

**Balanço Hídrico na Bacia do Jaguaribe,
Ceará, Utilizando Evapotranspiração de
Referência Penman-Monteith FAO
Estimada com Dados Mínimos**



ISSN 1679-6543

Dezembro, 2010

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agroindústria Tropical
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 36 *— on line*

**Balanço Hídrico na Bacia do
Jaguaribe, Ceará, utilizando
Evapotranspiração de Referência
Penman-Monteith FAO Estimada
com Dados Mínimos**

*Rubens Sonsol Gondim
Sérgio César de França Fuck Júnior
Aline de Holanda Nunes Maia
Sílvio Roberto Medeiros Evangelista*

Embrapa Agroindústria Tropical
Fortaleza, CE
2010

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Agroindústria Tropical

Rua Dra. Sara Mesquita 2270, Pici

CEP 60511-110 Fortaleza, CE

Caixa Postal 3761

Fone: (85) 3391-7100

Fax: (85) 3391-7109

Home page: www.cnpat.embrapa.br

E-mail: vendas@cnpat.embrapa.br

Comitê de Publicações da Embrapa Agroindústria Tropical

Presidente: *Antonio Teixeira Cavalcanti Júnior*

Secretário-Executivo: *Marco Aurélio da Rocha Melo*

Membros: *Diva Correia, Marlon Vagner Valentim Martins, Arthur Cláudio Rodrigues de Souza, Ana Cristina Portugal Pinto de Carvalho, Adriano Lincoln Albuquerque Mattos e Carlos Farley Herbster Moura*

Supervisor editorial: *Marco Aurélio da Rocha Melo*

Revisão de texto: *Jane Maria de Faria Cabral*

Normalização bibliográfica: *Rita de Cassia Costa Cid*

Fotos da capa: *Fábio Chaffin Barbosa*

Editoração eletrônica: *Arilo Nobre de Oliveira*

1ª edição

1ª impressão (2010): *on line*

Todos os direitos reservados

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Agroindústria Tropical

Balanço Hídrico na Bacia do Jaguaribe, Ceará, utilizando Evapotranspiração de Referência Penman-Monteith FAO Estimada com Dados Mínimos / Rubens Sonsol Gondim... [et al.]. – Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2010.

48 p.; on line. – (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Agroindústria Tropical, ISSN 1679-6543; 36)

1. Balanço hídrico - Bacia do Jaguaribe - Ceará - Brasil. 2. Evapotranspiração - Variabilidade - SIG. I. Gondim, Rubens Sonsol. II. Fuck Júnior, Sérgio César de França. III. Maia, Aline de Holanda Nunes. IV. Evangelista, Silvio Roberto Medeiros. V. Série.

CDD 551.483

© Embrapa 2010

Sumário

Resumo	5
Abstract	7
Introdução	9
Material e Métodos	10
Resultados e Discussão	17
Conclusões.....	46
Referências	47

Balanço Hídrico na Bacia do Jaguaribe, Ceará, utilizando Evapotranspiração de Referência Penman-Monteith FAO Estimada com Dados Mínimos

Rubens Sonsol Gondim¹

Sérgio César de França Fuck Júnior²

Aline de Holanda Nunes Maia³

Sílvio Roberto Medeiros Evangelista⁴

Resumo

Os dados básicos para estimar a evapotranspiração de referência de Penman-Monteith FAO (ET_0PM) são: temperaturas máxima e mínima, pressão de vapor real ou atual, radiação líquida e velocidade do vento, muitas vezes indisponíveis por requererem estações meteorológicas específicas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a adequação do método para estimar a ET_0PM , utilizando-se dados mínimos integrados a um Sistema de Informação Geográfica, na bacia do Rio Jaguaribe, CE. Foi utilizado o sistema integrado de modelagem regional PRECIS (*Providing Regional Climates for Impacts Studies*), versão 1.2, com as condições de contorno do Modelo Climático Global (HadAM3P), acoplado ao Modelo Climático Regional (HadRM3P), por meio da técnica dinâmica de redução de escala (*downscaling*).

Os dados foram analisados quanto a sua variabilidade espacial (latitude,

¹Engenheiro Agrônomo, D. Sc. em Recursos Hídricos, pesquisador da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE, rubens@cnpat.embrapa.br

²Geógrafo, M. Sc. em Geografia, analista da Embrapa Agroindústria Tropical, Fortaleza, CE.

³Engenheira Agrônoma, D. Sc. em Fitotecnia, pesquisadora da Embrapa Meio Ambiente, Jaguariúna, SP.

⁴Estatístico, D. Sc. em Engenharia Elétrica, pesquisador da Embrapa Informática Agropecuária, Campinas, SP.

longitude), utilizando-se o método geostatístico de krigagem associado a um Sistema de Informação Geográfica. Para a validação do método, foi ajustada uma regressão linear entre ET_oPM estimada com dados mínimos (temperaturas máxima e mínima) e com dados medidos por uma estação de referência. A média da ET_oPM anual estimada com dados mínimos foi 1.719 mm. O método mostrou-se aceitável na região estudada, considerando os resultados da análise de regressão (coeficiente angular de 0,95, coeficiente de determinação de 0,902, resíduos menores que 0,45 mm dia⁻¹ e a Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME) igual a 0,067 mm dia⁻¹).

Palavras-chave: evapotranspiração, Sistema de Informação Geográfica, regressão.

Water Balance in the Jaguaribe Basin using FAO Penman-Monteith ET_o Estimated With Limited Data

Abstract

The basic dataset needed for Penman-Monteith reference evapotranspiration (ET_o) estimation involves maximum and minimum temperature, vapor pressure, radiation and wind speed, sometimes unavailable once they require special weather stations. The objective of this work was to evaluate ET_o method using limited climate data integrated with a Geographic Information System in the Jaguaribe basin, Ceará State. 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 for generating hindcasts of climate variables for the 1961-1990 period (baseline). Monthly time series for minimum and maximum temperature and rainfall were generated for the baseline period. Spatial variability was assessed by using kriging geostatistics method integrated into a Geographic Information System. Model validation was performed, by fitting a linear regression between ET_o estimated with minimum data (minimum and maximum temperatures) and ET_o estimated using a complete dataset from a reference weather station. Average annual estimated ET_o was 1,719 mm. It was shown that the limited data methodology worked adequately for the region (linear coefficient of 0.95, determination coefficient of 0.902, errors inferior to 0.45 mm day^{-1} and root mean square error of $0.067 \text{ mm day}^{-1}$).

Index terms: evapotranspiration, Geographic Information System, regression.

Introdução

Evaporação é o processo em que a água líquida é convertida em vapor e removida de uma superfície evaporante, como lagos, rios, solos e vegetação. A transpiração consiste da vaporização da água líquida contida nos tecidos vegetais e sua remoção para a atmosfera.

A evapotranspiração envolve os processos de evaporação e transpiração quando ocorrem simultaneamente. O painel de *experts* organizado pela FAO recomendou a adoção do método de Penman-Monteith como padrão para estimar a evapotranspiração de referência, válido globalmente para cálculo das necessidades hídricas das culturas (ALLEN et al., 1998). Desde então, muitos trabalhos de estimativa da evapotranspiração de referência, que utilizam o método de FAO Penman-Monteith (ET_0 PM) como padrão (MENDONÇA; DANTAS, 2010), têm sido desenvolvidos.

Por causa da pouca disponibilidade das estações de referência capazes de mensurar todas as variáveis climáticas envolvidas na estimativa da ET_0 PM, têm surgido trabalhos como os de Popova et al. (2006); Cai et al. (2007); Jabloun e Sahli, (2008) e Sentelhas et al. (2010), que avaliam a metodologia para estimar a ET_0 PM com o emprego de dados mínimos.

O efeito do clima nas necessidades hídricas das plantas é dado pela evapotranspiração de referência (ET_0), que é a correção da diferença entre a evaporação de uma superfície líquida e a evapotranspiração de uma superfície de referência (cobertura de grama com alfafa ou outra vegetação de 0,12 m de altura uniforme, em ativo crescimento, cobrindo totalmente o solo, cultivada com abundante disponibilidade de água). O efeito da cultura é dado pelo coeficiente de cultivo (K_c) que é o coeficiente de correção entre a evapotranspiração da cultura e da superfície de referência (ALLEN et al., 1998).

A importância do tema deve-se à necessidade de se buscar melhores estimativas da ET_0 para um manejo eficiente da água para irrigação. De fato, o conhecimento das necessidades hídricas das espécies irrigadas,

estimadas pelo coeficiente de cultivo (K_c) e evapotranspiração de referência (ET_o), é de fundamental importância para a gestão sustentável dos recursos hídricos (GONDIM et al., 2005).

Em razão da inexistência de estações meteorológicas em número suficiente para cobrir todas as áreas onde exista irrigação, o método que utiliza dados mínimos é uma alternativa para estimar a ET_o PM. O objetivo deste trabalho é avaliar essa metodologia integrada a um Sistema de Informação Geográfica, na Bacia do Jaguaribe, CE.

Material e Métodos

Os instrumentos computacionais de geoprocessamento, chamados de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permitem a realização de análises complexas ao integrarem dados de diversas fontes e criarem bancos de dados georreferenciados (CÂMARA; MEDEIROS, 1998). A área objeto do estudo foi então delimitada entre 4°39'30" e 5°40'00" de latitude sul e 37°35'30" e 38°27'00" de longitude oeste, abrangendo o trecho do vale do Rio Jaguaribe situado entre a barragem do Açude Castanhão e a Barragem de Itaçaba. O trabalho compreendeu 160 km do Rio Jaguaribe, envolvendo os seguintes municípios: Alto Santo, São João do Jaguaribe, Tabuleiro do Norte, Limoeiro do Norte, Quixeré, Russas, Jaguaruana, Palhano e Itaçaba.

O modelo matemático completo de Penman-Monteith, utilizado para estimar necessidades hídricas das plantas pode ser encontrado em Allen et al. (1998), sendo a equação básica da evapotranspiração de

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

onde,

ET_o é a evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

R_n é a radiação líquida na superfície das culturas (MJ m⁻² dia⁻¹);

G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

T é a média diária da temperatura do ar a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$);

u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1});

e_s é a pressão da saturação de vapor (kPa);

e_a é a pressão de vapor atual (kPa);

$(e_s - e_a)$ é o déficit de saturação de vapor (kPa);

Δ é a inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$);

γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Os dados básicos utilizado par estimar ET_o Penman-Monteith FAO ($ET_o\text{PM}$) são 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).

Na Figura 1 é apresentado o mapa temático de altitude, gerado segundo o *Global Mapper*[®], a partir de dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Os dados de elevação foram obtidos em escala global aproximada, o que gerou a mais completa base de dados digital de alta resolução do planeta. O SRTM consistiu no sistema de radar específico e modificado que sobrevoou todo o

planeta, mapeando-o a bordo da nave espacial Endeavour, durante uma missão de onze dias, em fevereiro de 2000 (NASA, 2007). Dessa forma, utilizou-se o programa *Global Mapper*® para inserir os dados georreferenciados do levantamento SRTM. O mapa temático de altitude foi então empregado para a estimativa da ET_{0PM} , utilizando-se os dados da altitude na Equação 3 da pressão atmosférica.

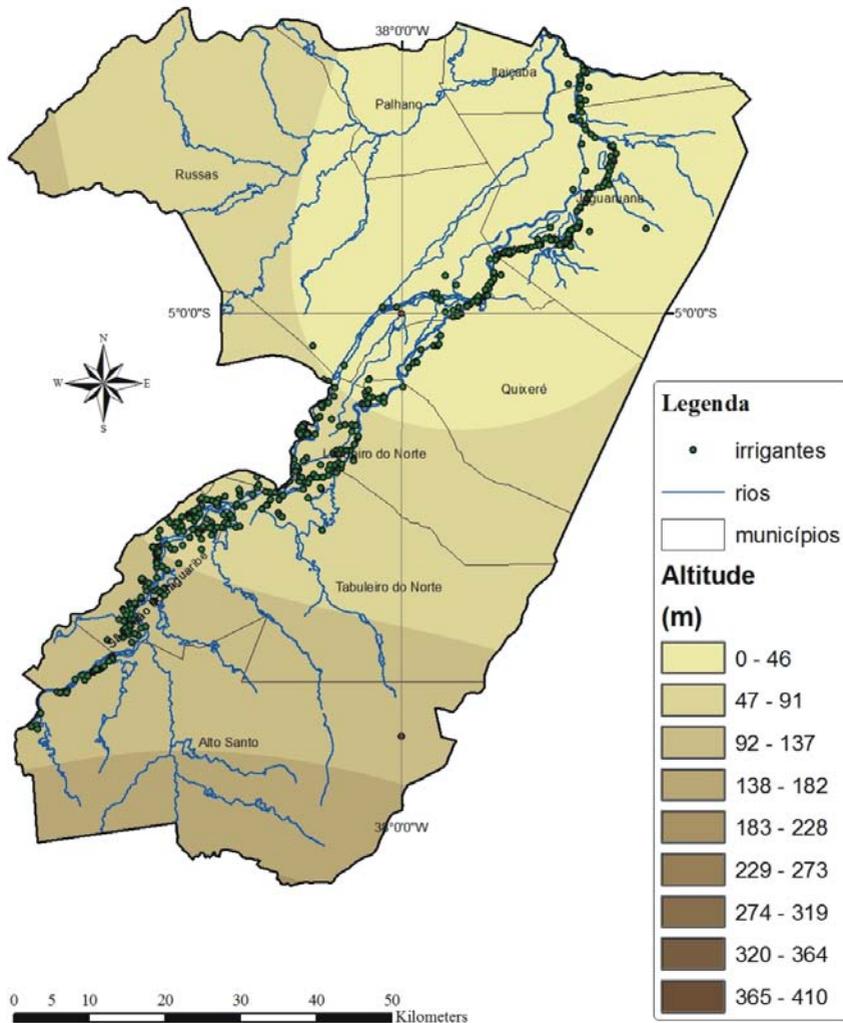


Figura 1. Altitude (m) da área de estudo.

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

onde,

exp é a base do logarítmico 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,

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

T é a 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 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

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

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

onde,

α é o albedo ou coeficiente de reflexão da cobertura vegetal, o qual assume o valor de 0,23 para a grama de referência hipotética (adimensional).

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

onde,

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

$T_{máx}K$ é a temperatura máxima absoluta durante período de 24 h (K);

$T_{mín}K$ é a temperatura mínima absoluta durante período de 24 h (K);

R_s é a radiação solar medida ou calculada (MJ m⁻² dia⁻¹);

R_{so} é a 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 é a altitude da estação em relação ao nível do mar (m);

R_a é a radiação extraterrestre (MJ m⁻² dia⁻¹).

A radiação extraterrestre (R_a) do 15º dia do mês para o hemisfério sul foi utilizada, conforme Allen et al. (1998), interpolando-se para a região de estudo. A Tabela 1 apresenta a radiação extraterrestre (R_a) do 15º dia do mês para o hemisfério sul, conforme Allen et al. (1998), interpolando-se para a região de estudo.

Tabela 1. Radiação extraterrestre (MJ m⁻² dia⁻¹) para cada mês, segundo a latitude.

R_a	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
	----- (MJ m ² dia ⁻¹) -----											
4º	37,6	38,3	38,0	36,0	33,4	31,8	32,3	34,6	37,0	38,0	37,6	37,2
6º	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	0,35	0,20	0,00	-0,20	-0,35	-0,45	-0,40	-0,30	-0,10	0,10	0,30	0,40
4,66º	37,8	38,4	38,0	35,9	33,2	31,5	32,0	34,4	36,9	38,1	37,8	37,5
5,67º	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 média	38,0	38,5	38,0	35,8	33,0	31,3	31,8	34,3	36,9	38,1	37,9	37,7

Os autores propuseram um modelo para estimar ET_oPM com dados limitados. Para sua utilização, assume-se que:

- 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 próximo da saturação com vapor d'água e a umidade relativa próxima de 100%. Esta temperatura é empregada para estimar a pressão de vapor real (e_a), então:

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

onde,

e_a é a pressão de vapor real (kPa);

$e^o(T_{\min})$ é a pressão de saturação de vapor na temperatura mínima (kPa);

T_{\min} é a temperatura mínima ($^{\circ}C$).

- 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 a temperaturas mais baixas durante a noite (T_{\min}), porque há menos radiação de onda longa refletida que é absorvida pela atmosfera. No entanto, 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 as nuvens agem como uma coberta que diminui a radiação de onda longa líquida refletida. Dessa forma, o cálculo da radiação é baseado pela diferença entre temperaturas máxima e mínima:

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

onde,

R_s é a radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

R_a é a radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

$T_{\text{máx}}$ é a temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$);

$T_{\text{mín}}$ é a temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$);

k_{R_s} é o coeficiente de ajuste (0,16;...;0,19) ($^{\circ}\text{C}^{-0.5}$).

- 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;
- O efeito do fluxo de calor no solo (G) é ignorado para cálculos diários, uma vez que sua magnitude é pequena.

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

Um conjunto de dados composto de climatologia de base do modelo de 1961–1990 (*baseline*) foi processado no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-CPTEC) (ALVES, 2007). Os dados foram então extraídos, considerando-se as coordenadas geográficas da região em estudo, com resolução espacial de $0,44^{\circ} \times 0,44^{\circ}$, o que gerou, então, os dados para as quadrículas de cada variável, a fim de abranger toda a região estudada.

Esses dados foram analisados quanto à sua variabilidade espacial (latitude/longitude), utilizando-se geoestatística (krigagem) associada a um Sistema de Informação Geográfica. A mesma metodologia foi empregada para estimar a demanda de água para irrigação de arroz no Sri Lanka, por Silva et al. (2007) e na bacia do Guadalquivir, Espanha, por Díaz et al. (2007).

Para validação do modelo, foi aplicada a regressão linear entre ET_oPM estimada com dados mínimos e com dados de uma estação de referência localizada em Limoeiro do Norte, CE.

Resultados e Discussão

Os valores da ET_oPM (mm) estimada com dados mínimos do período de 1961–1990 e com dados da estação de referência são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. ET_oPM (mm) estimada com dados mínimos e com dados da estação de referência.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
1961–1990 (modelo)	158	131	122	101	107	107	138	160	170	183	173	169	1.719
2002–2006 (estação Limoeiro)	156	127	146	125	125	116	141	170	187	200	187	180	1.859

Para estimar a ET_oPM com dados limitados, primeiramente foi escolhido o melhor K_r (coeficiente de ajuste que varia de 0,16 a 0,19, para a região segundo Allen et al. (1998) para a região). Comparou-se a ET_o de Penman-Monteith FAO, estimada com dados mínimos, utilizando-se o conjunto completo de dados disponíveis, referentes ao ano de 2006, da estação de referência localizada em Limoeiro do Norte, CE, sendo 0,17 o melhor valor de K_r com R^2 de 0,90 e $b = 1,07$ (Figura 2), quando comparado à qualidade de ajuste para um K_r de 0,16; 0,18 ou 0,19.

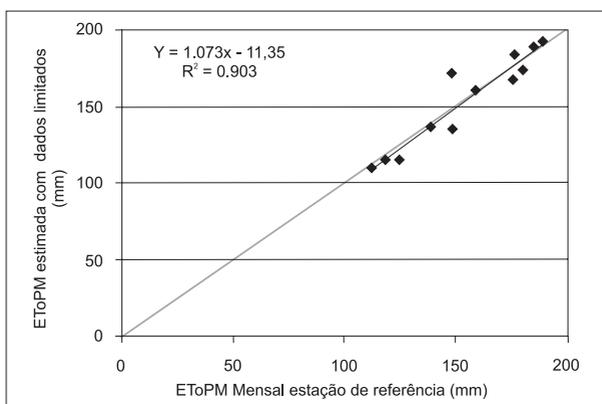


Figura 2. Regressão linear entre ET_oPM estimada com dados da estação de referência localizada em Limoeiro do Norte, CE e com dados limitados utilizando $K_r = 0,17$.

Na Tabela 3, são apresentados os valores da evapotranspiração de referência média mensal (mm), segundo Penman-Monteith FAO, estimados com dados mínimos, para a climatologia modelada para o período de 1961–1990, bem como mínimos, máximos, média e desvio padrão observados. Vale salientar que a ET_{oPM} anual para a região diferiu da estimada por Barbosa et al. (2005): 2.131,6 mm para Limoeiro do Norte, que empregou a interpolação pelo método do Inverso do Quadrado da Distância, utilizando dados secundários, sendo necessária uma validação com dados medidos por estação de referência.

Tabela 3. Evapotranspiração – ET_o 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).

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total anual
	----- (mm) -----												
Mínimo	88	76	80	72	73	73	79	87	88	92	101	89	
Máximo	170	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
Desvio padrão	15	11	8	6	8	8	12	14	16	18	16	16	

Nas Figuras 3 a 14 são apresentados os mapas temáticos da evapotranspiração de referência mensais (mm), de janeiro a dezembro, espacializados segundo Penman-Monteith FAO, e estimados com dados mínimos. Os mapas representam os dados da Tabela 3, interpolados pelo método geoestatístico da krigagem.

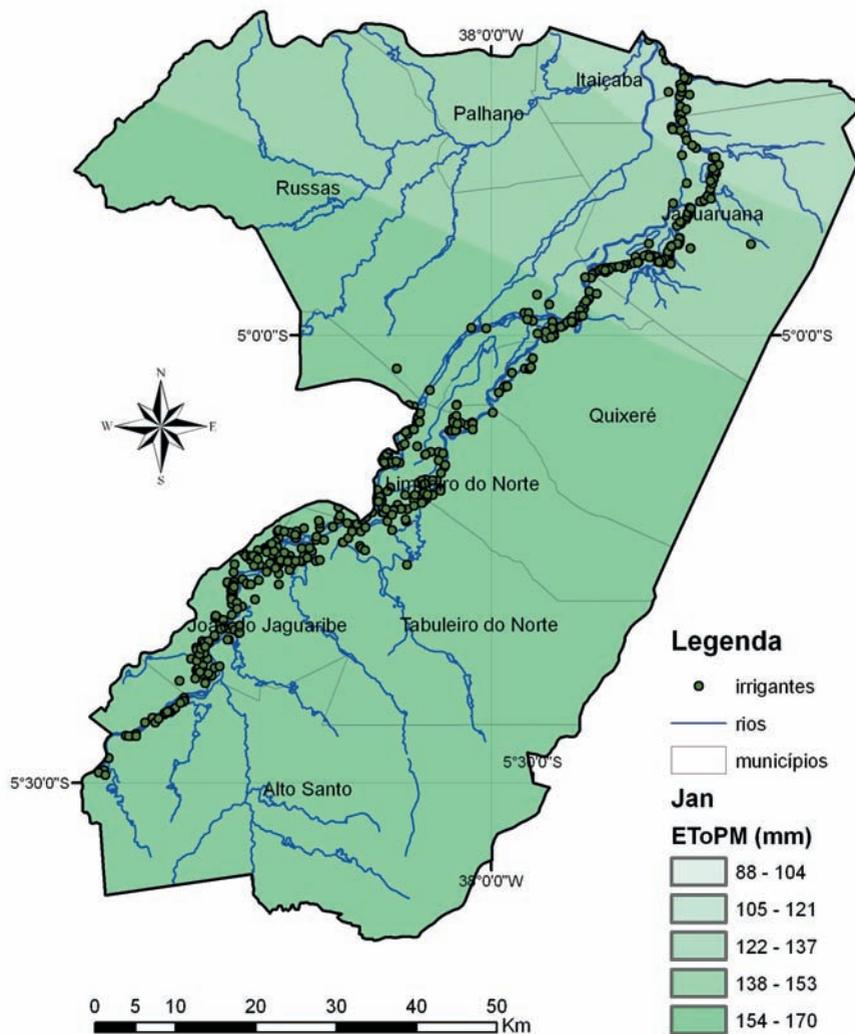


Figura 3. Variabilidade espacial da ET_{0PM} (1961–1990), no mês de janeiro.

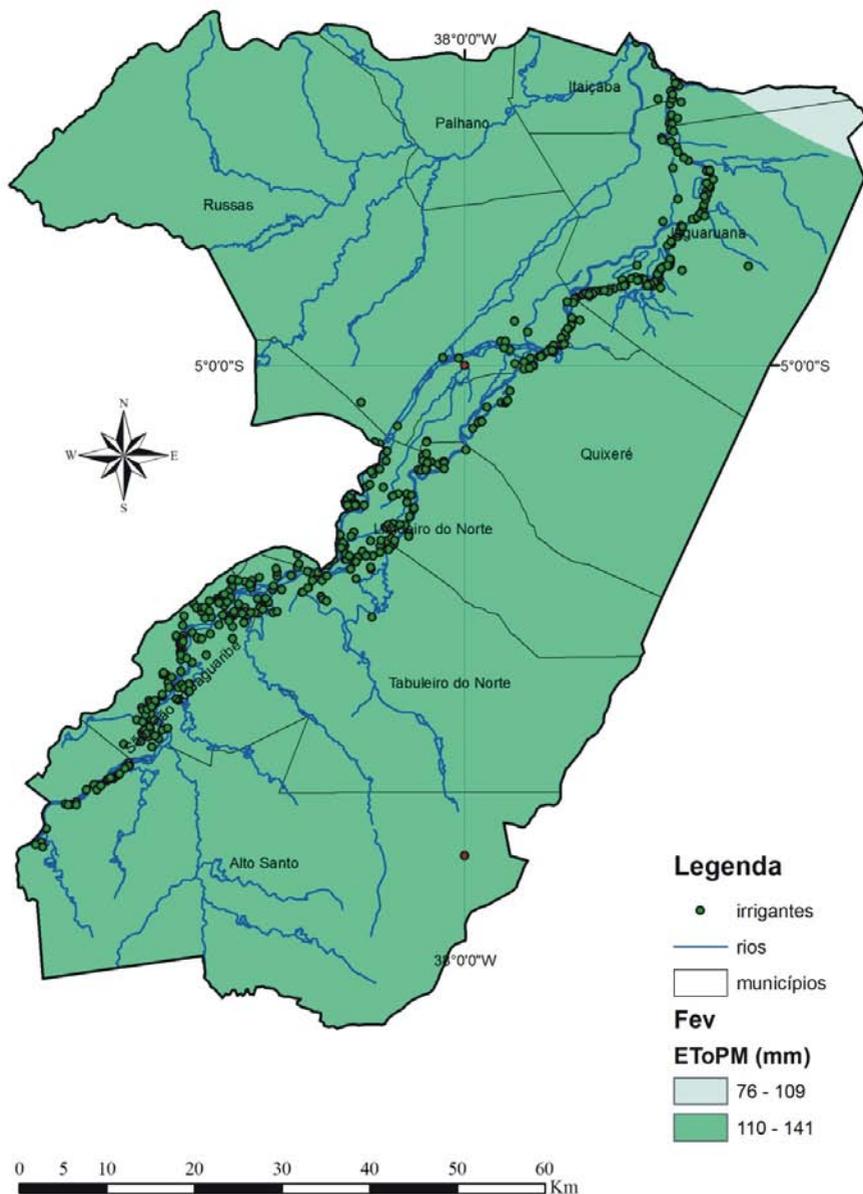


Figura 4. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de fevereiro.

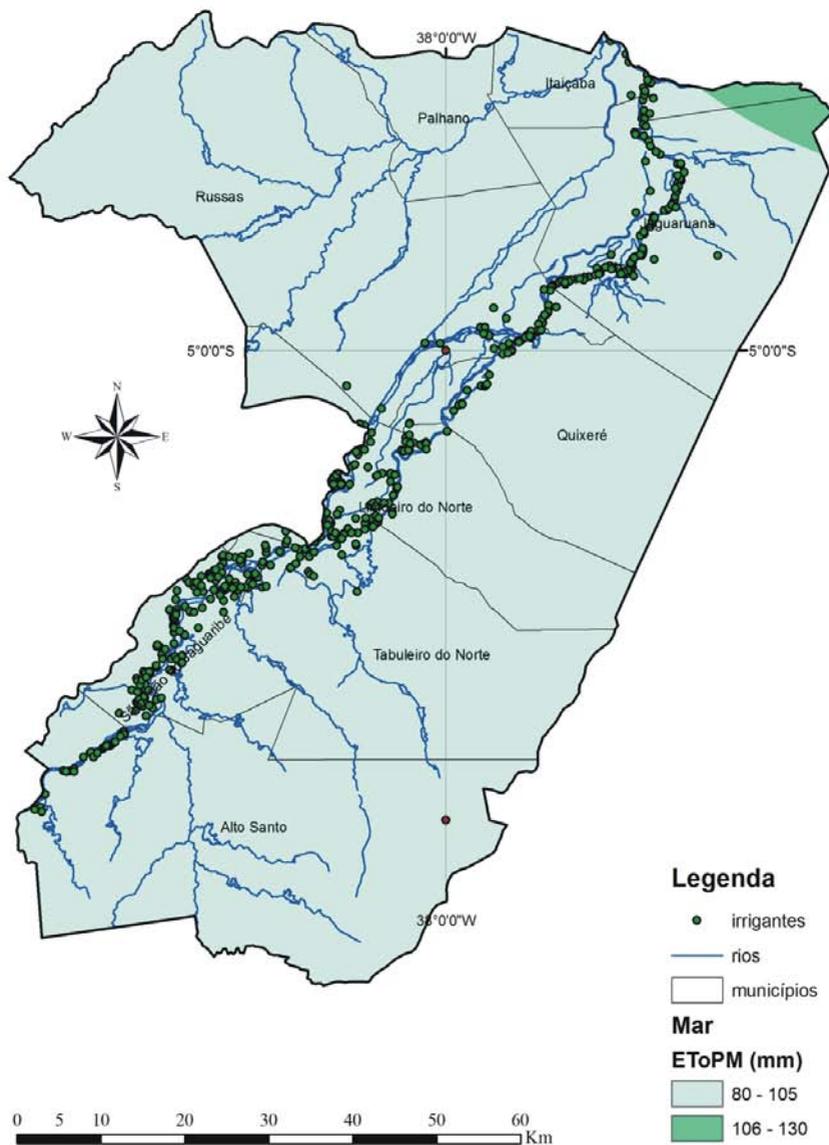


Figura 5. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de março.

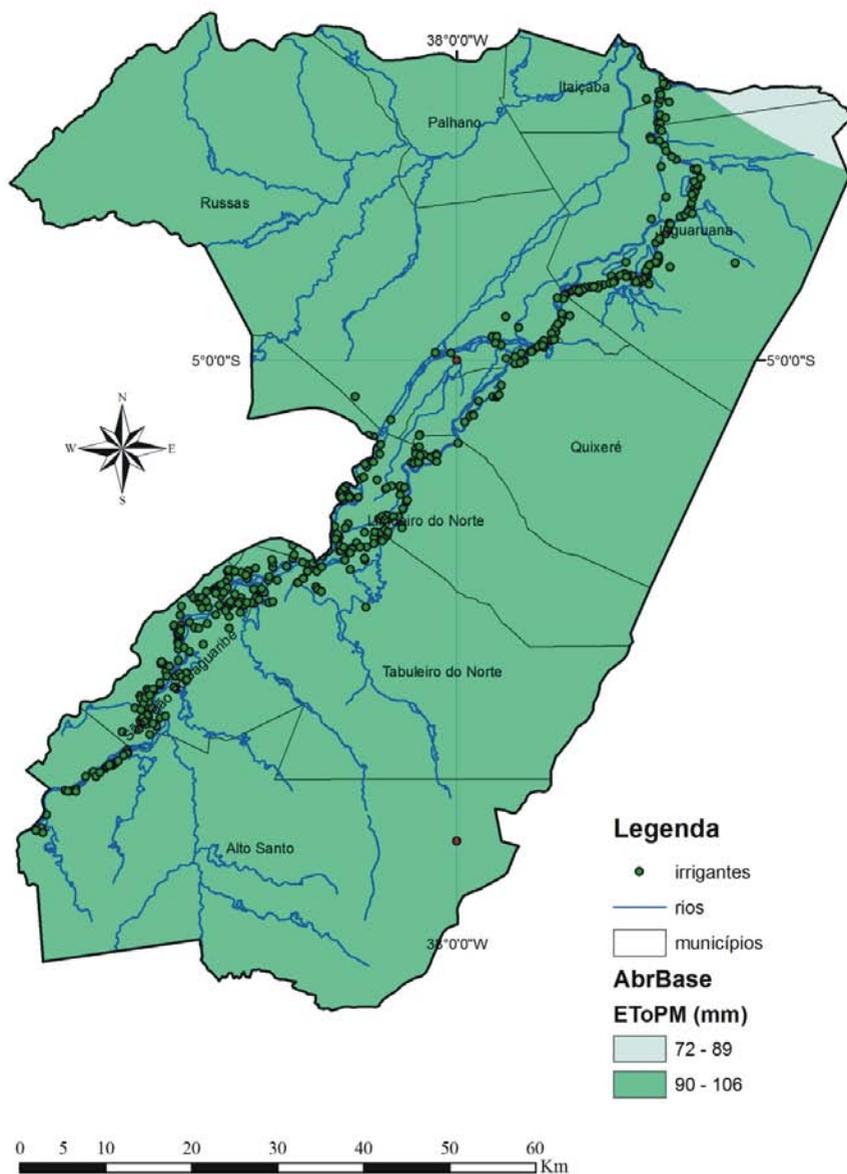


Figura 6. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de abril.

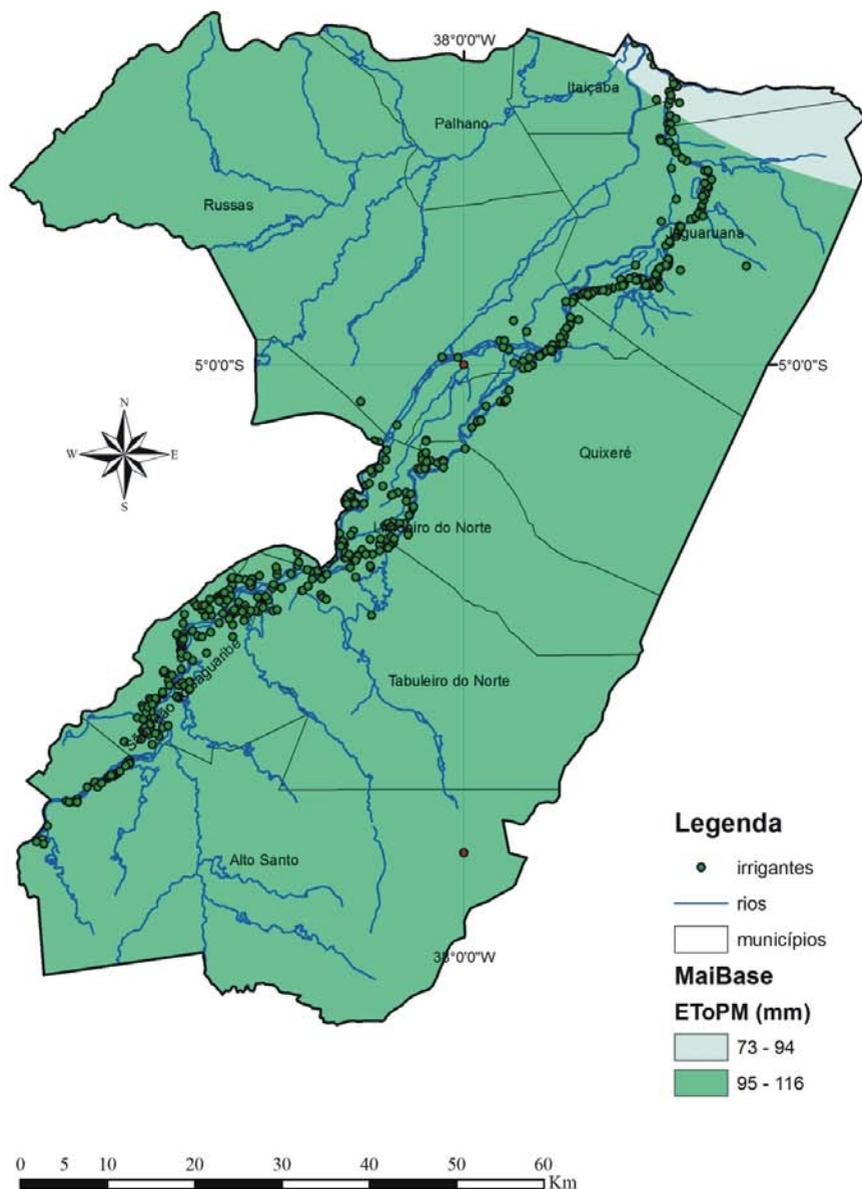


Figura 7. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de maio.

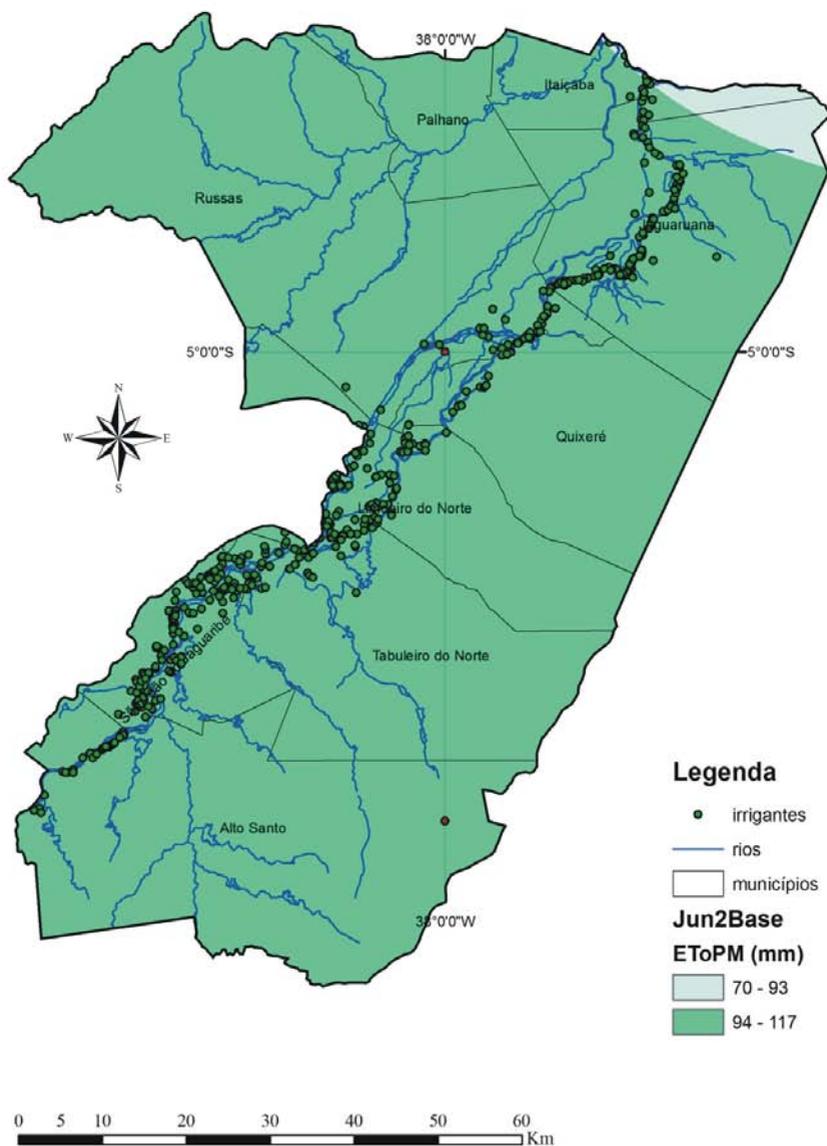


Figura 8. Variabilidade espacial da ET_{0PM} (1961–1990), no mês de junho.

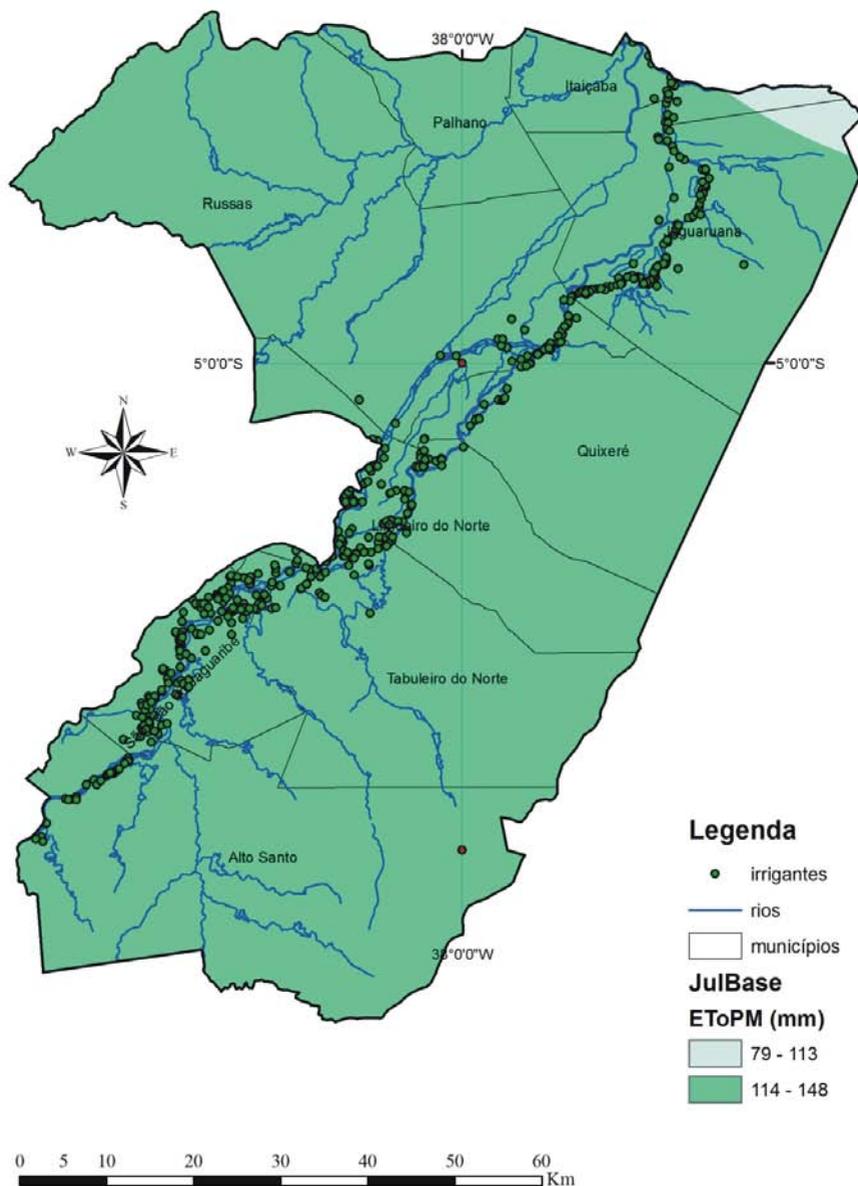


Figura 9. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de julho.

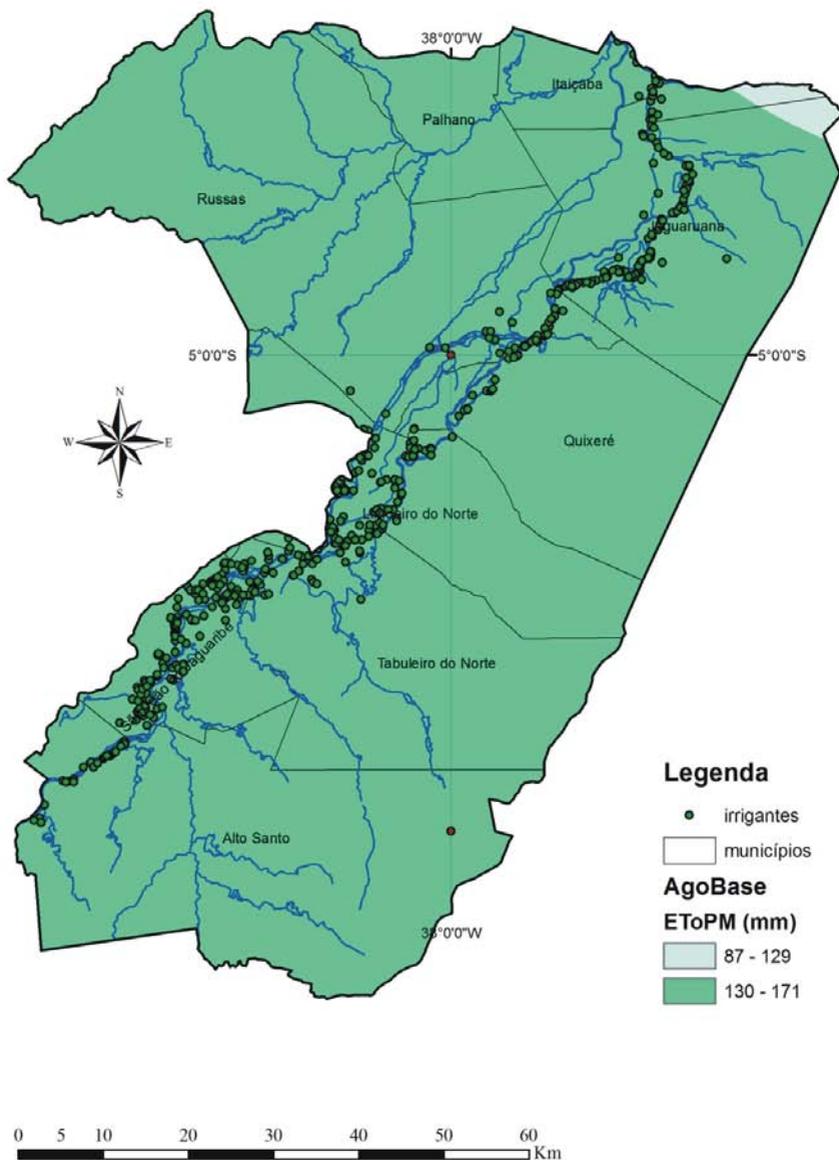


Figura 10. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de agosto.

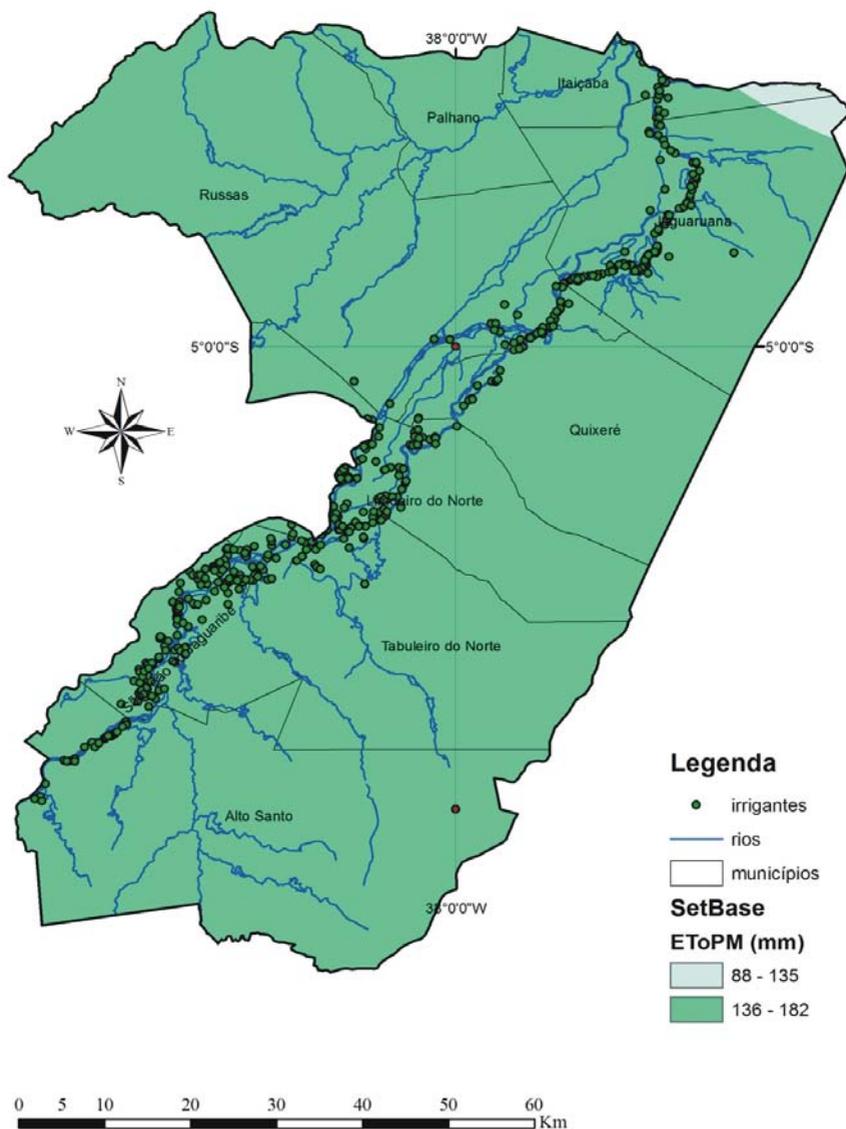


Figura 11. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de setembro.

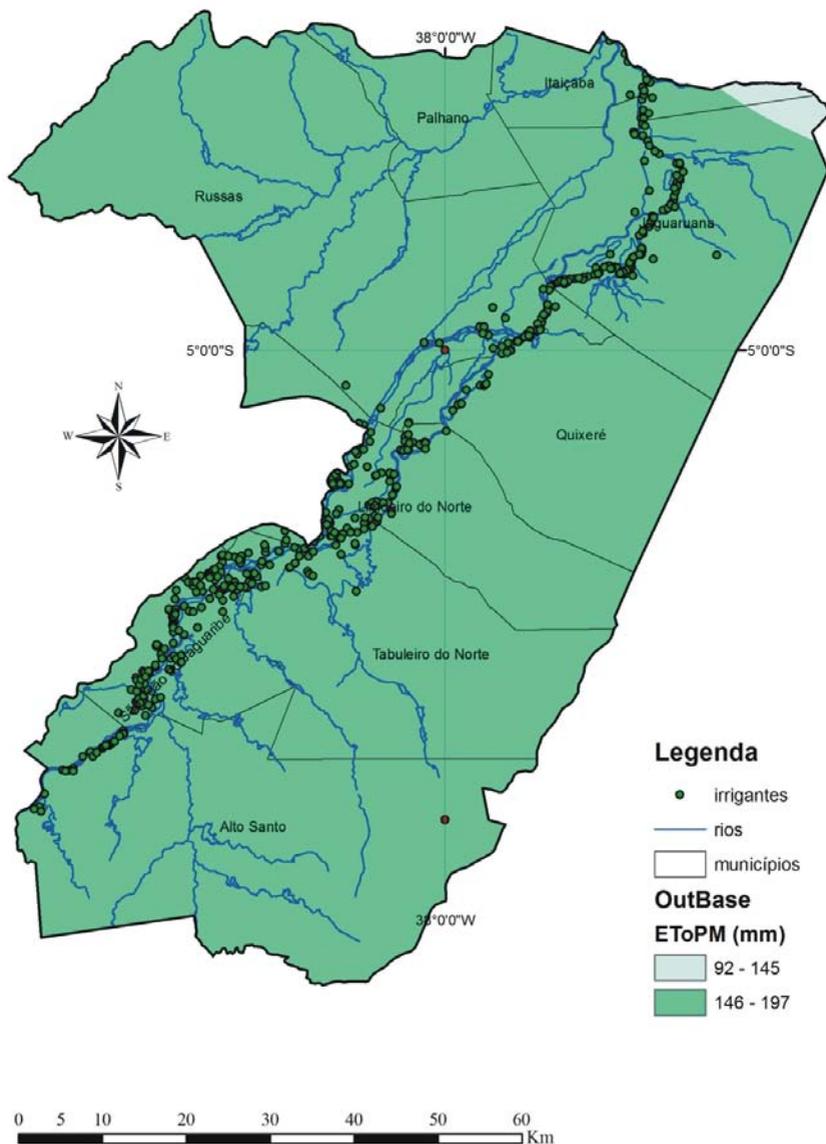


Figura 12. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de outubro.

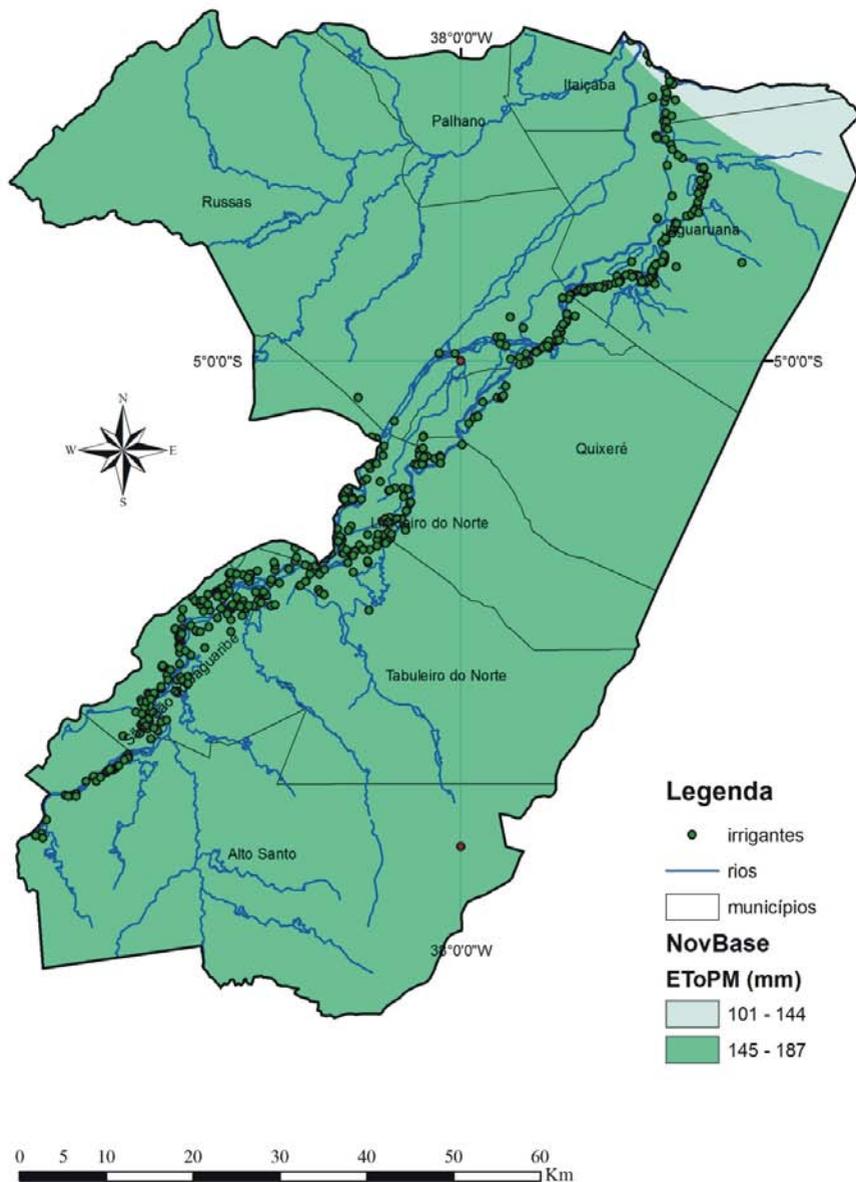


Figura 13. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de novembro.

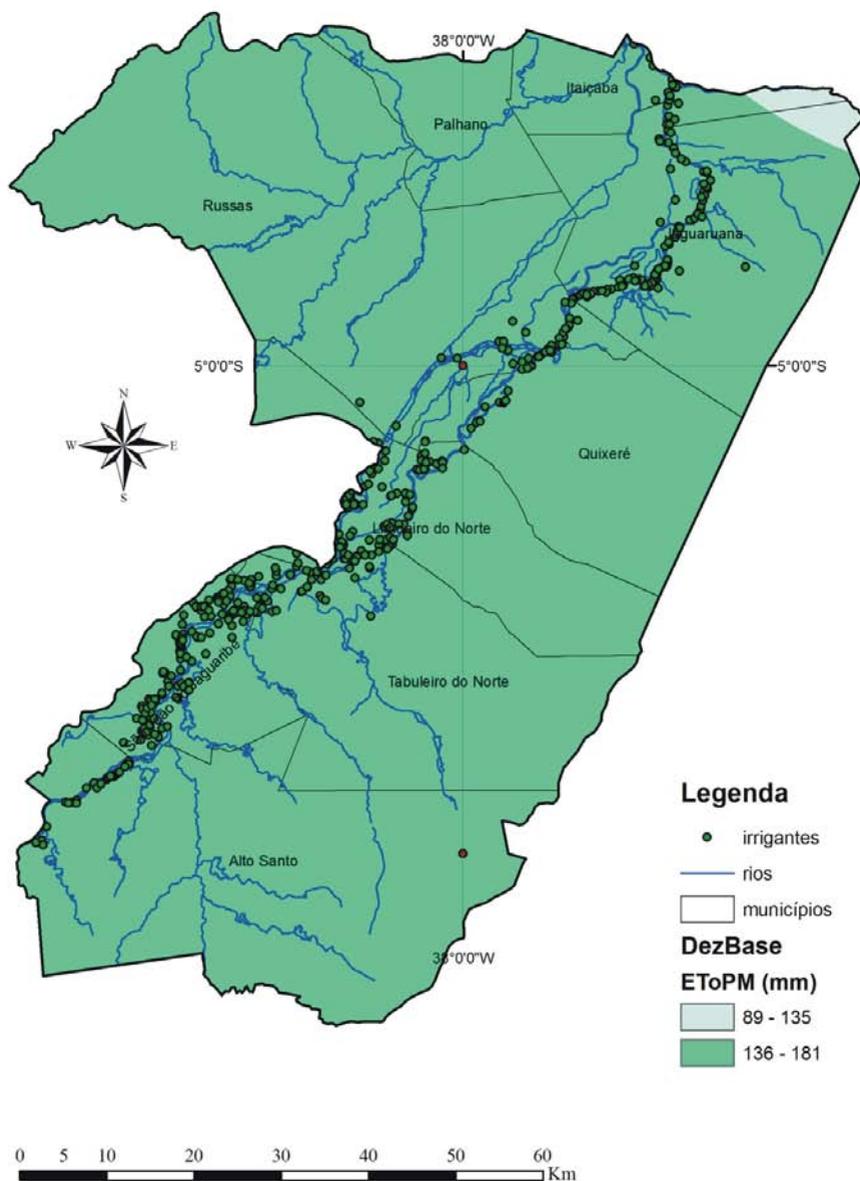


Figura 14. Variabilidade espacial da ET₀PM (1961–1990), no mês de dezembro.

Considerando-se a inexistência de dados passados suficientes, comparou-se a média das ET_oPM 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_oPM 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, foi observado um coeficiente de determinação (R^2) de 0,902 (Figura 15) e coeficiente angular (b) = 0,95, havendo uma leve tendência de se subestimar a ET_oPM quando se utiliza dados modelados. O desvio médio foi de 0,36 mm dia⁻¹ e Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME) igual a 0,067 mm dia⁻¹.

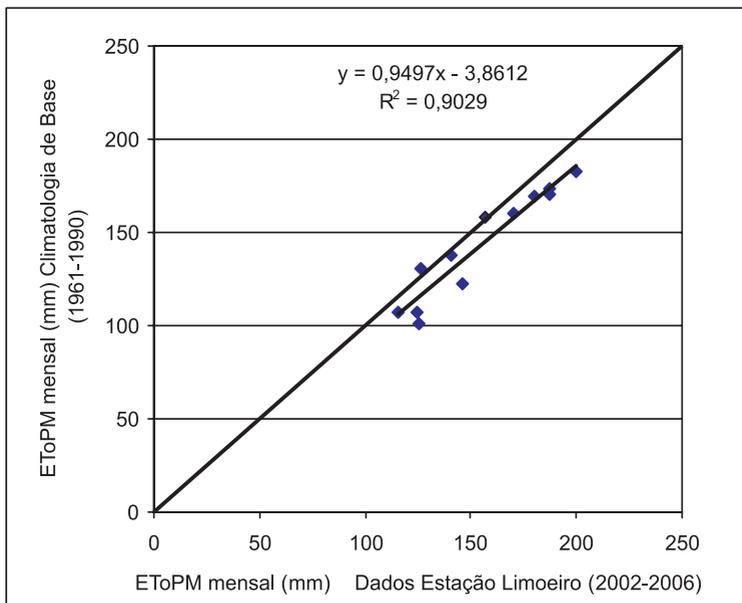


Figura 15. Regressão linear da ET_o (mm mês⁻¹) estimada com conjunto completo de dados medidos (2002-2006) e “hindcasts” do modelo de mudanças climáticas (1961-1990).

Na Tabela 4 são apresentados os dados de precipitação mensal (mm) do modelo para a região, totalizando 820 mm anuais.

Tabela 4. Precipitação mensal (mm) para período de 1961–1990, mínimos, máximos, média e desvio padrão observados.

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total anual
	----- (mm) -----												
Mínimo	39	76	162	137	69	22	8	0	0	0	6	16	
Máximo	187	200	224	380	400	300	195	101	49	40	50	95	
Média	72	110	186	188	127	54	23	6	5	4	13	32	820
Desvio padrão	28	25	12	6	57	39	25	11	6	5	7	14	

Nas Figuras 16 a 27 são apresentados os mapas temáticos da precipitação mensal espacializada (mm) para o período de 1961-1990 interpolados pelo método de krigagem. Os mapas representam dos dados espacializados da Tabela 4.

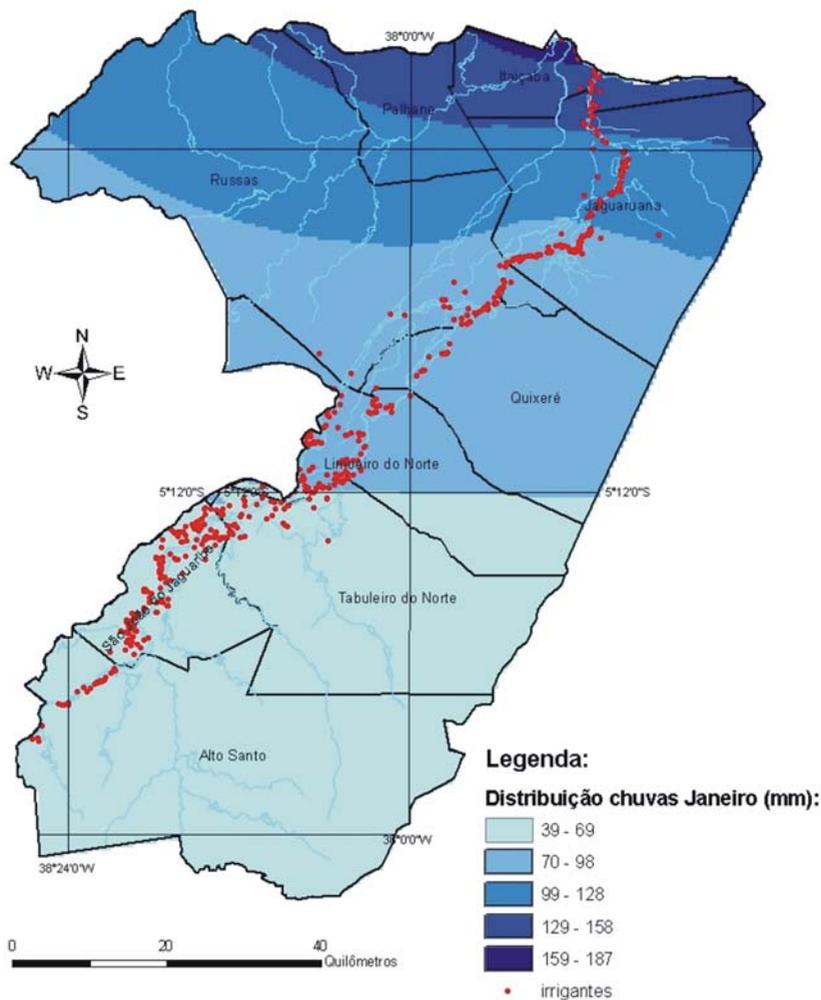


Figura 16. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de janeiro.

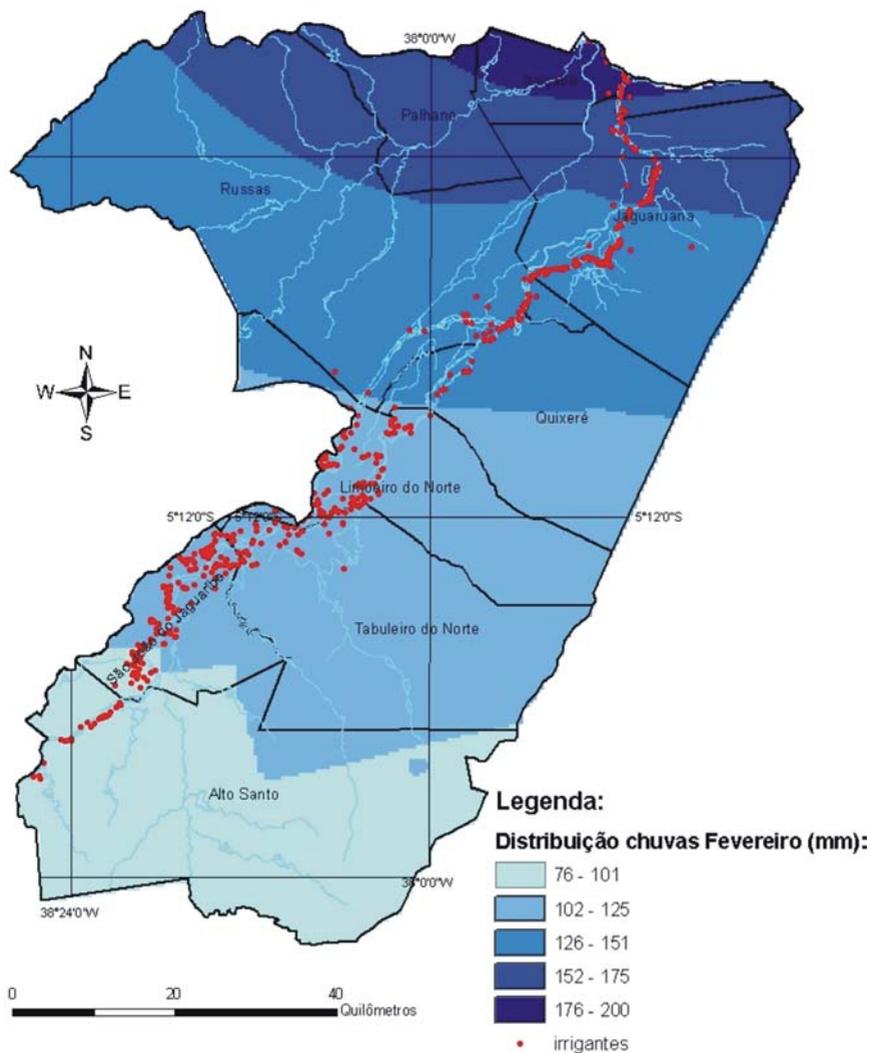


Figura 17. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de fevereiro.

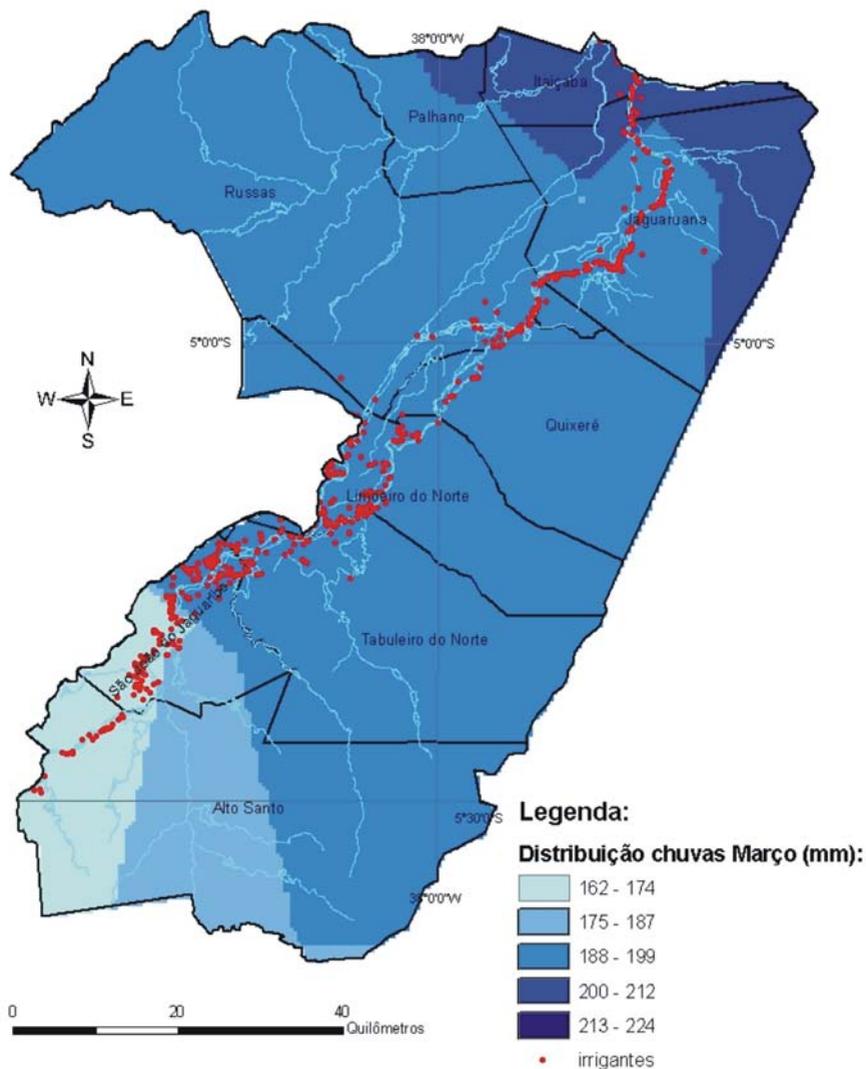


Figura 18. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de março.

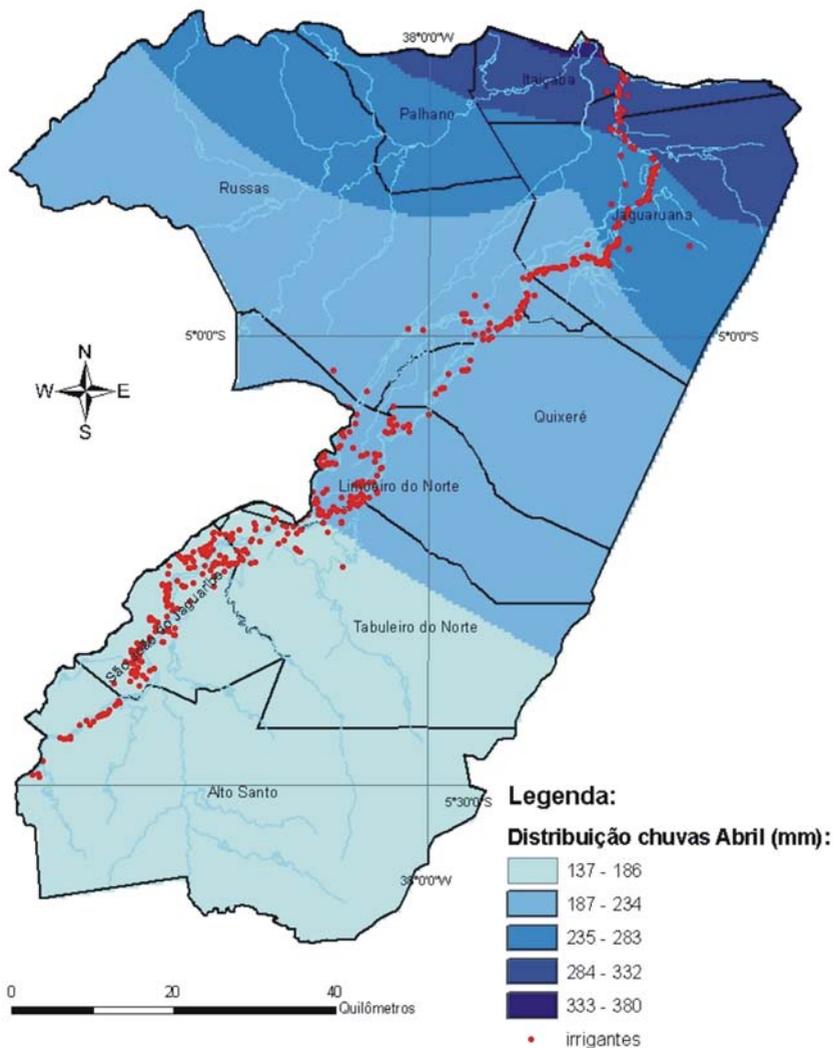


Figura 19. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de abril.

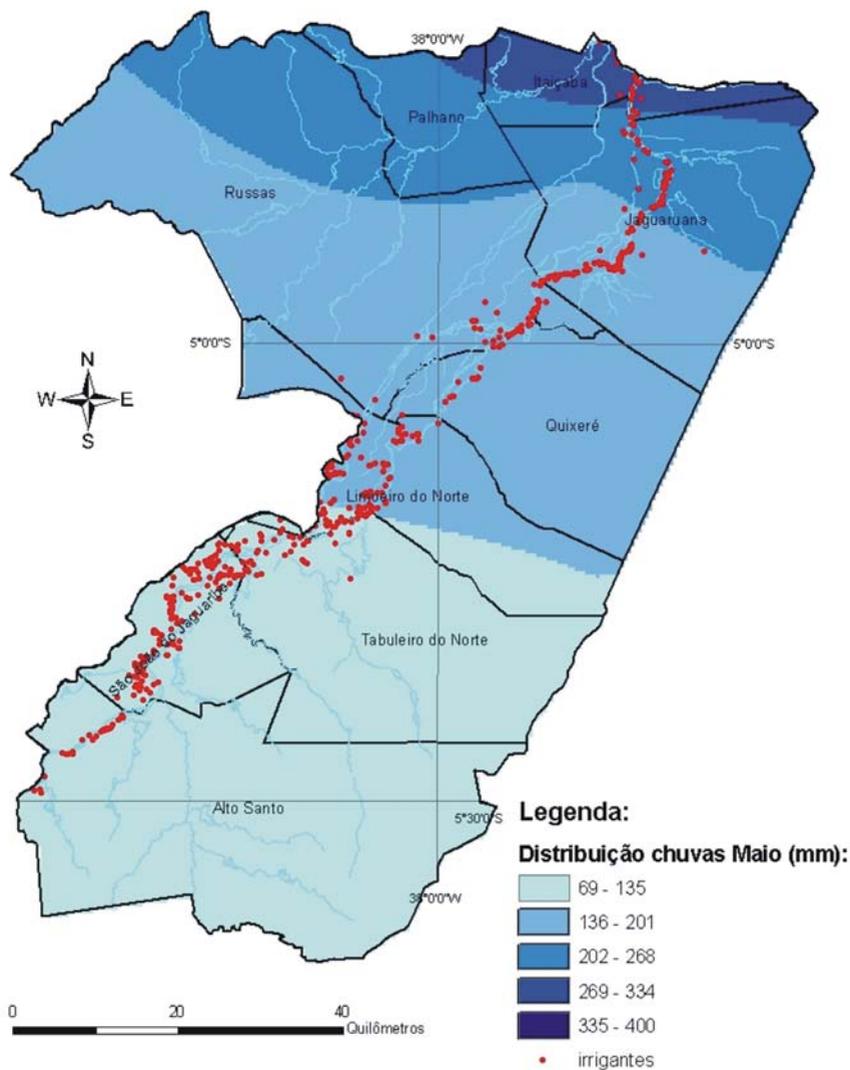


Figura 20. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de maio.

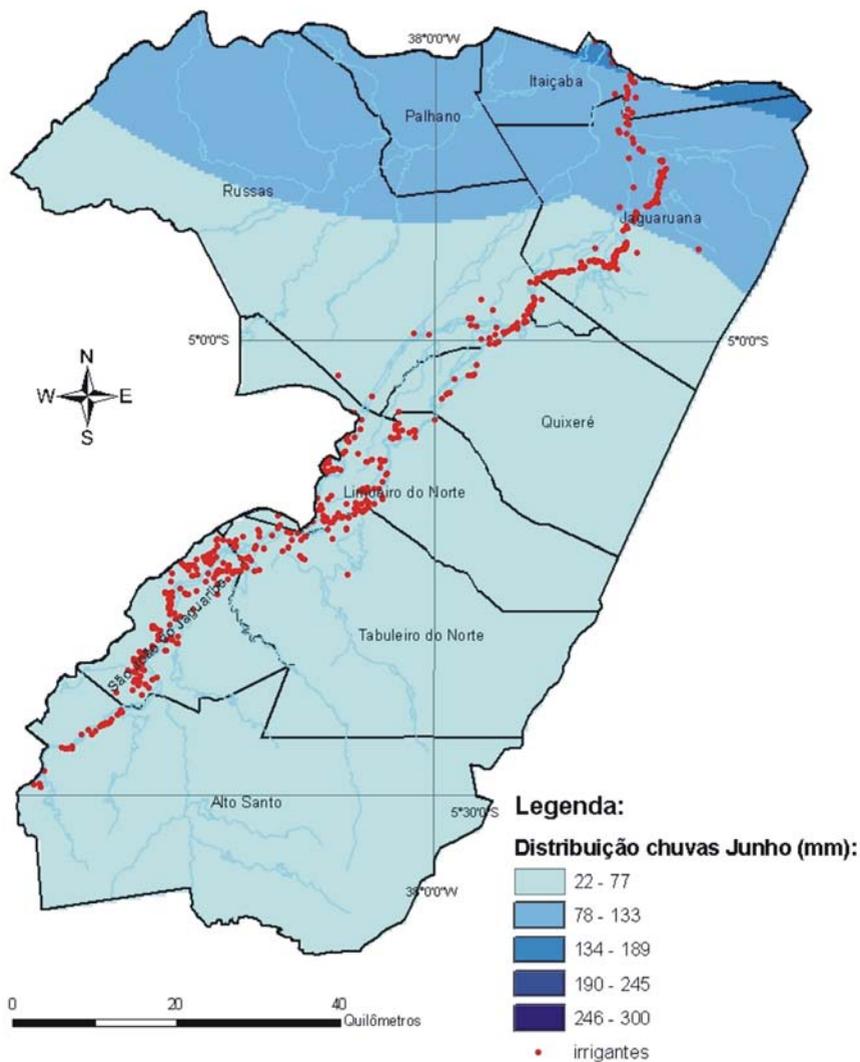


Figura 21. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de junho.

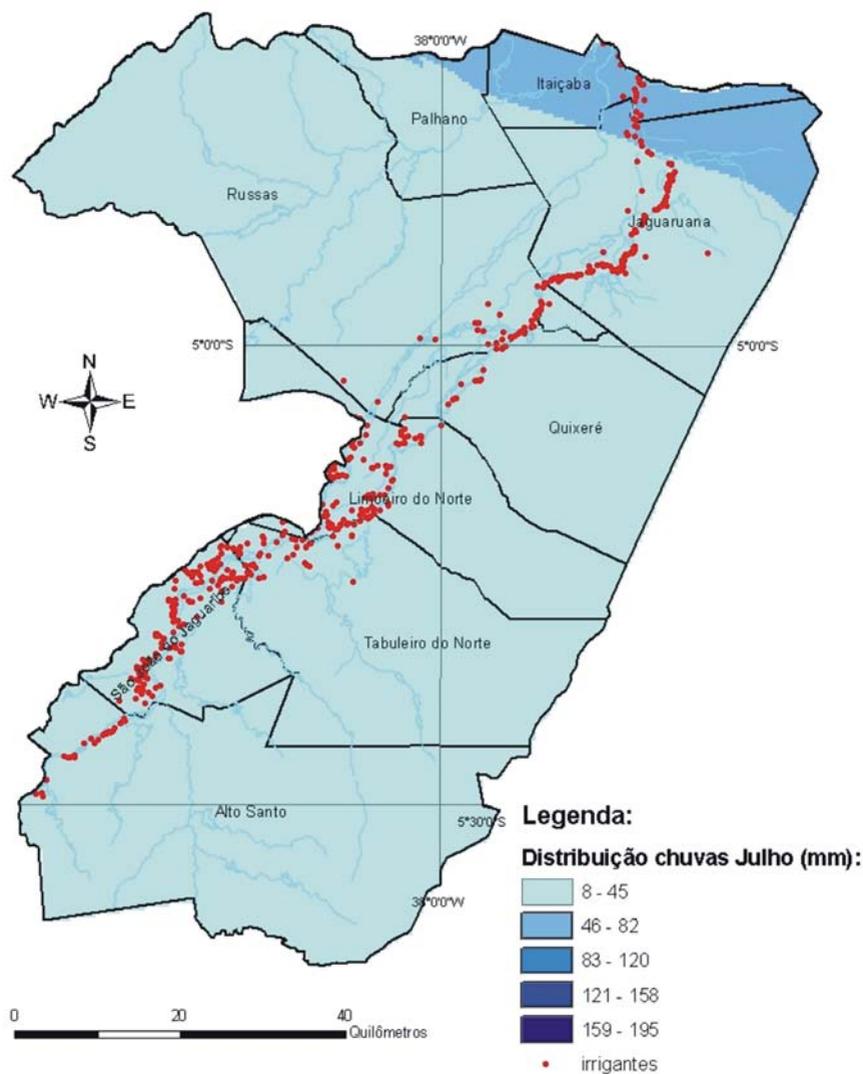


Figura 22. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de julho.

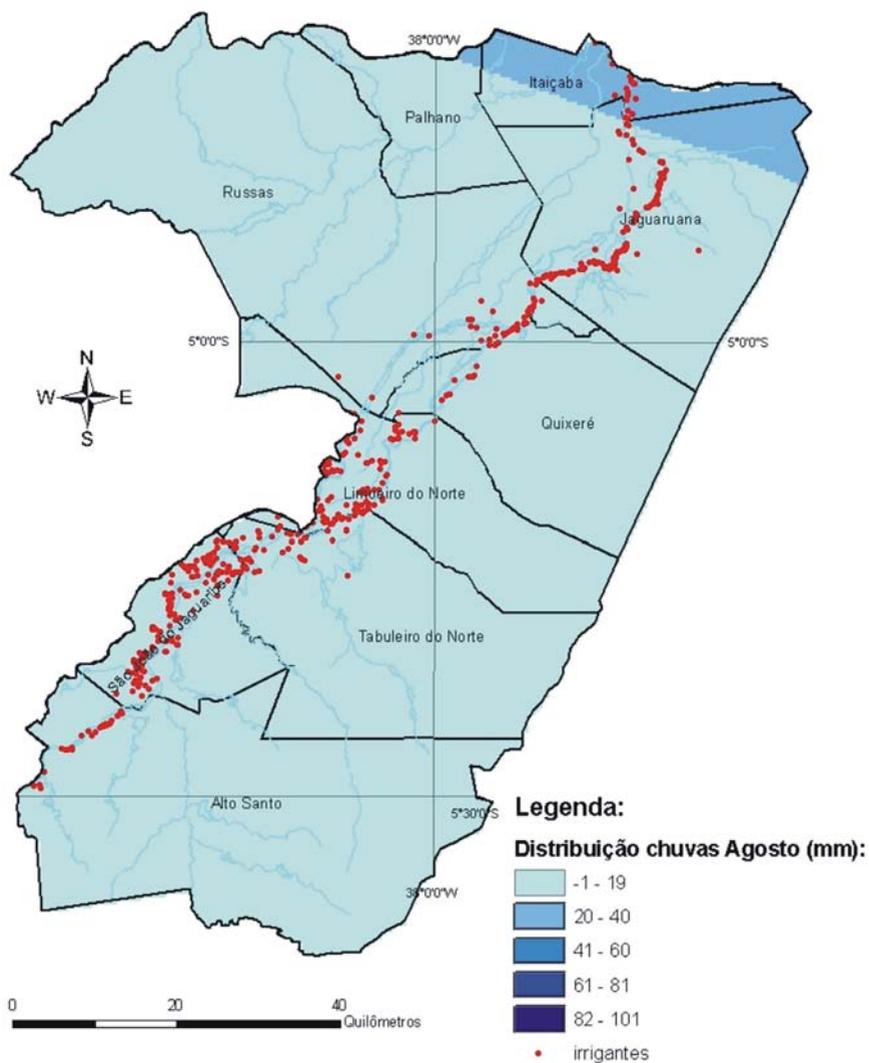


Figura 23. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de agosto.

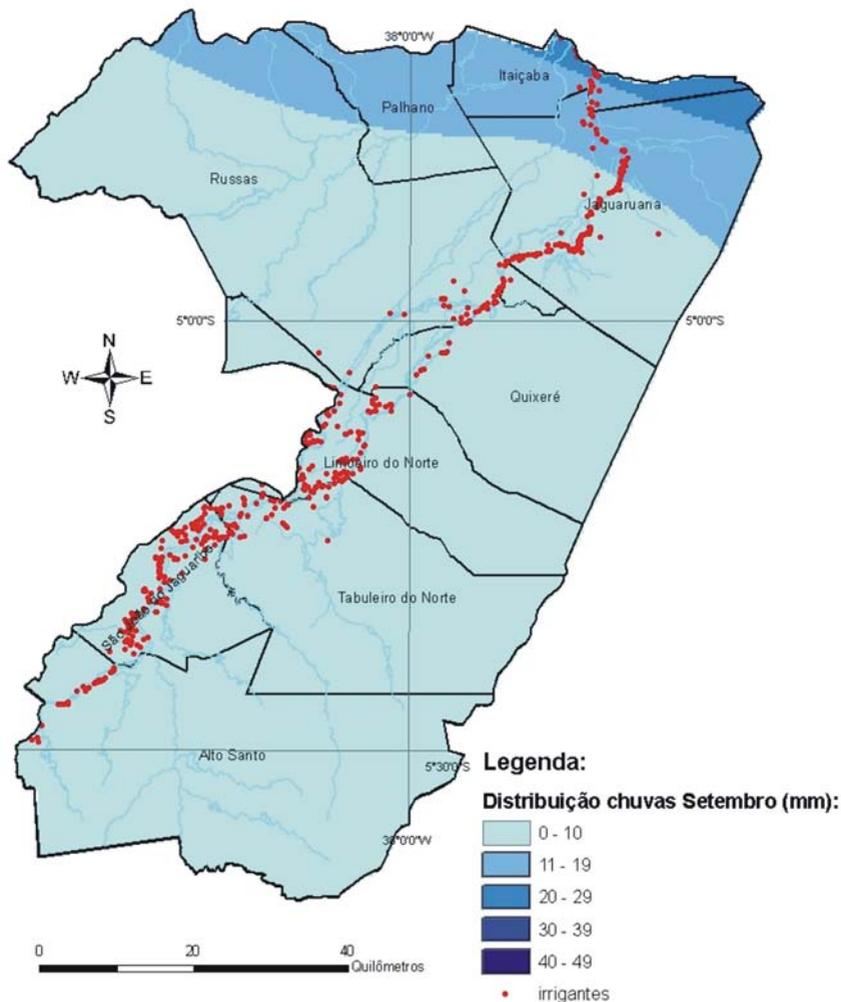


Figura 24. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de setembro.

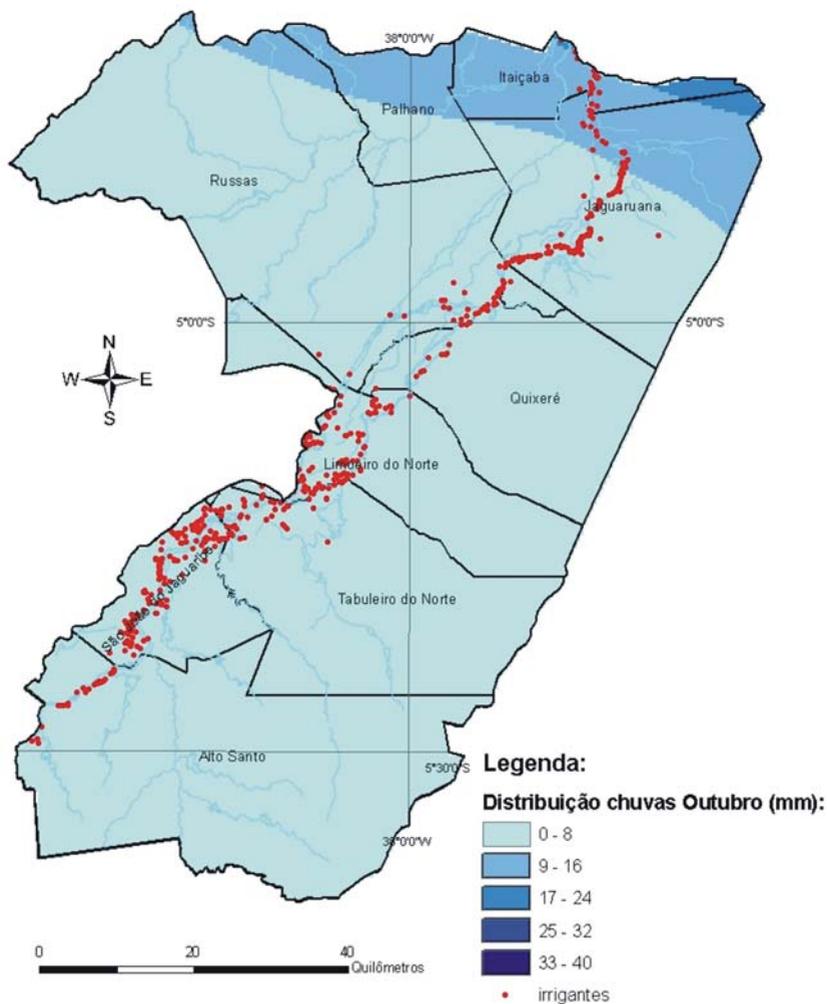


Figura 25. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de outubro.

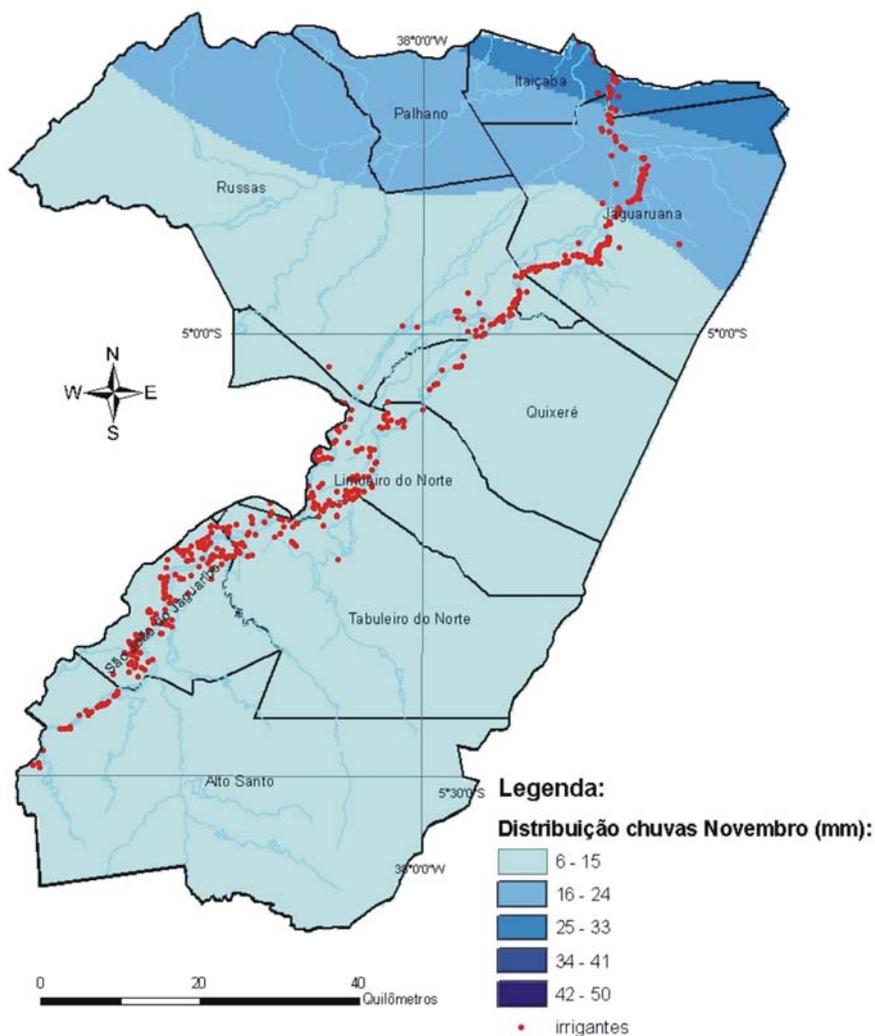


Figura 26. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de novembro.

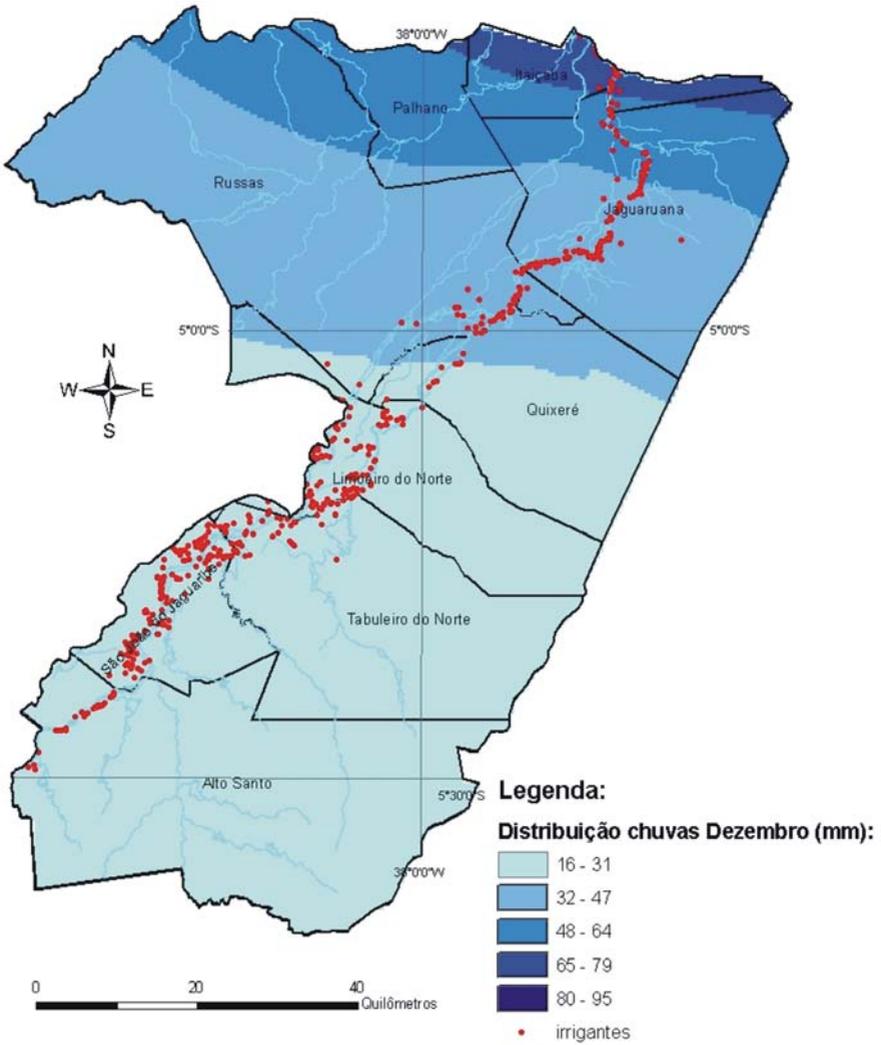


Figura 27. Variabilidade espacial da precipitação (1961–1990), no mês de dezembro.

Na Figura 28, o balanço hídrico médio (Precipitação – ET_0 médias) apresenta-se negativo na maioria dos meses (janeiro, fevereiro e período de junho a dezembro), quando se detecta a necessidade de irrigação das culturas.

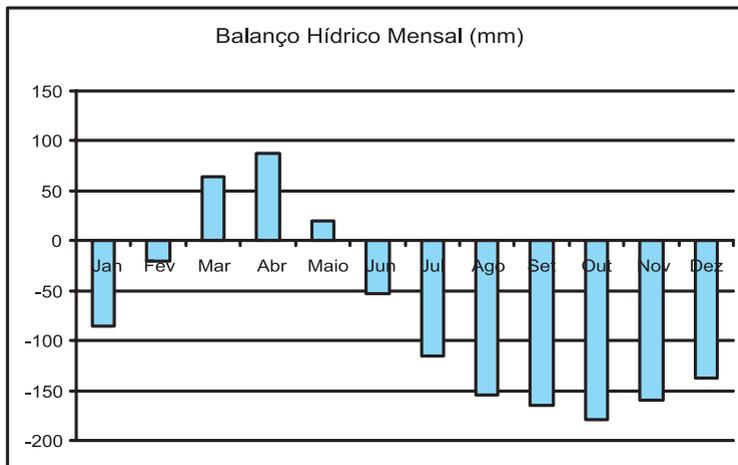


Figura 28. Balanço hídrico mensal (mm) para a bacia do Jaguaribe entre as barragens do Castanhão e Itaíba.

Conclusões

A metodologia para estimar a ET_{oPM} com dados mínimos funcionou satisfatoriamente na região estudada, considerando-se os resultados da análise de regressão.

O balanço hídrico médio (Precipitação – ET_o médias) apresenta-se negativo na maioria dos meses (janeiro, fevereiro e período de junho a dezembro), quando se detecta a necessidade de irrigação das culturas.

Referências

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (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 Especiais – INPE. São José dos Campos, 2007.

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. 1, p. 24-33, 2005.

CAI, J.; LIU, Y.; LEI, T.; PEREIRA, L. S. Estimating reference evapotranspiration with FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 145, p. 22-35, 2007.

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

DÍAZ, J. A. R.; WEATHERHEAD, E. K.; KNOX, J. W.; CAMACHO, E. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. **Regional Environmental Change**, v. 7, n. 3, 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. 6, 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. 2, p. 196-202, 2010.

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

POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data. application to South Bulgaria. **Irrigation and Drainage**, v. 55, n. 2, 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. 5, p. 635-644, 2010.

SILVA, C. S. de et al. Predicting the impacts of climate change – A case study of paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. **Agricultural Water Management**, v. 93, n. 1-2, p. 19-29, 2007.



Agroindústria Tropical

Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento

