (1960-90) com normal climatológica da estação de Jaguaruana-CE (1961-90).

Tabela 2. Comparação da média das temperaturas mínimas (°C) da climatologia de base do modelo (1961-90) com normal climatológica da estação de Jaguaruana-CE (1961-90).

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Climatologia de base 1961-90	23.4	23.3	23.4	23.6	23.4	23.1	22.9	23.0	23.4	23.8	24.1	23.8
Normal climatológica 1961-	23.7	23.5	23.5	23.4	22.9	21.8	21.2	21.1	21.8	22.6	23.8	23.5
Distância Euclidiana	0.3	0.2	0.1	0.2	0.5	1.3	1.7	1.9	1.6	1.2	0.3	0,3

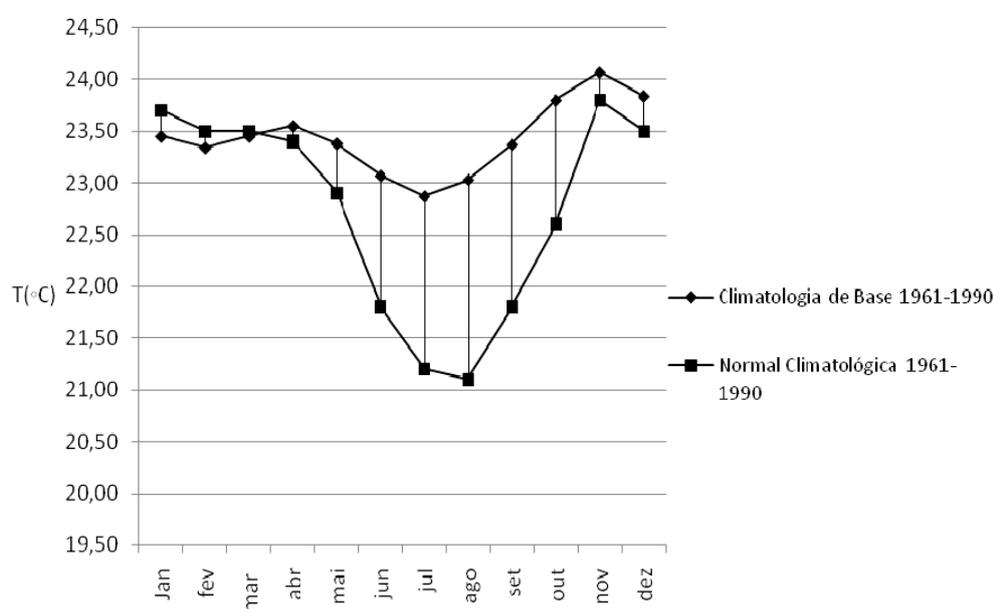


Fig. 2. Comparação da média das temperaturas mínimas (°C) da climatologia de base do modelo (1961-90) com normal climatológica da estação de Jaguaruana-CE (1961-90).

As Tabelas 3 e 4 apresentam os valores das projeções das temperaturas máxima e mínima mensais (°C) para os anos de 2040, em relação à climatologia de base do modelo (1961-90), cenários A2 e B2 (Nakicenovic *et al.*, 2000), bem como mínimos, máximos, média e desvio padrão observados. A diferença entre as condições iniciais e 2040 pode ser observada, através da porcentagem. As Figuras 3 e 4 apresentam os dados graficamente.

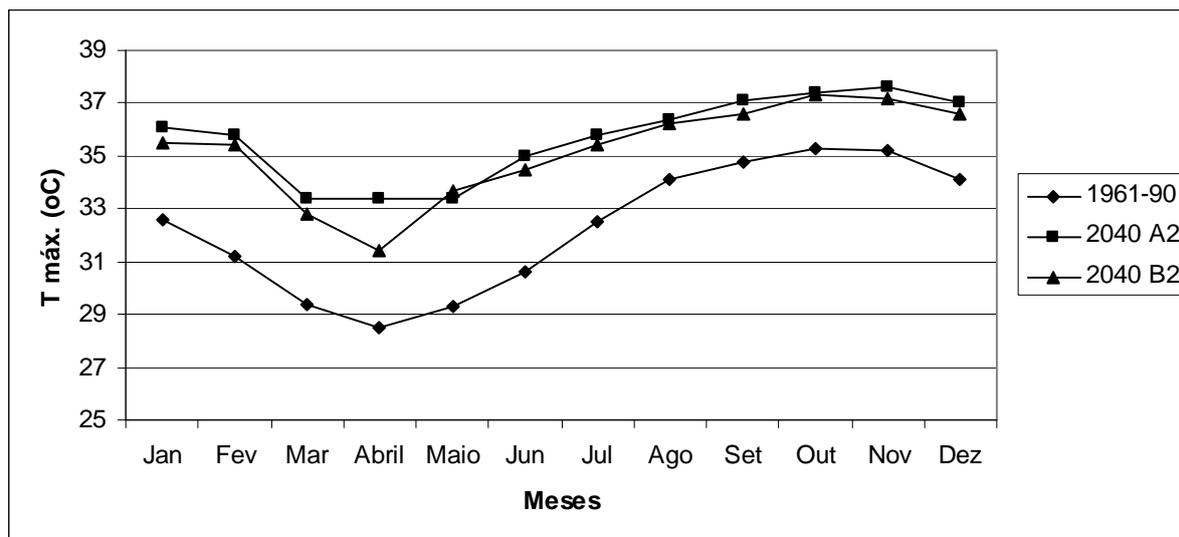


Fig. 3. Temperatura máxima mensal (°C) para climatologia de base e o ano de 2040, cenários A2 e B2.

Tabela 3. Projeções da temperatura máxima mensal (°C) para climatologia de base e o ano de 2040, cenários A2 e B2 – mínimos, máximos, média e desvio padrão observados.

	Jan	Fev	Mar	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<i>1961-90</i>												
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
Desvio Padrão	1.9	1.4	0.7	0.4	0.6	1.1	1.8	2.4	2.7	2.8	2.7	2.3
<i>2040 A2</i>												
Mínimo	33.3	33.2	32.1	32.2	32.6	33.6	33.5	33.4	33.3	33.4	33.8	33.4
Máximo	37.3	37.0	34.7	34.3	34.3	36.0	36.8	37.5	38.6	39.0	39.2	38.5
Média	36.1	35.8	33.4	33.4	33.4	35.0	35.8	36.4	37.1	37.4	37.6	37.0
%	10.7	14.7	13.6	17.2	14.0	14.4	10.2	6.7	6.6	5.9	6.8	8.5
Desvio Padrão	1.3	1.2	0.8	0.7	0.6	0.7	1.0	1.2	1.6	1.7	1.6	1.5
<i>2040 B2</i>												
Mínimo	32.6	33.0	31.6	30.6	32.8	33.1	33.1	33.1	32.8	33.4	33.4	33.1
Máximo	36.8	36.6	33.9	32.5	34.7	35.5	36.3	37.3	38.1	38.9	38.8	38.0
Média	35.5	35.4	32.8	31.4	33.7	34.5	35.4	36.2	36.6	37.3	37.2	36.6
%	8.9	13.5	11.6	10.2	15.0	12.7	8.9	6.2	5.2	5.7	5.7	7.3
Desvio Padrão	1.3	1.2	0.7	0.6	0.7	0.7	1.0	1.3	1.6	1.7	1.6	1.5

Para estimativa da ETo-PM com dados limitados, primeiramente estimou-se o melhor k_{RS} (coeficiente de ajuste) para a região, comparando-se a ET_o de Penman-Monteith FAO, estimada com dados mínimos e conjunto completo de dados disponível, referentes ao ano de 2006, da estação de Limoeiro do Norte (CE), sendo 0.17 o melhor valor de k_{RS} com R^2 de 0.90 (Figura 5), quando se compara a um k_{RS} de 0.16, 0.18 e 0.19.

Tabela 4. Projeções da temperatura mínima mensal (°C) para 1961-90 e o ano de 2040, cenários A2 e B2 – mínimos, máximos, média e desvio padrão observados.

	Jan	Fev	Ma	Abril	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	No	Dez
<i>1961-90</i>												
Mínimo	21.4	21.2	21.	21.3	21.	20.6	20.9	21.6	22.1	22.8	22.	22.
Máximo	25.4	25.3	25.	25.3	25.	25.0	24.7	24.7	25.0	25.6	25.	25.
Média	22.8	22.5	22.	22.6	22.	22.2	22.3	22.7	23.0	23.8	23.	23.
Desvio Padrão	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	1.1
<i>2040 A2</i>												
Mínimo	23.6	24.0	23.	24.0	23.	23.9	23.8	23.9	24.0	24.1	24.	24.
Máximo	26.1	26.4	26.	26.9	26.	26.6	26.0	25.6	25.7	25.7	26.	24.
Média	24.5	24.8	24.	25.1	24.	25.0	24.7	24.5	24.5	24.5	25.	25.
%	7.5	10.2	9.3	11.1	10.	12.6	10.8	7.9	3.1	5.5	5.5	10.
Desvio Padrão	0.7	0.6	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.5	0.54	0.4	0.5
<i>2040 B2</i>												
Mínimo	23.6	23.9	23.	22.9	23.5	23.3	23.0	23.3	23.5	23.8	24.1	23.
Máximo	25.9	26.1	26.	26.1	26.4	26.1	25.4	25.3	25.2	25.4	25.7	25.
Média	24.3	24.5	24.	24.0	24.7	24.5	24.1	24.1	23.9	24.3	24.6	24.
%	6.6	8.9	7.6	6.2	10.	10.4	8.1	6.2	2.3	3.4	3.4	3.8
Desvio Padrão	0.6	0.6	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5

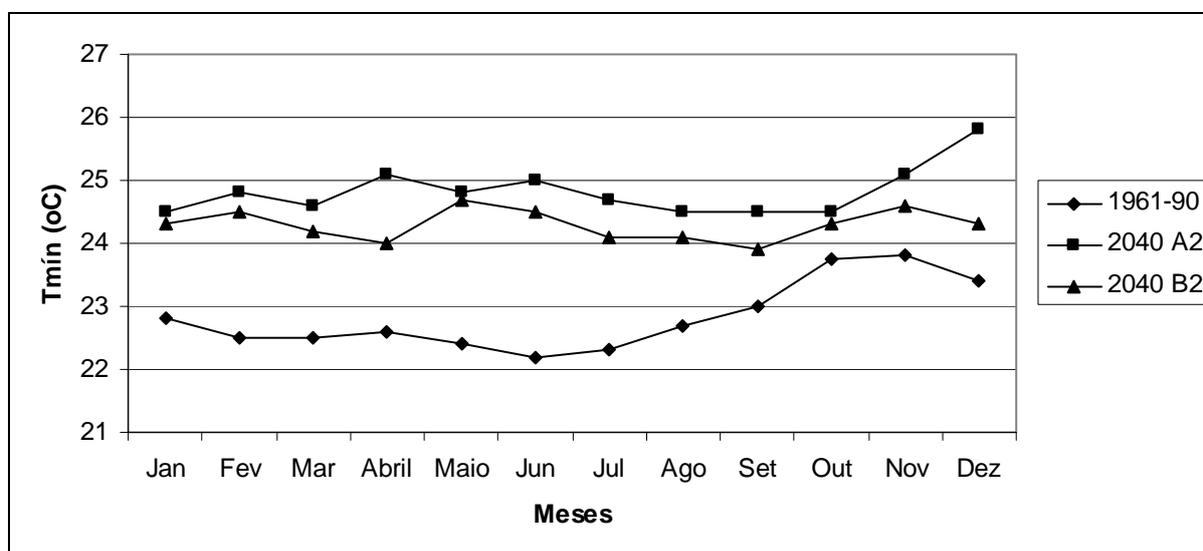


Fig. 4. Temperatura mínima mensal (°C) para climatologia de base e o ano de 2040, cenários A2 e B2.

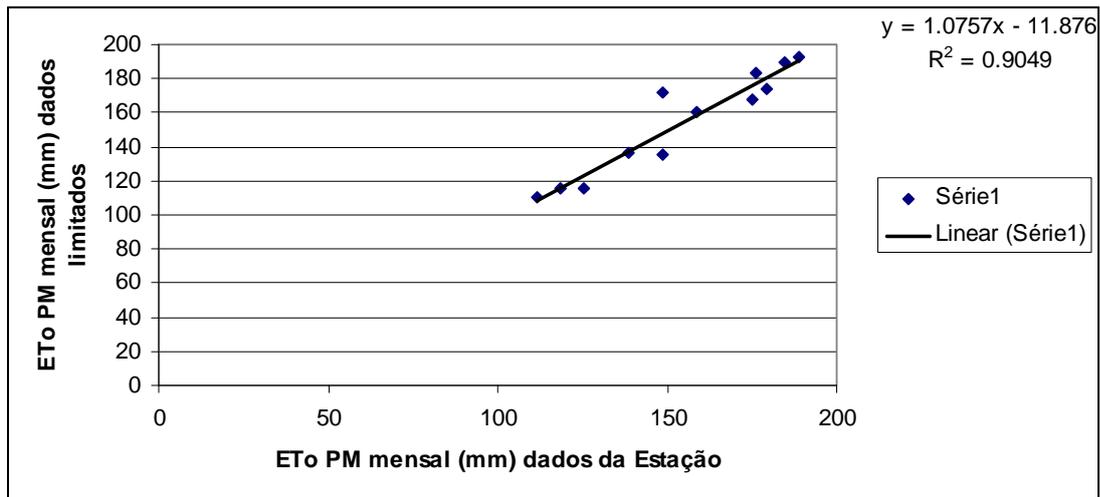


Fig. 5. Correlação por regressão linear entre EToPM estimada com dados da estação e com dados limitados utilizando $k_{RS} = 0.17$.

A Figura 6 apresenta mapa temático de altitude, gerado utilizando-se o *Global Mapper*®. Este por sua vez foi empregado para a estimativa da ETo-PM.

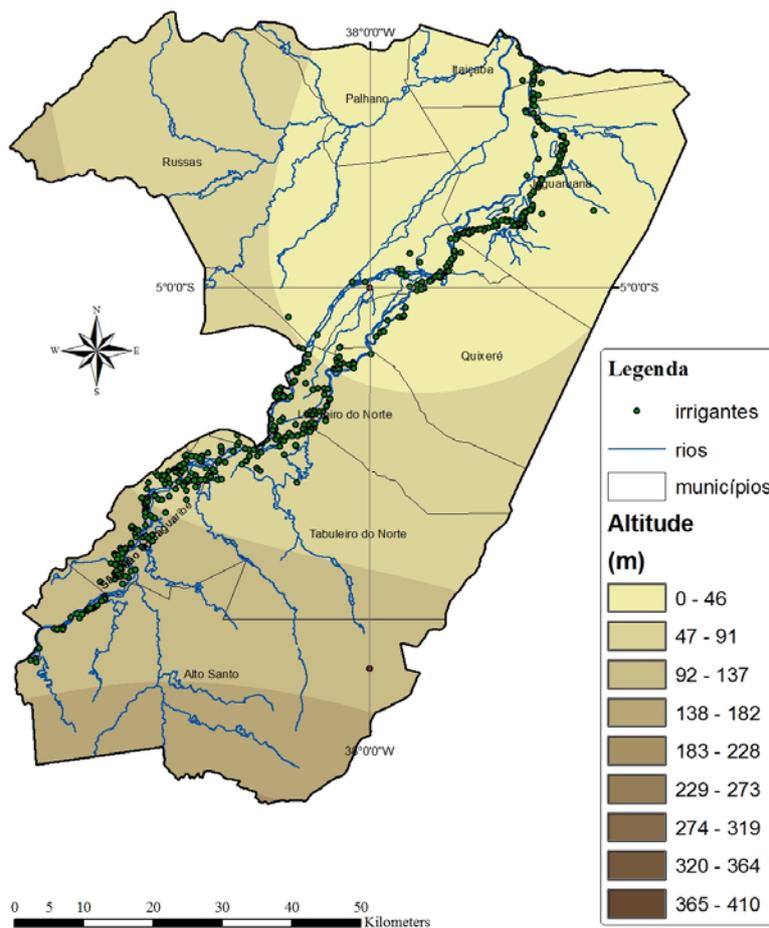


Fig. 6. Altitude (m) da área de estudo.

A Tabela 5 apresenta os valores das projeções da evapotranspiração de referência média mensal (mm) para a climatologia de base do modelo (1961-90) e para o ano de 2040, cenários

A2 e B2, bem como mínimos, máximos, média e desvio padrão observados. A diferença entre as condições iniciais e 2040 pode ser observada através dos totais anuais. A Figura 7 apresenta a comparação gráfica. Projetou-se uma elevação média da evapotranspiração anual de 216 mm e 190 mm (12.6 e 11.1%) para os cenários A2 e B2, respectivamente, passando de 1719 mm para 1935 e 1909 mm anuais em 2040, respectivamente. O modelo previu maior elevação da evapotranspiração no mês de abril (29 mm) para o cenário A2 e em maio (26 mm) no cenário B2.

Tabela 5. Projeções da evapotranspiração – ET_o Penman-Monteith mensal (mm) estimada com dados mínimos para o ano de 2040, cenários A2 e B2 – mínimos, máximos, média e desvio padrão observados e o total anual (mm), em relação ao período de referência (1961-90).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
<i>1961-90</i>													
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	1719
Desvio Padrão	15	11	8	6	8	8	12	14	16	18	16	16	
<i>2040 A2</i>													
Mínimo	130	116	115	110	104	108	116	125	126	135	131	133	
Máximo	188	166	158	137	138	141	158	175	188	204	194	197	
Média	178	158	147	130	130	134	151	167	178	192	184	186	1935
%	12.7	20.6	20.5	28.7	21.5	25.2	9.4	4.4	4.7	4.9	6.4	10.1	12.6
Desvio padrão	11	10	8	5	6	6	8	9	12	13	12	12	
<i>2040 B2</i>													
Mínimo	125	116	111	99	108	106	116	123	125	138	131	131	
Máximo	183	165	153	128	142	140	157	175	186	204	194	193	
Média	173	156	144	119	133	132	149	167	176	193	184	183	1909
%	9.5	19.1	18.0	17.8	24.3	23.4	8.0	4.4	3.5	5.5	6.4	8.3	11.1
Desvio Padrão	12	10	8	5	6	6	8	10	12	13	12	12	

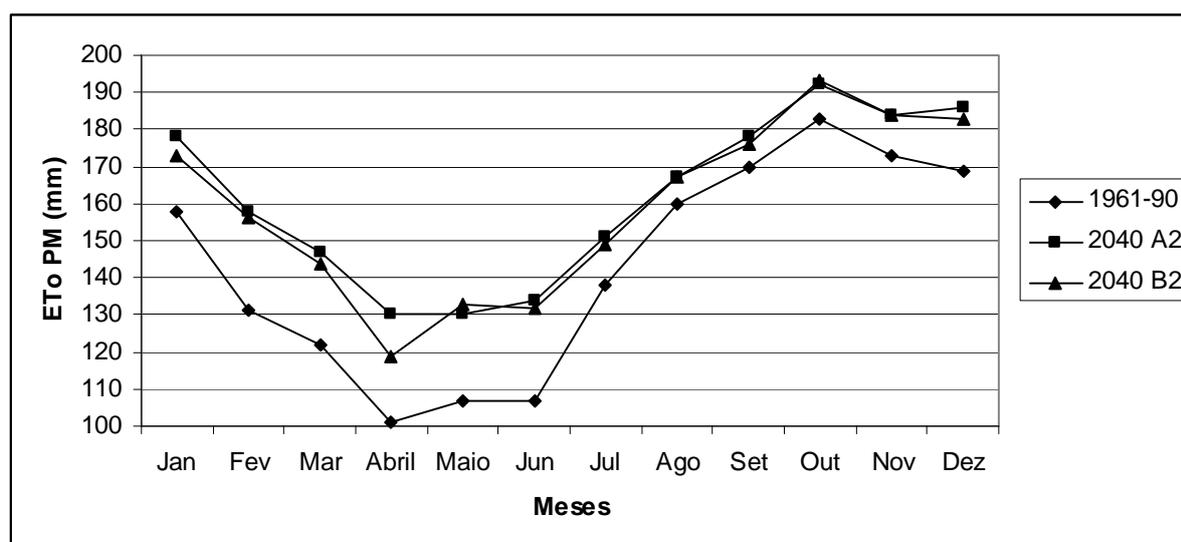


Fig. 7. Projeções da evapotranspiração mensal (mm) para climatologia de base do modelo e o ano de 2040, cenários A2 e B2.

Silva *et al.* (2007) aplicaram o modelo do Hadley Centre for Climate Prediction (HadCM3) (resolução de 300 km x 300 km) no Sri Lanka, numa resolução local de 16 km x 16 km. Projetaram aumento da evapotranspiração de 2% e 1% para os cenários A2 e B2, respectivamente, decorrente do aumento da temperatura (1.4 °C e 1 °C para os cenários A2 e B2, respectivamente). Já Díaz *et al.* (2007) estimaram para 2050, na bacia de Guadalquivir, Espanha, aumento na evapotranspiração (8.6% and 7.7%, para os cenários A2 e B2, respectivamente).

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam mapas temáticos da evapotranspiração de referência anual para 1961-90 e 2040, cenários A2 e B2, segundo Penman-Monteith FAO, estimada com dados limitados. Demonstra-se que as regiões de maior evapotranspiração estão direcionadas para o interior do semi-árido.

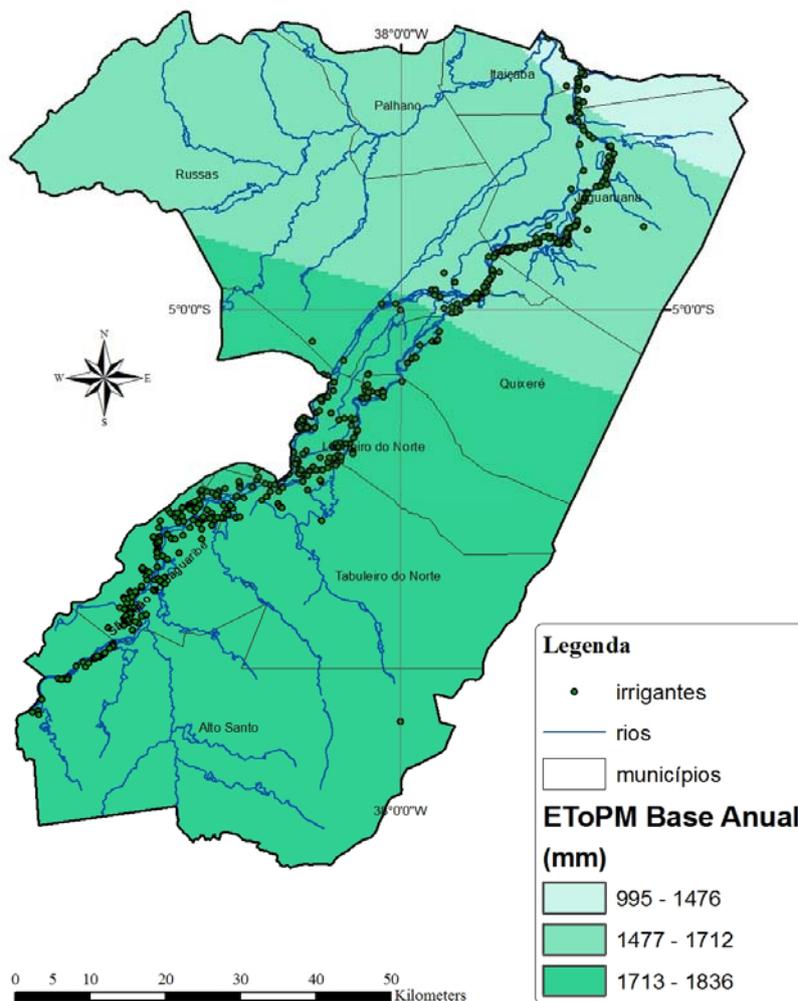


Fig.8. Mapa temático da ET_0 anual (mm) para o período de 1961-90.

Torna-se importante a confirmação da tendência e redução de incertezas de como a temperatura e, também, a precipitação deverá se comportar diante das mudanças climáticas na região, bem como o efeito do aumento da concentração de CO_2 na fisiologia das plantas, através do aperfeiçoamento de modelos de crescimento vegetal, a fim de se planejar medidas adaptativas para os irrigantes, tais como melhorias de eficiência na aplicação da água e escolha de métodos de irrigação, bem como adaptação no padrão de cultivo, selecionando-se culturas que consumam menos água.

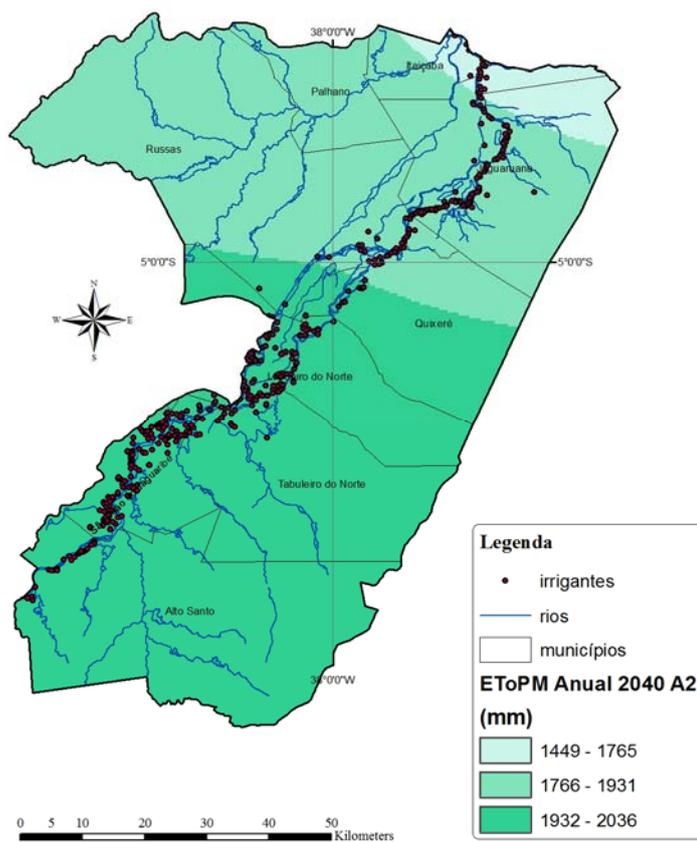


Fig.9. Mapa temático da ET_0 anual (mm) para 2040 A2.

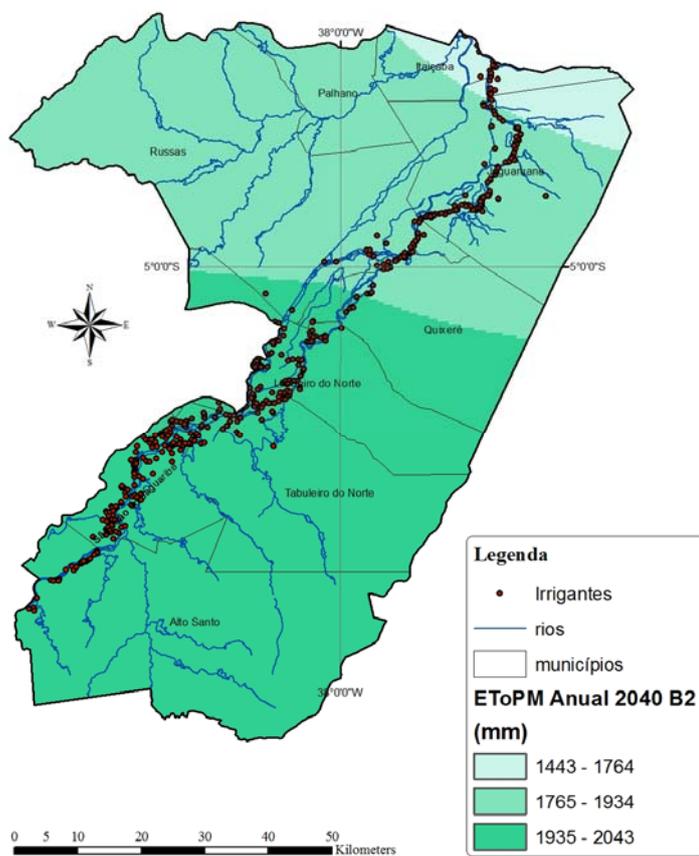


Fig. 10. Mapa da ET_0 temático anual (mm) para 2040 B2.

Validação e verificação do modelo aplicado

Para validação da modelagem, estimou-se a ET_o mensal, segundo Penman-Monteith FAO com apenas temperaturas máximas e mínimas, oriundos da climatologia de base do modelo de mudanças climáticas (1961-90) e com dados da normal climatológica para o mesmo período (variável independente), provenientes da estação de Jaguaruana (CE). Em seguida comparou-se, através de regressão linear. O coeficiente de regressão R^2 de 0.85 (Figura 11) demonstrou haver razoável relação entre as estimativas, conforme abordagem de Wilks (2006). 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 12. Os resíduos variam entre aproximadamente -13 e 17 mm mensais. É possível que decorram das divergências das temperaturas máximas e mínimas da normal climatológica e estimadas pela climatologia de base do modelo, conforme se mencionou anteriormente.

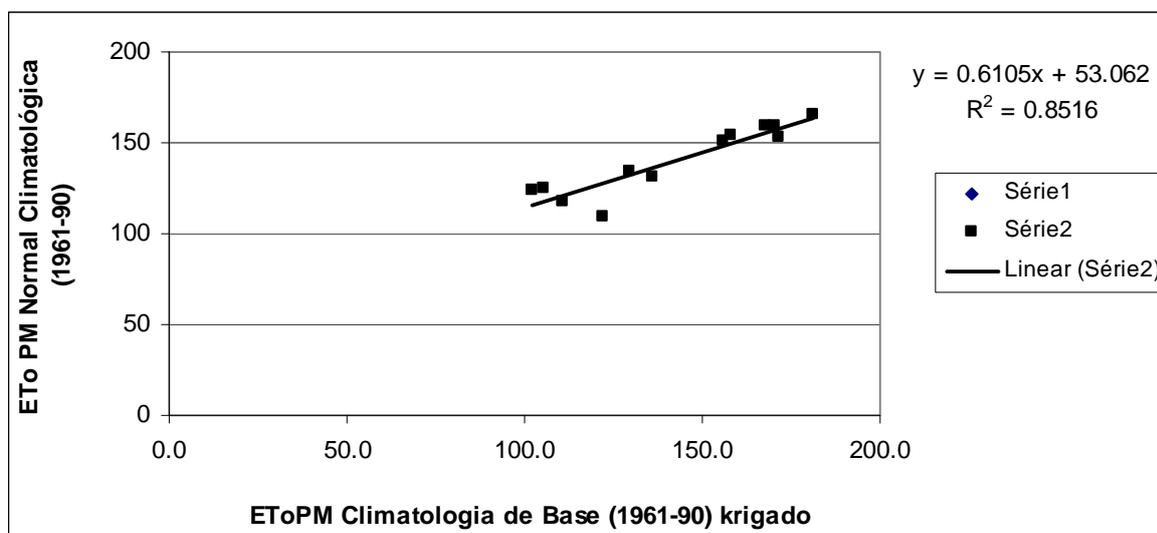


Fig. 11. Regressão linear das ET_o ($mm\ mês^{-1}$) estimadas com dados medidos e dados do modelo de mudanças climáticas (1961-90).

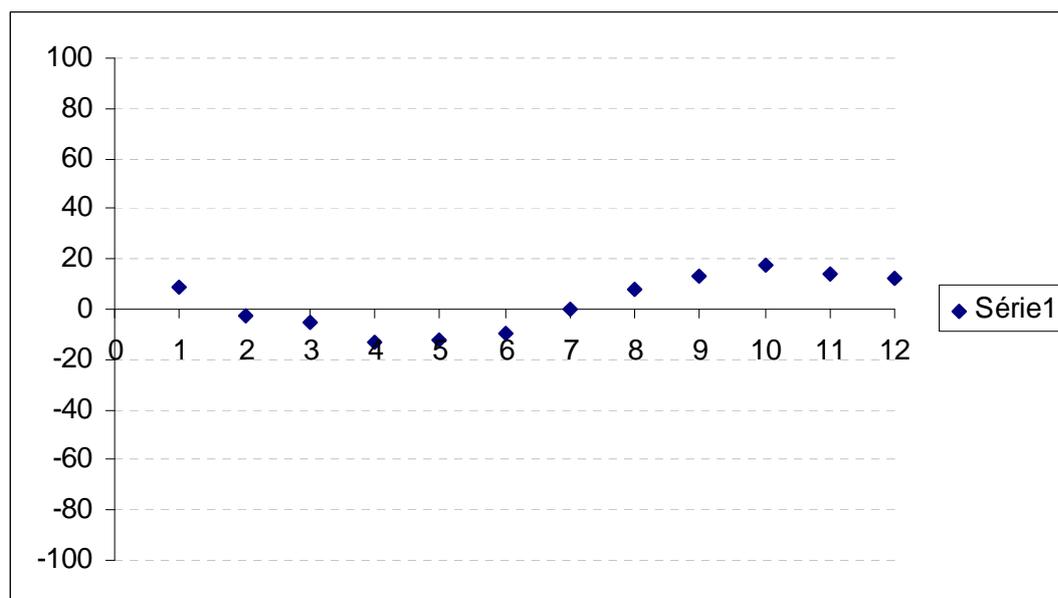


Fig. 12. Resíduos da regressão linear das ET_o ($mm\ mês^{-1}$) estimadas com dados medidos e dados do modelo de mudanças climáticas (1961-90).

Considerando-se a inexistência de dados passados suficientes, comparou-se ainda, a ETo-PM de 2006, estimada com a única fonte de conjunto de dados completos disponível na região (estação de Limoeiro do Norte, CE), com a ETo-PM estimada com dados limitados (temperatura máxima e mínima da climatologia de base do modelo de mudanças climáticas, período de 1961-90). Para isto, parte-se da suposição que não houve mudanças significativas entre o período de 1961-90 e 2006. Apesar das limitações da regressão anterior, esta resultou num R^2 de 0.90 (Figura 13) com coeficiente angular próximo de 1 e linear 6.366.

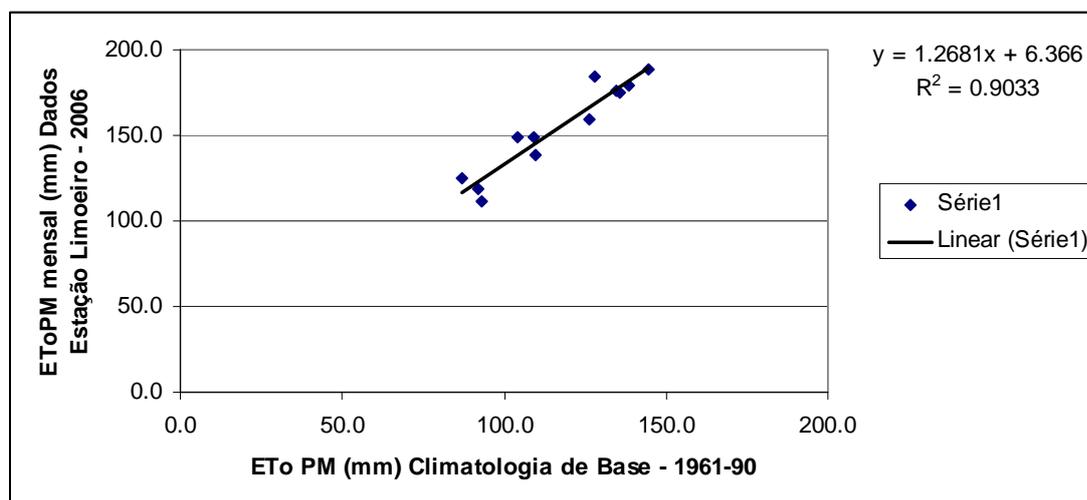


Fig. 13. Regressão linear das ETo ($\text{mm m\acute{e}s}^{-1}$) estimadas com dados medidos (2006) e dados do modelo de mudanças climáticas (1961-90).

Limitações e continuidade da pesquisa

A resolução do modelo acoplado de $0.44^\circ \times 0.44^\circ$ sobre uma área pequena de 6415.10 km^2 tornou necessário incluir dados de borda, a fim de permitir a interpolação por krigagem.

O estudo foi baseado em apenas um modelo de circulação global. Pesquisa futura pode focar em outros modelos de mudanças climáticas, bem como escala temporal atingindo o final do século, quando maiores impactos são esperados. Jones *et al.* (2004) recomenda o uso de tantos GCMs quanto possível em estudos de impactos das mudanças climáticas, apesar da pobre resolução, a fim de se refletir, pelo menos em parte, a incerteza científica da resposta do clima.

Os impactos de mais alta temperatura e concentração de CO_2 na atmosfera na taxa de crescimento e produtividade das culturas não foram modelados neste estudo. Estes impactos podem influenciar no ciclo e conseqüentemente nos coeficientes de cultivo utilizados para estimar a demanda de água mensal. Conhecimento neste assunto precisa ser melhorado, através de modelagem na agricultura.

Mudanças na frequência de secas não foram previstas neste estudo e a variabilidade interanual pode agravar a situação, levando a um impacto mais forte na disponibilidade dos recursos hídricos e na demanda de água para irrigação.

O volume afluente anual a montante para a barragem do Castanhão e perdas por evaporação também estarão sendo impactados pelas mudanças climáticas, merecendo serem estudados, a fim de se melhor avaliar a sustentabilidade hídrica da região.

Uma boa base de dados dos parâmetros climáticos do passado é de grande relevância para os estudos de mudanças climáticas, pois a mesma possui aplicação na seleção do modelo de

mudanças climáticas a utilizar, na validação das estimativas e projeções com dados independentes e medidos em campo, no mesmo período de tempo do utilizado para modelar o presente.

Conclusões

As mudanças climáticas estimadas pelo modelo HadRM3P demonstram que podem, de fato, funcionarem como fonte adicional de pressão na demanda de água para irrigação na área de estudo, através da elevação nos níveis de evapotranspiração de referência como consequência da elevação de temperatura.

O modelo climático regional, com as condições de contorno de um modelo global possui resolução que permite avaliar-se impactos em nível de bacia hidrográfica, pois torna-se possível maior detalhamento dos parâmetros climáticos e sua variabilidade espacial.

Mesmo considerando-se uma área pequena de 6415.10 km², observa-se variabilidade espacial dos resultados de temperatura e evapotranspiração. Os estudos demonstram não haver grandes divergências entre os resultados nos cenários A2 e B2 para a região estudada.

Considerando-se os cenários estudados e a aplicação das técnicas de redução de escala, as mudanças climáticas impactam na evapotranspiração de referência na região estudada, em percentual não desprezível. Por outro lado, há de se considerar ainda o comportamento futuro da precipitação, a qual influencia no balanço hídrico. Dependendo, a agricultura irrigada da região estudada pode tornar-se mais intensa em demanda de água, uma vez que modelo utilizado prevê tendências positivas na evapotranspiração.

Agradecimentos

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA, pelo financiamento do projeto Impactos das Mudanças Climáticas na Demanda de Água para Irrigação no Baixo Jaguaribe. Aos revisores anônimos e ao Prof. Luis dos Santos Pereira do Instituto Superior de Agronomia – ISA (Lisboa), os quais realizaram críticas construtivas que tanto contribuíram para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Referências bibliográficas

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56. FAO, Rome, 300p.
- Alves, L.M., 2007. *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 Especiais – INPE. São José dos Campos.
- Alves, M.C., Mota, V.C., de Carvalho, L.G., 2007. Metodologia geoestatística para estudar a precipitação pluvial de Juiz de Fora – MG sob cenários futuros de mudanças climáticas. In: 3ª Conferência Regional Sobre Mudanças Globais: América do Sul. Sociedade Brasileira de Meteorologia, São Paulo.
- Ambrizzi, T., Rocha, R.P. da, Marengo, J.A., Pissinchenko, I., Alves, L.N., Fernandez, J.P.R., 2007. *Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade – Relatório 3 – Cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais*. São Paulo, IAG/USP/CPTEC/INPE, 108p.
- Binder, L.C.W., 2006. Climate change and watershed planning in Washington State. *J. American Water Resources Association*, 42: 915-926.
- Carter, T.R., Alfsen, K., Barrow, E., Bass, B., Dai, X., Desanker, P., Gaffin, S.R., Giorgi, F., Hulme, M., Lal, M., Mata, L.J., Mearns, L.O., Mitchell, J.F.B., Morita, T., Moss, R., Murdiyarso, D., Pabon-Caicedo, J.D., Palutikof, J., Parry, M.L., Rosenzweig, C., Seguin, B., Scholes, R.J., Whetton, P.H., 2007. *General Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and*

- Adaptation Assessment*. Task group on data and scenario support for impact and climate assesment (TGICA) – Intergovernmental Panel on Climate Change, 66p.
- Díaz, J.A.R., Weatherhead, E.K., Knox, J.W., Camacho, E., 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 7: 149-159.
- Döll, P., 2002. Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. *Climatic Change*, 54: 269-293.
- Figueiredo, M.C.B., Rosa, M.F., Gondim, R.S., Saboia, L.F., 2003. Gestão da demanda hídrica em municípios do médio e baixo Jaguaribe. In: *Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente* (ENGEMA). CD-ROM. FGV/FAPESP/USP. ISSN 1679-7841, São Paulo.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001. In: Mccarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, A.N., Dokken, D.J., White, K.S., (Eds.). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge: University Press, U.K., 217p.
- Isaak, E.H., Srivastava, R.M., 1989. *An Introduction to Geostatistics*. New York: Oxford University Press, 561p.
- Jabloun, M., Sahli, A., 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. *Agric. Water Manage.*, 95: 707-715.
- Johns, T.C., Gregory, J.M., Igram, W.J., Johnson, C.E., Jones, A., Lowe, A., Mitchell, J.F.B, Roberts, D.L., Sexton, D.M.H., Steveson, D.S., Tett, S.F.B., Woodage, M.J., 2003. Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emissions scenarios. *Climate Dynamics*, 20: 583-612.
- Jones, R.G., Noguier, M., Hassell, D.C., Hudson, D., Wilson, S.S., Jenkins, G.J, Mitchell, J.F.B., 2004. *Generating High Resolution Climate Change Scenarios using PRECIS*. Met Office Hadley Centre, Exeter.
- Moberg, A., Jones, P.D., 2004. Regional climate model simulations of daily maximum and minimum near-surface temperatures across Europe compared with observed station data 1961-1990. *Climate Dynamics*. 23, 695-715.
- Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Departamento Nacional de Meteorologia, 1992. *Normais Climatológicas* (1961 – 1990). Brasília, 84p.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., De Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., GR, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., Van Rooijen, S., Victor, N., Dadi. Z., 2000. *IPCC Special Report on Emission Scenarios*. In: Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.). Cambridge University Press, Netherlands.
- Popova, Z., Kercheva, M., Pereira, L.S., 2006. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. Application to South Bulgaria. *Irrig. Drain.*, 55: 201-215
- Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará, 2006. Açude Castanhão. Disponível em: <<http://www.srh.ce.gov.br/linhas-de-acao/programa-de-acudes-estrategicos-2/acude-castanhao>>. Acesso em: 02.06.2008.
- Silva, C.S., Weatherhead, E.K., Knox, J.W., Díaz, J.A.R., 2007. Predicting the impacts of climate change – A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agric. Water Manage.*, 93: 19-29.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W., Barrow, E.M., 2002. SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17: 147-159.
- Wilks, D.S., 2006. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. New York: Elsevier, 630p.