





Faculdade de Meteorologia

Universidade Federal do Pará

Instituto de Geociências

Trabalho de Conclusão de Curso

HEWELIN ADRIANA PEREIRA DOS SANTOS MAIA

ESTUDO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA CIDADE DE BELÉM.

Belém – PA

Abril - 2017

HEWELIN ADRIANA PEREIRA DOS SANTOS MAIA

ESTUDO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA CIDADE DE BELÉM.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Meteorologia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

Orientador(a): Prof. Dr. João de Athaydes Silva Junior.

Belém – PA

Abril – 2017

ficha

HEWELIN ADRIANA PEREIRA DOS SANTOS MAIA

ESTUDO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NA CIDADE DE BELÉM.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Meteorologia, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Meteorologia.

Data de aprovação: ___/___/_____

Conceito: _____

Banca Examinadora:

_____

Prof. João de Athaydes Silva Junior – Orientador
Doutor em Desenvolvimnto Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará

_____

Prof. Dr. Paulo Afonso Fischer Kuhn – Membro
Doutor em Agronomia
Universidade Federal do Pará

_____

Msc. Alex Antonio Ribeiro de Oliveira – Membro
Mestrado em Recurso naturais da Amazônia
Museu Paraense Emilio Goeldi

Dedico aos meu pais por todo o apoio, por
todas as palavras de incentivo e
principalmente pelo amor e respeito.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo agradeço a Deus, primeiramente pelo dom da vida e pela chance de ter uma formação profissional, por todas as graças realizadas na minha vida e por ter me dado a força necessária para acordar todos os dias e ir em busca dos meu sonhos.

Agradeço a minha amada e abençoa família, minha mãe Donatilia, meu pai Ivaldo, meus irmãos Heverton e Hemerson e minha cunhada Deize pois sempre foram minha base e sempre se mostraram presente durante minha formação tanto pessoal como profissional, por sempre poder contar com o apoio de todos, por sempre receber o incentivo necessário pra seguir em frente, por todo amor e preocupação a mim dedicados.

Agradeço de forma especial a minha grande amiga Naiana, por ela ser a pessoa incrível que é, por ter sido a pessoa que sempre me levantava nos momentos de difilcudades, por sempre ter me ajudado no que fosse possível, por todos os momentos importantes compartilhados, pelo imenso carinho que tem por mim e por ter se tornado a irmã que eu não tive.

Agradeço aos meus amigos Ornella, Vinicius, Brenda, Andrezza, Carol, Cleyton e Leticia pela ajuda nas disciplinas, nos trabalhos e nos campos. Por todos os bons momentos vividos durante o curso, e por todas as brincadeiras e risadas que tornaram a nossa lida muito mais leve.

Agradeço também a todos os professores e professoras que contribuíram grandemente para meu crescimento profissional divindo seus conhecimentos com seus alunos.

Ao meu orientador João de Athaydes por todo apoio e paciência durante o desenvolvimento deste trabalho e pela oportunidade de estagiar na estação meteorológica da UFPA. E por sempre se mostrar disponível a ajudar seus alunos.

A Universidade Federal do Pará por possibilitar o crescimento profissional de seus discentes, pelo apoio nas viagens acadêmicas e por me proporcionar os melhores anos da minha vida

.

Tudo é do pai, Toda honra
e toda glória é dele a vitória
alcançada em minha vida!
Pe. Fábio de Melo

RESUMO

O prensente trabalho buscou estimar a evapotranspiração potencial (ETP) mensal da cidade de Belém-PA, que localiza-se no norte do Brasil, com coordenadas geográficas de -01°27’20”S e -48°30’15”W. A qual possui clima quente e úmido, caracterizado pelos período chuvoso e menos chuvoso. A metodologia do trabalho baseou-se na utilização de métodos empíricos de estimativa de evapotranspiração, tendo o método de Penman Monteith como padrão. Foi utilizado dados do ano de 2016 da estação meteorológica automática da UFPA e o tratamento dos dados e elaboração dos gráficos foram realizados com o suporte de planilhas digitais. Obtendo valores médios anual de 155 mm para o método de Thornthwaite (TW), 131mm para Pènman Monteith (PM), 157mm para Hargraeves & Samani (H), 145mm para Priestley &Taylor (P&T), Thorthwaite – Camargo (T-C) com 154mm, Camargo (C) com 121mm e 70mm para Linacre (Li). Os métodos de TW, H, T-C, C e P&T superestimaram a ETP e LI subestimou comparados a PM. A correlação mostrou que o método de P&T obtever melhor resultado com R^2=0,9858 e H o pior resultado com R^2= 0,0432. No período chuvoso a ETP tem menores valores em comparação ao período menos chuvoso em consequência da maior influência de nebulosidade nesse período, que reduz a intensidade de radiação solar incidente na superfície terrestre.

Palavra-chave: Evapotranspiração Potencial. Estimativa. Penman Monteith.

ABSTRACT

The present work sought to estimate the potential evapotranspiration (ETP) monthly of the city of Belém-PA, located in the north of Brazil, with geographic coordinates of -01 ° 27'20 "S and -48 ° 30'15" W. Which has a hot and humid climate, characterized by rainy and less rainy period. The methodology of the work was based on the use of empirical methods of estimation of evapotranspiration, having the method of Penman Monteith as standard. Data from the year 2016 of the UFPA automatic weather station were used and the data treatment and graphics elaboration were performed with the support of digital spreadsheets. Obtaining mean annual values of 155 mm for the Thornthwaite method, 131 mm for Pènman Monteith (PM), 157 mm for Hargraeves & Samani (H), 145 mm for Priestley & Taylor (P & T), Thornwaite - Camargo (C) with 121mm and 70mm for Linacre (Li). The methods of TW, H, T-C, C and P & T overestimated the ETP and LI underestimated compared to PM. Correlation showed that the P & T method obtained the best result with R2 = 0.9858 and H the worst result with R2 = 0.0432. In the rainy season the ETP has lower values in a less rainy period due to the greater influence of cloudiness in this period, which reduced an intensity of solar radiation incident on the terrestrial surface.

Keywords: Potential Evapotranspiration. Estimation. Penman Monteith

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01- Equematização do Ciclo Hidrológico. 16

Figura 02 – Localização da cidade de Belém-PA. 19

Gráfico 01- Estimativa de evapotranspiração potencial pelos métodos de Thornthwaite, Hargreaves & Samani, ao longo do ano de 2016, para a cidade de Belém. 28

Gráfico 02- Estimativa de evapotranspiração potencial pelos métodos de Linacre e Priestley & Taylor, ao longo do ano de 2016 para a cidade de Belém.....29

Gráfico 03- Estimativa de Evapotranspiração Potencial pelos métodos de Penman-Monteith e Thornthwaite-Camargo, ao longo do ano de 2016, para a cidade de Belém. 30

Gráfico 04- Estimativa de Evapotranspiração Potencial pelo método de Camargo, ao longo do ano de 2016, para a cidade de Belém. 31

Gráfico 05- Comparação da evapotranspiração de referência mensal estimada pelo método Penman-Monteith e os métodos: Hargreaves & Samani & Samani (a), Linacre (b), Thornthwaite (c), Thornthwaite-Camargo (d), Priestley & Taylor (e) e Camargo (f), para o município de Belém no ano de 2016. 34

LISTA DE SIGLAS

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFPA	Universidade Federal do Pará
PA	Pará
ETP	Evapotranspiração potencial
TW	Thornthwaite
PM	Penman Monteith
H	Hargraeves
Li	Linacre
P&T	Priestley &Taylor
FAO	Food and Agriculture Organization of the united nations

SUMÁRIO

1 **INTRODUÇÃO**.....13

2 **OBJETIVOS**.....15

2.1 **Objetivo geral** 15
2.2 **Objetivos específicos**..... 15

3 **REVISÃO DE LITERATURA** 16

3.1 **Ciclo hidrológico** 16
3.2 **Definição de evapotranspiração** 17
3.3 **Método empíricos de estimativa da evapotranspiração** 18

4 **MATERIAL E MÉTODOS**.....19

4.1 **Caracterização da área de estudo** 19
4.2 **O clima** 20
4.3 **Dados utilizados**..... 21
4.5 **Métodos de estimativa da evapotranspiração**..... 21
4.5.1 Método de Thornthwaite de 1948..... 21
4.5.2 Método de Penman-Monteith 23
4.5.3 Método de Priestley &Taylor 24
4.5.4 Método de Hargreaves & Samani 24
4.5.5 Método de Linacre..... 25
4.5.6 Método de Thornthwaite-Camargo..... 25
4.5.7 Método de Camargo..... 26

5 **RESULTADOS** 27

5.1 **Métodos de thornthwaite e hargreaves & samani**. 27
5.2 **Métodos de linacre e priestley&taylor**. 28
5.3 **Métodos de penman-monteith e thornthwaite-camargo**..... 29
5.4 **Método de camargo**..... 30
5.5 **Comparação dos métodos com relação ao método padrão de Penman-Montheith**..... 31

6 **CONCLUSÕES**.....35

REFERENCIAS.....36

1 **INTRODUÇÃO**

O presente estudo foi desenvolvido na cidade de Belém, que está situada na região Amazônica, com um clima quente e úmido. A região amazônica é conhecida pela exuberância de sua vegetação e grande quantidade de corpos hídricos, sendo também caracterizada, pela grande disponibilidade de energia solar e água .

Parte da água proveniente da chuva que chega a superfície terrestre retorna a atmosfera por meio de perdas evaporativas, processo físico em que há a mudança de fase do estado líquido para o estado gasoso devido à incidência de radiação solar e ocorre nos corpos hídricos superficiais (rios, lagos e mares), no solo e em vegetação úmida. Também há perdas por meio da transpiração vegetal que representa um processo biofísico em que a planta para suprir suas necessidades fisiológicas absorvem água proveniente do solo através das raízes, reservam uma parte e liberam o restante pelos estômatos na forma de vapor. A composição dessas duas formas de perda de água para atmosfera é o que chamamos de evapotranspiração que seria a ocorrência simultânea da evaporação e da transpiração.

A evapotranspiração constitui um papel fundamental no ciclo hidrológico e pode ser definido como um fenômeno natural de transferência de água da superfície para atmosfera no estado de vapor (SILVA; AMARAL, 2008). Sendo um importante mecanismo do ciclo da água torna-se indispensável o seu conhecimento.

Costa (1989) diz que o processo de evapotranspiração depende dos fatores climáticos, do solo e da planta, cita que vários estudos revelam a influência dos fatores climáticos na evapotrasnpiração. Precipitação, velocidade do vento, razão de insolação, umidade relativa do ar, temperatura máxima, média e mínima são as variáveis climáticas que afetam o processo de evapotranspiração (MOHAN; ARUMUGAM, 1996), e as alterações climáticas podem afetar diretamente no balanço hídrico das regiões, da mesma forma, este processo de transferência de agua para atmosfera também influência nas variáveis meteorológicas.

Sabendo da importância da evapotranspiração na definição do clima em uma região ou local especifico alguns estudos foram feito com o intuito de

estimar esta variável através de dados observados de radiação solar e temperatura, por exemplo. Devido à relevância da evapotranspiração para o clima de um dado local, o presente estudo tem como objetivo, estudar o comportamento médio mensal da evapotranspiração estimada na área da cidade de Belém-PA, utilizando métodos empíricos de Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo, Camargo, Hargreaves e Samani, linacre e Priestley e Taylor o método padrão de Penman-Monteith parametrizado pela FAO, dando uma contribuição para o aumento do conhecimento sobre essa temática para a região.

2 **OBJETIVOS**

2.1 **Objetivo geral**

Analisar a variabilidade média mensal da evapotranspiração estimada na universidade federal do pará na cidade de Belém.

2.2 **Objetivos específicos**

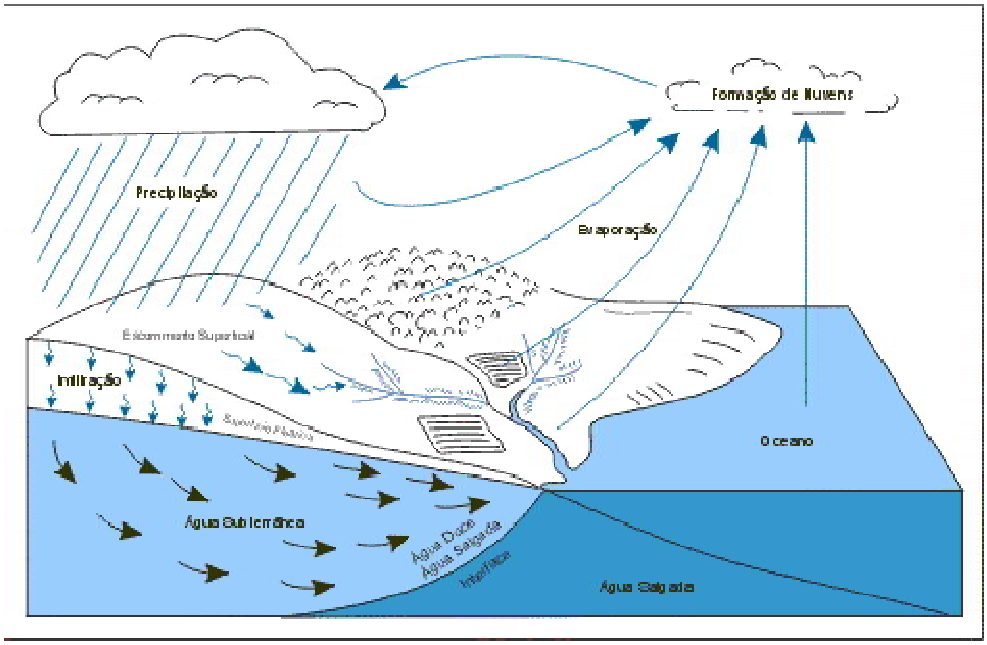
- Calcular e analisar a estimativa da evapotranspiração pelos métodos de Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo, Camargo, Hargreaves & Samani, Linacre, Priestley &Taylor e Penman-Monteith para o local de estudo.
- Comparação dos métodos com o método padrão.
- Avaliar o efeito da sazonalidade da evapotranspiração no local estudado;

3 **REVISÃO DE LITERATURA**

3.1 **Ciclo Hidrológico**

Villela e Mattos (1975), define ciclo hidrológico como uma atividade da água de forma natural tanto quanto seus acontecimentos, mudanças e sua influência na sociedade. Segundo Tundisi (2003), o ciclo hidrológico é incentivado por vários fatores, dentre eles são: energia térmica solar, força dos ventos com o transporte de vapor d'água para o continente e força da gravidade. E os principais componentes que fazem parte do ciclo hidrológico são: evaporação, a precipitação, a transpiração das plantas e a percolação, infiltração e a drenagem. O ciclo hidrológico sofre grandes consequências através de um amplo conjunto das atividades humanas refletindo na qualidade da água, o que é resultado do uso múltiplo da água. O uso da água difere em diversas atividades, onde depende da população, economia da região, indústria e atividades agrícolas, os impactos são diversos e mostram uma proporção diferente na qualidade da água e em cada componente do ciclo hidrológico, Tundisi (2006).

Figura 01- Equematização do Ciclo Hidrológico.



Fonte: (HEATH, 2015)

3.2 **Definição de evapotranspiração**

O conhecimento das perdas por evaporação e transpiração tem grande importância para o gerenciamento e planejamento de uso de recursos hídricos e para irrigação (BORGES, 2007).

Thornthwaite (1948), como um dos primeiros pesquisadores a abordar o tema Evapotranspiração, define este fenômeno como sendo o processo natural em que a água retorna para atmosfera. Varejão Silva (2006) reforça esse conceito dizendo que a evapotranspiração é derivados de superfície vegetada, englobando duas contribuições: a evaporação da umidade que existe no solo e a transpiração como resultado da atividade biológica ocasionada pelos seres vivos que habitam no solo.

Segundo Villa Nova, Salati e Matsui (1976), toda mudança nas características da cobertura do solo provocaria alterações nos parâmentos do balanço de energia e na dinâmica do escoamento, comprometendo o processo evaporativo. Uma consequência é a possível diminuição da umidade do ar que poderá gerar grandes oscilação térmicas e uma profunda mudança no equilíbrio dos sistemas convectivos da região.

Segundo Silva e Amaral (2008), a Evapotranspiração (ET), extremamente importante no computo do Balanço Hídrico para fins de irrigação, e é um processo simultâneo de transferência de água para a atmosfera através da evaporação da água do solo e da transpiração das plantas

Sabe-se que qualquer modificação nas características da cobertura de solo implica não só em alterações nos parâmetros do balanço de energia, como também na dinâmica do escoamento, afetando diretamente o processo evaporativo. Como consequência uma provável redução da umidade do ar deverá determinar, a exemplo dos climas desérticos, maiores oscilações térmicas e profundas alterações no equilíbrio dos sistemas convectivos característico da região (VILLA NOVA; SALATI; MATSUI, 1976).

3.3 **Método empíricos de estimativa da evapotranspiração**

Exitem uma grande variedade de métodos utilizados para estimar a evapotranspiração potencial. Esses métodos podem ser classificados de acordo com a base de dados que é utilizado. Existem os método baseados somente em dados de temperatura do ar, outros baseados em temperatura do ar e pressão de vapor ou na radiação incidente (FERNANDES et al, 2010).

As equações para estimar a ETP foram desenvolvidas em localidades distintas e podem limitar-se de acordo com o local a ser usado, sendo recomendado o uso em locais com clima semelhante ao que a equação foi desenvolvida. (LEITÃO, M.; OLIVEIRA; LEITÃO, T., 2007)

A evapotranspiração pode ser estimada com informações medidas na estação agrometeorológicas, havendo vários métodos para se obter essas informações. Somente alguns métodos apresentam grande potencialidade em sua aplicação prática, onde vai depender dessas informações meteorológicas disponíveis no espaço a ser estudado. Contudo todos os métodos para estimativa de evapotranspiração são empíricos, pois em sua aplicação sempre iremos utilizar parametrizações empíricas (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2007). As informações quantitativas de evapotranspiração são necessárias em diversos campos do conhecimento que enfrentam grandes problemas com manejo da água e irrigação (STONE et al., 1995).

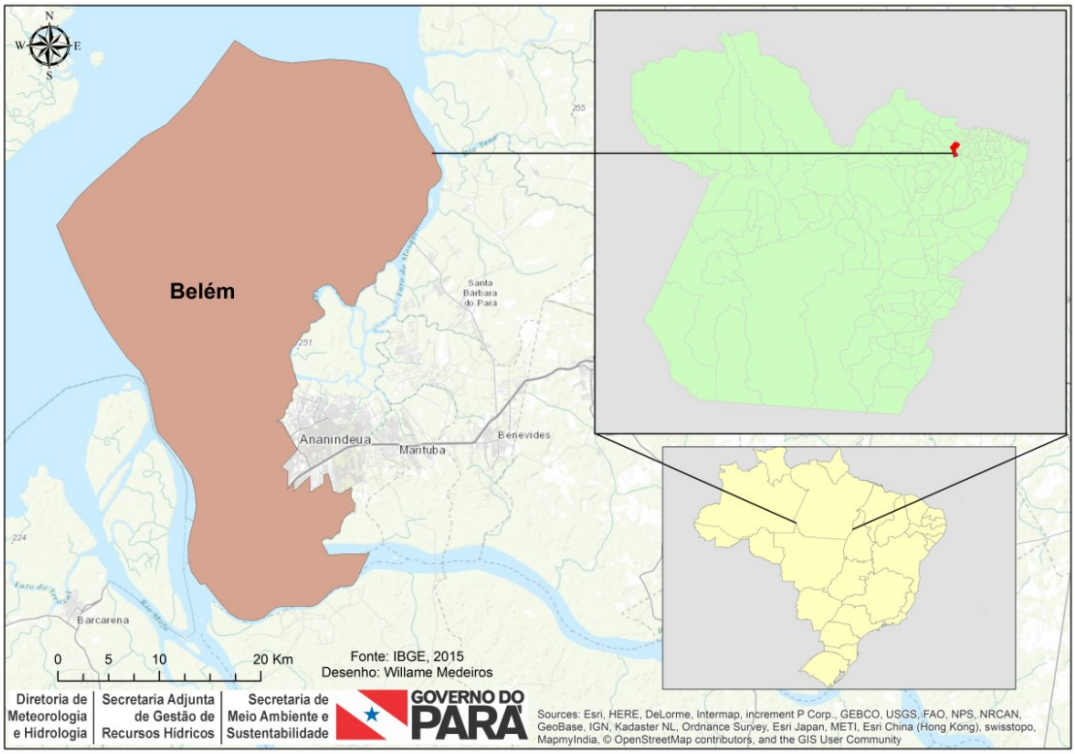
4 **MATERIAL E MÉTODOS**

4.1 **Caracterização da área de estudo**

A cidade de Belém é um município do Estado do Pará situado na região Norte do Brasil, com as seguintes coordenadas geográficas, latitude 01°27’20” S e longitude 048°30’15” W. A cidade possui 39 ilhas, totalizando uma área de 1.059,458 km², encontra-se as margens da Baia do Guajará e do rio Guamá, onde faz divisa com os municípios de Ananindeua, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Barcarena, além das baías do Marajó e Guajará (SILVA JUNIOR, 2012).

O relevo apresenta pouca variação, com uma altitude máxima de 25 metros situada na ilha de Mosqueiro, mas em grande parte da área urbana a altitude varia entorno de 3 a 4 metros. A população estimada para 2016 em Belém é de 1.446.042 habitantes, tendo uma densidade demográfica 1.364,88 (IBGE, 2016)

Figura 02 – Localização da cidade de Belém-PA.



4.2 **O Clima**

A cidade de Belém, situada na região norte do Brasil, possui um clima do tipo quente e úmido, as temperaturas possuem pouca variação ao longo do ano e tem uma média climatológica entorno de 26°C a radiação solar incidente é elevada durante o ano todo. Com relação à umidade relativa, se matem em média a 80%, a precipitação na região norte é muito elevada, com total anual acima de 2000 mm.

O município pertence à região equatorial, segundo a classificação de Köppen Belém se encaixa no tipo climático Afi, que corresponde a clima chuvoso sem ocorrência de estação seca com a menor média de temperatura do ano superior a 18° C. E de acordo com Thornthwaite a cidade classifica-se como B4rA'a' caracterizando clima úmido, podendo presentar pouca ou nenhuma deficiência hídrica. Devido à cidade está localizada na região equatorial a região não apresenta estações do ano definidas, segundo Oliveira et al. (2016) há apenas dois períodos identificados como chuvoso e o menos chuvoso, o período chuvoso ocorre entre os meses de janeiro a maio e o período menos chuvoso está compreendido entre os meses de Julho a Dezembro.

Em Belém a precipitação é regida basicamente por convecção local, porém, há contribuição de outros sistemas atmosféricos no verão austral que corresponde ao período chuvoso da região. Durante esse período de maior ocorrência de precipitação os efeitos locais são associados a sistemas de escalas maiores, como a Zona de convergência intertropical (ZCIT) que é formada pela confluência dos ventos Alísios oriundos do nordeste do hemisfério norte e sudeste do hemisfério sul, e sua colaboração na região norte é notada nos meses de março e Abril quando a ZCIT se desloca de sua posição de aproximadamente 12°N para a posição mais ao sul em torno de 4°S, temos a atuação das linhas de instabilidades (LI), que se formam na costa norte e nordeste da América do sul e tem atuação durante todo o ano tendo maior ocorrência no mês de Julho (COHEN, 1989).

Com base nos dados observacionais que constam nas normais climatológica do INMET (1961-1990) observa-se que Belém possui um regime pluviométrico bastante elevando durante o ano todo, com o maior valor médio

observado no mese de Março com 436 mm com e o menor valor no mês de Novembro com 111 mm e a temperatura não tem variação acentuada de um período pro outro, a temperatura máxima fica em torno de 31ºC, a mínima de 22ºC e média de 26ºC, tem umidade relativa acima de 80% o ano todo.

4.3 **Dados Utilizados**

O estudo foi reaizado com dados de um ano, de Janeiro a Dezembro de 2016, e os elementos meteorológicos utilizados foram: a temperatura máxima e mínima do ar, a radiação solar global e a velocidade do vento, coletados na estação automática da estação automática LEM/UFPA localizada no campos básico da Universidade Federal do Pará, próximo ao Instituto de Geociências. A estimativa de evapotranspiração potecial foi feita através dos métodos de Thornthwaite (1948), Hargreaves & Samani, Linacre, Prietley&Taylor e Penman-Monteith, Thornthwaite-Camargo e Camargo . Nos métodos em que a ETP é estimatimada em escala diária, os valores foram acumulados para se transformar em escala mensal.

4.5 **Métodos de estimativa da evapotranspiração**

4.5.1 Método de Penman-Monteith

O método de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO é reconhecido como método padrão de estimativa de evapotranspiração por ser baseado em um número maior de variáveis meteorológicas, obtendo melhores resultados da evapotranspiração diária. Nesse método são utilizadas informações de temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento, saldo de radiação e outras variavés, além da identificação do local e surge partir de uma adaptação do método de Penman e por possui melhor desempenho em diversos locais e climas é utilizado como base de comparação para outros métodos. Será utilizada a metodologia proposta por Allen et al. (1998).

$$ETo = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0{,}34\ _2)} \qquad \text{Eq. (6)}$$

Onde

- Eto: evapotranspiração de referência [mm dia^{-1}],
- G: fluxo de calor do solo [MJ m^{-2} dia^{-1}],
- Rn: radiação líquida na superfície da cultura [MJ m^{-2} dia^{-1}],
- T: média da temperatura diária do ar [° C],
- U_2: velocidade do vento a 2 m [m s^{-1}],
- e_s: pressão de saturação do vapor [kPa],
- e_a: pressãoparcial de vapor [kPa],
- Δ - curva de pressão de vapor, kPa ºC^{-1};
- γ - constante psicrométrica,[0,063 kPa ºC^{-1}]
- 900 - fator de conversão.

O fluxo de calor no solo foi estima pela seguinte equação:

$G = 0{,}3 * Rn$, onde Rn é o saldo de radiação. Eq. (5.1)

Radiação líquida total diária foi calculada através da seguinte equação:

$$Rn = Q_g\,(1 - r) - 4{,}903\ 10^{-9}\ T^4 (0{,}34 - 0{,}14\sqrt{e_a})(0{,}1 + 0{,}9\frac{n}{N}) \qquad \text{Eq. (5.2)}$$

Em que T é a temperatura média diária em °K, e_a pressão de vapor (kPa), n é a insolação (h), N é o fotoperíodo (h), r o albedo da superfície, Qg a irradiância solar global diária (MJ m^{-2} dia^{-1}).

$e_s = 0{,}06108 \cdot 10^{\left(\frac{7{,}5}{273{,}3+T}\right)}$, onde T é a temperatura Eq. (5.3)

$e_a = \left(\frac{e_s \cdot UR}{100}\right)$, onde UR é a Umidade relativa Eq. (5.4)

$$\Delta = \frac{4098 \cdot e_s}{(T+273,3)^2} \qquad \text{Eq. (5.5)}$$

4.5.2 Método de Thornthwaite de 1948

O método de Thornthwaite (1948) foi mostrado pela primeira vez em 1944, envolvendo as seguintes variáveis: comprimento do dia, temperatura média diária e umidade relativa do ar. Futuramente, houve alguma adequações da equação, onde a umidade relativa do ar foi anulada. De modo geral, o método tem uma boa estimativa para o clima úmido, não dependendo da latitude e altitude. Este método é baseado em um índice de eficiência de temperatura anual. Na qual é definido pela soma de 12 valores mensais do índice de calor.

$$I = \sum_1^{12} i \qquad \text{Eq. (1)}$$

$$i = \left(\frac{Tméd}{5}\right)^{1,514} \qquad \text{Eq. (2)}$$

Em que: I é o índice de calor anual, i é o índice de calor mensal e Tmed é a temperatura média mensal.

Para se obter os valores de evapotranspiração potencial, ainda é necessário obter o valor do coeficiente “a”, no qual se baseia no índice de calor anual.

$$a = 6{,}75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7{,}71 \times 10^{-5} \times I^2 + 0{,}01791 \times I + 0{,}49239 \qquad \text{Eq. (3)}$$

Para se obter a evapotranspiração em milímetros, é utilizada a seguinte equação:

$$ETP = 16\left(\frac{10 \text{x} \text{Tméd}}{I}\right)^a \qquad \text{Eq. (4)}$$

Esta equação ganha valores de EVP para uma condição padrão, com 12 horas de fotoperíodo e mês com 30 dias. Sendo feita a correção pela seguinte equação:

$$ETo_T = ETP_p \times \frac{N}{12}\frac{ND}{30} \qquad \text{Eq. (5)}$$

em que: N é o fotoperíodo do 15º dia do mês e ND é o número de dias do mês.

4.5.3 Método de Priestley & Taylor

O método de Priestley e Taylor (1972) é uma simplificação de penman, onde foi mantido o saldo de radiação corrigido pelo parâmetro de Priestley & Taylor.(SILVA, 2005).

$$ETo = \alpha \times W(Rn - G) \qquad \text{Eq. (6)}$$

- Onde,
- α é o parâmetro de Priestley & Taylor,
- Rn é saldo de radiação, obtido pela equação 5.2,
- G é a densidade do fluxo de calor no solo, obtido pea equação 5.1
- e l é o calor latente (2,45 MJ.kg-1).
- W é o fator de ponderação, obtido pela equação abaixo.
- W = 0,407 + 0,0147 T para 0 < T < 16 o C Eq. (6.1)
- W = 0,483 + 0,0100 T para 16,1 < T < 32 o C Eq. (6.2)

4.5.4 Método de Hargreaves & Samani

É um método mais simples pois não é necessário dados de radiação solar global, velocidade do vento e de umidade relativa do ar. (SILVA, 2005)

$$\mathrm{ETo} = 0{,}0023(T_{méd} + 17{,}8)(T_{máx} - T_{mín})^{0,5} Ra \qquad \text{Eq. (7)}$$

onde Tmed, Tmax, e Tmin em °C, que correspondem, respectivamente, as temperaturas média, máxima e mínima e o Ra que representa a radiação extraterrestre (mm/dia).

4.5.5 Método de Linacre

É uma simplificação de método de Penman-Monteith nesse método a evapotranspiração é estimada com base nos dados de Temperaturas diárias máxima, mínima e ponto de orvalho, além de dados de latitude e altitude, usando a seguinte equação abaixo. (LINACRE, 1977).

$$ETo = \frac{700\frac{Tm}{100-\varphi}+15\,(T_a-T_d)}{(80+T_d)} \qquad \text{Eq. (8)}$$

em que Tm = Ta + 0,006z, z é a altitude (m); Ta é a temperatura média do ar (°C); φ a latitude (graus) e Td a temperatura média do ponto de orvalho (°C).

4.5.6 Método de Thornthwaite-Camargo

É o método de Thornthwaite, porém adaptado por Camargo et al. (1999) para ser empregado em qualquer condição climática. Para tanto, utiliza-se uma temperatura efetiva (Tef), que expressa a amplitude térmica local, ao invés da temperatura média do ar. A vantagem é que nessa nova formulação a ETP não é mais subestimada em condições de clima seco. A desvantagem é que há agora necessidade de dados de Tmax e Tmin. Assim como no método original de Thornthwaite, esse método parte de uma ET padrão (ETp).

A formulação do método é a seguinte:

$ETp = 16\,(10\,Tef/I)^a$ (Para $0 \leq Tef < 26{,}5°C$) Eq. (9b)

$ETp = -415,85 + 32,24\ Tef - 0,43\ Tef^2$ (Para $Tef \geq 26,5°C$) Eq. (9b)

- $Tef = 0,36\ (3.Tmax - Tmin)$ Eq. (9.1)
- $I = 12\ (0,2\ Ta)^{1,514}$ sendo Ta = temp. média anual normal Eq. (9.2)
- $a = 0,49239 + 1,7912.10^{-2}.I - 7,71.10^{-5}.I^2 + 6,75.10^{-7}.I^3$ Eq. (9.3)
- $ETP = ETp * COR$ (mm/mês). Eq. (9.4)
- $COR = (N/12).(NDP/30)$ Eq. (9.5)

Sendo,
N = fotoperíodo do mês em questão; NDP = dias do período em questão

4.5.7 Método de Camargo

O método proposto por Camargo é um método empírico, baseado no método de Thornthwaite. Sendo assim, apresenta as mesmas vantagens e restrições desse método. Apesar disso, tem uma vantagem a mais que é não necessitar da temperatura média anual normal. No entanto, considera a irradiância solar extraterrestre (Qo), a qual é fornecida por tabelas.

$ETP = 0,01 * Qo * Tmed * NDP$ Eq. (10)

Onde,

- Qo = irradiância solar extraterrestre (mm/d)
- NDP = dias do período em questão
- Tmed = Temperatura média mensal

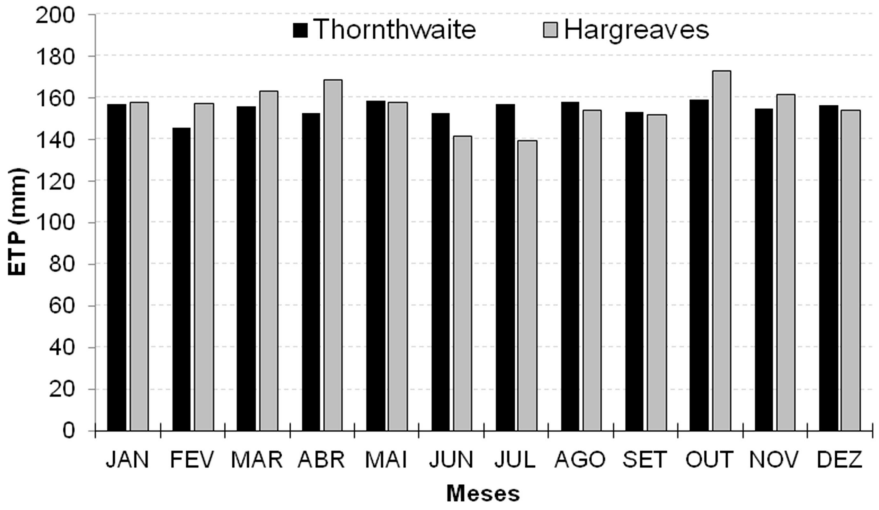
5 **RESULTADOS**

5.1 **Métodos de Thornthwaite e Hargreaves & Samani**.

No Gráfico 01 podemos observar a variabilidade mensal da Evapotranspiração estimada pelos métodos de Thornthwaite e Hargreaves & Samani, ao longo do ano de 2016 para a cidade de Belém. Observou-se que nos métodos de Thornthwaite e Hargreaves & Samani não houve uma grande variabilidade durante o ano, onde o método de Thornthwaite apresentou uma amplitude anual de 14 mm, com valores médios, máximo e mínimo anuais de 155 mm, 159 mm (Outubro) e 145mm (Fevereiro), respectivamente. Já o método de Hargreaves & Samani, apresentou uma amplitude anual de 34 mm, com valores médios, máximo e mínimo anuais de 157 mm, 173 mm (Outubro) e 139mm (Julho), respectivamemte.

Os maiores valores de ETP observados em ambos os métodos ocorreram no mês de outubro, que corresponde a um mês que está no final do período menos chuvoso da região, já os menores valores observados, pelo método de Thornthwaite foi em fevereiro, que está situado no meio do período chuvoso, estando de acordo com o que se esperava, e pelo método de Hargreaves & Samani o menor valor registrado foi no mês de julho, que corresponde ao período de transição entre a época chuvosa e a menos chuvosa, ou seja, esse mês já apresenta redução pluviométrica e com isso a evapotranspiração deveria aumentar, sendo assim o valor de ETP encontrado nesse mês mostra-se incoerente com o que deveria ocorrer.

Gráfico 01- Estimativa de evapotranspiração potencial pelos métodos de Thornthwaite e Hargreaves & Samani, ao longo do ano de 2016, para a cidade de Belém.



Fonte: Da Autora.

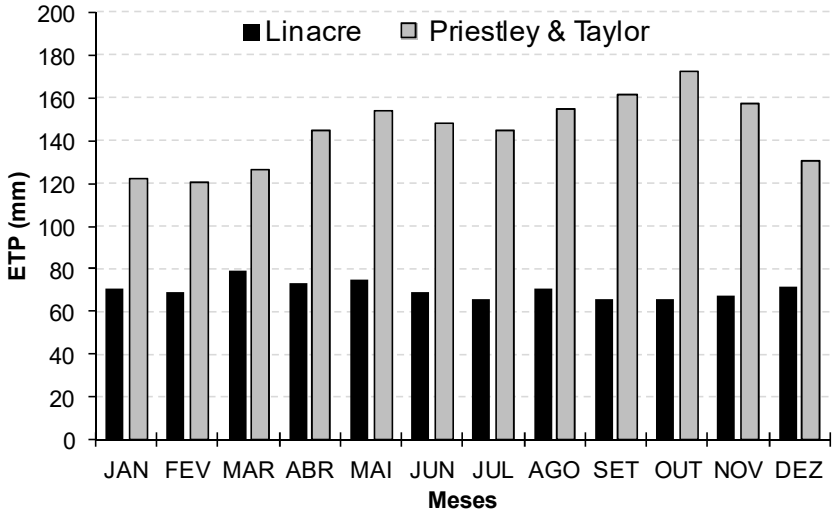
5.2 **Métodos de Linacre e Priestley&Taylor.**

No Gráfico 02 podemos observar a variabilidade mensal da Evapotranspiração estimada pelos métodos de Linacre e Priestley&Taylor, ao longo do ano de 2016 para a cidade de Belém.

Foi verificado que os métodos de Linacre e Priestley&Taylor apresentaram uma grande diferença entre si durante o ano, onde o método de Linacre apresentou valores menores quando comparado ao método de Priestley&Taylor. O método de Linacre apresentou uma amplitude anual de 14 mm, com valores médios, máximo e mínimo anuais de 70 mm, 79 mm (Março) e 65mm (Outubro), respectivamente. Já o método de Priestley&Taylor, apresentou uma amplitude anual de 52 mm, com valores médios, máximo e mínimo anuais de 145 mm, 172 mm (Outubro) e 120mm (Fevereiro), respectivamemte.

Observou-se que o método de Priestley&Taylor apresentou uma variabilidade mais definida, com menores valores no trimestre JFM, e os maiores valores no trimestre SON, correspondendo adequadamente com os período chuvoso e menos chuvoso da região, resposta essa que o método de Linacre apresentou de forma inversa.

Gráfico 02- Estimativa de evapotranspiração potencial pelos métodos de Linacre e Priestley&Taylor, ao longo do ano de 2016 para a cidade de Belém.



Fonte: Da Autora.

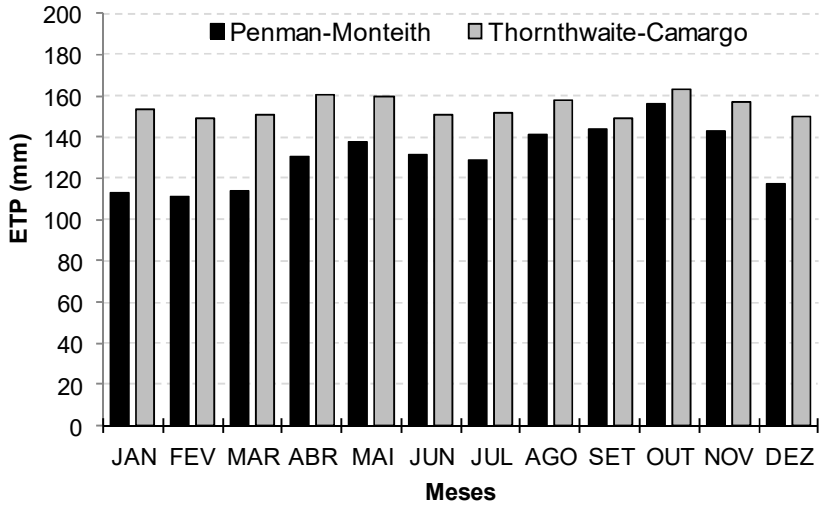
5.3 **Métodos de Penman-Monteith e Thornthwaite-Camargo**

No Gráfico 03 podemos observar a variabilidade mensal da Evapotranspiração estimada pelos métodos de Penman-Monteith e Thornthwaite-Camargo, ao longo do ano de 2016 para a cidade de Belém.

Observou-se que A ETP estimada pelo método de Penman-Monteith apresentou uma variabilidade durante o ano, com uma amplitude anual de 45 mm, com valores médios, máximo e mínimo anuais de 131 mm, 156 mm (Outubro) e 111 mm (Fevereiro), respectivamente. Já o método de Thornthwaite-Camargo, apresentou uma amplitude anual de 14 mm, com valores médios, máximo e mínimo anuais de 154 mm, 163 mm (Outubro) e 149 mm (Fevereiro e Setembro), respectivamemte.

O método de Penman-Monteith apresentou um padrão anual sazonal, similar ao comportamento da precipitação pluvial, onde no período chuvoso foram encontrados menores valores da ETP, devido a menor disponibilidade de energia para evaporação da água, e maiores valores de ETP no período menos chuvoso, o que não pode ser observado no método de Thornthwaite-Camargo.

Gráfico 03- Estimativa de Evapotranspiração Potencial pelos métodos de Penman-Monteith e Thornthwaite-Camargo, ao longo do ano de 2016, para a cidade de Belém.



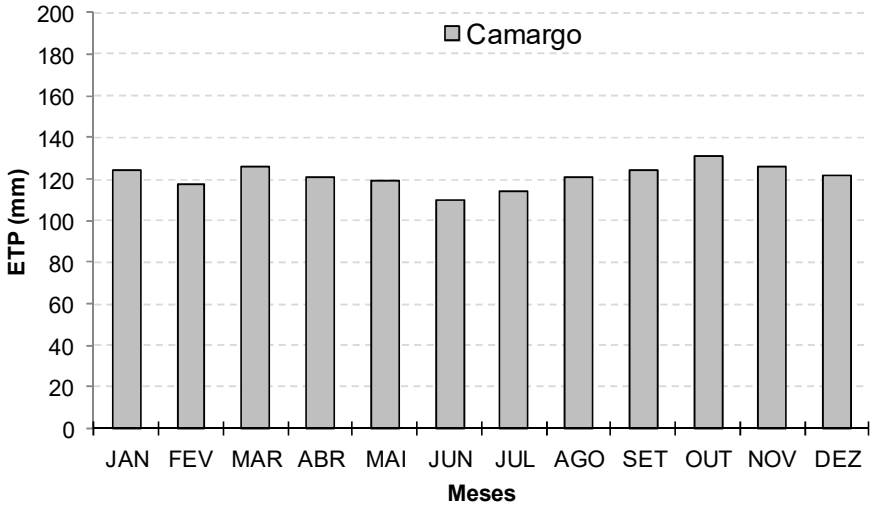
Fonte: Da Autora.

5.4 **Método de Camargo**

No Gráfico 04 podemos observar a variabilidade mensal da Evapotranspiração estimada pelo método Camargo, ao longo do ano de 2016 para a cidade de Belém.

Observou-se que A ETP estimada pelo método de Camargo apresentou uma pequena variabilidade durante o ano, com uma amplitude anual de 22 mm, e com valores médios, máximo e mínimo anuais de 121 mm, 131 mm (Outubro) e 109 mm (Junho), respectivamente.

Gráfico 04- Estimativa de Evapotranspiração Potencial pelo método de Camargo, ao longo do ano de 2016, para a cidade de Belém.



Fonte: Da Autora.

5.5 **Comparação dos métodos com relação ao método padrão de Penman-Montheith**.

Na Tabela 1 pode-se visualisar os valores de estimativa mensais de ETP obtidos através dos métodos de Penman-Monteith(PM), Thornthwaite (TW), Hargreaves & Samani (H), Priestley & Taylor (P&T), Linacre (Li), Thornthwaite-Camargo (T-C) e Camargo (C), para o município de Belém durante o ano de 2016. Pode-se observar a variabilidade mensal da estimativa da ETP nos métodos utilizados, onde verifica-se que PM e P&T seguem o padrão da sazonalidade da precipitação pluvial e da nebulosidade na região e os outros não.

Tabela 1- Valores médios mensais de Evapotranspiração potencial pelos métodos de Penman-Monteith(PM), Thornthwaite (TW), Hargreaves & Samani (H), Priestley & Taylor (P&T), Linacre (Li), Thornthwaite-Camargo (T-C) e Camargo (C), para o ano de 2016.

	P-M	TW	H	P&T	Li	T-C	C
JAN	113	157	158	122	71	154	124
FEV	111	145	157	120	69	149	117
MAR	113	156	163	126	79	151	126
ABR	131	152	169	145	74	160	121
MAI	138	158	158	154	75	159	119
JUN	131	152	142	149	69	151	109
JUL	129	157	139	145	66	152	114
AGO	141	158	154	155	70	158	121
SET	143	153	152	162	66	149	124
OUT	156	159	173	172	65	163	131
NOV	143	155	161	157	68	157	126
DEZ	117	156	154	131	71	150	122
Média	131	155	157	145	70	154	121

Fonte: Da Autora.

No Gráfico 05 podemos observar a comparação da evapotranspiração de referência mensal estimada pelo método Penman-Monteith e os métodos: Hargreaves & Samani (a), Linacre (b), Thornthwaite (c), Thornthwaite-Camargo (d), Priestley & Taylor (e) e Camargo (f), para o município de Belém no ano de 2016. Com base nos gráficos foram feitas comparações que nos forneceram subsidios para avaliar os métodos estudados em relação ao método de Penman-Monteith, padronizado pela FAO. Com base na Tabela 1, podemos aferir que os métodos de Hargreaves & Samani, Thornthwaite, Thornthwaite-Camargo e Priestley & Taylor superestimaram os valores da Evapotranspiração quando comparado ao método de Penman-Montheith, e o método de Linacre subestimou os valores da Evapotranspiração.

O método de Camargo apesar de apresentar valores ligeiramente superiores ao método de Penman-Montheith, sua correlação foi muito fraca (R=0,298) indicando que apesar da facilidade de ser aplicado e requerer

poucas informações, o mesmo não apresentou um bom comportamento linear entre os métodos.

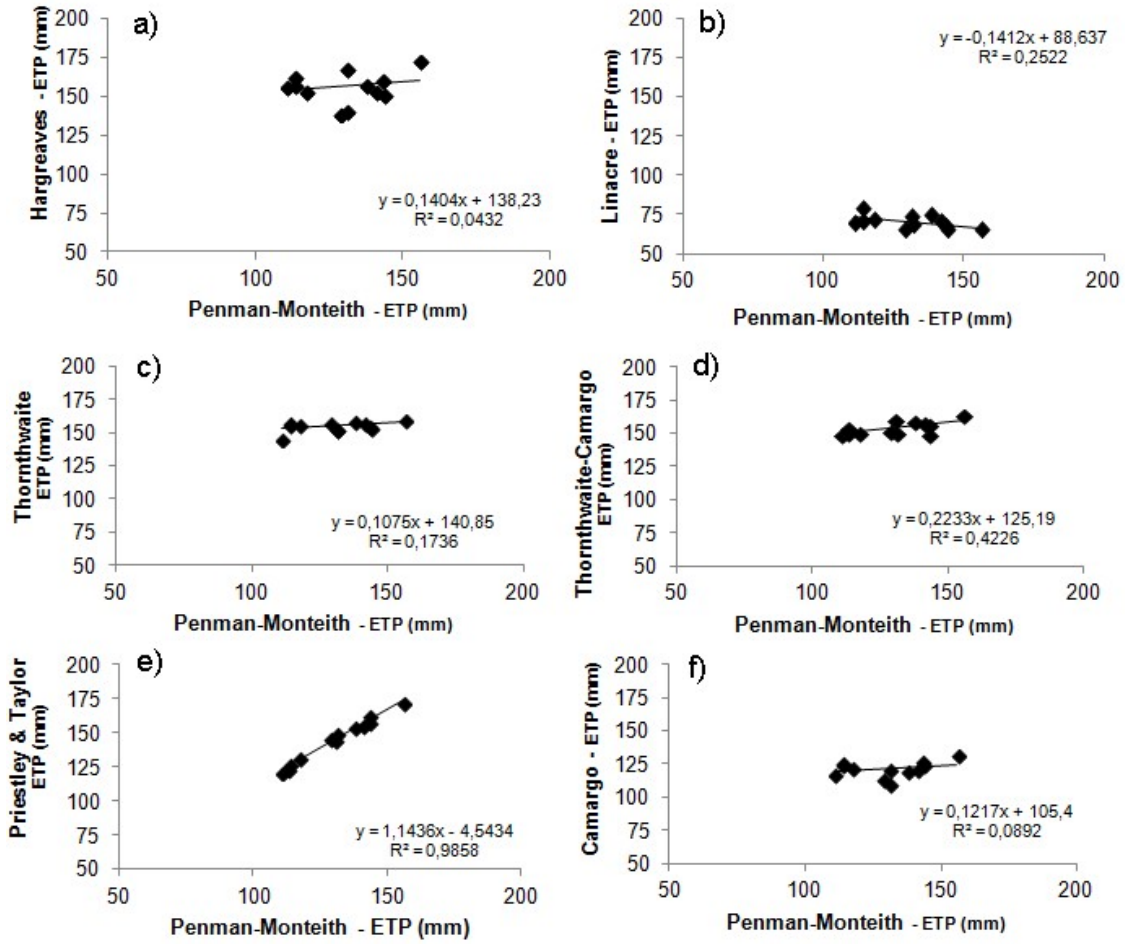
Ao analisarmos as correlações entre o método de Penman-Monteith e os métodos estudados, o método de Priestley & Taylor foi o que apresentou uma melhor correlação (R=0,992), onde esse método foi baseado no método original de Penman, que considera a ETP proveniente de um termo aerodinâmico, e também leva em consideração o balanço de energia do local. O método de Thornthwaite-Camargo apresentou uma correlação moderada (R=0,650), o método de Linacre apresentou uma correlação negativa moderada (R= -0,502) , os métodos de Thornthwaite e Hargreaves & Samani apresentaram correlações fracas, com R=0,417 e R=0,208, respectivamente.

Estudos realizadospor Lima, Araújo e Silva. (2010) para a cidade de Petrolina-PE, mostrou que a correlação entre os métodos de Penman-Monteith e Hargreaves & Samani para aquela região foi moderada a forte (R=0,733), significando que o método pode ser utilizado para a região com um determinado cuidado, haja visto que a relação entre os mesmos não é perfeita.

Rocha et al. (2015) ao estudar a relação entre os métodos de Linacre, Hargreaves & Samani e Camargo com o método de Penman-Monteith, para a cidade de Garanhuns-PE encontrou uma baixa correlação entre esses métodos, R=0,49, R=0,64 eR=0,43, respectivamente.

Pereira et al. (2009) ao estudar a relação entre os métodos de estimativa da Evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira – MG, verificou que os métodos de Linacre e de Hargreaves & Samani apresentaram correlações fracas tanto no perioco chuvoso como no menos chuvoso, no entanto o método de Priestley & Taylor apresentou uma boa correlação durante o período chuvoso e no periodo menos chuvoso a correlação foi fraca.

Gráfico 05- Comparação da evapotranspiração de referência mensal estimada pelo método Penman-Monteith e os métodos: Hargreaves & Samani & Samani (a), Linacre (b), Thornthwaite (c), Thornthwaite-Camargo (d), Priestley & Taylor (e) e Camargo (f), para o município de Belém no ano de 2016.



Fonte: Da Autora.

6 **CONCLUSÕES**

A comparação dos métodos mostra que os métodos de Thornthwaite, Hargreaves & Samani, Camargo, Thornthwaite-Camargo e Priestley&Taylor superestimaram a ETP em comparação com Penman Monteith. No entanto Prietley&Taylor, neste estudo, apresentou melhores resultados em relação ao método padrão PM. Linacre apresentou comportamento subestimando a ETP em todos os meses do ano. Hargreaves & Samani Linacre obtiveram os piores resultados na estimativa de ETP, não sendo recomendados a sua utilização na região.

Os método de Thornthwaite, Camargo, Thornthwaite-Camargo e linacre apresentaram pequena variabilidade durante o ano. O métode de Hargreaves & Samani mostra uma variabilidade que não corresponde com o esperado. Penman Monteith e Priestley & Taylor acompanharam o padrão de precipitação, obtendo resultados adequados aos períodos chuvoso e menos chuvoso. A variabilidade sazonal mostra que a ETP é maior no período menos chuvoso, quando a radiação solar incidente é mais intensa as temperaturas são maiores, no período chuvoso a ETP é menor devido a influência de nebulosidade que nesse período é bem intensa.

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).

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, PB, DEAg/UFCG, v.11, n.3, p.293–300, 2007.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.

COHEN, J.C.P. *Um estudo observacional de linhas de instabilidade na Amazônia*. 1989. xix, 153 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Pesquisas Espaciais- INPE, São José dos Campos, SP, 1989.

COSTA, J.P.R. *Comportamento fisiológico e consumo hídrico da cultura de soja irrigada (GLYCINE MAX (L.) MERRIL) nas condições semi-áridas do Nordeste brasileiro*. 1989. 111f. Dissertação (Mestrado) - Campina Grande-PB, 1989.

FERNANDES, D.S.; HEINEMANN, A.B.; PAZ, R.L.; AMORIM, A. O. *Evapotranspiração*: uma revisão sobre os métodos empíricos. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. (Documentos, 263).

FUNDAÇÃO CEARENCE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS(FUNCEME). *Sistemas meteorológicos causadores de chuva na região Nordeste do Brasil*. Disponível em: <http://www.funceme.br/>. Acesso em: 10/03/2017

HEATH, R. C. *Hidrologia básica de água subterrânea*. United States: Geological Survey Water Supply Paper 2220; Associação Brasileira de Águas Subterrâneas Núcleo Sul-ABAS, 2015.

INSTITUTO DE BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Faltou o que tirastes o*Titulo*. Disponível em: <http://www.cod.ibge.gov.br/3AW. 2016>. Acesso em: 10/03/2017

LEITÃO, M. M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, T, J. V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da paraíba. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, UAEAG/UFCG, v.11, n.6, p.585–593, 2007.

LIMA, J. R.A.; ARAÚJO, R. S.; SILVA, F. S. Análise comparativa entre os métodos de estimativa de evapotranspiração de referência em Bebedouro – PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16., 2010, Belém. *Anais...* Belém: SBMET, 2010. Disponível em: <http://www.sbmet.org.br/cbmet2010/artigos/698_89589.pdf>. Acesso em: 29/03/2017

LINACRE, et al. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, Amsterdam, v.18, n.1, p.409-424, 1977.

MOHAN, S.; ARUMUGAM, N. Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration: factor analysis approach. *Water Resources Management*, Índia, v. 10, n. 1, p.1-20, Feb. 1996.

OLIVEIRA, M. C. F.; SOUZA JÚNIOR, J. A.; CRUZ, P. P. N.; SOUZA FILHO J. D. Climatologia urbana da cidade de Belém-Pará, através das precipitações e temperaturas do ar, das normais climatológicas de 1941 a 1970, 1971 a 2000 e da normal provisória de 2001 a 2015. *Revista Brasileira de Geografia Física* v.09, n. 03, p. 803-819, 2016.

PEREIRA, D. R.; YANAGI, S. N. M.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; SILVA, L A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.39, n.9, p.2488-2493, 2009.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. *Meteorologia agrícola*. Ed. revista ampliada. Piracicaba, SP: Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciências Exatas, 2007.

SILVA, V. P. R.; BELO FILHO, A. F. ; SILVA, B. B.; CAMPOS, J. H. B. C. Desenvolvimentolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, DEAg/UFCG, v.9, n.4, p.547-553, 2005.

SILVA JUNIOR, J. A. *Avaliação de parâmetros micrometeorológicos, do conforto e da percepção térmica na área urbana da cidade de Belém – PA*. 2012. 157f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido) - Núcleo de Altos Estudos Amazônicos, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2012.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. da. *Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação*. Embrapa-CNPAF, Goiânia, 1995. 49p. (Documentos, 55).

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

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

REICHARDT, K. *Á água em sistemas agrícolas*. São Paulo: Manole, 1990. 188p.