

CAMILA DUANE CORREA GAIA

**A EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO ESTADO DO PARÁ: DEFINIÇÃO DE DÉFICITS
HÍDRICOS, UTILIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO E DA
GEOESTATÍSTICA**

Botucatu

2021

CAMILA DUANE CORREA GAIA

**A EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO ESTADO DO PARÁ: DEFINIÇÃO DE DÉFICITS
HÍDRICOS, UTILIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO E DA
GEOESTATÍSTICA**

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia (Irrigação e
Drenagem)

Orientador: Enzo Dal Pai

Botucatu

2021

G137e

Gaia, Camila Duane Correa

A evapotranspiração no Estado do Pará : Definição de déficits hídricos, utilização do sensoriamento remoto e da geoestatística / Camila Duane Correa Gaia. -- Botucatu, 2021
75 p. : il., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Enzo Dal Pai

1. Engenharia agrônômica. 2. Climatologia agrícola. 3. Evapotranspiração. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: A EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO ESTADO DO PARÁ: DEFINIÇÃO DE DÉFICITS HÍDRICOS, UTILIZAÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO E DA GEOSTATÍSTICA

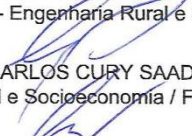
AUTORA: CAMILA DUANE CORREA GAIA

ORIENTADOR: ENZO DAL PAI

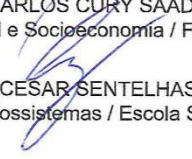
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (IRRIGAÇÃO E DRENAGEM), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. ENZO DAL PAI (Participação Virtual)
Pós-Doutorando - Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu



Prof. Dr. JOAO CARLOS CURY SAAD (Participação Virtual)
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. PAULO CESAR SENTELHAS (Participação Virtual)
Engenharia de Biossistemas / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Botucatu, 08 de janeiro de 2021

Àos meus amados pais,

Maralice e Edson,

dedico

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Naralice e Edson, pelo apoio e preocupação comigo durante o tempo que fiquei longe de casa.

Aos meus amigos Luís e Geovana, por sempre estarem comigo mesmo com a distância.

Aos meus amigos Pedro e Larissa, por terem feito essa experiência ser mais leve e tranquila.

Ao Prof. Dr. Enzo Dal Pai por ter me compreendido nos momentos mais difíceis e ter aceitado ser meu orientador.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de mestrado (Código de Financiamento 001).

A Universidade Estadual Paulista (UNESP) e ao programa de irrigação e drenagem pela capacitação e professores exemplares.

RESUMO

Tendo em vista o papel do Bioma Amazônia na climatologia do mundo, objetivou-se, este trabalho, o estudo das variáveis climáticas do Estado do Pará: temperatura média do ar, umidade média do ar, radiação solar global e precipitação. Além disso, foi realizado a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) através da equação de Penman-Monteith e o ajuste da equação de Thornthwaite e Hargreaves e Samani localmente. Para isso, no Capítulo 1, intitulado “Cálculo da evapotranspiração de referência e estudo climático do Estado do Pará” foram utilizados dados de estações meteorológicas automáticas disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) de 22 estações localizadas no Estado do Pará e de 15 localizadas nos arredores do Estado. A partir destas informações foram elaborados mapas de interpolação e os componentes climáticos foram avaliados. Com o intuito de quantificar os excedentes e as deficiências hídricas foi realizado o balanço hídrico normal, utilizando a CAD de 100 mm. No Capítulo 2, intitulado “Avaliação e ajuste de equações empíricas baseadas em temperatura e radiação solar para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Pará” foram utilizados os dados das 22 estações do Estado do Pará para a o cálculo da evapotranspiração por meio das equações de Penman-Monteith, Thornthwaite e Hargreaves e Samani. Estas foram comparadas na sua forma original e posteriormente ajustadas localmente por meio do coeficiente de desempenho desenvolvido por Camargo e Sentelhas (2007). Observou-se que temperatura do ar e radiação solar foram os componentes que mais contribuíram justificar as variações ao longo do ano da evapotranspiração de referência. A equação de Thornthwaite apresentou desempenho insatisfatório na maioria das localidades estudadas, mesmo após a tentativa de ajuste local. Enquanto que a equação de Hargreaves e Samani, na sua forma original, apresentou bom desempenho, que foi melhorado ainda mais com ajuste local.

Palavras-chave: Balanço hídrico; Clima úmido; Thornthwaite; Hargreaves-Samani.

ABSTRACT

In view of the role of the Amazon Biome in the climatology of the world, this work aimed to study the climatic variables of the State of Pará: average air temperature, average relative humidity, global solar radiation and precipitation. In addition, the reference evapotranspiration (ET_0) was estimated using the Penman-Monteith equation and the Thornthwaite and Hargreaves and Samani equation adjusted locally. For this purpose, in Chapter 1, entitled "Calculation of reference evapotranspiration and climatic study of the State of Pará", data from automatic meteorological stations were used by the National Meteorological Institute (Inmet) of 22 stations located in the State of Pará and 15 stations located on the boundary of the state. Based on this information, interpolation maps were elaborated and the climatic components were evaluated. In order to quantify surpluses and water deficiencies, a normal water balance was performed using the 100 mm CAD. In Chapter 2, entitled "Evaluation and adjustment of empirical equations based on temperature and solar radiation to estimate the reference evapotranspiration in the State of Pará", data from the 22 stations in the State of Pará were used to calculate the evapotranspiration using the equations of Penman-Monteith, Thornthwaite and Hargreaves and Samani. These were compared in their original form and subsequently adjusted locally using the performance coefficient developed by Camargo and Sentelhas (2007). It was observed that air temperature and solar radiation were the components that contributed most to justify the variations throughout the year of reference evapotranspiration. The Thornthwaite equation performed poorly in most of the studied locations, even after attempting local adjustment. While the Hargreaves and Samani equation, in its original form, performed well, it was further improved with local adjustment.

Keywords: Water balance; Humid climate; Thornthwaite; Hargreaves-Samani.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 1 - CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E ESTUDO CLIMÁTICO DO ESTADO DO PARÁ.....	18
RESUMO.....	18
ABSTRACT.....	18
1.1 INTRODUÇÃO.....	19
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
1.2.1 Obtenção dos dados climatológicos.....	20
1.2.2 Cálculo da evapotranspiração de referência (ET _o).....	22
1.2.3 Interpolação dos dados.....	24
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
1.4 CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS.....	44
CAPÍTULO 2 - AVALIAÇÃO E AJUSTE DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS BASEADAS EM TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO ESTADO DO PARÁ.....	46
RESUMO.....	46
ABSTRACT.....	46
2.1 INTRODUÇÃO.....	47
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	48
2.2.1 Obtenção e análise de dados.....	48
2.2.2 Métodos de estimativa de ET _o	49
2.2.3 Análise do desempenho das equações de estimativa da ET _o	49
2.2.4 Ajuste das equações de estimativa da ET _o	50
2.2.5 Validação.....	50
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
2.3.1 Avaliação e ajuste local da equação de Thornthwaite.....	51

2.3.2	Avaliação e ajuste local da equação de Hargreaves e Samani.....	60
2.4	CONCLUSÕES.....	70
	REFERÊNCIAS.....	71
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
	REFERÊNCIAS.....	75

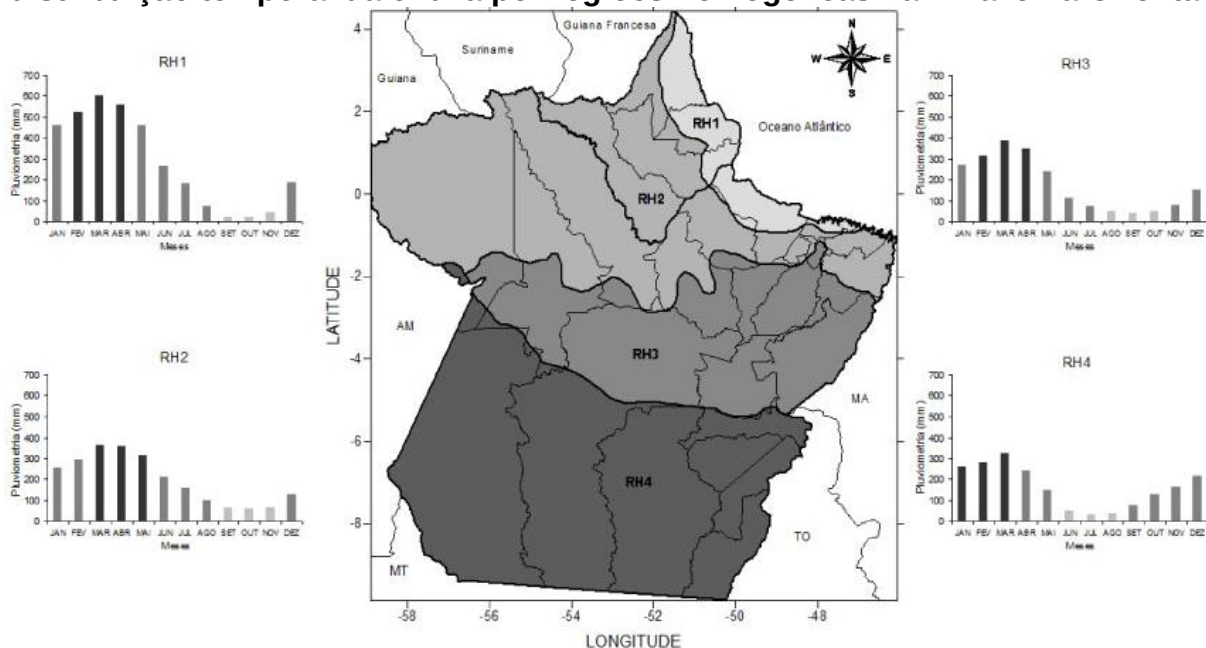
INTRODUÇÃO GERAL

O estudo climático da Região Amazônica faz-se importante devido ao aumento nas discussões sobre meio ambiente e a necessidade de compreensão do efeito da Floresta Amazônica no clima global. Além disto, por tratar-se de uma região equatorial, está exposta a elevadas quantidades de energia durante todo o ano. Essa energia, no ambiente, disponibiliza-se na forma sensível e latente. Em sua forma latente permite elevadas taxas de evaporação de água do ambiente, gerando um sistema muito característico, com elevada precipitação pluvial.

Muito se disseminou sobre a floresta amazônica ser úmida, com elevado regime pluvial durante o ano inteiro de forma constante. O próprio termo utilizado na língua inglesa "*rain forest*", na tradução livre "floresta de chuva", pode ter ajudado a gerar essa informação. Porém sabe-se especialmente que a região mais ao sul do estado apresenta sazonalidade nas chuvas com período de estiagem bem definido.

Mais de 3/4 da precipitação anual do Estado do Pará ocorre durante os meses de dezembro a maio (MORAES et al., 2005). Conforme o trabalho de Amanajás e Braga (2012), o Estado do Pará pode ser dividido em quatro regiões distintas de precipitação (Figura 1).

Figura 01 – espacialização das regiões homogêneas de chuva e histograma da distribuição temporal da chuva por regiões homogêneas na Amazônia Oriental



Fonte: Amanajás e Braga (2012)

A primeira região, chamada de RH1, é a área costeira do Estado, com média de 3.400 mm ano⁻¹. O mês mais chuvoso é março com 606 mm e o mais seco é outubro com 22 mm. A segunda região, chamada de RH2, é localizada em boa parte da mesorregião do Baixo Amazonas e possui média anual de 2376 mm, sendo março o mês mais chuvoso, com 361 mm e outubro o mais seco, com 56 mm. A RH3 corresponde ao Nordeste Paraense, com média anual de 2100 mm e a RH4 corresponde ao Sudeste Paraense, sendo esta a região com menor volume de chuva anual, inferior a 2000 mm.

Existem diversos estudos em relação ao comportamento da precipitação e alguns de climatologia geral da Amazônia (MORAES et al, 2005; ALBUQUERQUE et al., 2010; AMANAJÁS, BRAGA, 2012; MENEZES et al., 2015). Dentre todos os elementos climatológicos de interesse, um não é rotineiramente disponibilizado: a evapotranspiração de referência (ET_0). Esta representa a quantidade de água evapotranspirada por uma extensa superfície vegetada sem deficiência hídrica. Apesar da importância desta variável no planejamento agrícola, as estações agrometeorológicas disponíveis no Estado do Pará ainda não fornecem estas informações de forma direta para os usuários dos recursos hídricos da região.

Os dados das estações automáticas e convencionais disponíveis estão proporcionalmente em pequena quantidade, levando em consideração a extensão territorial, quando comparada com a cobertura por estações meteorológicas em outras regiões do Brasil, como o Sul e o Sudeste brasileiro. Essa baixa cobertura meteorológica é facilmente justificada pela dificuldade no acesso físico ao território, pois em algumas partes do Estado do Pará há poucas estradas, muitas em más condições, e quando localizadas muito distante de centros urbanos, facilitam furtos e vandalismo das estações coletoras de dados.

Devido a esta baixa cobertura por estações meteorológicas, há extensas regiões onde a obtenção dos elementos meteorológicos só pode ser realizado com o uso da geotecnologia, pois, possibilita geoespacializar dados anteriormente pontuais, gerando mapas úteis em regiões com escassez de informações. Como forma de subsidiar o planejamento agrícola e estudos de balanço hídrico, os objetivos deste trabalho foram:

- Estudar o clima do Estado de Pará;
- Calcular a ET_0 no Estado do Pará;
- Parametrizar as equações de Thornthwaite e Hargreaves e Samani de ET_0 para o Estado do Pará.

CAPÍTULO 1

CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E ESTUDO CLIMÁTICO DO ESTADO DO PARÁ

RESUMO

O objetivo deste estudo foi calcular a evapotranspiração de referência através do método de Penman-Monteith no Estado do Pará; e elaborar mapas de interpolação com as variáveis climáticas: temperatura média do ar, umidade média do ar, radiação solar global, precipitação e evapotranspiração de referência. Além disso, foi realizado o balanço hídrico normal, considerando a CAD de 100 mm, para quantificar os excedentes e deficiência hídrica do Estado do Pará. Observou-se que as variáveis temperatura, radiação solar e precipitação foram as que mais se correlacionaram com a evapotranspiração de referência. Em geral, os meses mais chuvosos apresentaram os menores valores de evapotranspiração, enquanto que os meses menos chuvosos, os maiores. De acordo com o balanço hídrico houveram 216 mm de deficiência hídrica que se concentram nos meses de agosto, setembro e outubro. A média anual de evapotranspiração de referência foi de 1.117 mm, a mensal foi de 93,08 mm e a diária foi de 3,4 mm.

Palavras-chave: Penman-Monteith. Clima úmido. Balanço hídrico.

ABSTRACT

The aim of this study was to calculate the reference evapotranspiration using the Penman-Monteith method in the State of Pará; and to elaborate interpolation maps with the climatic variables: average air temperature, average relative humidity, global solar radiation, precipitation and reference evapotranspiration. In addition, a normal water balance was performed, considering the CAD of 100 mm, to quantify the surplus and water deficiency in the State of Pará. It was observed that the variables temperature, solar radiation and precipitation were the ones that most correlated with evapotranspiration of reference. In general, the rainiest months had the lowest values of evapotranspiration, while the least rainy months, the highest. According to the water balance, there were 216 mm of water deficiency that are concentrated in the months of August, September and October. The average annual reference evapotranspiration was 1,117 mm, the monthly average was 93.08 mm and the daily rate was 3.4 mm.

Keywords: Penman-Monteith. Humid climate. Water balance.

1.1 INTRODUÇÃO

A determinação da evapotranspiração de referência (ET_0) se faz importante para o estudo climático de uma região, juntamente com outras variáveis climáticas como a precipitação, a temperatura e a umidade do ar, a radiação solar global, entre outras.

A partir destas, é possível verificar a disponibilidade hídrica, que é um fator fundamental para a produção vegetal, de forma que o estresse, seja por excesso ou por déficit hídrico, afetam o desenvolvimento das plantas (REICHARDT, 1978).

A realidade que se encontra na maioria dos estados brasileiros é a falta de disponibilidade dos dados de ET_0 . Para que o usuário dos recursos hídricos possa obter esta informação, é necessário que solicite os dados básicos de entrada nas equações de ET_0 ao órgão detentor dos mesmos, para então aplicá-los na equação de sua escolha, o que não permite o cálculo em tempo real.

Para a correta quantificação da necessidade hídrica de uma região é necessário realizar o balanço hídrico climatológico. O balanço hídrico é utilizado para realizar o acompanhamento do armazenamento de água no solo, devendo este ser mantido em níveis ótimos para maximizar a produtividade agrícola (REICHARDT, 1990). Por meio do balanço hídrico podem-se estabelecer critérios para a irrigação e o planejamento agrícola de uma região.

Pode ser realizado o balanço hídrico climatológico normal e o sequencial. O primeiro é utilizado para a caracterização climática de uma região e determinação de melhores épocas de semeadura, enquanto o segundo é utilizado para o acompanhamento do armazenamento de água no solo em tempo real, que pode ser feito em escala diária, quinidial, semanal, decendial ou mensal, tornando muito útil para o manejo da irrigação e do solo. Para ambos, os componentes são: precipitação (P), evapotranspiração real (ETR), evapotranspiração de referência (ET_0), armazenamento de água no solo (ARM), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC).

Para a variável ET_0 do balanço hídrico, pode-se utilizar as equações de ET_0 disponíveis. Dentre as equações existentes, a equação de Penman-Monteith é a oficialmente recomendada pela FAO (*Food and Agriculture Organization*), pois é um método baseado em processos físicos, fisiológicos e aerodinâmicos (ALLEN et al., 1998). Desta forma, utilizá-la requer conhecimentos específicos e muitas variáveis de entrada. Além disso, de acordo com Vila Nova et al. (1976), o balanço hídrico na

Região Amazônica era um desafio devido as dimensões e características da região, bem como da escassez de dados meteorológicos e hidrológicos.

Atualmente, apesar da presença de estações automáticas, ainda há muito o que ser explorado em relação a excedentes e deficiências hídricas, a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) e a necessidade hídrica das culturas desta região do País para o desenvolvimento da agricultura tanto irrigada como de sequeiro.

Visando facilitar o acesso a estas informações em forma gráfica, o uso de ferramentas do geoprocessamento, como a interpolação, se faz muito útil. Nota-se o desenvolvimento de trabalhos neste sentido, como, para o Norte e Nordeste do Estado de Minas Gerais (SANTOS et al., 2019) e para o Noroeste Paulista (SILVA JUNIOR, 2017). Nestes trabalhos foram desenvolvidos mapas de ET_o diárias para disponibilizar estas informações de forma rápida para os produtores rurais e outros usuários de água destas regiões.

Seguindo esta linha, os objetivos deste trabalho foram: calcular a evapotranspiração de referência através do método de Penman-Monteith; e elaborar mapas de interpolação com as variáveis climáticas: temperatura média do ar, umidade média do ar, radiação solar global, precipitação e evapotranspiração de referência. Além disso, foi realizado o balanço hídrico para quantificar os excedentes e deficiência hídrica do Estado do Pará.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1 Obtenção dos dados climatológicos

Os dados climáticos das estações meteorológicas automáticas disponíveis para a região foram fornecidos cordialmente pelo Instituto Nacional de Meteorologia (InMet – WWW.inmet.org.br), e são compostos de: temperatura máxima e mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); umidade relativa do ar máxima e mínima (%); velocidade média do vento a 10 metros (m s^{-1}); radiação global (KJ m^{-2}) e precipitação (mm). Todos os dados climáticos foram fornecidos em escala horária do início da abertura das estações até o ano de 2018.

Nestes dados constaram valores horários de 46 estações localizadas nos estados do Pará, e dos estados de Maranhão, Tocantins, Mato Grosso, Amapá e Amazonas para que a interpolação de dados possuisse bordadura. Pelo número de estações considerado, há grande variabilidade quanto à disponibilidade de dados. Algumas apresentam menos de dois anos. Desta forma, foram descartadas estações com

menos de 5 anos de dados. Na Tabela 01 constam algumas informações das 37 estações utilizadas neste trabalho.

Tabela 01 – Informações das estações automáticas do Inmet utilizadas

ESTAÇÃO	Pontos	Latitude	Longitude	Altitude	Ano de abertura
ALTA FLORESTA - MT	1	-10,1	-56,2	292	2007
APIACAS - MT	2	-9,6	-57,4	218	2006
APUÍ - AM	3	-7,2	-59,9	157	2008
ARAGUAINA - TO	4	-7,1	-48,2	231	2007
ARAGUATINS - TO	5	-5,6	-48,1	131	2009
BELÉM - PA	6	-1,4	-48,4	21	2003
BRAGANÇA - PA	7	-1,0	-46,8	41	2008
BURITICUPU - MA	8	-4,3	-46,4	175	2008
CAMETÁ - PA	9	-2,2	-49,5	10	2008
CAPITÃO POÇO - PA	10	-1,7	-47,1	79	2011
CARLINDA - MT	11	-10,0	-55,8	294	2008
CASTANHAL - PA	12	-1,3	-47,9	47	2003
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA - PA	13	-8,3	-49,3	176	2008
ESTREITO - MA	14	-6,7	-47,4	183	2008
GUARANTÃ DO NORTE - MT	15	-10,0	-54,9	284	2002
IMPERATRIZ - MA	16	-5,6	-47,5	118	2008
ITAITUBA - PA	17	-4,3	-56,0	24	2008
MACAPÁ - AP	18	0,0	-51,1	17	2013
MARABÁ - PA	19	-5,4	-49,1	117	2009
MARINÓPOLIS DO TOCANTINS - TO	20	-9,6	-49,7	187	2012
MAUÉS - AM	21	-3,4	-57,7	25	2008
MINA PALITO - PA	22	-6,3	-55,8	260	2010
MONTE ALEGRE - PA	23	-2,0	-54,1	101	2012
NOVO REPARTIMENTO - PA	24	-4,2	-49,9	101	2008
ÓBIDOS - PA	25	-1,9	-55,5	90	2012
PACAJÁ - PA	26	-3,8	-50,6	89	2008
PARAGOMINAS - PA	27	-3,0	-47,4	113	2007
PARINTINS - AM	28	-2,6	-56,8	19	2008
PLACAS - PA	29	-3,9	-54,2	100	2008
RONDON DO PARÁ - PA	30	-4,8	-48,2	203	2008
SALINÓPOLIS - PA	31	-0,6	-47,4	23	2008
SANTANA DO ARAGUAIA - PA	32	-9,3	-50,4	177	2008
SERRA DOS CARAJÁS - PA	33	-6,1	-50,1	707	2008
SOURE - PA	34	-0,7	-48,5	13	2008
TOMÉ-AÇU - PA	35	-2,6	-48,4	43	2007
TUCURUÍ - PA	36	-3,8	-49,7	138	2008
TURIAÇU - MA	37	-1,7	-45,4	36	2008

Os dados horários foram convertidos a horário local em dados diários através da linguagem R. Foram removidos dias com dados faltantes e com a radiação solar global abaixo de $2,0 \text{ MJ dia}^{-1}$ ou maior do que a radiação solar extraterrestre (R_a). Os dados foram organizados utilizando planilhas no Excel 2013.

1.2.2 Cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o)

Para a estimativa da evapotranspiração de referência, a equação mundialmente aceita como padrão e parametrizada pela FAO é a de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), que utiliza uma cultura hipotética semelhante a grama com os seguintes parâmetros: altura de 0,12 m; albedo igual a 23% e resistência da cultura igual a 69 s m⁻¹.

Inicialmente calcula-se a declinação solar (D_s), o ângulo solar horário (w_s), e a distância relativa terra-sol (d_r), conforme as equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$D_s = 0,409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} DJ - 1,39 \right) \quad (1)$$

$$w_s = \arccos (-\tan \varphi \tan D_s) \quad (2)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} DJ \right) \quad (3)$$

em que:

D_s – declinação solar (rad); DJ – dia juliano (dia); w_s – ângulo solar horário (rad); φ – latitude (rad); e d_r – distância relativa terra-sol.

A radiação solar extraterrestre (r_a) é calculada conforme a equação 4.

$$r_a = 37,59 d_r (w_s \sin \varphi \sin D_s + \cos \varphi \cos D_s \sin w_s) \quad (4)$$

Para o cálculo são necessários a pressão atmosférica (P, equação 5), a constante psicométrica (γ, equação 6) e a taxa de variação da pressão de saturação em função da temperatura (Δ, equação 7).

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

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P \quad (6)$$

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right) \right]}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (7)$$

em que:

P – pressão atmosférica (kPa); γ - constante psicométrica (kPa °C⁻¹); Δ – taxa de variação da pressão de saturação em função da temperatura (kPa °C⁻¹); z – é a altitude (m); e T_{med} – temperatura do ar média (°C).

Posteriormente calcula-se a média da pressão parcial de vapor na saturação do ar (es) através das equações 8, 9 e 10. A pressão atual de vapor (ea) é calculada através da equação 11.

$$es_{\text{máx}} = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_{\text{máx}}}{T_{\text{máx}} + 237,3}\right) \quad (8)$$

$$es_{\text{mín}} = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_{\text{mín}}}{T_{\text{mín}} + 237,3}\right) \quad (9)$$

$$es = \frac{es_{\text{máx}} + es_{\text{mín}}}{2} \quad (10)$$

$$ea = \frac{UR_{\text{med}}}{100} es \quad (11)$$

em que:

es – pressão de saturação do ar (kPa); ea – pressão atual de vapor (kPa); $es_{\text{máx}}$ – pressão de saturação do ar máxima (kPa); $T_{\text{máx}}$ – temperatura máxima do ar (°C); $T_{\text{mín}}$ – temperatura mínima do ar (°C); e UR_{med} – umidade relativa do ar média (%).

Para o balanço de ondas longas (R_{nl}) é necessário definir a radiação solar máxima (R_{so}), que pode ser feita através da equação 12, utilizando os coeficientes de Angstrom com base na latitude. O balanço de ondas longas é calculado conforme a equação 13.

$$R_{\text{so}} = (a+b) ra \quad (12)$$

$$R_{\text{nl}} = \sigma \left(\frac{T_{\text{máx}}^4 + T_{\text{mín}}^4}{2} \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{ea}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{\text{so}}} - 0,35 \right) \quad (13)$$

em que:

R_{nl} – balanço de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_{so} – radiação solar máxima ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); a – coeficiente de Angstrom correspondente a fração da radiação difusa; b – coeficiente de Angstrom complementar que representa o total de radiação solar global; ra – radiação solar extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); σ – constante de Stefan-Boltzmann ($\text{MJ k}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O balanço de ondas curtas (R_{ns}) é calculado com base na equação 14. A partir do balanço de ondas curtas e longas, o saldo de radiação (R_n) pode ser calculado conforme a equação 15. Finalmente, a equação de Penman-Monteith (equação 16) é aplicada.

$$R_{ns} = 0,77 R_s \quad (14)$$

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (15)$$

$$ET_{0 \text{ (FAO)}} = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_{med} + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (16)$$

em que:

$ET_{0 \text{ (FAO)}}$ – evapotranspiração de referência pela equação de Penman-Monteith (mm);

R_{ns} – balanço de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); R_s – radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

R_n – saldo de radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G – fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); e

U_2 – velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1})

1.2.3 Interpolação dos dados

A partir da planilha com os dados diários preparados, calcularam-se as médias (ou acumulados) mensais das variáveis radiação solar global, precipitação, temperatura média do ar, umidade relativa do ar, evapotranspiração de referência e a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração de referência. Os valores de evapotranspiração utilizados na elaboração dos mapas de interpolação foram obtidos a partir do modelo de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Este modelo foi o escolhido como “referência” da evapotranspiração neste trabalho. Isto não confirma que o modelo escolhido é o melhor. Sua utilização como referência deve-se ao fato de que é o modelo que mais utiliza informações do ambiente na estimativa da ET_0 . Os dados foram organizados em planilhas mensais no Excel e salvos em formato csv.

A interpolação foi feita através do programa Qgis 3.4, utilizando a ponderação pelo inverso da distância ao quadrado (IDW). Após a interpolação foi feito o recorte da imagem utilizando uma camada vetorial com os limites do Estado do Pará. Devido a extensão da área de estudo foi utilizada a projeção cônica equivalente de Albers, que fornece coordenadas em metros. O datum utilizado foi o Sirgas 2000.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na apresentação dos resultados as figuras serão dispostas com informações mensais das variáveis analisadas neste trabalho.

A Figura 02 apresenta os níveis de radiação solar global na superfície, em valores somados de MJ por unidade de área (m^2) por mês.

Figura 02 – Valores mensais de radiação solar global incidente na superfície no Estado do Pará, em MJ m⁻²



O Estado do Pará é dividido pela linha do Equador. Valores da radiação solar na linha do Equador têm um comportamento considerado pouco sazonal, apresentando

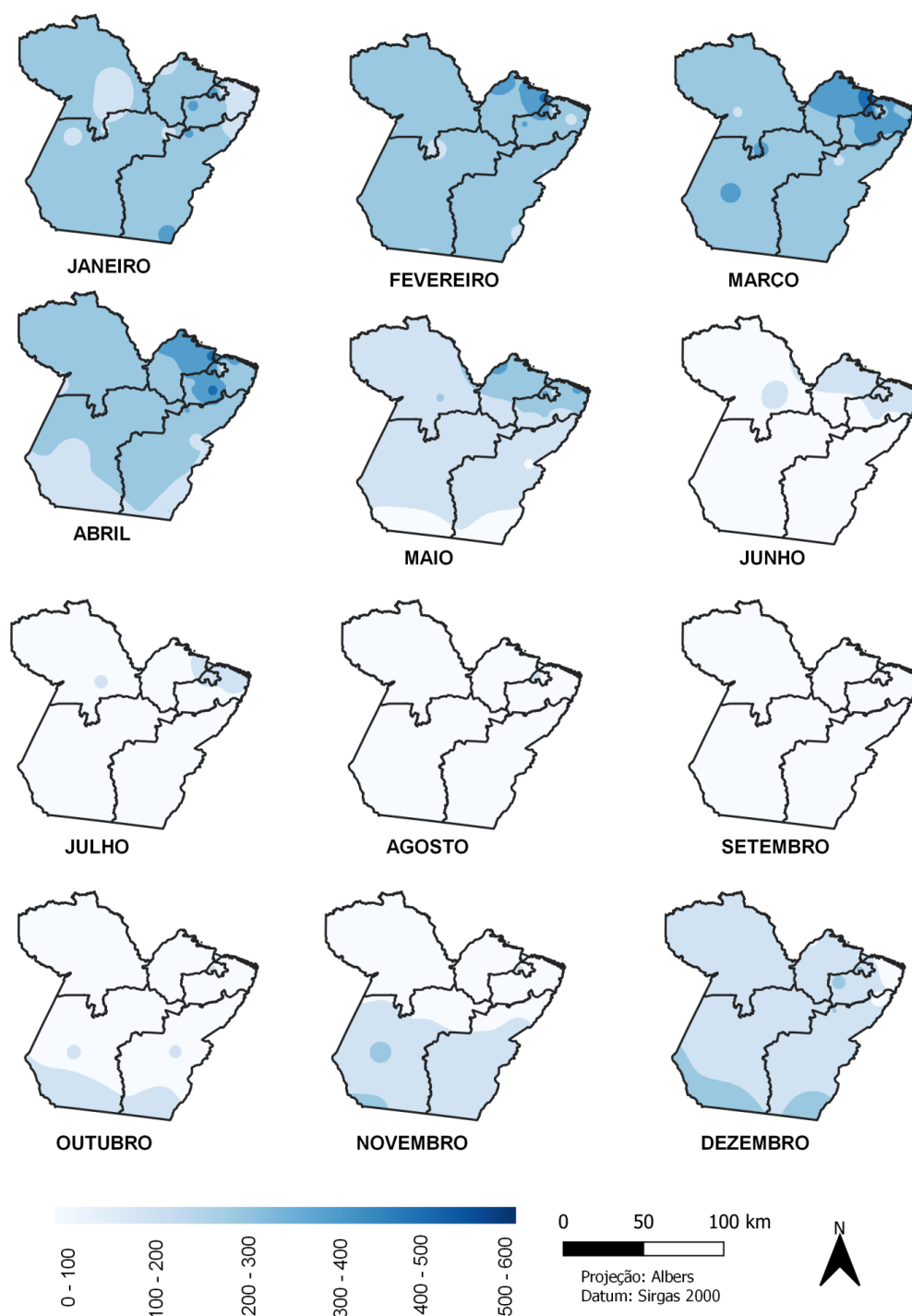
pequenas diferenças e amplitudes durante o ano, o que torna difícil se precisar estações do ano.

Entre a população local existem os termos “verão e inverno amazônico”. Esses termos criados na região se originaram em decorrência da sensação térmica. Apesar de não haver estações definidas em latitudes pequenas, o regime pluviométrico é bem marcado durante o ano. Quando ocorrem os maiores índices de precipitação, a sensação térmica diminui, e popularmente esse período é conhecido como “inverno amazônico”, enquanto que na ocorrência de menos chuva, a sensação térmica aumenta, e chama-se “verão amazônico”.

Este conhecimento popular refletido na sensação térmica está associado à radiação solar e à nebulosidade. Elevadas nebulosidades diminuem o valor da radiação solar na superfície. Existe correlação entre nebulosidade e precipitação. Há de se esperar que elevadas precipitações sejam causadas por elevadas nebulosidades.

Para uma correta interpretação do que ocorre com a radiação solar global no Estado do Pará é importante que se considere o regime hídrico. O Bioma Amazônia ali presente, onde encontra-se a floresta tropical úmida, leva à falsa percepção de que o Estado do Pará tenha em sua totalidade o mesmo regime hídrico. Existem regiões do Estado que apresentam, em algum período do ano, deficiência hídrica. Por esta consideração, faz-se necessário o conhecimento do regime pluviométrico do Estado do Pará, apresentado na Figura 03.

Figura 03 – Valores acumulados mensais de precipitação no Estado do Pará, em mm



Observando-se a sazonalidade mensal da precipitação pode-se dividir o Estado em duas regiões distintas: uma região mais ao Norte do Estado com grandes volumes de chuva distribuídos ao longo do ano, com período menos chuvoso entre outubro e

dezembro; e uma região mais ao Sul do Estado, com notório período de redução de chuvas entre os meses de maio a agosto.

O mês de março é o mais chuvoso em todo o território paraense, apresentando média geral de 325 mm mês⁻¹. A partir do mês de abril ocorre uma redução iniciada mais ao Sul do Estado do Pará, mais influenciada pela continentalidade.

A região litorânea permanece mais tempo com volumes de chuva maiores do que o interior do Estado, provavelmente devido a maritimidade. Além disso, este efeito é decorrente da influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), da forte convecção local e da formação de nuvem *cumulonimbus* (ALBUQUERQUE et al, 2010)

Entre os meses de agosto e setembro as chuvas diminuem em todo o território, e em setembro o mapa de chuvas mostra todo o Estado com 0 a 100 mm. De fato, em média, no Estado do Pará, a precipitação fica menor do que 100 mm a partir de junho e permanece em queda até setembro. A partir de outubro ocorre o retorno de maior volume de precipitação que volta a atingir na média geral valores maiores do que 100 mm a partir de dezembro.

A precipitação retorna com maior volume inicialmente no Sul do Pará e se estende até atingir o Norte do Estado, nos meses de dezembro e janeiro. Os meses de dezembro a maio a precipitação ocorre, na média geral, em volume maior do que 140 mm mês⁻¹. Destacam-se os meses de janeiro a abril pois apresentaram médias maiores do que 200 mm mês⁻¹.

A Tabela 02 apresenta os valores de precipitação média mensal e total anual por mesorregião. A mesorregião do Marajó e a Região Metropolitana de Belém possuem as maiores médias, de 2.502 e 2.116 mm ano⁻¹, respectivamente, seguida do Nordeste Paraense, com 1.800 mm ano⁻¹. Todas estas são regiões localizadas no litoral paraense. Partindo para o interior do Estado, ocorre a redução dos totais anuais de precipitação. O Sudoeste Paraense, o Baixo Amazonas e o Sudeste Paraense apresentam valores bem próximos de 1.601, 1.571 e 1.524 mm ano⁻¹, respectivamente.

Tabela 02 - Média mensal e total de precipitação por mesorregião do Estado do Pará, em mm

Mesorregião	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Baixo Amazonas	185	219	248	262	151	78	77	38	34	50	72	156	1571
Marajó	299	453	521	450	281	151	132	78	14	12	16	95	2502
Nordeste Paraense	191	252	325	329	241	130	96	39	24	24	43	106	1800
RMB	250	280	323	258	238	138	127	98	76	80	80	167	2116
Sudeste Paraense	250	228	247	229	119	32	18	11	25	74	116	176	1524
Sudoeste Paraense	201	229	286	239	149	60	31	30	30	69	131	146	1601
Média Geral	229	277	325	294	197	98	80	49	34	51	76	141	1853

Por ser uma região do planeta muito exposta ao Sol e receber muita energia, grandes volumes de água evaporam consumindo calor latente do ambiente. Regiões do Estado mais afastadas do oceano aparentemente apresentam efeito da continentalidade e, portanto, a distribuição das chuvas durante o ano não é homogênea.

De fato, de acordo com o trabalho de Lopes et al. (2013), os maiores volumes de precipitação ocorrem na mesorregião Nordeste Paraense, com valores acima de 2.000 mm, seguido pelo Noroeste e Sudoeste Paraense. Assim como obtido deste trabalho, o Sudeste do Estado do Pará apresentou o volume de chuva mais baixos, entorno de 1.400 a 1.800 mm.

Em relação a porcentagem de área e índices de precipitação, conforme o trabalho de Moraes et al. (2005), cerca de 10% do território paraense situado majoritariamente no litoral apresenta média anual entre 2.400 a 3.330 mm. O Sul e o Sudeste do Estado e parte do Norte e Nordeste, o que corresponde a 50% do território, apresentaram média anual entre 1900 a 2000 mm. E o restante, 40 % do território, apresenta precipitação anual entre 1350 a 1900 mm.

Apesar da diferença entre os valores encontrados neste trabalho e nos artigos citados, nota-se que o comportamento da variação da precipitação é o mesmo. Vale lembrar que neste trabalho, em algumas regiões como no Sudoeste Paraense e Baixo Amazonas, há distorções no mapa devido à pouca cobertura de estações, por isso, pode-se observar pontos isolados nos mapas.

Chama a atenção na escala da Figura 03 que os meses de maior precipitação possuem volumes de chuva acima dos 300 mm por mês. Estes são regimes muito intensos de chuva. Como exemplos têm-se na mesorregião Marajó os meses de

fevereiro a abril, na mesorregião Nordeste Paraense os meses de março e abril e na Região Metropolitana de Belém, o mês de março.

De acordo com Albuquerque et al. (2010), o regime pluviométrico é fortemente influenciado pelo deslocamento da ZCIT, que se encontra ao Sul do Pará durante o verão, o que torna o trimestre março, abril e maio e o trimestre dezembro, janeiro e fevereiro, mais chuvosos; enquanto que o trimestre setembro, outubro e novembro e o trimestre junho, julho e agosto, menos chuvosos.

A precipitação não é sinônimo de nebulosidade, mas estas estão bem correlacionadas. A explicação da distribuição da radiação solar pode ser alicerçada na distribuição das chuvas no Estado. No Norte do Pará, nota-se um elevado nível energético (valor médio de $473 \text{ MJ m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$) em todos os meses do ano. A radiação solar nesta localidade apresenta menor variação anual, logo a nebulosidade vigente condiciona a radiação solar na superfície. A nebulosidade é presente praticamente todo o ano, mas é maior nos meses de dezembro a abril, a radiação varia pouco, tendendo a ser ligeiramente menor nestes dois meses.

Na região Sul do Estado do Pará a situação é distinta: um notório regime hídrico menor (em relação ao norte) nos meses de maio a agosto. Por ser uma região de maior latitude, é de se esperar com a sazonalidade, menores valores da radiação solar global neste período (menor, porém, ainda considerados elevados por estarem em latitudes $< 10^\circ$). Porém, exatamente nos meses de menor radiação solar global (inverno) ocorrem regimes pluviométricos muito baixos, com cobertura de céu tendendo para o céu aberto. Esse fato permite valores energéticos elevados mesmo no inverno.

Pode-se observar a variação da radiação solar global por mesorregião no Estado do Pará na Tabela 03.

Tabela 03 – Acumulado médio mensal e anual da radiação solar global por mesorregião no Estado do Pará, em MJ m⁻²

Mesorregião	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Baixo Amazonas	503	414	410	436	467	468	519	581	571	595	507	500	5.971
Marajó	535	424	478	420	470	470	626	651	602	642	663	571	6.554
Nordeste Paraense	454	351	420	445	459	453	500	552	571	545	504	480	5.734
RMB	381	304	370	355	400	403	453	428	460	480	426	365	4.826
Sudeste Paraense	460	419	471	462	491	501	542	552	537	511	456	460	5.864
Sudoeste Paraense	410	362	425	421	414	430	438	505	454	443	420	387	5.109
Média Geral	457	379	429	423	450	454	513	545	532	536	496	460	5.676

O mês que apresentou, na média, maiores valores energéticos foi o mês de agosto, com média de 545 MJ m⁻², com o maior valor absoluto ocorrendo na mesorregião do Marajó no mês de novembro com 663 MJ m⁻². O mês com menor valor energético foi fevereiro, com 379 MJ m⁻², com menor valor absoluto ocorrendo na Região Metropolitana de Belém com 304 MJ m⁻². A média anual de radiação solar global do Estado do Pará é de 5.676 MJ m⁻².

Nota-se que a radiação solar, de fato, foi maior nos meses de menor precipitação, consequentemente, nos meses de menor nebulosidade. Entre os meses de julho e outubro a radiação solar global atingiu níveis superiores a 500 MJ m⁻², por outro lado, a precipitação durante estes meses foi, em média, de 54 mm mês⁻¹.

A temperatura e umidade relativa acompanham a radiação e a nebulosidade. As Figuras 04 e 05 mostram a variação espacial destas duas variáveis ao longo do ano no Estado do Pará, respectivamente. Nota-se que na região Norte do Estado as temperaturas foram mais elevadas ao longo do ano. Enquanto que na região Sul do Estado observa-se um aumento na temperatura com o declínio da nebulosidade de forma bem marcada.

Figura 04 – Valores médios mensais de temperatura do ar no Estado do Pará, em °C

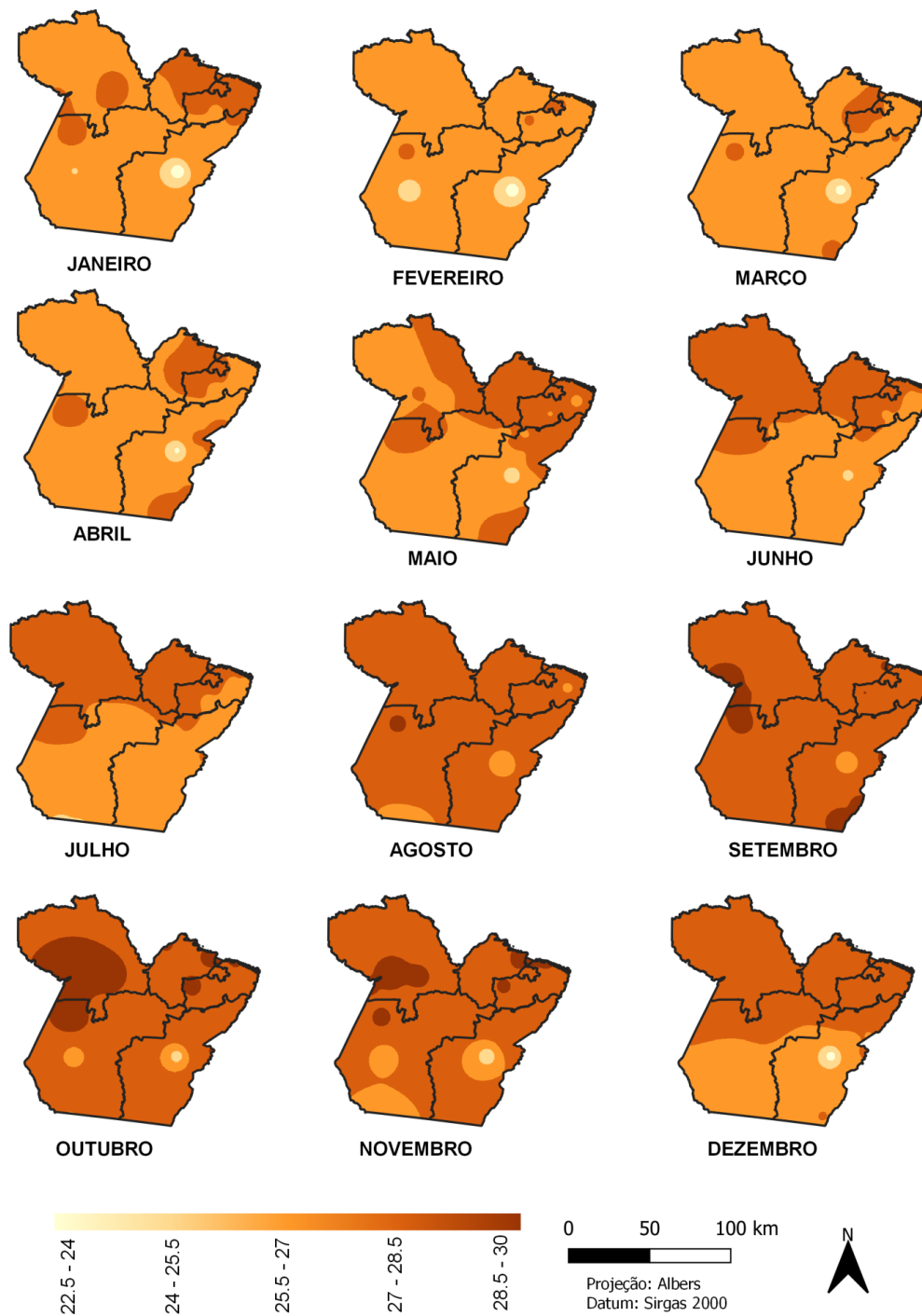
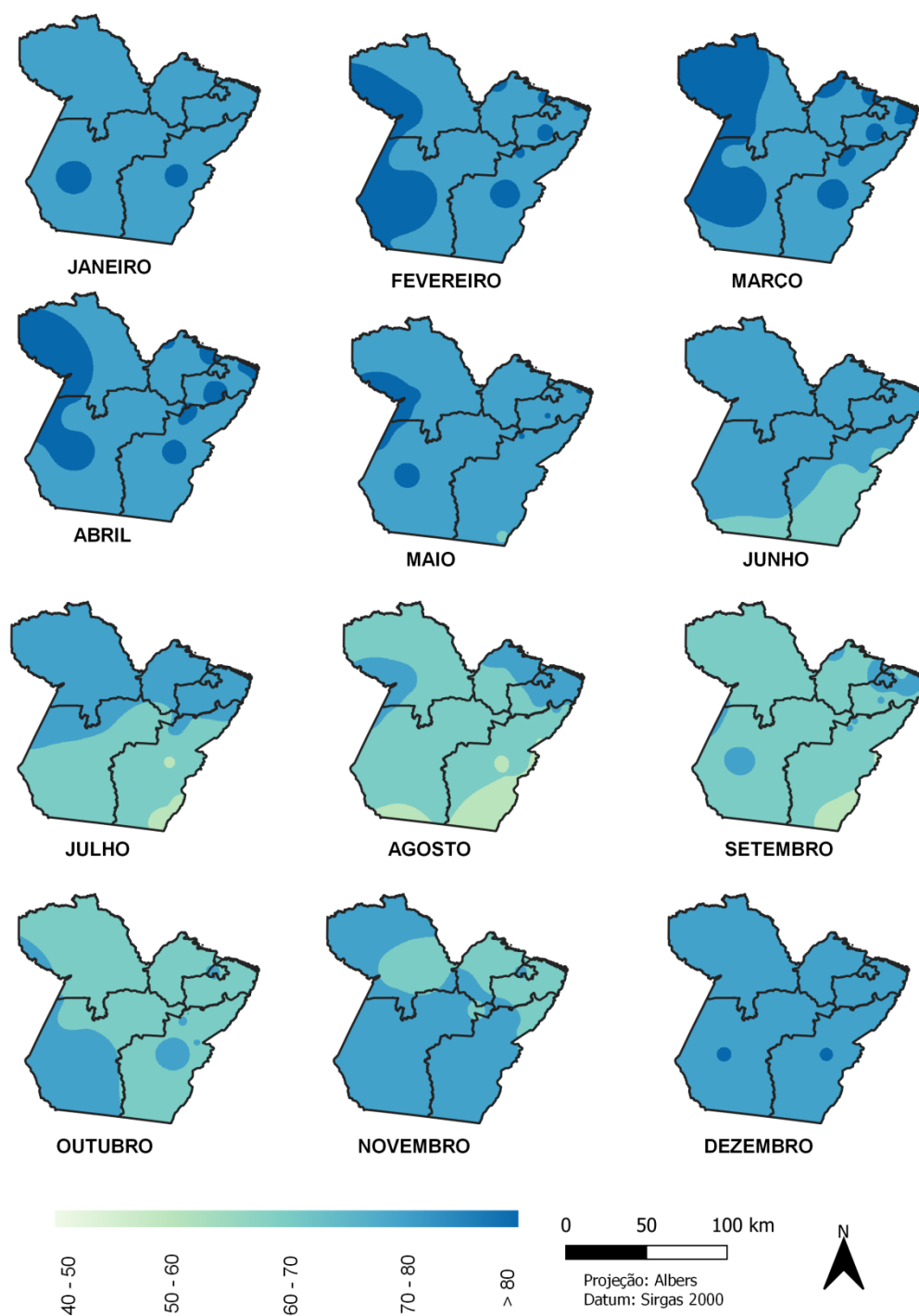


Figura 05 - Valores médios mensais de umidade relativa do ar no Estado do Pará, em %



A Tabela 04 apresenta os valores médios mensais da temperatura média do ar nas seis mesorregiões do Estado do Pará. Na média geral, o mês mais frio é fevereiro, com 26,6 °C, seguido por março e abril, com 26,8 e 26,9 °C, respectivamente.

Enquanto que os meses mais quentes são outubro, com 28,3°C, seguido por setembro e por novembro, ambos com média de 28,2°C.

Tabela 04 – Média mensal e geral da temperatura média do ar por mesorregião no Estado do Pará, em °C

Mesorregião	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Baixo Amazonas	27,0	26,4	26,4	26,8	27,0	27,1	27,0	27,8	28,4	28,6	28,5	27,4	27,4
Marajó	27,4	26,9	27,1	27,1	27,6	27,9	27,8	28,1	28,7	28,9	29,0	28,6	27,9
Nordeste Paraense	27,4	26,9	27,0	27,0	27,2	27,1	27,1	27,6	28,0	28,3	28,4	27,9	27,5
RMB	27,4	27,1	27,1	27,3	27,7	27,7	27,6	27,8	28,1	28,3	28,4	27,9	27,7
Sudeste Paraense	26,2	26,2	26,5	26,6	26,9	26,7	26,6	27,3	27,9	27,7	27,3	26,7	26,9
Sudoeste Paraense	26,5	26,3	26,5	26,9	26,9	26,9	27,2	28,0	28,0	28,0	27,7	27,1	27,2
Média Geral	27,0	26,6	26,8	26,9	27,2	27,2	27,2	27,8	28,2	28,3	28,2	27,6	27,4

Ao longo do ano, observa-se que os valores de temperatura média do ar são maiores quando ocorre menores volumes de precipitação, e consequentemente, maiores valores de radiação solar, e vice-versa.

Em relação as mesorregiões do Pará, o Marajó foi o que apresentou a maior média de temperatura do ar, de 27,9 °C, seguido pela Região Metropolitana de Belém, com média de 27,7°C. O Nordeste Paraense e o Baixo Amazonas apresentam médias bem próximas de 27,5 e 27,4°C, respectivamente. O Sudoeste e o Sudeste Paraense apresentaram as menores médias, de 27,2 e 26,9°C, respectivamente. A média geral de temperatura média do Estado do Pará foi de 27,4°C.

Na Tabela 05 são apresentadas as médias de umidade relativa média do ar para as cinco mesorregiões do Estado do Pará. Em média, o trimestre de agosto a outubro apresentou os menores valores de umidade relativa do ar, em torno de 69%, enquanto que, os quatro primeiros meses do ano apresentaram médias entre 76,7% e 79,6%.

Tabela 05 – Média mensal e geral da umidade relativa do ar por mesorregião no Estado do Pará, em %

Mesorregião	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Baixo Amazonas	75,3	78,9	80,2	79,2	78,4	75,3	73,1	69,0	67,9	67,3	68,3	73,2	73,8
Marajó	78,0	81,0	81,3	82,0	80,0	77,1	76,3	74,6	70,7	69,6	69,4	72,9	76,1
Nordeste Paraense	75,7	79,2	79,7	79,9	78,2	75,9	74,7	71,8	69,5	67,4	67,6	71,2	74,2
RMB	76,1	78,4	79,1	78,6	76,7	75,4	74,0	73,1	72,1	70,8	69,9	72,9	74,8
Sudeste Paraense	77,7	78,4	78,7	78,4	75,9	69,9	64,9	61,9	64,5	68,7	72,9	75,4	72,3
Sudoeste Paraense	77,3	79,2	78,6	79,3	79,0	74,4	69,2	66,6	69,3	71,0	72,9	76,1	74,4
Média Geral	76,7	79,2	79,6	79,6	78,0	74,6	72,0	69,5	69,0	69,1	70,2	73,6	74,3

As mesorregiões Marajó e Região Metropolitana de Belém apresentaram as maiores médias de umidade relativa do ar, de 76,1% e 74,8%, seguidas pelo Sudoeste Paraense, com 74,4%, e pelo Nordeste Paraense, com 74,2%. Os menores valores de umidade relativa do ar média foram da mesorregião Baixo Amazonas e Sudeste Paraense, que apresentam 73,8% e 72,3%, respectivamente. A média geral de umidade relativa do ar do Estado do Pará foi de 74,3%.

Assim como ocorreu com a temperatura média do ar, houve correlação entre a umidade relativa do ar e a precipitação e entre a radiação solar global. Notadamente, os maiores valores médios de umidade relativa ocorrem em meses em que a radiação foi menor e a precipitação foi maior, e vice-versa, o que é explicado pela variação de nebulosidade.

Da mesma forma como ocorreu com a precipitação, a diminuição da umidade relativa inicia-se no Sul do Estado do Pará em direção ao Norte, até atingir seu valor mínimo em setembro, com exceção da mesorregião Marajó e Região Metropolitana de Belém.

Na Figura 06 a seguir, está apresentado o comportamento das médias dos acumulados mensais de ET_0 , em mm, estimados por Penman-Monteith, no Pará.

Figura 06 - Valores de evapotranspiração de referência no Estado do Pará, em mm, estimado pela equação de Penman-Monteith



Pode-se observar que o mês de fevereiro apresentou os menores valores de ET_0 em uma grande área territorial do Estado, envolvendo todas as mesorregiões. Em março ocorre o aumento, mais acentuado no litoral da mesorregião Marajó e mais ao

Sudeste do Estado. A partir de agosto, os valores de ET_o aumentam e quase todo o território estadual, o que permanece até o mês de setembro. Em outubro inicia-se a redução da ET_o , chegando em dezembro com alguns locais pontuais de valores destoantes.

Como a umidade relativa e a temperatura do ar, apesar de variarem ao longo do ano, não o fazem de forma extrema, a variável que mais explica a variação de ET_o ao longo do ano no Estado do Pará é a radiação solar global e a nebulosidade, associada a precipitação.

A Tabela 06 apresenta os valores médios do acumulado mensal e total da ET_o por mesorregião do Estado do Pará. Na média geral do Estado, o mês de maior evapotranspiração foi outubro, com 105 mm mês^{-1} . O segundo semestre do ano é marcado por valores de ET_o mensais maiores. Os meses de agosto a novembro apresentaram as maiores médias, entre 105 e 98 mm mês^{-1} . Por outro lado, o primeiro semestre apresenta valores de ET_o mensal mais baixos, sendo o mês de fevereiro o de menor evapotranspiração, com 77 mm mês^{-1} , seguido por março e abril, com 87 e 86 mm mês^{-1} , respectivamente.

Tabela 06 – Acumulado médio mensal e anual da evapotranspiração de referência por mesorregião do Estado do Pará, em mm, estimado pela equação de Penman-Monteith

Mesorregião	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
Baixo Amazonas	101	83	82	88	91	89	98	112	112	118	100	100	1172
Marajó	105	85	95	84	92	89	118	121	112	120	124	109	1256
Nordeste Paraense	91	71	85	89	90	87	95	104	109	105	97	94	1116
RMB	80	65	79	75	83	80	90	86	93	97	87	76	990
Sudeste Paraense	93	85	95	92	94	92	98	104	105	102	92	93	1145
Sudoeste Paraense	84	74	87	85	82	82	83	99	92	90	87	80	1026
Média Geral	92	77	87	86	89	87	97	104	104	105	98	92	1117

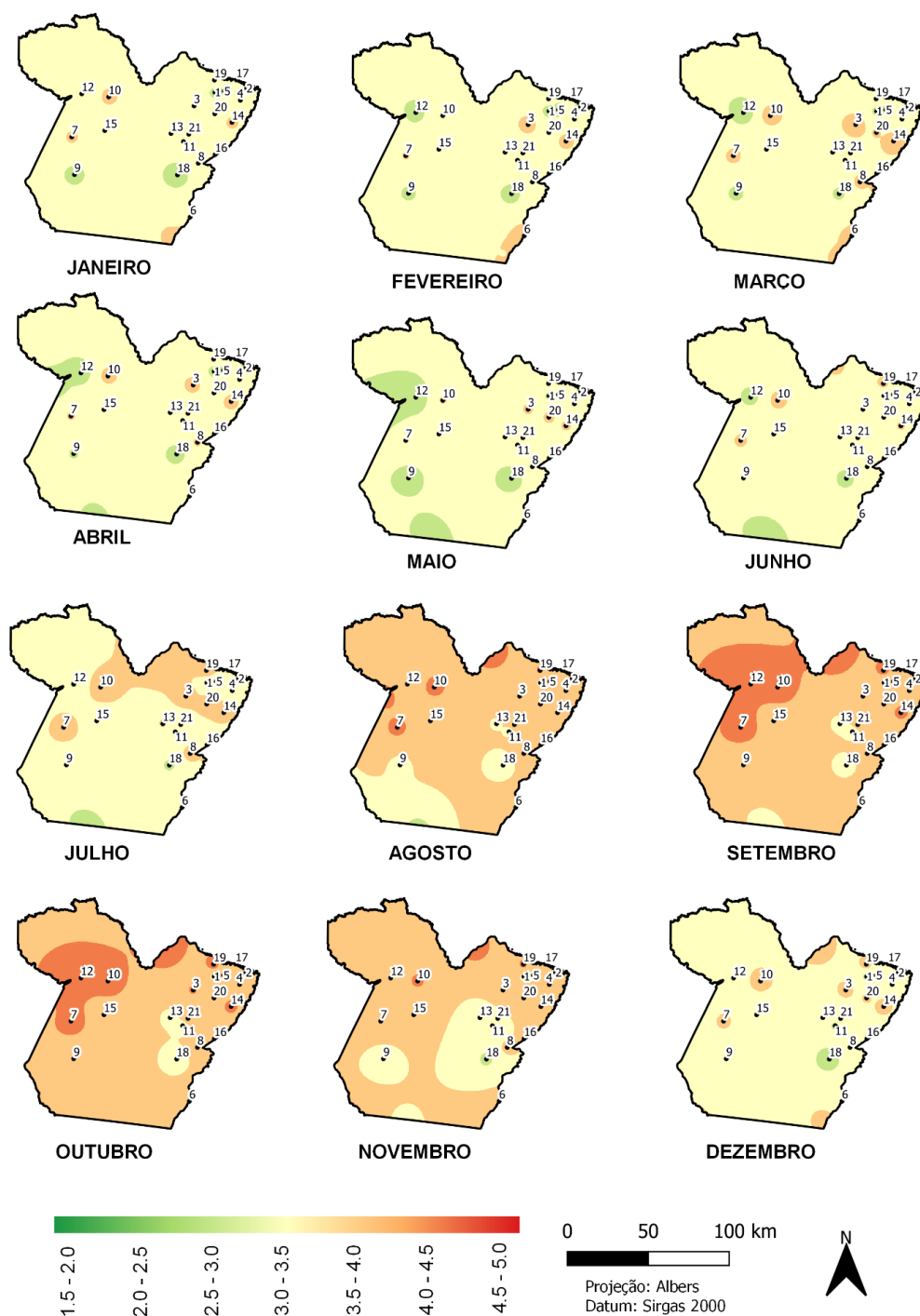
Em relação as mesorregiões do Estado do Pará, tem-se que a Região Metropolitana de Belém se destacou como a que apresentou a menor evapotranspiração acumulada, com média de 990 mm ano^{-1} , seguida pelo Sudoeste Nordeste Paraense, com médias de 1.026 e $1.116 \text{ mm ano}^{-1}$, respectivamente.

A mesorregião Marajó foi a que apresentou a maior média anual de evapotranspiração, igual a $1.256 \text{ mm ano}^{-1}$, seguida pela mesorregião Baixo

Amazonas e Sudeste Paraense, com médias anuais de 1.172 e 1.145 mm ano⁻¹. A média geral de ET_o anual do Estado do Pará foi de 1.117 mm ano⁻¹.

Para a melhor compreensão da ET_o e como forma de ajudar no manejo diário da gestão de água nas propriedades paraenses, apresenta-se, na Figura 07, o mapa interpolação de ET_o em escala diária do Estado do Pará para cada mês do ano, obtida a partir da escala mensal dividida pelo número de dias do mês em questão.

Figura 07 - Interpolação da evapotranspiração diária das estações agrometeorológicas do Estado do Pará, em mm dia⁻¹



Na Tabela 07 são apresentados os valores de ET_0 na escala diária em cada um dos 12 meses do ano nas localidades estudadas. Pode-se observar que nos primeiros meses do ano os valores de ET_0 são mais baixos, aumentando a partir de junho, com

os maiores valores se concentrando nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro na maioria das estações do Estado do Pará.

Tabela 07 - Evapotranspiração de referência diária das estações meteorológicas do Estado do Pará

Estações	Jan	Fev	Mar	Abr	Maio	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Belém-PA	2,8	2,8	2,9	2,8	2,9	3,1	3,2	3,4	3,4	3,4	3,4	2,9	3,1
Bragança-PA	3,1	2,9	3,0	2,8	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	3,4	3,4	3,1	3,2
Cametá-PA	3,5	3,8	3,8	3,7	3,6	3,5	3,6	3,9	4,0	4,1	3,9	3,7	3,7
Capitão-Poço-PA	3,3	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,8	3,9	3,9	3,7	3,3	3,5
Castanhal-PA	2,9	2,8	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,6	3,5	3,4	3,0	3,2
C. do Araguaia-PA	3,5	3,7	3,6	3,4	3,5	3,4	3,5	3,9	3,9	3,8	3,6	3,5	3,6
Itaituba-PA	3,6	3,5	3,6	3,5	3,5	3,6	3,8	4,2	4,4	4,3	3,9	3,6	3,8
Marabá-PA	3,3	3,4	3,6	3,6	3,5	3,5	3,6	3,9	4,0	3,7	3,6	3,4	3,6
Mina Palito-PA	2,9	2,9	2,9	3,0	2,9	3,1	3,3	3,4	3,6	3,6	3,8	3,2	3,2
Monte Alegre-PA	3,6	3,5	3,7	3,6	3,5	3,6	3,8	4,2	4,3	4,3	4,1	3,6	3,8
N. Repartimento-PA	3,1	3,3	3,4	3,3	3,2	3,1	3,2	3,4	3,3	3,2	3,1	2,9	3,2
Óbidos-PA	3,1	2,8	2,7	2,8	2,7	2,9	3,0	3,6	4,1	4,2	3,8	3,4	3,2
Pacajá-PA	3,0	3,2	3,3	3,2	3,2	3,3	3,5	3,4	3,3	3,3	3,2	3,1	3,3
Paragominas-PA	3,6	3,7	3,8	3,7	3,6	3,5	3,7	3,9	4,1	4,2	4,0	3,7	3,8
Placas-PA	3,1	3,2	3,2	3,2	3,1	3,3	3,3	3,6	3,7	3,7	3,5	3,2	3,3
Rondon do Pará-PA	3,2	3,3	3,5	3,4	3,4	3,4	3,5	3,7	3,8	3,8	3,6	3,3	3,5
Salinópolis-PA	3,1	3,1	3,2	3,1	3,4	3,5	3,5	3,8	3,9	3,8	3,6	3,3	3,4
Serra dos Carajás-PA	2,6	2,7	2,9	2,7	2,5	2,8	2,9	3,0	3,1	3,0	2,8	2,6	2,8
Soure-PA	3,4	3,3	3,4	3,3	3,5	3,6	3,8	4,1	4,3	4,3	4,1	3,7	3,7
Tomé-Açu-PA	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,5	3,6	3,9	3,9	3,9	3,8	3,6	3,6
Tucuruí-PA	3,2	3,4	3,5	3,3	3,2	3,3	3,4	3,6	3,7	3,8	3,5	3,3	3,4
Média	3,2	3,2	3,3	3,2	3,2	3,3	3,4	3,7	3,8	3,8	3,6	3,3	3,4

Acompanhando o comportamento da ET_0 mensal, a ET_0 diária apresentou as maiores médias mensais entre os meses de agosto a novembro, esses quatro meses apresentaram média entorno de $3,7 \text{ mm dia}^{-1}$. Enquanto que os meses de janeiro a junho apresentaram em média valores menores de ET_0 diária, cerca de $3,3 \text{ mm dia}^{-1}$.

Os menores valores de ET_0 estão associados aos maiores índices de chuva no primeiro semestre, conforme discutido anteriormente, que provocam o aumento da umidade relativa do ar e da nebulosidade. Esse comportamento foi observado no Estado do Acre, nas cidades de Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul, onde valor máximo de ET_0 mensal ocorreu na transição da estação chuvosa para a menos chuvosa. No entanto, esta região ocorre reduções na temperatura e umidade do ar durante os meses de maio a junho devido a entrada de frentes frias, o que resulta em valores de ET_0 mais baixos neste período (SILVA et al., 2015).

Ainda de acordo com SILVA et al. (2015), em regiões de floresta nativa localizadas entre as latitudes 7 e 10°S, o padrão sazonal da temperatura do ar, da radiação solar e da precipitação são os principais fatores que influenciam o comportamento da ET_o .

As estações de Paragominas, Itaituba, Cametá e Soure apresentaram as maiores médias diárias gerais de ET_o , de 3,8 mm dia⁻¹. As menores médias foram das estações Serra dos Carajás, Belém, Castanhal, Bragança, Novo Repartimento, Mina Palito e Óbidos, de 3,1 mm dia⁻¹.

Para que o entendimento seja melhor em relação ao déficit e excedente hídrico no Estado do Pará, foi elaborado o balanço hídrico, utilizando a planilha desenvolvida por Rolim et al. (1998). A CAD utilizada foi de 100 mm.

Na tabela 08 apresenta-se o resumo do balanço hídrico de forma de totais anuais.

Tabela 08 - Resumo do balanço hídrico normal das estações meteorológicas do Estado do Pará

Estações	P (mm)	Eto (mm)	DEF¹ (mm)	EXC² (mm)
Belém-PA	2971	1082	0	1890
Bragança-PA	1504	1102	366	768
Cametá-PA	1923	1156	214	980
Capitão-Poço-PA	1631	1197	159	594
Castanhal-PA	1260	898	82	444
C. do Araguaia-PA	1355	1201	305	460
Itaituba-PA	1605	1108	124	622
Marabá-PA	1381	1180	306	506
Mina Palito-PA	1713	1059	148	802
Monte Alegre-PA	1650	1314	232	567
N. Repartimento-PA	1445	1034	210	621
Óbidos-PA	1448	1059	180	570
Pacajá-PA	1485	911	173	748
Paragominas-PA	1304	1284	429	450
Placas-PA	1616	1143	169	642
Rondon do Pará-PA	1542	1204	285	623
Salinópolis-PA	1893	1136	301	1058
Santana do Araguaia-PA	1772	1200	290	862
Serra dos Carajás-PA	1628	897	161	892
Soure-PA	2502	1256	273	1519
Tomé-Açu-PA	2051	990	109	1170
Tucuruí-PA	1766	1161	242	848
MÉDIA	1702	1117	216	802

¹Deficiência; ²Excedente

Nota-se que apenas a estação de Belém não apresentou valores de déficit hídrico. A média de déficit foi de 216 mm. Cerca de 36% das localidades apresentaram entre 100 a 200 mm, 32% apresentaram entre 200 a 300 mm e 18% apresentaram deficiência hídrica entre 300 a 400 mm. Apenas a estação de Paragominas atingiu valores de déficit hídrico acima de 400 mm.

Quanto ao excedente hídrico, a média do Estado do Pará foi de 802 mm. As estações de Belém, de Soure, Tomé-açu e de Salinópolis apresentaram excedentes maiores do que 1000 mm. Enquanto que em Castanhal, Paragominas e Conceição do Araguaia ocorreram as menores médias de excedente em torno de 440 a 460 mm.

1.4 CONCLUSÕES

Em geral, no Estado do Pará ocorrem reduções no índice de precipitação durante o segundo semestre, marcadamente no trimestre agosto, setembro e outubro. Durante o período mais seco, ocorre déficit hídrico, aumento da temperatura do ar e maiores índices de radiação devido a menor nebulosidade.

Em contrapartida, durante o verão ocorrem grandes índices de precipitação no Estado, com destaque para o mês de março, considerado o mais chuvoso, em média. Durante a estação de verão, devido à alta nebulosidade, ocorre redução da temperatura, aumento da umidade e redução da radiação solar global que atinge a superfície do território paraense.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. F.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, M. C. F.; SOUZA JÚNIOR, J. A. Precipitação nas mesorregiões do Estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 6, n. 6, p. 151-168, 2010.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 297p.
- LOPES, M. N. G.; SOUZA, E. B.; FERREIRA, D. B. S. Climatologia Regional da precipitação no Estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s.l], v.12, p. 84-102, 2013.
- MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2005.
- REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: Manole, 1990. 188p.
- REICHARDT, K. **A água na produção agrícola**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 119p.
- ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente excel para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.1, p. 133-137, 1998.
- SANTOS, T. A.; VICENTE, M. R.; LEITE, C. V.; SANTOS, R. M.; SOUZA, J. L. T. Zonas homogêneas de evapotranspiração de referência para o norte e nordeste de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.13, n.4, p.3540-3555, 2019.
- SILVA, H. J. F.; LUCIO, P. S.; BROWN, I. F. Análise mensal, sazonal e interanual da evapotranspiração de referência para o sudoeste da Amazônia, Acre, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 8, n. 6, p. 1711-1729, 2015.
- SILVA JUNIOR, J. F. **Evapotranspiração de referência como base para o manejo sustentável da irrigação no Noroeste Paulista**. 2017. 82f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu.

VILLA NOVA, N. A.; SALATI, E.; MATSUI, E. Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. **Acta amazônica**, v. 6, n. 2, p. 215-228, 1976.

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO E AJUSTE DE EQUAÇÕES EMPÍRICAS BASEADAS EM TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO ESTADO DO PARÁ

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar as equações de Thornthwaite e de Hargreaves e Samani no Estado do Pará, e propor ajustes locais de seus parâmetros em relação a equação de Penman-Monteith. O ajuste foi feito por meio do coeficiente de desempenho elaborado por Sentelhas e Camargo (1997). Observou-se que temperatura do ar e radiação solar foram os componentes que mais contribuíram para justificar as variações ao longo do ano da evapotranspiração de referência. A equação de Thornthwaite apresentou desempenho insatisfatório na maioria das localidades estudadas, mesmo após a tentativa de ajuste local. Enquanto que a equação de Hargreaves e Samani, na sua forma original, apresentou bom desempenho, que foi melhorado ainda mais com ajuste local. Recomenda-se o uso da equação de Hargreaves e Samani original ou ajustada localmente para o cálculo da ET_0 no Estado do Pará, em casos em que a utilização da equação de Penman-Monteith é inviável. Palavras-chave: Thornthwaite. Hargreaves-Samani. Clima úmido. Penman-Monteith.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the Thornthwaite and Hargreaves and Samani equations in the State of Pará, and to propose local adjustments of their parameters in relation to the Penman-Monteith equation. The adjustment was made using the performance coefficient prepared by Sentelhas and Camargo (1997). It was observed that air temperature and solar radiation were the components that most contributed to justify the variations throughout the year of the reference evapotranspiration. The Thornthwaite equation showed an unsatisfactory performance in most of the studied locations, even after attempting a local adjustment. While the Hargreaves and Samani equation, in its original form, performed well, which was further improved with local adjustment. The use of the original or locally adjusted Hargreaves and Samani equation is recommended for the calculation of ET_0 in the State of Pará, in cases where the use of the Penman-Monteith equation is not feasible.

Palavras-chave: Thornthwaite. Hargreaves-Samani. Humid climate. Penman-Monteith.

2.1 INTRODUÇÃO

A ET_0 é definida como a mudança de estado físico da água da forma líquida para a gasosa, através de uma superfície natural gramada, padrão, sem restrição hídrica. Em situações quaisquer de umidade e de cobertura vegetal, chama-se de evapotranspiração real ou atual (ET_a) (CAMARGO; CAMARGO, 2000).

Desde a introdução do conceito de evapotranspiração foram desenvolvidos métodos por diversos autores para a estimativa da ET_0 ao longo dos anos, com estimativas baseadas, sobretudo, na temperatura e radiação solar. No entanto, a FAO (Food and Agriculture Organization), adotou a equação desenvolvida por Penman-Monteith como padrão, devido a utilização de muitas variáveis biofísicas de entrada, tornando-a referência mundial e utilizada para comparar outros métodos de estimativa de ET_0 (ALLEN et al., 1998)

Exatamente por isso, a utilização da equação de Penman-Monteith se torna mais difícil, pois, nem sempre as variáveis de entrada estão disponíveis. Além disso, diferente das outras regiões do País, a Região Norte como um todo possui poucos pontos de monitoramento climatológico devido ao acesso restrito em algumas localidades (VILA NOVA et al., 1976).

Equações mais simples, baseadas em temperatura e em radiação solar, por outro lado, são mais fáceis de serem implementadas, são exemplos as equações de Thornthwaite e Hargreaves e Samani (CAMARGO; CAMARGO, 2000), que apesar de não terem o mesmo desempenho da equação de Penman-Monteith, este pode ser melhorado através de ajustes locais.

Esforços neste sentido têm sido feitos como para o Estado do Ceará (LIMA JUNIOR et al., 2016), para o Noroeste Paulista (CONCEIÇÃO, 2013), na Bahia (SANTIAGO et al., 2016), em Sergipe (BARROS et al., 2017), no Espírito Santo (ZANETTI et al., 2018), entre outros trabalhos realizados com ajustes locais para cidades e estados do Brasil.

Tendo a Amazônia um papel importante na climatologia do mundo, o objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento das equações de Thornthwaite e de Hargreaves e Samani no Estado do Pará, e propor ajustes de seus parâmetros em

relação a equação de Penman-Monteith. Estudos desta natureza são essenciais para o planejamento agrícola e manejo dos recursos hídricos da Região Amazônica.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Obtenção e análise de dados

No estudo foram utilizados dados oriundos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de 22 estações localizadas no Estado do Pará, conforme listadas da Tabela 09. Foram disponibilizados pelo INMET dados horários de: temperatura do ar máxima, mínima e média; umidade relativa do ar máxima, mínima e média; radiação solar global; velocidade do vento a 10 metros de altura e precipitação.

Tabela 09 - Estações automáticas do Estado do Pará utilizadas no estudo

Estações	Pontos	Latitude	Longitude	Atitude (m)	Ano de abertura
BELÉM	1	-1,4112	-48,439512	21,00	2003
BRAGANÇA	2	-1,0473	-46,785790	41,00	2008
CAMETÁ	3	-2,2397	-49,499827	10,00	2008
CAPITÃO POÇO	4	-1,7348	-47,057500	79,00	2011
CASTANHAL	5	-1,3009	-47,947967	47,00	2003
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA	6	-8,3036	-49,282770	176,00	2008
ITAITUBA	7	-4,2770	-55,993087	24,00	2008
MARABÁ	8	-5,3664	-49,051166	117,00	2009
MINA PALITO	9	-6,3201	-55,787783	260,00	2010
MONTE ALEGRE	10	-2,0001	-54,076479	101,00	2012
NOVO REPARTIMENTO	11	-4,2440	-49,939308	101,00	2008
ÓBIDOS	12	-1,8808	-55,519856	90,00	2012
PACAJÁ	13	-3,8437	-50,638098	89,00	2008
PARAGOMINAS	14	-2,9904	-47,407833	113,00	2007
PLACAS	15	-3,8640	-54,216416	100,00	2008
RONDON DO PARÁ	16	-4,8275	-48,173556	203,00	2008
SALINÓPOLIS	17	-0,6189	-47,356596	23,00	2008
SANTANA DO ARAGUAIA	18	-9,3386	-50,350280	177,00	2008
SERRA DOS CARAJÁS	19	-6,0774	-50,142265	707,00	2008
SOURE	20	-0,7278	-48,515795	13,00	2008
TOMÉ-AÇU	21	-2,5926	-48,360585	43,00	2007
TUCURUÍ	22	-3,8228	-49,674956	138,00	2008

Os dados horários foram convertidos em dados diários através da linguagem R. Foram removidos dias com dados faltantes e com a radiação solar global abaixo de $2,0 \text{ MJ dia}^{-1}$ ou maior do que a radiação solar extraterreste (R_a).

2.2.2 Métodos de estimativa de ET_o

A evapotranspiração foi calculada através da equação de Penman-Monteith considerada o método padrão e os demais métodos de estima da ET_o foram: Thornthwaite e Hargreaves e Samani, de acordo com as equações 17, 18 e 19.

$$ET_{o(TW1)} = a \left(\frac{b T_{med}}{I} \right)^x \quad 0 < T_{med} < 26,5^\circ\text{C} \quad (17)$$

$$ET_{o(TW2)} = c + d T_{med} - e T_{med}^2 \quad T_{med} \geq 26,5^\circ\text{C} \quad (18)$$

$$ET_{o(HS)} = f R_s (g + T_{med}) \quad (19)$$

em que:

$ET_{o(TW1)}$ – evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite para temperatura média do ar entre 0 e 26,5°C; $ET_{o(TW2)}$ - evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite para temperatura média do ar maior do que 26,5°C; a , b , c ... g – os parâmetros que foram ajustados; T_{med} – temperatura média do ar; e R_s – radiação solar global.

2.2.3 Análise do desempenho das equações de estimativa da ET_o

O comportamento das equações foi quantificado através do coeficiente de correlação (r , equação 20), do coeficiente de exatidão (d , equação 21), e do coeficiente de desempenho (c , equação 22). A quantificação do erro foi obtida através da raiz quadrada do erro médio (RQEM).

$$r = \sqrt{\frac{\sum_i^n \frac{(P_i - O_i)^2}{N}}{N}} \quad (20)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_i^n (P_i - O_i)^2}{\sum_i^n (|P_i - O_i| + |O_i - P_i|)^2} \quad (21)$$

$$c = r \cdot d \quad (22)$$

em que:

r – coeficiente de correlação; d – coeficiente de exatidão; c – coeficiente de desempenho; P_i – dados de ET_o estimados por Penman-Monteith; O – dados de ET_o estimados por outras equações; N – número de observações.

O coeficiente de desempenho foi avaliado conforme a Tabela 10:

Tabela 10 - Valores do coeficiente de desempenho de acordo com Camargo e Sentelhas (1997)

Valor do coeficiente "c"	Desempenho
> 90,0	Ótimo
0,81 a 90,0	Muito bom
0,71 a 0,80	Bom
0,51 a 0,70	Mediano
0,41 a 0,50	Sofrível
0,31 a 0,40	Mau
$\leq 0,30$	Péssimo

2.2.4 Ajuste das equações de estimativa da ET_o

Os parâmetros das equações de estimativa da ET_o foram ajustados com base no coeficiente de desempenho (c), utilizando a ferramenta Solver do Excel®, visando aumentá-lo, o que consequentemente melhorou os coeficientes de correlação e/ou exatidão. Os dados utilizados para o ajuste das equações foram os dos anos ímpares.

2.2.5 Validação

Para se validar os dados são necessários dois conjuntos distintos de dados: parte dos dados entra na modelagem; outra parte dos dados não é utilizada no modelo: serve para que se valide o modelo. Com o modelo criado, estima-se seu resultado e compara-se este resultado estimado com os dados que não entraram na modelagem. O quanto mais próximo os dois estiverem, melhor foi o desempenho do modelo gerado.

Pela heterogeneidade dos dados quanto à sua disponibilização temporal (entre as 22 estações há muita variação quanto ao tamanho da série disponível), optou-se por um modelo de separação de dados conveniente neste caso: utilizar anos ímpares na

modelagem e anos pares na validação. Desta maneira dois conjuntos de dados distintos são criados a partir de apenas um.

A metodologia mais adequada seria ter uma longa série medida continuamente para gerar dados para o modelo, e posteriormente se ter outra série contínua para a validação. Não houve possibilidade de se usar essa opção neste trabalho devido a algumas estações terem sua série temporal muito limitada.

Os mesmos coeficientes utilizados para avaliar as equações originais foram utilizados na avaliação das equações ajustadas.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.3.1 Avaliação e ajuste local da equação de Thornthwaite

O desempenho da equação com os parâmetros originais de Thornthwaite está apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Análise estatística da equação de Thornthwaite aplicada nas estações do Estado do Pará com base nos coeficientes de correlação (r), exatidão (d) e desempenho (c)

ESTAÇÃO	r	d	c	REQM
BELÉM	0,63	0,33	0,20	1,48
BRAGANÇA	0,42	0,50	0,21	1,07
CAMETÁ	0,24	0,43	0,11	1,04
CAPITÃO POÇO	0,61	0,67	0,41	0,47
CASTANHAL	0,72	0,48	0,35	1,15
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA	0,33	0,54	0,18	0,61
ITAITUBA	0,90	0,63	0,57	0,88
MARABÁ	0,84	0,67	0,56	0,71
MINA PALITO	0,78	0,59	0,46	0,75
MONTE ALEGRE	0,89	0,75	0,66	0,47
NOVO REPARTIMENTO	-0,03	0,41	-0,01	1,33
ÓBIDOS	0,75	0,46	0,35	1,12
PACAJÁ	0,22	0,37	0,08	1,16
PARAGOMINAS	0,60	0,60	0,36	0,58
PLACAS	0,58	0,39	0,23	1,06
RONDON DO PARÁ	0,49	0,59	0,29	0,61
SALINÓPOLIS	0,72	0,60	0,44	0,77
SANTANA DO ARAGUAIA	0,44	0,52	0,23	0,71
SERRA DOS CARAJÁS	0,93	0,80	0,74	0,60
SOURE	0,89	0,65	0,58	0,66
TOMÉ-AÇU	0,67	0,47	0,32	0,73
TUCURUÍ	0,62	0,44	0,27	1,00

Pode-se observar que houve boa correlação para as estações de Serra dos Carajás ($r=0,93$), Itaituba ($r=0,90$), Monte Alegre ($r=0,89$) e Soure ($r=0,89$), que apresentaram valor de “r” próximo a 1. Também houve correlação considerada “forte” nas estações de Marabá ($r=0,84$), Mina Palito ($r=0,78$), Óbidos ($r=0,75$), Salinópolis ($r=0,72$) e Castanhal ($r=0,72$).

Nas estações de Conceição do Araguaia ($r=0,33$), Cametá ($r=0,24$), Pacajá ($r=0,22$) e Novo Repartimento ($r=-0,03$) apresentaram coeficientes de correlação considerados “fracos”. As demais estações (40,9%) apresentaram valores de “r” classificados como “moderado”.

Quanto ao índice de exatidão (d), os maiores valores foram observados nas estações de Serra dos Carajás ($d=0,80$) e Monte Alegre ($d=0,75$). Em torno de 77,3% das localidades estudadas apresentaram valores de “d” entre 0,70 a 0,40. Placas

($d=0,39$), Pacajá ($d=0,37$) e Belém ($d=0,33$) apresentaram índice de exatidão abaixo de 0,40.

Nenhuma localidade apresentou coeficiente de desempenho (c) considerado “ótimo” ou “muito bom”. De fato, cerca de 77,3% das localidades apresentaram valores de “ c ” classificados como “péssimo”, “mau” ou “sofrível”. Quatro estações apresentaram coeficiente “ c ” classificados como “mediano”, sendo elas: Monte Alegre ($c=0,66$), Soure ($c=0,58$), Itaituba ($c=0,57$) e Marabá ($c=0,56$). Apenas a estação de Serra dos Carajás ($c=0,74$) apresentou valor de “ c ” classificado como “bom”.

Em relação à Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), houve uma variação de 0,47 a 1,48 mm dia⁻¹, com destaque de Belém (REQM=1,48), Novo Repartimento (REQM=1,33) com os maiores valores e Monte Alegre (REQM=0,47) e Capitão-Poço (REQM=0,47) com os menores valores.

A aplicação da equação de Thornthwaite foi desenvolvida para clima úmido, porém, observou-se seu desempenho ruim neste trabalho. Souza e Sousa (2020) correlacionaram oito equações de ET_o à equação de Penman-Monteith em Rio Branco – AC, dentre elas a equação de Thornthwaite que apresentou coeficiente “ c ” igual a 0,47, classificado como “mau”. O mesmo ocorreu em Boa Vista – RR, em que o desempenho também de Thornthwaite foi classificado como “mau” ($c=45$) (ARAÚJO et al., 2007). Estes resultados mostram que a temperatura do ar sozinha não é capaz de justificar as variações da ET_o , sendo necessário para a região de estudo a utilização de mais componentes de entrada.

Em São Paulo, no município de Jacupiranga, a equação de Thornthwaite subestimou a ET_o , em relação os valores obtidos com Penman-Monteith, com baixos erros no período mais chuvoso e com erros maiores no período mais seco (BORGES; MENDIONDO, 2007)

Foi feito o ajuste local do método de Thornthwaite utilizando a temperatura efetiva sugerida por Camargo e com a calibração dos parâmetros da equação original. Os valores obtidos da análise estatística estão descritos na Tabela 12, o resumo do desempenho em relação ao coeficiente “ c ” das equações originais e ajustadas na Tabela 13, e os parâmetros ajustados na Tabela 14.

Tabela 12 – Análise estatística da equação de Thornthwaite ajustada localmente para as estações do Estado do Pará

ESTAÇÃO	r	d	c	REQM
BELÉM	0,79	0,83	0,66	0,26
BRAGANÇA	0,51	0,73	0,37	0,73
CAMETÁ	0,15	0,46	0,07	1,04
CAPITÃO POÇO	0,90	0,82	0,86	0,22
CASTANHAL	0,83	0,88	0,73	0,37
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA	0,68	0,72	0,49	0,59
ITAITUBA	0,90	0,95	0,86	0,28
MARABÁ	0,89	0,94	0,83	0,31
MINA PALITO	0,81	0,84	0,68	0,43
MONTE ALEGRE	0,93	0,97	0,90	0,24
NOVO REPARTIMENTO	0,19	0,48	0,09	0,90
ÓBIDOS	0,81	0,89	0,72	0,31
PACAJÁ	0,45	0,64	0,28	0,44
PARAGOMINAS	0,70	0,82	0,57	0,35
PLACAS	0,83	0,90	0,74	0,25
RONDON DO PARÁ	0,57	0,71	0,41	0,52
SALINÓPOLIS	0,49	0,68	0,33	0,88
SANTANA DO ARAGUAIA	0,41	0,41	0,17	1,15
SERRA DOS CARAJÁS	0,86	0,91	0,78	0,43
SOURE	0,68	0,78	0,52	0,56
TOMÉ-AÇU	0,83	0,91	0,76	0,19
TUCURUÍ	0,59	0,76	0,45	0,33

Tabela 13 – Resumo do desempenho em relação ao coeficiente “c” da equação de Thornthwaite original e ajustada localmente para as estações do Estado do Pará

Estação	Original		Ajustada	
	c	Classificação	c	Classificação
Belém	0,20	Péssimo	0,66	Mediano
Bragança	0,21	Péssimo	0,37	Mau
Cametá	0,11	Péssimo	0,07	Péssimo
Capitão Poço	0,41	Sufrível	0,86	Muito Bom
Castanhal	0,35	Mau	0,73	Bom
Conceição do Araguaia	0,18	Péssimo	0,49	Sufrível
Itaituba	0,57	Mediano	0,86	Muito Bom
Marabá	0,56	Mediano	0,83	Muito Bom
Mina Palito	0,46	Sufrível	0,68	Mediano
Monte Alegre	0,66	Mediano	0,90	Muito Bom
Novo Repartimento	-0,01	Péssimo	0,09	Péssimo
Óbidos	0,35	Mau	0,72	Bom
Pacajá	0,08	Péssimo	0,28	Péssimo
Paragominas	0,36	Mau	0,57	Mediano
Placas	0,23	Péssimo	0,74	Bom
Rondon do Pará	0,29	Péssimo	0,41	Sufrível
Salinópolis	0,44	Sufrível	0,33	Mau
Santana do Araguaia	0,23	Péssimo	0,17	Péssimo
Serra dos Carajás	0,74	Bom	0,78	Bom
Soure	0,58	Mediano	0,52	Mediano
Tomé-açu	0,32	Mau	0,76	Bom
Tucuruí	0,27	Péssimo	0,45	Sufrível

Tabela 14 – Parâmetros ajustados localmente da equação de Thornthwaite para as estações do Estado do Pará
(continua)

ESTAÇÃO	ET _o (TW1)	PARÂMETRO	ET _o (TW2)	PARÂMETROS
Belém	16,0	a	1066,2	c
	10,0	b	80,8	d
			1,4	e
Bragança	16,3	a	609,1	c
	10,5	b	30,8	d
			0,1	e
Cametá	16,0	a	344,6	c
	10,0	b	18,9	d
			0,0	e
Capitão Poço	16,0	a	859,5	c
	10,2	b	65,3	d
			1,1	e
Castanhal	16,1	a	189,3	c
	10,2	b	11,7	d
			0,0	e

Tabela 14 – Parâmetros ajustados localmente da equação de Thornthwaite para as estações do Estado do Pará
(continuação)

ESTAÇÃO	ET _o (TW1)	PARÂMETRO	ET _o (TW2)	PARÂMETROS
Conceição do Araguaia	15,6	a	49,1	c
	9,5	b	6,3	d
			0,0	e
Itaituba	16,0	a	94,7	c
	10,0	b	8,4	d
			0,0	e
Marabá	16,2	a	73,2	c
	10,1	b	7,5	d
			0,0	e
Mina Palito	16,0	a	409,6	c
	10,3	b	31,6	d
			0,4	e
Monte Alegre	16,3	a	495,4	c
	11,2	b	34,6	d
			0,4	e
Novo Repartimento	16,1	a	103,0	c
	10,2	b	8,4	d
			0,0	e
Óbidos	16,0	a	778,9	c
	9,9	b	59,0	d
			1,0	e
Pacajá	16,2	a	289,9	c
	10,4	b	25,3	d
			0,4	e
Paragominas	16,0	a	70,4	c
	10,0	b	7,4	d
			0,0	e
Placas	16,0	a	390,9	c
	10,1	b	31,2	d
			0,5	e
Rondon do Pará	16,1	a	86,9	c
	10,1	b	7,7	d
			0,0	e
Salinópolis	16,0	a	29351,2	c
	10,3	b	2489,2	d
			52,5	e
Santana do Araguaia	16,0	a	414,5	c
	10,1	b	31,7	d
			0,4	e
Serra dos Carajás	16,2	a	415,9	c
	11,6	b	32,2	d
			0,4	e
Soure	16,4	a	5721,0	c
	11,1	b	466,9	d
			9,3	e
Tomé-Açu	16,1	a	69,4	c
	10,2	b	7,1	d
			0,0	e
Tucuruí	16,3	a	102,6	c
	10,5	b	8,5	d
			0,0	e

A maioria das equações ajustadas para cada localidade de estudo promoveu melhorias dos coeficientes de correlação, exatidão e desempenho em boa parte das estações.

O coeficiente de correlação melhorou para 68,2% das localidades, com exceção de Cametá ($r=0,15$) Salinópolis ($r=0,49$), Santana do Araguaia ($r=0,41$), Serra dos Carajás ($r=0,86$), Soure ($r=0,68$) e Tucuruí ($r=0,59$), onde houveram reduções e em Itaituba ($r=0,90$) onde não houve alteração do coeficiente em relação a equação original.

Em relação ao coeficiente de exatidão ocorreram melhorias consideráveis em quase todas as estações (95,4%), com exceção apenas da estação de Santana do Araguaia ($d=0,41$), onde houve redução do coeficiente.

O coeficiente de desempenho apresentou melhorias para a maioria das estações (81,8%), enquanto que para as estações de Cametá ($c=0,07$), Salinópolis ($c=0,33$), Santana do Araguaia ($c=0,17$) e Soure ($c=0,52$) houveram reduções com a utilização das equações ajustadas.

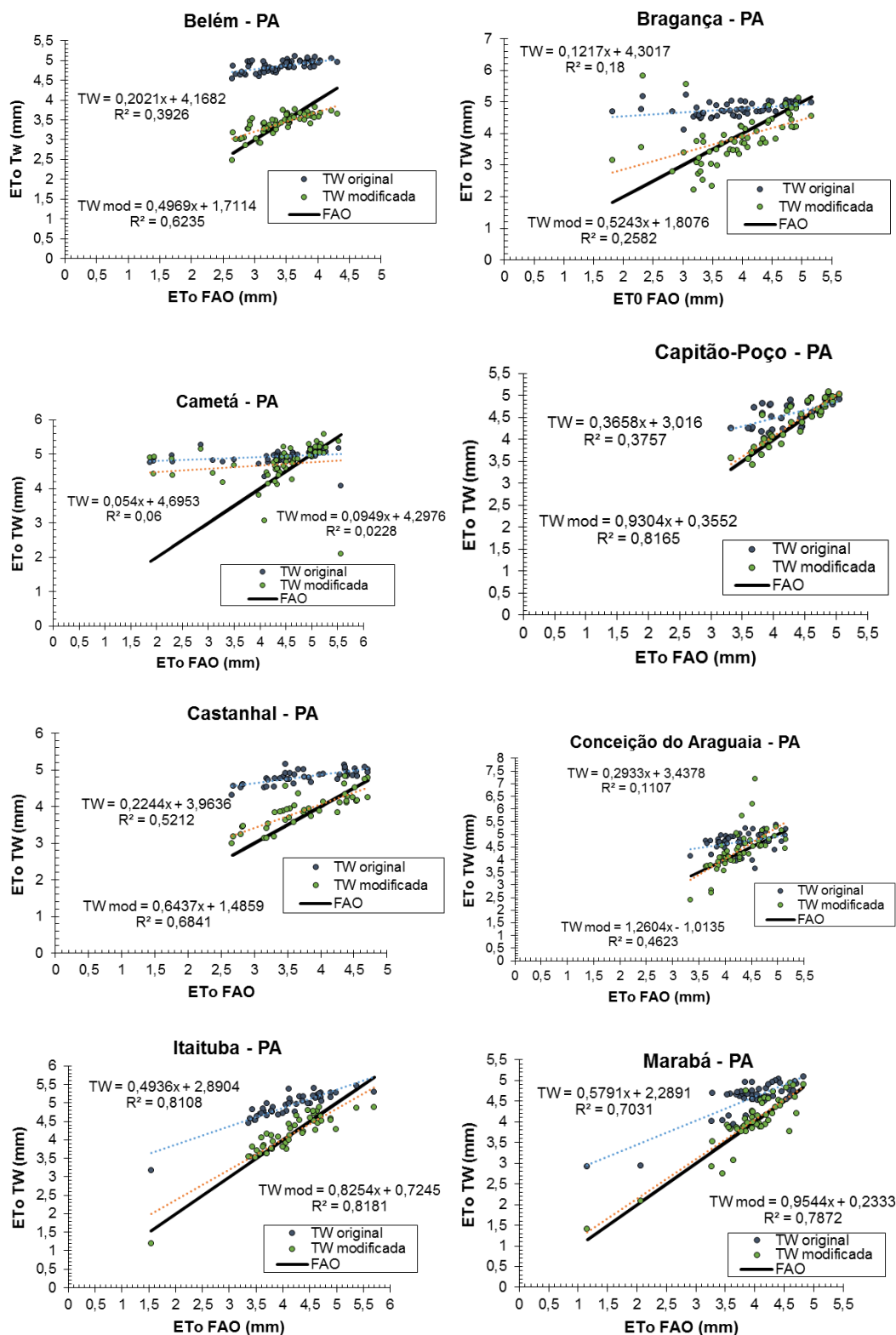
De acordo com a classificação do coeficiente “c” (Tabela 15), nenhuma equação ajustada apresentou valor considerado “ótimo”. Cerca de 40,9% das equações ajustadas apresentaram desempenho classificado como “muito bom” ou “bom”; aproximadamente 18,2% apresentaram desempenho “mediano” e 40,9% apresentou valor de “c” classificado como “péssimo”, “mau” ou “sofrível”. As estações de Cametá, Salinópolis, Santana do Araguaia e Soure tiveram redução do coeficiente “c” com o ajuste.

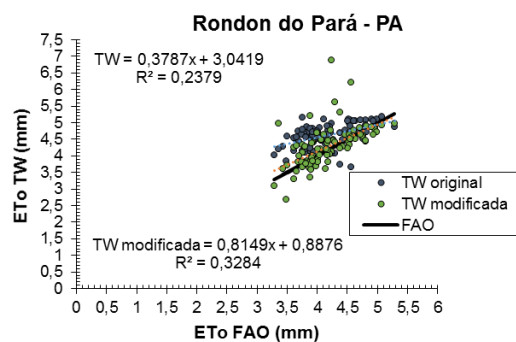
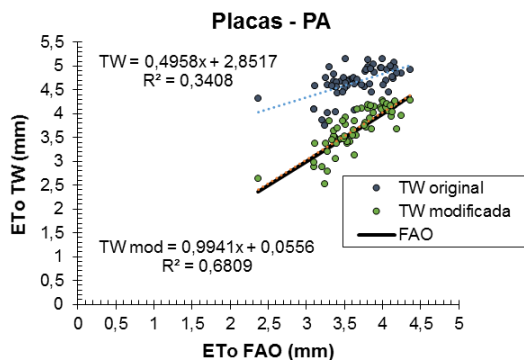
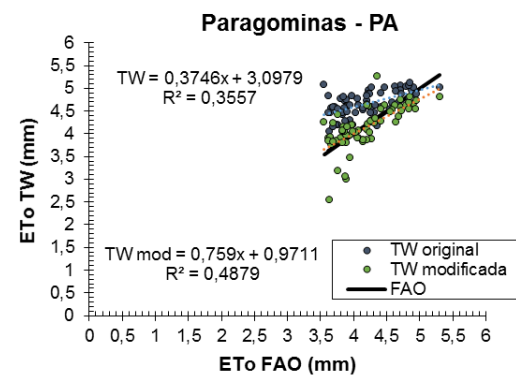
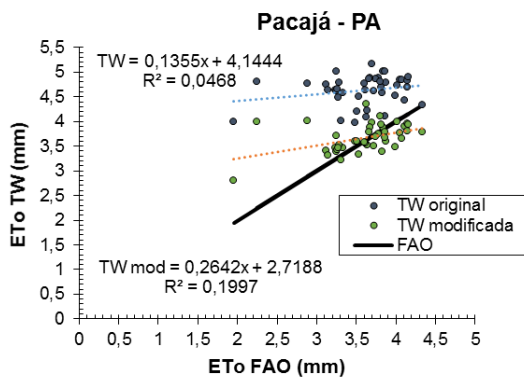
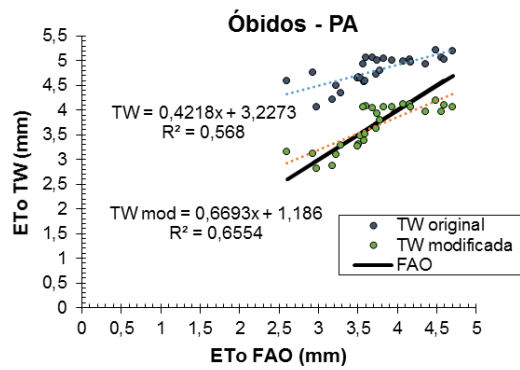
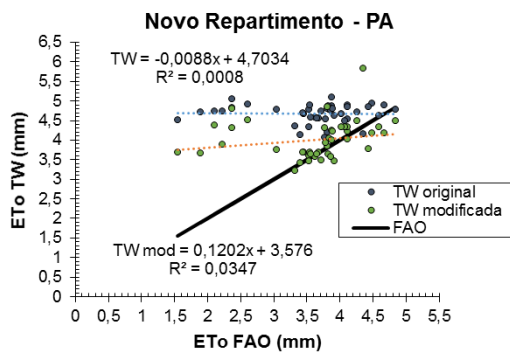
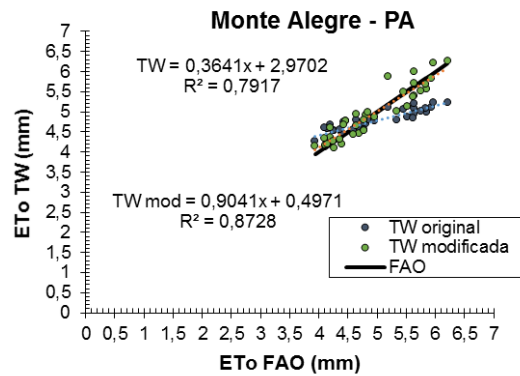
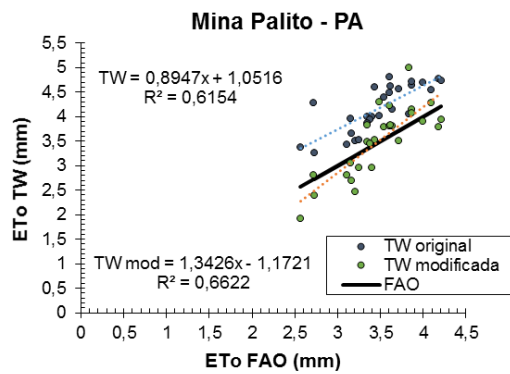
Houve também a diminuição da raiz do erro médio quadrático (REQM) com a amplitude de 0,19 até 1,15 mm dia⁻¹, com as localidades de Tome-açu (REQM=0,19) e Capitão-Poço (REQM=0,22) apresentando os menores valores de REQM, enquanto que Santana do Araguaia (REQM=1,15) e Cametá (REQM=1,04) apresentaram os maiores.

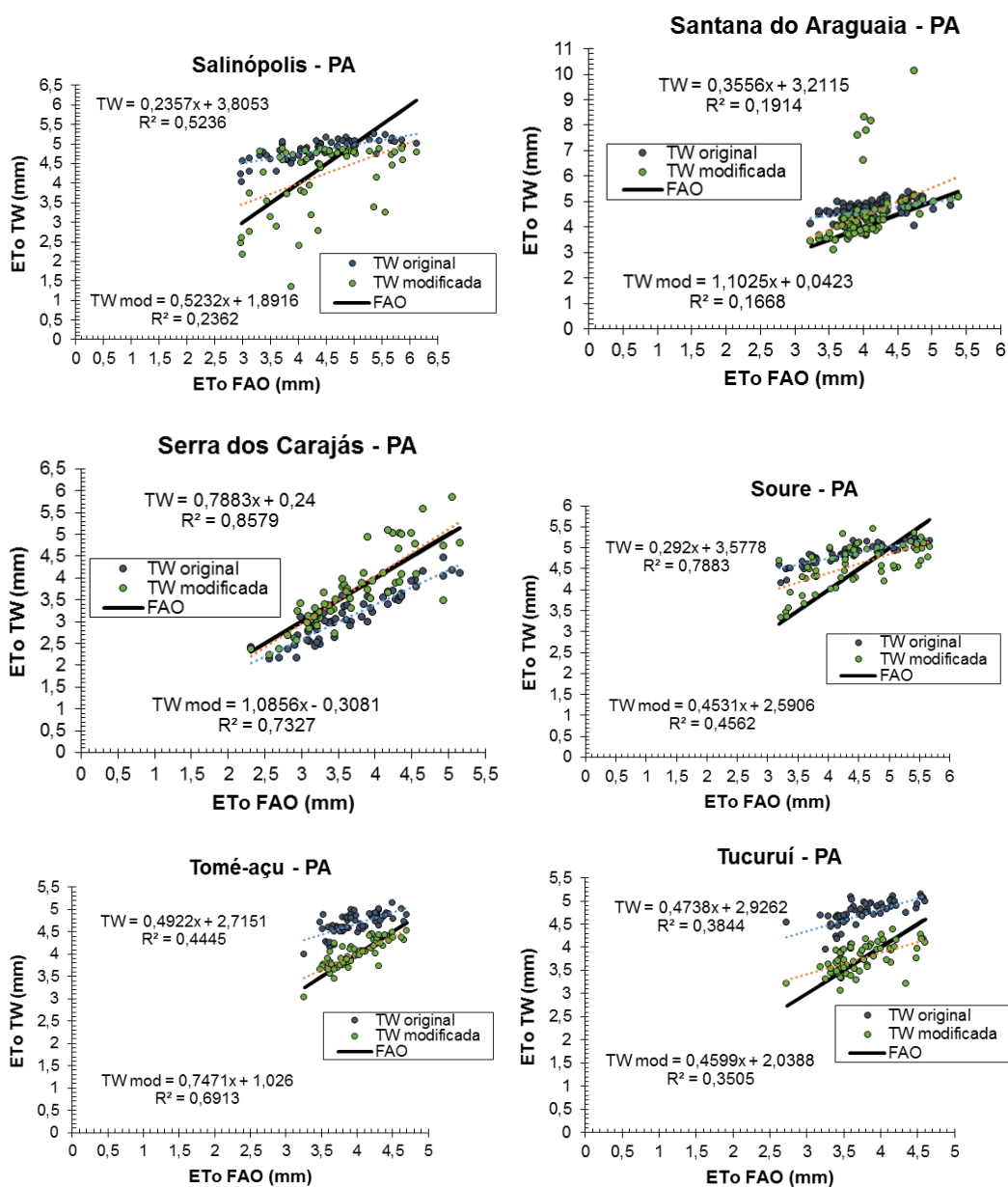
Na Figura 08 é apresentado o comportamento da equação de Thornthwaite com os parâmetros originais e com os parâmetros ajustados em relação a equação de Penman-Monteith. Nota-se que houve boa correlação da equação original com a equação de Penman-Monteith nas estações de Itaituba, Marabá, Monte Alegre, Serra dos Carajás e Soure. Em relação a equação ajustada localmente, as boas correlações foram das estações de Capitão-Poço, Itaituba e Monte Alegre. Portanto, apesar de ocorrerem melhorias nos coeficientes analisados com o ajuste local, não houve grandes

melhoras de desempenho da equação de Thornthwaite, pois seu comportamento foi pouco linear à equação de Penman-Monteith.

Figura 08 – Relação entre a ET_o estimada por Thornthwaite original, Thornthwaite modificada e Penman-Monteith FAO







2.3.2 Avaliação e ajuste local da equação de Hargreaves e Samani

O desempenho da equação com os parâmetros originais de Hargreaves e Samani está apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Análise estatística da equação de Hargreaves e Samani aplicada nas estações do Estado do Pará

ESTAÇÃO	r	d	c	REQM
BELÉM	0,99	0,84	0,83	0,39
BRAGANÇA	0,95	0,91	0,86	0,50
CAMETÁ	0,98	0,92	0,90	0,64
CAPITÃO POÇO	0,91	0,88	0,80	0,33
CASTANHAL	0,90	0,89	0,80	0,40
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA	0,92	0,81	0,74	0,42
ITAITUBA	0,98	0,85	0,83	0,63
MARABÁ	0,98	0,87	0,85	0,53
MINA PALITO	0,98	0,82	0,81	0,44
MONTE ALEGRE	0,95	0,93	0,89	0,33
NOVO REPARTIMENTO	0,97	0,93	0,90	0,51
ÓBIDOS	0,94	0,74	0,70	0,68
PACAJÁ	0,94	0,83	0,78	0,49
PARAGOMINAS	0,93	0,67	0,63	0,60
PLACAS	0,97	0,75	0,73	0,47
RONDON DO PARÁ	0,91	0,80	0,73	0,42
SALINÓPOLIS	0,88	0,91	0,80	0,42
SANTANA DO ARAGUAIA	0,88	0,79	0,70	0,42
SERRA DOS CARAJÁS	0,86	0,90	0,78	0,36
SOURE	0,95	0,89	0,84	0,52
TOMÉ-AÇU	0,91	0,63	0,57	0,58
TUCURUÍ	0,94	0,74	0,70	0,50

Os valores do coeficiente de correlação de todas as estações foram classificados como “forte”, variando de 0,86 a 0,99. Em relação ao coeficiente de exatidão, todas as estações apresentaram valores de “d” maiores do que 0,50, com variação de 0,63 a 0,93.

Quanto ao coeficiente de desempenho, cerca de 22,7% das localidades foram classificadas como “mediano”, em torno de 36,4%, como “bom” e 40,9% como “muito bom”. Os melhores desempenhos foram das estações de Novo Repartimento (c=0,90), Cametá (c=0,90) e Monte Alegre (c=0,89). Já os menores valores de “c” foram das estações de Tomé-açu (c=0,57), Paragominas (c=0,63) e Santana do Araguaia (c=0,79).

A REQM resultou em valores variando de 0,33 a 0,68 mm dia⁻¹. Os menores erros foram das estações de Capitão-Poço (REQM=0,33), Monte Alegre (REQM=0,33) e Serra dos Carajás (REQM=0,36), enquanto que os maiores foram das estações de Óbidos (REQM=0,68), Cametá (REQM=0,64) e Itaituba (REQM=0,63).

Aplicando a equação de Hargreaves e Samani em Sete Lagoas – MG, caracterizada pelo clima tropical chuvoso, com inverno seco, Borges Junior et al. (2017) obtiveram uma forte tendência a superestimação da ET_o na base diária, quando comparada a equação de Penman-Monteith.

Em clima semiárido, na cidade de Ouricuri – PE, mudanças na temperatura máxima e mínima do ar acarreta em impactos na ET_o , pois, a temperatura é a variável que reflete de forma imediata mudanças no clima (BORGES; OLIVEIRA, 2020).

A equação de Hargreaves e Samani tende a superestimar a ET_o em regiões de clima úmido. Arraes et al. (2016), observaram essa tendência ao analisar oito municípios de Pernambuco. Nas estações onde a umidade média do ar obteve valores acima de 70% houve superestimação da ET_o , porém com bons resultados estatísticos, isso porque, com a umidade do ar maior, ocorre menor déficit de pressão e de velocidade do vento. Apesar da equação de Hargreaves e Samani ter sido desenvolvida para o clima seco, estes autores não obtiveram bons resultados para as estações localizadas no sertão pernambucano, devido a equação não ter como dado de entrada a umidade relativa do ar.

Foi feito o ajuste local dos parâmetros originais da equação de Hargreaves e Samani para que houvesse melhorias nos resultados da análise estatística, como pode ser visto na Tabela 16 e o resumo da análise do coeficiente “c” entre a equação original e ajustada, na Tabela 17, e os parâmetros ajustados, na Tabela 18.

Tabela 16 – Análise estatística da equação de Hargreaves e Samani ajustada localmente para as estações do Estado do Pará

ESTAÇÃO	r	d	c	REQM
BELÉM	0,99	0,99	0,98	0,07
BRAGANÇA	0,95	0,97	0,92	0,26
CAMETÁ	0,98	0,96	0,94	0,42
CAPITÃO POÇO	0,93	0,96	0,90	0,17
CASTANHAL	0,90	0,94	0,85	0,28
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA	0,94	0,97	0,91	0,14
ITAITUBA	0,98	0,98	0,96	0,17
MARABÁ	0,98	0,98	0,97	0,17
MINA PALITO	0,97	0,98	0,96	0,11
MONTE ALEGRE	0,96	0,98	0,95	0,18
NOVO REPARTIMENTO	0,97	0,95	0,92	0,41
ÓBIDOS	0,94	0,97	0,91	0,18
PACAJÁ	0,94	0,96	0,90	0,21
PARAGOMINAS	0,93	0,96	0,89	0,16
PLACAS	0,97	0,98	0,96	0,10
RONDON DO PARÁ	0,92	0,96	0,88	0,17
SALINÓPOLIS	0,88	0,92	0,81	0,39
SANTANA DO ARAGUAIA	0,84	0,90	0,76	0,23
SERRA DOS CARAJÁS	0,89	0,94	0,84	0,29
SOURE	0,95	0,97	0,93	0,23
TOMÉ-AÇU	0,93	0,96	0,89	0,14
TUCURUÍ	0,95	0,97	0,92	0,13

Tabela 17 – Resumo do desempenho em relação ao coeficiente “c” da equação de Hargreaves e Samani original e ajustada localmente para as estações do Estado do Pará

Estação	Original		Ajustada	
	C	Classificação	C	Classificação
Belém	0,83	Muito Bom	0,98	Ótimo
Bragança	0,86	Muito Bom	0,96	Ótimo
Cametá	0,90	Muito Bom	0,96	Ótimo
Capitão Poço	0,80	Bom	0,92	Ótimo
Castanhal	0,80	Bom	0,89	Muito Bom
Conceição do Araguaia	0,74	Bom	0,91	Ótimo
Itaituba	0,83	Muito Bom	0,89	Muito Bom
Marabá	0,85	Muito Bom	0,97	Ótimo
Mina Palito	0,81	Muito Bom	0,88	Muito Bom
Monte Alegre	0,89	Muito Bom	0,96	Ótimo
Novo Repartimento	0,90	Muito Bom	0,90	Muito Bom
Óbidos	0,70	Mediano	0,95	Ótimo
Pacajá	0,78	Bom	0,91	Ótimo
Paragominas	0,63	Mediano	0,90	Muito Bom
Placas	0,73	Bom	0,93	Ótimo
Rondon do Pará	0,73	Bom	0,76	Bom
Salinópolis	0,80	Bom	0,92	Ótimo
Santana do Araguaia	0,70	Mediano	0,85	Muito Bom
Serra dos Carajás	0,78	Bom	0,84	Muito Bom
Soure	0,84	Muito Bom	0,81	Muito Bom
Tomé-Açu	0,57	Mediano	0,92	Ótimo
Tucuruí	0,70	Mediano	0,94	Ótimo

Tabela 18 – Parâmetros ajustados localmente da equação de Hargreaves e Samani para as estações do Estado do Pará

ESTAÇÃO	HS	PARAMETROS
Belém	0,0104	f
	25,8164	g
Bragança	0,0180	f
	3,1717	g
Cametá	0,0199	f
	0,0000	g
Capitão Poço	0,0209	f
	0,0000	g
Castanhal	0,0210	f
	0,0000	g
Conceição do Araguaia	0,0203	f
	0,0000	g
Itaituba	0,0154	f
	6,7876	g
Marabá	0,0199	f
	0,0000	g
Mina Palito	0,0021	f
	225,4329	g
Monte Alegre	0,0212	f
	0,0000	g
Novo Repartimento	0,0203	f
	0,0000	g
Óbidos	0,0003	f
	1714,0943	g
Pacajá	0,0202	f
	0,0000	g
Paragominas	0,0196	f
	0,0000	g
Placas	0,0175	f
	3,5631	g
Rondon do Pará	0,0190	f
	2,1113	g
Salinópolis	0,0217	f
	0,0000	g
Santana do Araguaia	0,0030	f
	161,0732	g
Serra dos Carajás	0,0240	f
	0,0000	g
Soure	0,0203	f
	0,0000	g
Tomé-Açu	0,0198	f
	0,0000	g
Tucuruí	0,0196	f
	0,0000	g

O coeficiente de correlação permaneceu alto, com variação de 0,84 a 0,99, classificado como “forte”. Os valores mais altos foram das estações de Belém ($r=0,99$), Marabá ($r=0,98$) e Itaituba ($r=0,98$). Os valores menores foram das estações de Santana do Araguaia ($r=0,84$), Salinópolis ($r=0,88$) e Serra dos Carajás ($r=0,89$).

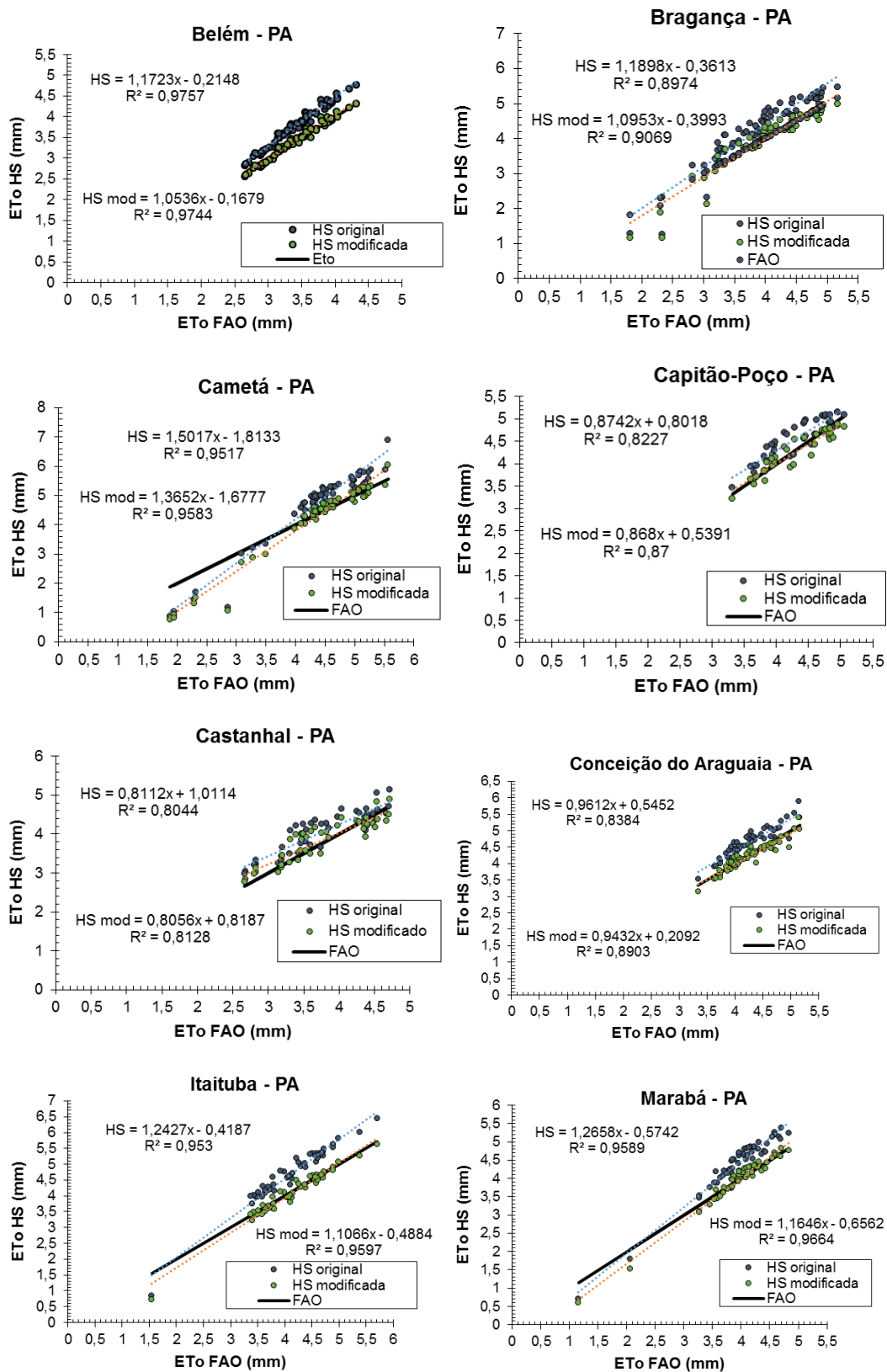
A forte correlação da ET_o utilizando a equação de Hargreaves e Samani observada, tanto na sua forma original como calibrada, se deve as variáveis de entrada utilizadas serem a temperatura e a radiação solar, que em conjunto, são importantes componentes da evapotranspiração em um clima úmido.

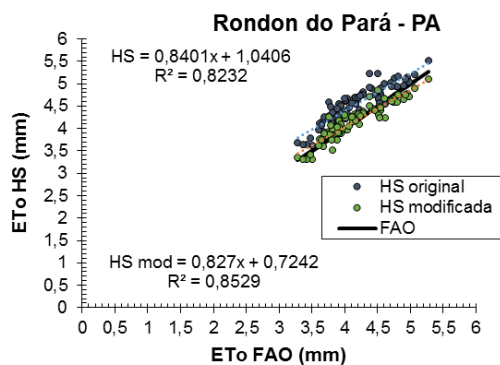
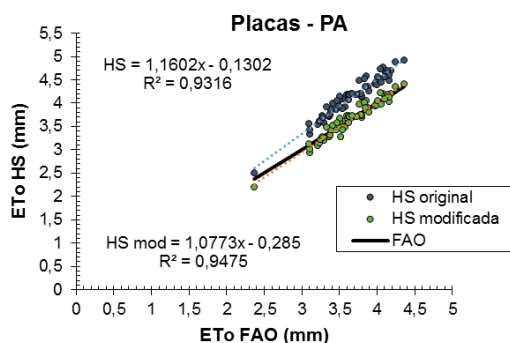
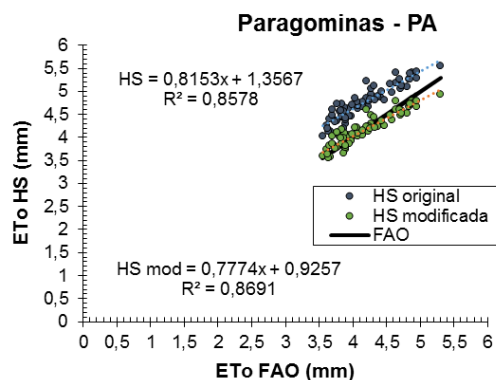
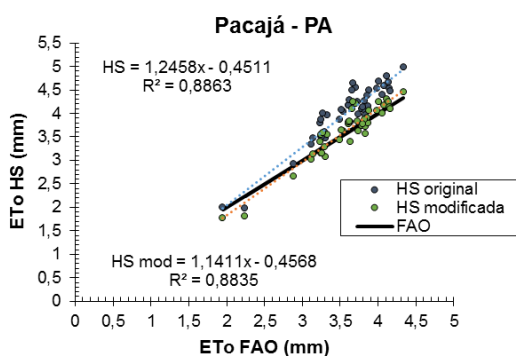
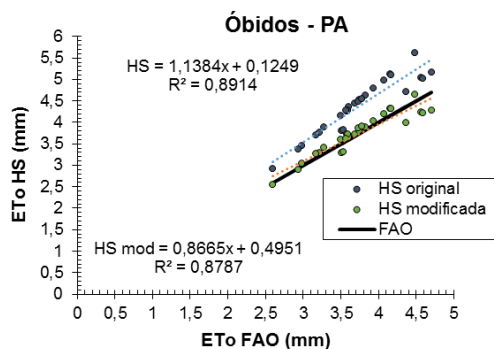
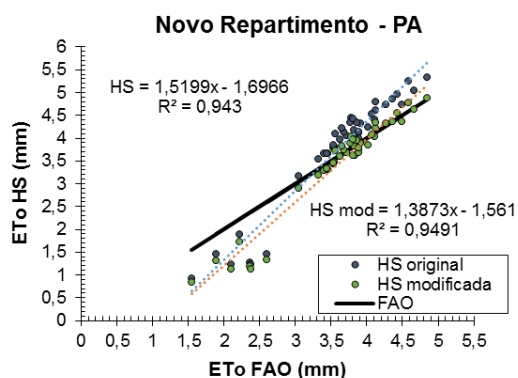
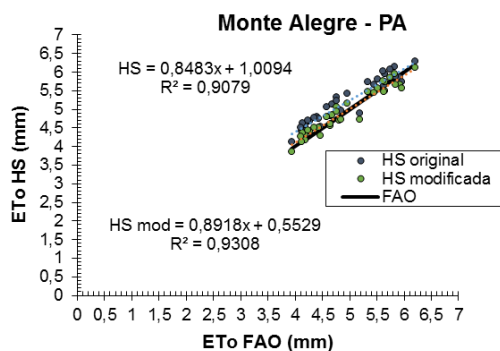
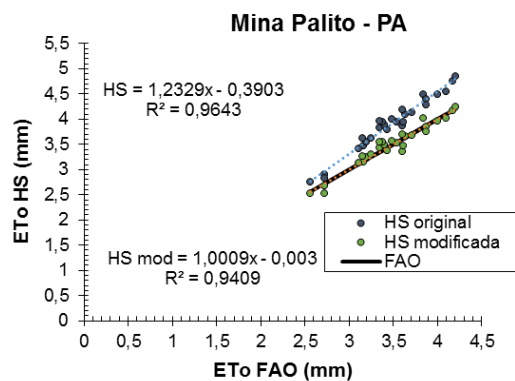
Houve melhoria do coeficiente de exatidão que variou de 0,90 a 0,99. Em resultado disso, houveram melhoras no coeficiente de desempenho de todas as estações, em que foram classificadas como “bom” (4,5%), “muito bom” (36,4%) e “ótimo” (59,1%), com exceção da estação de Soure, onde houve uma ligeira redução.

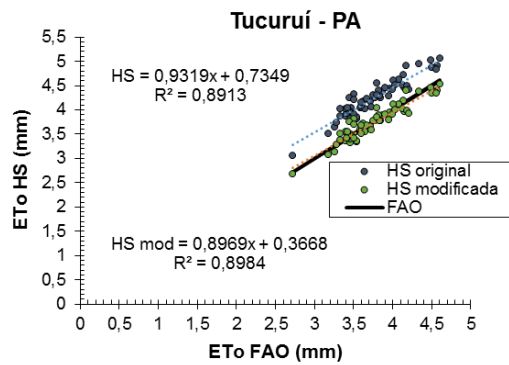
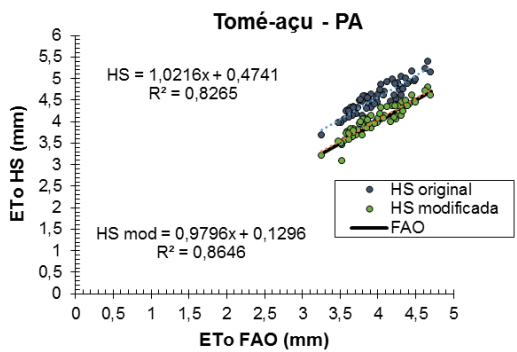
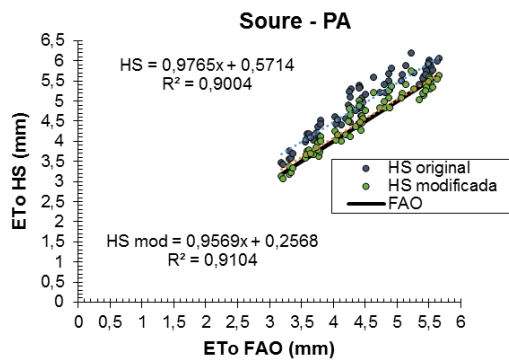
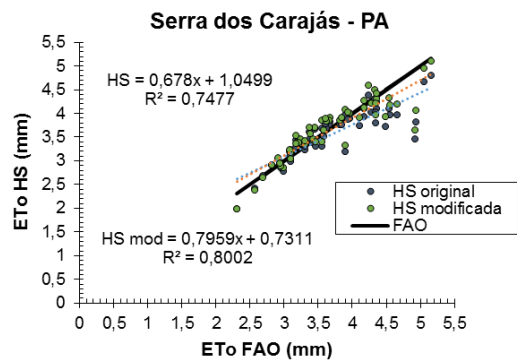
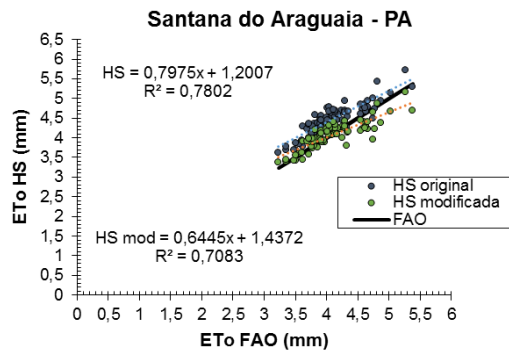
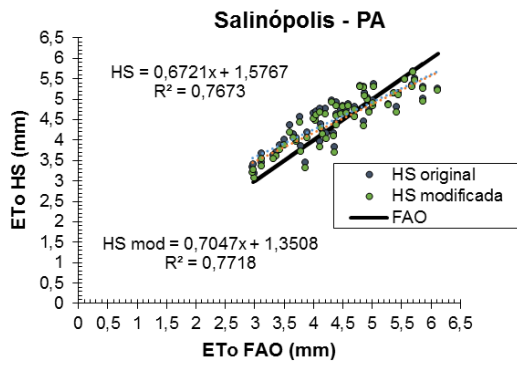
Quanto ao REQM houve redução, resultando em uma variação de 0,07 a 0,42 mm dia⁻¹. Os menores erros foram encontrados na estação de Belém (REQM=0,07), Placas (REQM=0,10) e Mina Palito (REQM=0,11) enquanto que os maiores foram nas estações de Cametá (REQM=0,42), Novo Repartimento (REQM=0,41) e Salinópolis (REQM=0,39).

Na Figura 11 é apresentado o comportamento da equação de Hargreaves e Samani com os parâmetros originais e com os parâmetros ajustados em relação a equação de Penman-Monteith. Nota-se que houve boa correlação da equação original com a equação de Penman-Monteith em todas as estações do Estado do Pará. Em relação a equação ajustada localmente, o comportamento linear permaneceu “bom”, com aumentos em relação a equação original, com exceção das estações de Belém, Mina Palito, Óbidos, Pacajá e Santana do Araguaia, onde houveram ligeiras reduções do R^2 .

Figura 11 – Relação entre a ETo estimada por Hargreaves e Samani original, Hargreaves e Samani modificada e Penman-Monteith FAO







2.4 CONCLUSÕES

Observou-se que apenas a temperatura do ar não é suficiente para explicar as mudanças na evapotranspiração de referência nos municípios paraenses estudados neste trabalho. Apesar da equação de Thornthwaite ter boa aplicação para clima úmido, os resultados obtidos foram ruins, na maioria das estações de estudo, mesmo após a tentativa de ajuste local.

Em contrapartida, a equação de Hargreaves e Samani, por conter como variável de entrada a radiação solar, além da temperatura do ar, apresentou bons resultados, o que mostra que em regiões de clima úmido, boa parte das variações da evapotranspiração de referência estão atreladas a estas duas variáveis. Recomenda-se o uso da equação de Hargreaves e Samani original ou ajustada localmente para o cálculo da ET_0 no Estado do Pará, quando não houve meios de utilização da equação de Penman-Monteith.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO Irrigation and Drainage, Paper 56, 1998. 297p.
- ARRAES, F. D. D.; LIMA JÚNIOR, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; MACEDO, K. G.; COURAS, Y. S.; OLIVEIRA, W. C. Parametrização da equação de Hargreaves-Samani para o Estado do Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 1, p. 410-419, 2016.
- ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Boa Vista, RR. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.
- BARROS, A. C.; SILVA, C. S. O.; NETTO, A. O. A. Ajuste dos parâmetros de equação Hargreaves-Samani em escala diária para o perímetro irrigado Jacaré-Curitiba, Canindé-SE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.11, n.8, p. 2152-2161, 2017.
- BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 3, p. 293-300, 2007.
- BORGES, T. K. S.; OLIVEIRA, A. S. Análise de sensibilidade de equação de Hargreaves-Samani a mudanças na temperatura do ar em condições de semiárido. **Revista Geama, Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology**, [s.l], v. 6, n. 3, p. 15-21, 2020.
- BORGES JÚNIOR, J. C. F.; OLIVEIRA, A. L. M.; ANDRADE, C. L. T.; PINHEIRO, M. A. B. Equação de Hargreaves-Samani calibrada em diferentes bases temporais para Sete Lagoas, MG. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 38-49, 2017.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n.1, p.89-97, 1997.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. Ajuste do modelo de Hargreaves para estimativa da evapotranspiração de referência no Noroeste Paulista. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.7, n.5, p.306-316, 2013.
- LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B.; NASCIMENTO, F. A. L.; MACÊDO, K. G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para

estimativa da evapotranspiração de referência do Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciências Agronômicas**, Fortaleza, v.47, n.3, p. 447-454, 2016.

SANTIAGO, E. J. P.; OLIVEIRA, V. E. A.; SILVA, R. R.; GONÇALVES, I. S.; OLIVEIRA, G. M. Ajuste da equação de Hargreaves e Samani a partir de dados lisimétricos para o município de Juazeiro – BA. **Irriga**, Botucatu, Edição especial, Irriga & Inovagri, p. 108-114, 2016.

SOUZA, M. L. A.; SOUSA, J. W. Avaliação do desempenho de métodos empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência em Rio Branco, Acre. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 2, n. 1, p. 254-267, 2020.

VILLA NOVA, N. A.; SALATI, E.; MATSUI, E. Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. **Acta amazônica**, v. 6, n. 2, p. 215-228, 1976.

ZANETTI, S. S.; DOHLER, R. E.; CARMO, E. B.; CECÍLIO, R. A. Calibração da equação de Hargreaves-Samani para estimar a evapotranspiração de referência no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.12, n.3, p. 2692-2701, 2018.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme o estudo climático realizado neste trabalho, foi possível observar a sazonalidade das variáveis climáticas no Estado do Pará. Observou-se que o que mais explica as variações de evapotranspiração é a radiação solar global, a temperatura do ar e a nebulosidade, associada a precipitação.

Em relação ao desempenho das equações de Thornthwaite e Hargreaves e Samani, observou-se que Thornthwaite não apresentou na grande maioria das estações analisadas, boa correlação com a evapotranspiração calculada por Penman-Monteith, mesmo depois da tentativa de ajuste local. Enquanto que a equação de Hargreaves e Samani, na sua forma original, apresentou excelente correlação e bom desempenho em relação aos parâmetros analisados neste trabalho. Após o ajuste local o desempenho melhorou ainda mais. Desta forma, recomenda-se o uso da equação original de Hargreaves e Samani, e, quando de interesse em maior precisão, a equação ajustada localmente para o cálculo da ET_o no Estado do Pará.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. F.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, M. C. F.; SOUZA JÚNIOR, J. A. Precipitação nas mesorregiões do Estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008). **Revista Brasileira de Climatologia**, [s.l.], v. 6, n. 6, p. 151-168, 2010.

AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Padrões espaço-temporal pluviométricos na Amazônia Oriental utilizando análise multivariada. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 423-434, 2012.

MENEZES, F. P.; FERNANDES, L. L.; ROCHA, E. J. P. O uso da estatística para regionalização da precipitação no Estado do Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s.l.], v. 16, p. 64-71, 2015.

MORAES, B. C.; COSTA, J. M. N.; COSTA, A. C. L.; COSTA, M. H. Variação espacial e temporal da precipitação no estado do Pará. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 35, n. 2, p. 207-214, 2005.