



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA  
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

ISAAC ALVES DA SILVA FREITAS

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ET_0$ )**

MOSSORÓ-RN

2019

ISAAC ALVES DA SILVA FREITAS

**COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MÉTODOS PARA  
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em manejo de solo e água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em manejo de solo e água.

Linha de Pesquisa: Manejo do solo e da água no ambiente agrícola.

Orientador: Prof. Dr. José Espínola Sobrinho

Co-orientador: Saulo Tasso Araújo da Silva.

MOSSORÓ-RN

2019

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)  
Setor de Informação e Referência (SIR)

A73c Alves da Silva Freitas, Isaac.  
COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MÉTODOS  
PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE  
REFERÊNCIA / Isaac Alves da Silva Freitas. - 2019.  
63 f. : il.

Orientadora: José Espinola Sobrinho.  
Coorientadora: Saulo Tasso Araújo da Silva.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Manejo de Solo e Água, 2019.

1. Manejo da irrigação. 2. análise de  
sensibilidade. 3. Penman-Monteith. 4. curva de  
sensibilidade. I. Espinola Sobrinho, José, orient.  
II. Tasso Araújo da Silva, Saulo, co-orient. III.  
Título.

Bibliotecário-Documentalista: Keina Cristina Santos Sousa,  
CRB4 1254

ISAAC ALVES DA SILVA FREITAS

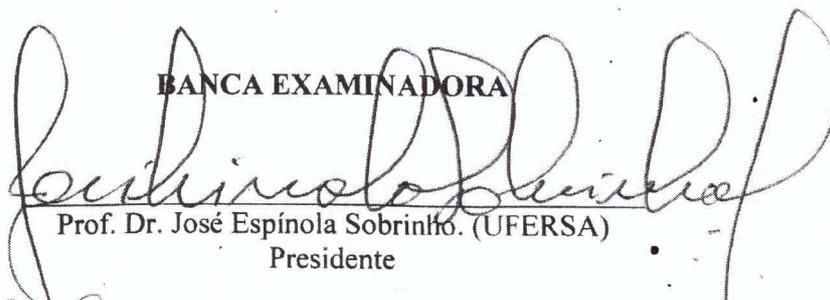
**COMPARAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE METODOS PARA  
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em manejo de solo e água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em manejo de solo e água.

Linha de Pesquisa: Manejo do solo e da água no ambiente agrícola.

Defendida em: 08 / Abriu/ 2019.

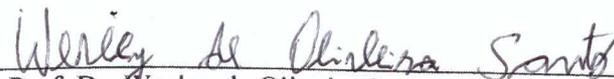
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. José Espínola Sobrinho. (UFERSA)  
Presidente



Prof. Dra. Welka Preston Leite Batista da Costa Alves. (UERN)  
Membro Examinador



Prof. Dr. Wesley de Oliveira Santos. (UFERSA)  
Membro Examinador.



Prof. Dr. Saulo Tasso Araújo da Silva. (UFERSA)  
Co-orientador

*Dedicado à minha incrível avó Maria Rita Lima de Freitas, que me mostrou que devemos sempre ser verdadeiros no que falamos, e corretos na forma como vivemos. (In Memoriam).*

*A Raimunda de Fatima da Silva e Luiz Lima de Freitas meus pais, por todo o amor e o suporte durante todos esses anos.*

*Ao André A. da Silva Freitas, meu irmão, por todos esses anos de abdicção em prol de minha Formação, mesmo quando o que fazia pudesse prejudica-lo, e a minha namorada Vilmara Carneiro, por toda a ajuda, a paciência e os ensinamentos sobre como ser alguém melhor.*

*Ao meu tio Manuel Raimundo, que me ajudou durante todos esses anos, sempre que de alguma forma necessitei.*

*Ao meu orientador José Espínola Sobrinho, por todos os momentos difíceis que ele me ajudou a contornar. Obrigado por ser além de um orientador, um amigo, e a quem aprendo a admirar a cada dia mais.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois, Ele é a fonte de tudo. Agradeço por todos os momentos e pessoas que passaram e que estão ao meu lado, e por toda a força e esperança que Deus tem me proporcionado, sempre agindo em minha vida para que eu tivesse consciência de que ele está ao meu lado e jamais me desamparara.

A Universidade Federal Rural do Semi-Árido, e o programa de pós-graduação em manejo de solo e água, por todo o suporte e o acolhimento que me foi proporcionado. Aos meus mestres, que fazem tudo o que podem para proporcionar a todos nós alunos, a melhor formação possível, sempre sendo profissionais quando em ambiente de aula, e sendo bons exemplos de pessoas para todos nós.

Ao professor José Espínola Sobrinho, por todos esses anos de orientação, tanto na graduação quanto na pós-graduação, muito obrigado por todos esses anos, por ter me ajudado tanto, obrigado por ter entendido as minhas limitações e ter me ajudado a ver que ensinar é o maior bem que se pode fazer para a sociedade.

Ao professor Saulo Tasso que aceitou o desafio de ajudar na minha orientação, não colocando obstáculos para que isso ocorresse, sendo crítico sempre que necessário. Ao meu irmão André Alves da Silva Freitas por toda a paciência que teve e tem comigo, por toda a torcida e toda a cobrança que já me fez, pois às vezes só assim pude ter coragem de estudar e me esforçar.

A Bárbara Albuquerque e Fernanda Dantas (Lôra), por me ajudarem a ver e entender que tipo de amigo eu sou e quero ser, por puxarem a minha orelha quando fazia coisas erradas e por me darem um ombro quando eu não sabia o que fazer.

A Tecla, Edmilson, que me ajudaram tanto, e ainda conto com vocês. Ao Ramon, Galdino, Willian Fernandes, Alricelia, Valeria e em especial a Jozelmo que sempre será lembrado como o bom amigo que sempre foi.

Ao meu Amigo Andrhe Luiz, que passou por tantas coisas que eu não pude participar, mas que mesmo assim não se esqueceu do amigo. E a toda a sua família por me acolheu desde sempre, e por tratarem a um estranho como eu com tanto carinho.

E finalmente a todos da Juventude Franciscana (JUFRA), vocês sempre foram da família, sempre foram exemplo de bondade de compaixão com o próximo, que possamos nos manter fortes, em nosso benefício, mas a cima de tudo em prol do próximo.

## RESUMO

O município de Mossoró destaca-se no cenário agrícola regional, sendo considerado grande potencialidade produtora na fruticultura da região Nordeste. O município apresenta constante déficit hídrico, sendo necessário o desenvolvimento da agricultura irrigada e o uso eficiente da água, para isso é necessário o conhecimento da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), para o cálculo das necessidades hídricas das culturas. Assim sendo, objetivou-se neste trabalho avaliar diversos métodos de estimativa da ET<sub>o</sub>, de forma a viabilizar um método confiável e que envolva uma menor quantidade de variáveis de entrada que o método padrão da FAO, para as condições climáticas de Mossoró. A metodologia usada testou diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, comparando-os com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56, posteriormente foi feita a regressão linear dos dados, verificando a existência ou não de significância entre os valores encontrados, indicando-se nos resultados os melhores e os piores métodos comparados ao método de Penman-Monteith-FAO 56. De acordo com os índices estatísticos utilizados, o melhor desempenho foi obtido pelo método de Penman Original (PO), ao passo que o pior método ficou por conta da metodologia proposta por Thornthwaite e Camargo (TTC). O método Penman Original (PO) obteve valores de ( $d = 1,0$ ,  $c = 0,91$  e  $EPE = 0,54$  mm/dia), enquanto que o TTC obteve valores de ( $d = 0,99$ ,  $c = -0,05$  e  $EPE = 4,19$ mm/dia). Quando testada a viabilidade dos métodos, todos se mostraram, de acordo com o teste t, viáveis, com exceção do TTC que mostrou baixíssima confiabilidade, sendo recomendada a sua exclusão de uso sem uma previa calibração para nossas condições.

**Palavras-chave:** Manejo da irrigação, análise de sensibilidade, Penman-Monteith, curva de sensibilidade.

## ABSTRACT

The municipality of Mossoró stands out in the regional agricultural scenario, being considered, great productive potential in the fruticulture of the Northeast region. The municipality has a constant water deficit, it is necessary the development of irrigated agriculture and the efficient use of water, for this it is necessary the knowledge of the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>), for the calculation of the water needs of the crops. Therefore, the objective of this work was to evaluate several ET<sub>o</sub> estimation methods, in order to make feasible a reliable method that involves a smaller amount of input variables than the FAO standard method, for the climatic conditions of Mossoró. The methodology used tested different methods of estimation of the reference evapotranspiration, comparing them with the standard Penman-Monteith-FAO method 56, later the linear regression of the data was, verified, verifying the existence or not of significance between the values found, indicating the best and worst methods compared to the Penman-Monteith-FAO method 56. According to the statistical indices used, the best performance was, obtained by the Penman Original (PO) method, while the worst method was due to the methodology proposed by Thornthwaite and Camargo (TTC). The original Penman method (PO) obtained values of ( $d = 1.0$ ,  $c = 0.91$  and  $EPE = 0.54\text{mm / day}$ ), while the TTC obtained values of ( $d = 0.99$ ,  $c = -0,05$  and  $EPE = 4,19\text{mm / day}$ ). When the viability of the methods were tested, all of them were viable, according to the t test, with the exception of TTC, which showed very low reliability, being recommended to be excluded from use without prior calibration for our conditions.

**Key words:** Irrigation management, sensitivity analysis, Penman-Monteith, sensitivity curve.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1a – Valores médios de Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) de uma série histórica de 11 anos (2007 a 2017), comparando 27 métodos de estimativa de ET<sub>o</sub>, com o método padrão (Penman-Monteith-FAO 56).....37
- Figura 1b – Valores médios de Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) de uma série histórica de 11 anos (2007 a 2017), comparando 27 métodos de estimativa de ET<sub>o</sub>, com o método padrão (Penman-Monteith-FAO 56).....39
- Figura 2 – Comportamento dos métodos frente a variação de temperatura.....47
- Figura 3 – Comportamento dos métodos frente a variação de radiação .....49
- Figura 4 – Comportamento dos métodos frente a variação de umidade relativa.....51
- Figura 5 – Comportamento dos métodos frente a variação de velocidade do vento.....54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Critério para análise do desempenho ou confiança dos métodos empíricos.....	33
Tabela 2	– Valores acumulados de precipitação referente a série histórica de 11 anos, de 2007 a 2017, em Mossoró, RN, ao longo dos meses.....	36
Tabela 3	– Indicadores estatísticos de Camargo e Sentelhas a comparação entre os diferentes métodos de estimativa da ETo com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56, em escala diária.....	43
Tabela 4	– Análise da variância para a regressão linear ao longo do período de tempo estudado para Mossoró-RN.....	46

## LISTA DE SIGLAS

PMFAO56	PENMAN-MONTHEIT FAO 56
PO	PENMAN-ORIGINAL 1948
TP	TANNER-PELTON
SS	STEPHENS-STEWART
RT	RADIAÇÃO-TEMPERATURA
RL	RADIAÇÃO LIQUIDA
RG	RADIAÇÃO GLOBAL
HH	HICKS-HESS
LG	LUNGEON
RK	ROMANENKO
McB	McGUINNESS-BORDNE
Mc	McCLOLD
Tc	TURC
BL	BENEVIDEZ-LOPEZ
KR	KHARRUFA
IN	IVANOV
HM	HAMON
LN	LINACRE
CM	CAMARGO
JH	JENSEN-HAISE
PT	PRIESTLEY-TAYLOR
BM	BLANEY-MORIN
HO	HARGREAVES-ORIGINAL
HS	HARGREAVES-SAMANI
MK	MAKKINK
TTW	THORNTHWAITE
TTC	THORNTHWAITE-CAMARGO
AT	ABTEW
TMAX	TEMPERATURA MAXIMA
TMIN	TEMPERATURA MINIMA
ET	EVAPOTRANSPIRAÇÃO
ET <sub>o</sub>	EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

## SUMARIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	16
2.1 Aspectos conceituais.....	16
2.1.1 Evapotranspiração (ET).....	16
2.1.2 Evapotranspiração de referência (ETo).....	18
2.1.3. Fatores climáticos que afetam a ETo .....	19
Radiação solar .....	20
Temperatura .....	21
Umidade relativa .....	21
Velocidade do Vento.....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1 Penman-Monteith-FAO 56 (ALLEN <i>et al.</i> 1998) (PMFAO56) .....	23
3.2 Penman-original (PENMAN, 1948) (PO).....	24
3.3 Makkink (MAKKINK, 1957) (MK) .....	24
3.4 Turc (TURC, 1961) (Tc).....	25
3.5 Jensen-Haise (JENSEN e HAISE, 1963) (JH).....	25
3.6 Garcia-Lopez (GARCIA e LOPEZ, 1970) (GL).....	25
3.7 Priestley-Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972) (PT).....	25
3.8 Hargreaves-original (HARGREAVES, 1974) (HO).....	26
3.9 Linacre (LINACRE, 1977) (LN).....	26
3.10 Hargreaves-Samani (HARGREAVES e SAMANI, 1985) (HS) .....	27
3.11 Radiação-Temperatura (OUDIN <i>et al.</i> , 2005) (RT).....	27
3.12 Thornthwaite (THORNTHWAITE, 1948) (TTW) .....	27
3.13 Hamon (HAMON, 1961) (HM) .....	27
3.14 Camargo (CAMARGO, 1971) (CM) .....	28
3.15 Thornthwaite-Camargo (CAMARGO <i>et al.</i> , 1999) (TTC).....	28
3.16 Stephens-Stewart (WINTER <i>et al.</i> , 1995) (SS).....	28
3.17 Tanner-Pelton (BERLATO e MOLION, 1981) (TP).....	29
3.18 Radiação-Global (TOMAR e O'TOOLE, 1980) (RG) .....	29
3.19 Radiação-Líquida (BRUIN e STRICKER, 2000) (RL) .....	29
3.20 Hicks-Hess (BRUIN e KEIJMAN, 1979) (HH).....	30
3.21 McCloud (JACOBS e SATTI, 2001) (MC) .....	30
3.22 McGuinness-Bordne (OUDIN <i>et al.</i> , 2005) (McB) .....	30
3.23 Ivanov (DORFMAN, 1977) (IN) .....	31

3.24 Kharrufa (KHARRUFA, 1985) (KR).....	31
3.25 Blaney-Morin (BLANEY e MORIN, 1942) (BM) .....	31
3.26 Romanenko (OUDIN <i>et al.</i> , 2005) (RK).....	31
3.27 Lungeon (ZIMMERMANN, 2000) (LG).....	32
3.28 Abtew (OUDIN <i>et al.</i> , 2005) (AT).....	32
Análise de desempenho .....	33
Avaliação da sensibilidade dos métodos .....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	35
4.1 Dados de Precipitação.....	35
4.2 Evapotranspiração de referência.....	36
4.2 Curva de sensibilidade .....	46
4.2.1 Temperatura .....	46
4.2.2 Radiação solar global .....	48
4.2.3 Umidade relativa do ar .....	50
4.2.4 Velocidade do vento.....	52
5 CONCLUSÕES .....	54
6 BIBLIOGRAFIA .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Norte é um dos grandes produtores nacionais de fruticultura tropical irrigada, participando com 27% do valor da produção da fruticultura do nordeste brasileiro no ano de 2017 (SECEX/MIDIC, 2018). A baixa capacidade hídrica observada no Nordeste do Brasil (NEB) é resposta aos baixos acumulados pluviais, elevadas taxas de evaporação e episódios frequentes de secas na região (MARTINS *et al.* 2016). O conhecimento da distribuição espacial e temporal da disponibilidade hídrica de uma região permite estabelecer diretrizes para implementação de políticas de planejamento para o uso racional da água. Diante da crescente demanda dos recursos hídricos e os conflitos entre os múltiplos usos, seja na área agrícola que demanda um volume bem maior do que nas atividades urbanas, exige que o planejamento e a gestão da sua utilização ocorram em termos racionais e otimizados.

Estimativas precisas da evapotranspiração são essenciais para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação, melhorar a alocação dos recursos hídricos e avaliar o efeito do uso da água e mudanças no balanço hídrico. Poucos estudos têm avaliado a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) no contexto de sua variação temporal.

Cerca de 70% da área da região Nordeste do Brasil constitui a região do Semiárido Brasileiro, o qual é caracterizado por um padrão pluviométrico cujos volumes variam de 300 a 1000 mm anuais (MARENGO *et al.* 2011) com acentuadas irregularidades sazonais e intrasazonais. O Estado do Rio Grande do Norte é, entre os estados da região Nordeste do Brasil, que possui a maior porção de sua área inserida na região Semiárida. Essa região tem seu subsolo constituído na sua maioria de rochas ígneas e metamórficas, pré-cambrianas, genericamente chamada de cristalinas (FEITOSA e FEITOSA., 2011), que não favorecem a acumulação de água. Assim, as características do clima, associadas com as características edáficas, tornam a agricultura, uma das principais atividades econômicas da região, uma atividade de elevado risco decorrente da presença de condições climáticas muito adversas, característica essa muito presente em nossa região.

A adoção de práticas de manejo de água e o uso de sistemas de irrigação mais eficientes constituem uma das práticas que propiciam subsídios que possam garantir a sustentabilidade da atividade e a segurança hídrica dessas regiões. Por essa razão, o uso racional da água na irrigação tem sido um tema amplamente estudado e discutido.

No Semiárido Brasileiro, em particular, essas práticas são indispensáveis devido à escassez dos recursos hídricos e a necessidade da sustentabilidade da irrigação, visto que a

mesma desempenha importante papel socioeconômico da região, requerendo, no entanto, mais estudos com esse intuito para uma melhor compreensão desse processo. Outra preocupação é que a utilização da irrigação não fique restrita apenas ao agronegócio, mas também se torne uma tecnologia acessível a agricultura familiar, de modo que minimize os riscos e perdas em anos de chuvas insuficientes para a produção agrícola, garantindo assim, a segurança alimentar para essa parcela da população. Por esse motivo o uso de equações matemáticas pode ser uma eficaz forma de minimizar o uso de recursos hídricos já tão escassos na região nordeste.

Na escolha de um método para estimativa da ETo devem ser consideradas a praticidade e a precisão visto que, apesar dos métodos teóricos e micro meteorológicos serem baseados em princípios físicos, eles também apresentam limitações, sobretudo quanto à precisão instrumental, o que pode restringir a sua utilização. Diversos pesquisadores propuseram modelos para a estimativa da ETo, com as diferentes concepções e número de variáveis envolvidas (SILVA *et al.* 2015). Entretanto, vários elementos meteorológicos nem sempre se encontram disponíveis na propriedade ou região de interesse (BARROS *et al.* 2009). Por essa razão, os métodos para estimar ETo que empregam um número menor de variáveis, além de serem mais simples, ainda são importantes para objetivos práticos (CONCEIÇÃO; MANDELLI., 2005).

Estimativas precisas da evapotranspiração são essenciais para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação, melhorar a alocação dos recursos hídricos e avaliar o efeito do uso da água e mudanças no balanço hídrico. Também se torna cada vez mais necessário o conhecimento de mudanças da evapotranspiração em função do tempo, poucos estudos têm avaliado a evapotranspiração de referência (ETo) no contexto de sua variação temporal, bem como a influência que, as mudanças nas variáveis climáticas, tem sobre o cálculo da ETo.

Desta forma o presente trabalho teve como objetivo, avaliar os impactos das alterações climáticas na ETo e o comportamento de diversas equações empíricas que serão testadas, frente a equação padrão Penman-Monteith FAO 56.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Aspectos conceituais

#### 2.1.1 Evapotranspiração (ET)

Ao longo dos anos diversos autores tem dado suas contribuições a fim de caracterizar a evapotranspiração, bem como são muitas as ideias acerca do comportamento e os mecanismos e a influência da evaporação e transpiração sobre o comportamento do clima no mundo. Tucci em 2001 menciona os diversos estados da água associando com a evaporação e transpiração, em seu texto o autor fala que a transferência de água entre a superfície terrestre e a atmosfera ocorre em dois sentidos: a atmosfera-superfície, em que a água pode estar em qualquer estado físico, na forma de precipitação de chuva, granizo e neve, e no sentido superfície-atmosfera em que transferência de água ocorre na forma de vapor, devido à evaporação e transpiração, sendo a última de origem biológica.

A evapotranspiração é um termo bastante estudado para a determinação do consumo de água por parte das plantas. A primeira citação foi efetuada por Thornthwaite em 1948, citado por vários autores entre eles Silva, Moura e Klar (2014) utilizaram a metodologia proposta por Thornthwaite para classificar o clima do estado de Pernambuco. Para Thornthwaite (1948), o fenômeno chamado de evapotranspiração potencial, é considerado como: a perda máxima de água em uma superfície de solo bem umedecido, completamente coberta com vegetação, em fase de desenvolvimento ativo e com dimensões suficientemente grandes, de modo a minimizar os efeitos de energia advectiva local. Se alguma dessas condições não forem atendidas, tem-se a evapotranspiração real. Pouco tempo depois, Penman (1948), na Inglaterra, também definiu a evapotranspiração potencial (ETP) como o processo de transferência de água para a atmosfera, na unidade de tempo, de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, de porte baixo, em pleno desenvolvimento e sem restrições de água no solo. A definição proposta, foi utilizada durante muitos anos, até que, pelo uso de diferentes culturas sendo utilizadas para cálculo de evapotranspiração, surgiu a necessidade de se conceber uma definição mais geral do termo evapotranspiração, mesmo em condições do uso de variedades de grama diferentes. De um modo geral, a grama foi tomada como padrão, isso se devendo a sua utilidade em estações meteorológicas (PEREIRA *et al.* 1997).

Surgiu então a definição de (ET<sub>o</sub>). Desse modo ET<sub>o</sub> foi definida no Boletim 24 da FAO como: “taxa de evapotranspiração para uma extensa superfície, com cobertura gramada de altura uniforme, entre 8 e 15 cm, em crescimento ativo, com o solo completamente sombreado e sem déficit de água (Doorenbos e Pruitt., 1977; Jensen *et al.* 1990 e Al-Ghobari, 2000), para grama de referência rebaixada através de cortes.

De acordo com Camargo e Camargo (2000), Thornthwaite considerou a evapotranspiração potencial (ETP), como um elemento meteorológico padrão, que representa a precipitação necessária para suprir os requerimentos hídricos que necessita uma dada cobertura vegetal.

Diversos trabalhos foram publicados relacionados ao requerimento de água pelas culturas, merecendo destaque os seguintes: a) a primeira edição do Manual 70 da ASCE (American Society of Civil Engineers), b) a segunda edição do Manual 70 da ASCE,; c) o Boletim 24 da FAO; d) a revisão proposta por especialistas realizada pela FAO e outros órgãos ligados à área em 1991; e e) último Boletim da FAO número 56, de 1998.

A primeira edição do Manual 70 da ASCE foi realizada pelo antigo Comitê do Uso Consuntivo de Água para as Culturas Irrigada e Vegetação Nativa, que iniciou seus trabalhos no ano de 1965. Um pouco progresso ocorreu até 68. Em 1969 iniciou-se revisões mais profundas até que em 1973 o Relatório de Uso Consuntivo foi terminado sendo publicado apenas em 1974.

O Manual No 70 da ASCE editado por Jensen *et al.* (1990), objetiva: definir e interpretar a terminologia de evapotranspiração ou uso consuntivo; proporcionar treinamento de engenheiros, educadores e pesquisadores com um resumo breve dos fatores que controlam a evapotranspiração; descrever métodos modernos de medida e estimativa de evapotranspiração; descrever os fatores mais importantes a serem considerados na determinação do requerimento de água na irrigação para fazendas, projetos e bacias fluviais; resumir a medida representativa de evapotranspiração de culturas irrigadas; avaliar a precisão de vários procedimentos de estimativa sob os vários tipos de climas; apresentar melhoramentos para estimativa de evapotranspiração e apresentar uma bibliografia selecionada para informações adicionais.

A segunda edição do Manual 70 da ASCE foi publicada em 1989 após várias revisões e pequenas modificações sugeridas, por Jensen *et al.* (1990).

O Manual 24 da FAO apresenta sugestões da aplicação de métodos bastante conhecidos que determinam a evapotranspiração de referência, para diferentes condições climáticas. Esses métodos são: Blaney-Criddle, Radiação, Penman e Tanque de Evaporação.

O Relatório de Consultores Especialistas nos Procedimentos para Revisão do Roteiro da FAO, com relação a Previsões de Requerimento de Água pelas culturas, (Smith, 1991), chegou a conclusão unânime que a equação combinada de melhor performance na estimativa de ETo é a de Penman-Monteith.

Allen *et al.* (1994 a e b), apresentaram uma atualização na definição de (ETo) e no procedimento de cálculo da referida variável. Devido, principalmente, à diversidade de gramas consideradas na definição da cultura de referência, os autores recomendam uma grama hipotética, com valores fixos de albedo (0,23), altura de 0,12m e resistência do dossel de 70  $\text{sm}^{-1}$ .

A evapotranspiração (ET) é o principal componente no balanço de água em ecossistemas agrícolas, além de ser um fator-chave nos estudos de avaliação ambiental, no manejo de bacias hidrográficas e na estimativa da necessidade hídrica das culturas (CARVALHO *et al.* 2015).

Segundo Alencar *et al.* (2011), a evapotranspiração é a principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, exercendo grande influência sobre os processos hidrológicos e estreitamente relacionada com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e o escoamento superficial.

### **2.1.2 Evapotranspiração de referência (ETo)**

O termo evapotranspiração de referência (ETo), foi desenvolvido utilizando os conceitos propostos por Thornthwaite aplicando-os à cultura da alfafa (*Mendicago sativa L.*), com altura de 0,3 a 0,5 m, numa dada condição climática, com área tampão de 100 m aproximadamente. Entre as razões apresentadas para a escolha da alfafa como planta de referência, argumentou-se que o seu porte seria mais representativo das condições aerodinâmicas de outras culturas do que a grama com o seu porte rasteiro. Contudo, Doorenbos e Pruitt (1977) apresentaram uma definição para evapotranspiração de referência, como aquela que ocorre em uma extensa superfície gramada, com altura de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrições hídricas. Em essência, pode-se verificar que a definição de ETo coincide com a evapotranspiração potencial ETP.

Vale Salientar, no entanto, que, os valores obtidos com a utilização da cultura da alfafa podem diferir substancialmente dos encontrados com a grama, devido às diferenças de rugosidade e albedo das suas superfícies. Buscando apresentar uma padronização para a definição da ETo e visando, principalmente, à utilização do modelo de Penman, Smith (1991)

apresentou uma conceituação da ETo como aquela que ocorre em uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, poder refletor (albedo) de 23% e resistência do dossel ao transporte de vapor d'água de  $69 \text{ s m}^{-1}$ . Essa proposição coincide com a evapotranspiração de uma superfície coberta com grama, em crescimento ativo e sem restrições de água no solo. A evapotranspiração real é aquela que ocorre numa superfície vegetada, sem imposição de qualquer condição (PEREIRA *et. al.*, 2014).

O Manual 24 da FAO, publicado por Doorenbos e Pruitt (1977), teve o objetivo de orientar os pesquisadores com relação à determinação do requerimento de água pelas culturas. Os autores recomendam o cálculo da evapotranspiração das culturas, em três estádios como segue: 1) determinação do efeito do clima no requerimento de água pelas culturas, dados pela evapotranspiração de referência (ETo), 2) o efeito das características da cultura no requerimento de água, dado pelo coeficiente da cultura (Kc) e 3) o efeito das condições locais e práticas agrícolas no requerimento de água pelas culturas, advecção, dimensão do campo, disponibilidade de água, salinidade e métodos de cultivo e irrigação.

A última publicação da FAO, o Boletim 56 (Allen *et al.* 1998), novamente atualiza os procedimentos de cálculo de evapotranspiração de referência (ETo), analisa aspectos relacionados à determinação do coeficiente das culturas (Kc) e recomenda procedimentos de avaliação dos dados empregados nas estimativas de ETo.

### **2.1.3. Fatores climáticos que afetam a ETo**

Segundo Garcez e Alvarez (2012), os fatores que afetam os fenômenos climáticos podem ser agrupados em duas categorias distintas: os relativos à atmosfera ambiente, e os referentes à própria superfície evaporante.

A mudança nas condições climáticas tem gerado grandes preocupações em nível mundial, sendo que uma das grandes questões, neste contexto, é o aquecimento global. As alterações ocorridas nas condições climáticas podem afetar a demanda de água das plantas, porque a evapotranspiração é afetada por mudanças nos elementos climáticos (ALENCAR *et al.* 2011).

Villa Nova (1987) ressalta que é difícil separar a ação de cada um desses elementos, pois os mesmos agem simultaneamente. De maneira geral, quanto maior a disponibilidade de energia solar, maior a temperatura do ar e a velocidade do vento e, quanto menor a umidade

relativa do ar, maior deverá ser a demanda evaporativa da atmosfera, ocasionando aumento na taxa de evapotranspiração, quando a umidade do solo não for fator restritivo.

Os fatores meteorológico-climáticos que afetam a ETo são: o saldo de radiação, a temperatura do ar, a umidade do ar e a velocidade do vento, além de superfícies de água livre, tipo de vegetação e manejo do solo, conforme Carvalho *et al.* (2011). Porém, o presente trabalho vai abordar as variáveis de radiação solar global, temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, por serem as que mais interferem nos valores de ETo.

Silveira e Andrade (2002), trabalhando com a Análise de Componentes Principais (ACP) na investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração, no estado do Ceará, encontraram que, dentre as variáveis climatológicas estudadas, as que apresentaram maior peso no processo da evapotranspiração foram a razão de insolação (n/N) e a umidade relativa do ar (UR).

Diversas tentativas têm sido feitas para relacionar o poder evaporante da atmosfera a vários fatores meteorológicos. Na realidade, a maior parte desses parâmetros está em estreita interdependência, de forma que os mais importantes dentre eles podem aparecer isolados nas formulas simplificadas (GARCEZ e ALVAREZ, 2012). Abaixo alguns dos fatores que intervêm na evapotranspiração:

### **Radiação solar**

A energia proveniente do sol é o fator mais importante no desenvolvimento dos processos físicos que influenciam as condições de tempo e clima na Terra. O saldo de radiação (Rn) representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre sendo definido como o balanço de radiação de todos os fluxos radiativos que chegam e saem de uma superfície (KLEIN *et al.* 1977; WELIGEPOLAGE, 2005).

Da energia recebida na superfície da Terra, aproximadamente 20% é refletida pelas nuvens e partículas atmosféricas, enquanto outra parte é absorvida pela superfície terrestre – solo, vegetação etc. (PITA, 2011).

Denomina-se fluxo de radiação a quantidade de energia radiante recebida, transmitida ou emitida por unidade de tempo. Quando este fluxo de radiação é expresso por unidade de área costuma-se chamar de densidade de fluxo radiante. A Organização Meteorológica Mundial (WMO) recomenda o uso dos termos emitância, para designar o fluxo de radiação emitido e irradiância, para representar o fluxo de radiação incidente (VAREJÃO-SILVA, 2005).

## **Temperatura**

Uma variável extremamente importante por apresentar grande facilidade de disponibilidade em estações meteorológicas. Na ausência de dados de radiação este pode ser o elemento responsável por indicar a energia presente no sistema. A radiação absorvida pela atmosfera poderá elevar os valores de temperatura do ar. Quando na ocasião de uso dessa variável em equações de ETo os parâmetros mais utilizados são a temperatura máxima, mínima e a média de temperatura diária, essa média diária de temperatura do ar deveria ser considerada como a média aritmética de todas as temperaturas observadas a intervalos regulares e curtos. No entanto, no Brasil, assim como em quase todos os países, esta “média” é estimada através de um parâmetro chamado de “temperatura compensada” (VAREJÃO-SILVA, 2005).

A evapotranspiração é dependente dos elementos meteorológicos, do solo e da planta. De acordo com Penman (1956), quando a cobertura do solo é completa, a evapotranspiração é condicionada principalmente pelos elementos meteorológicos. Dentre esses elementos, o saldo de radiação é o que exerce maior influência na taxa de evapotranspiração dos cultivos.

O curso anual da radiação solar é o principal fator que determina a variação da temperatura do ar, à medida que aumentamos a latitude, a temperatura média do ar diminui. Outro fator que altera inversamente o valor da temperatura média do ar é a altitude, em média à medida que se eleva 100 m, ocorre um resfriamento na ordem de 0,65 °C (TUBELIS e NASCIMENTO, 1992).

A temperatura nas camadas de ar mais próximas à superfície é um parâmetro de relevância ecológica, ambiental e agrícola. Do ponto de vista agrícola, a temperatura do ar relaciona-se com as fases fenológicas das culturas, maturidade fisiológica (GADIOLI *et al.* 2000) e demanda hídrica (HARGREAVES *et al.* 1985; ALLEN *et al.* 1998).

## **Umidade relativa**

A água que está presente na atmosfera pode ser expressa de várias formas, sejam elas através da pressão de vapor, da temperatura no ponto de orvalho ou da umidade relativa, entre outras (ALLEN *et al.* 1998).

A radiação solar é a principal fonte de energia para a evaporação da água, sendo a diferença entre a pressão de vapor na superfície e no ar ao redor, fator determinante na transferência de vapor para atmosfera. Em climas úmidos de regiões tropicais, apesar da elevada quantidade de energia, a alta umidade relativa reduz a evapotranspiração, o ar está sempre

próximo da saturação. A umidade relativa local, e a temperatura determinam o déficit de pressão de vapor (MEDEIROS, 2002).

Quando se usa uma equação combinada como a de Penman-Monteith, vários métodos de cálculo de déficit de pressão de vapor podem ser usados, sendo que o método empregado pode-se afetar significativamente a magnitude do termo aerodinâmico (JENSEN *et al.*, 1990). Para fins de estimativa da ETo, a pressão de vapor saturado para determinados períodos, deve ser calculada como a média entre a pressão de vapor à temperatura máxima (T<sub>máx</sub>) e a temperatura mínima (T<sub>mín</sub>) diária (ALLEN *et al.* 1998).

### **Velocidade do Vento**

A evapotranspiração é controlada pela disponibilidade de energia do meio, pela demanda atmosférica e pelo suprimento de H<sub>2</sub>O para as plantas no solo, dessa forma, esta demanda também é influenciada pelo poder de transporte de moléculas de água mediante o deslocamento do vento e sua velocidade e ao déficit de pressão de vapor (PEREIRA *et al.* 1997). Sentelhas (1998) relata que, quanto maior for a disponibilidade de energia solar, temperatura do ar e velocidade do vento, e quanto menor for a umidade relativa, maior será a taxa de evapotranspiração.

De acordo com Hargreaves (1994) o vento influencia a advecção, sendo as interações do vento com a temperatura, umidade relativa, déficit de pressão de vapor, difíceis de serem estimadas por equações.

O procedimento referente à análise de sensibilidade foi realizado em função das possíveis mudanças nos elementos climáticos analisados, considerando-se um intervalo de acréscimo e decréscimo nos valores de cada variável estudada.

## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

Os dados meteorológicos foram obtidos por uma estação meteorológica convencional e posteriormente mediante o uso de uma estação meteorológica automática, localizada no campus central da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) Mossoró, que apresenta clima semiárido quente com classificação de Köppen BSw<sup>h</sup>, com chuvas de verão, que podem se prolongar para o outono, cujas coordenadas são 05° 12' 48" latitude sul, e 37° 18' 44" de

longitude oeste, foram utilizados dados diários dentro de uma série histórica de onze anos completos (1 de janeiro de 2007 até 31 de dezembro de 2017). Os parâmetros utilizados para a realização dos cálculos foram: Temperatura média, máxima e mínima (°C); umidade relativa do ar média, máxima e mínima (%); velocidade do vento ( $m.s^{-1}$ ) e radiação global ( $MJ.m^{-2}.d^{-1}$ ) sendo as unidades convertidas conforme a necessidade de cada método.

Para o tratamento dos dados, foi utilizado o software Excel® bem como para a montagem das equações. Neste estudo foram utilizadas e avaliadas 27 equações empíricas para determinação da evapotranspiração de referência, essas equações foram comparadas com a equação padrão Penman-Monteith FAO 56. Todas as equações utilizadas para comparação com o método padrão de Penman-Monteith-FAO fazem uso de um número de variáveis menor que a equação padrão. Em decorrência da quantidade de equações vistas a baixo, suas variáveis de entrada estão descritas ao fim da descrição das equações.

Equações utilizadas neste trabalho estão descritas por:

### 3.1 Penman-Monteith-FAO 56 (ALLEN *et al.* 1998) (PMFAO56)

Monteith em 1965 desenvolveu um método fisiológico geral, ou seja, para qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de estresse hídrico, generalizando este método fisiológico para o método de Penman através de uma analogia com a lei de Ohm para os circuitos elétricos, introduzindo no termo aerodinâmico ( $\gamma$ ) duas resistências à transferência do vapor de água: a resistência do dossel ( $r_c$ ) e a resistência aerodinâmica ( $r_a$ ). Assim, suprida a deficiência conceitual do método original de Penman, surgiu assim o método de Penman-Monteith.

De acordo com as parametrizações propostas pelo Boletim 56 da *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), a equação de Penman- Monteith (Equação 1) assume a seguinte forma para a  $ET_0$  diária em  $mm/d^{-1}$ :

$$ET_0 = \frac{0,408 s (R_N - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} U_2 \frac{(e_s - e)}{10}}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

O método é baseado em processos físicos e, explicitamente, incorpora os parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos. Existem vários métodos para estimar a evapotranspiração, mas suas performances, em diferentes ambientes, variam, já que a maioria apresenta empirismo em sua concepção (SENTELHAS *et al.* 2010).

### 3.2 Penman-original (PENMAN, 1948) (PO)

Este método que foi criado por Penman (Equação 2) em 1948 e desde então vem sendo bastante utilizado, com boas estimativas de evapotranspiração sempre sendo bastante confiável. Este fato se deve ao grande número de variáveis que são utilizadas na equação, podendo assim ajustar seus resultados de forma mais precisa, este método foi combinado com o método de Monteith, para a formulação do método padrão recomendado pela FAO, para o cálculo da  $ET_0$ . O método de PO é dado pela equação:

$$ET_0 = \frac{s}{s + \gamma} 0,408 (R_N - G) + \frac{\gamma}{s + \gamma} 0,26 \left( 1 + \frac{U_2}{160} \right) (e_s - e) \quad (2)$$

O método de Penman foi desenvolvido no clima da Inglaterra, Porém, por todos os muitos parâmetros colocados, também pode ser calculado para clima seco semiárido. O método PENMAN original (1948) é um dos mais utilizados, e sua equação é derivada assumindo-se a proporcionalidade entre a evaporação da água e a evapotranspiração do capim irrigado. É um dos métodos mais utilizados e foi o primeiro método indireto que combinou os efeitos do balanço de energia com o poder evaporante do ar e é denominado por essa razão de método combinado.

### 3.3 Makkink (MAKKINK, 1957) (MK)

Este método foi bastante difundido na Europa Ocidental, ele é baseado no método de Penman, foi desenvolvido na Holanda e tem por característica correlacionar a evapotranspiração e a radiação solar à superfície, conforme descrito por Pereira *et al.* (1997):

$$ET_0 = R_G \text{ mm/dia} \left( \frac{s}{s + \gamma} \right) + 0,12 \quad (3)$$

O método de Makkink (Equação 3) bem como o de Penman, foi desenvolvido com o uso de lizimetria, tendo em vista a determinação de um método que necessita-se de um menor número de variáveis para que o uso deste método.

### 3.4 Turc (TURC, 1961) (Tc)

No presente trabalho utilizou-se o método de Turc (1961) (Equação 4) que foi desenvolvido para o Europa Ocidental (França) adaptada para regiões com umidade relativa média mensal maior que 50%. Porém podendo ser ajustado para diferentes condições.

$$ET_0 = \frac{0,013 t}{t+15} (23,9 R_G + 50) \quad (4)$$

### 3.5 Jensen-Haise (JENSEN e HAISE, 1963) (JH)

Consiste em estimar a evapotranspiração de referência apenas com dados de temperatura do ar e radiação solar (PEREIRA *et al.* 1997).

Determinando a equação em questão para regiões áridas e semiáridas, Jensen e Hayse (1963) (Equação 5) apresentaram o cálculo da evapotranspiração da seguinte forma:

$$ET_0 = R_{G \text{ mm/dia}} (0,025 t + 0,08) \quad (5)$$

### 3.6 Garcia-Lopez (GARCIA e LOPEZ, 1970) (GL)

A equação a seguir foi desenvolvida por Garcia Benevidez e Lopez Dias (Equação 6) em (1970), utilizando características de umidade relativa, e temperatura do ar tornando a equação mais simples, sem a necessidade do uso de parâmetros de radiação.

$$ET_0 = 1,21 \cdot 10^{\left(\frac{7,45 t}{243,7+t}\right)} (1 - 0,01 f) + 0,21 t - 2,30 \quad (6)$$

### 3.7 Priestley-Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972) (PT)

Pode ser considerado um método de balanço de energia com base apenas no termo radiativo (diabático) corrigido por um fator de ajuste que torna o método semelhante à razão de Bowen (PEREIRA *et al.* 1997). O Método de Priestley e Taylor (Equação 7) foi calibrado para diversas localidade nos Estados Unidos e Austrália através de lisimetria, porém sendo exposto a locais com condições climáticas amenas, o método se apresenta como sendo:

$$ET_0 = 0,5143 \frac{s}{s + \gamma} (R_N - G) \quad (7)$$

O método de Priestley-Taylor (Priestley-Taylor 1972; é uma forma simplificada do método de Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998), que apenas necessita da radiação e da temperatura para que a  $ET_0$  seja calculada. Esta simplificação baseia-se no fato de que a evapotranspiração é mais dependente da radiação do que da umidade do ar e do vento. Esses autores verificaram que o componente de radiação era responsável por cerca de 2/3 da  $ET_0$ . Desta forma propuseram um método baseado no uso dessa componente.

### 3.8 Hargreaves-original (HARGREAVES, 1974) (HO)

O cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves (Equação 8) 1974 é menos complexo do que o método de Penman-Monteith. Este método é utilizado quando não existem dados de radiação global solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento. Neste caso, podem-se obter os valores de evapotranspiração de referência, em  $\text{mm/d}^{-1}$ .

$$ET_0 = 0,135 \frac{R_G}{\lambda} (t + 17,8) \quad (8)$$

Sendo um método desenvolvido e calibrado para regiões de temperaturas mais elevadas, não possui boa precisão em climas mais amenos, sendo testado em localidades como Davis, Califórnia; Coshocton, Ohio; Copenhagen, Denmark; Aspendale, Austrália e outras três localidades no Líbano.

### 3.9 Linacre (LINACRE, 1977) (LN)

Originalmente testado para as condições climáticas da Austrália, é um método baseado na simplificação do método Penman, usando dados de temperatura e umidade relativa do ar em função da latitude e longitude (LINACRE, 1977). Na (Equação 9) Linacre estabeleceu a seguinte fórmula empírica para estimar a evapotranspiração de referência, expressa em  $\text{mm/d}^{-1}$ , pressupondo um albedo de 0,25:

$$ET_0 = \frac{500(t + 0,006z)}{100 - \phi} + 15(t - t_a) / (80 - t) \quad (9)$$

### 3.10 Hargreaves-Samani (HARGREAVES e SAMANI, 1985) (HS)

Por meio do uso de lisímetros em Davis, no estado da Califórnia (clima semiárido), com gramado, Hargreaves e Samani (Equação 10) em 1985 propuseram um novo método para a estimativa da evapotranspiração (PEREIRA *et al.* 1997), com base na equação original de Hargreaves. Tendo em vista situações em que não se tem dados de radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, qual seja:

$$ET_0 = 0,0023 R_0 \text{ mm/dia} (t_{\max} - t_{\min})^{0,5} (t + 17,8) \quad (10)$$

ALLEN *et al.* (1998) propõem o uso da equação de Hargreaves (HARGREAVES e SAMANI, 1985) como alternativa para a estimativa da evapotranspiração, quando somente os dados de temperatura do ar são disponíveis nas estações meteorológicas. O método foi testado em localidades no Haiti, Bangladesh, Austrália e nos estados unidos.

### 3.11 Radiação-Temperatura (OUDIN *et al.*, 2005) (RT)

O cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Radiação-Temperatura, é mais simples do que o método de Penman-Monteith. O método (Equação 11) que foi desenvolvido por OUDIN *et al.* (2005), baseia-se em dados de radiação global, temperatura máxima e calor latente de vaporização.

$$ET_0 = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{R_G t_{\max}}{56} \right) \quad (11)$$

### 3.12 Thornthwaite (THORNTHWAITTE, 1948) (TTW)

Este método foi estabelecido por Thornthwaite (Equação 12) em 1948 que obteve excelente correlação com dados de localidades de área seca dos Estados Unidos e República Dominicana. O modelo é dado segundo a equação abaixo:

$$ET_0 = \frac{16}{30} \left( 10 \frac{t_i}{I} \right)^a \frac{N}{12} \quad (12)$$

### 3.13 Hamon (HAMON, 1961) (HM)

O método foi desenvolvido por Hamon (Equação 13) em 1961, que o desenvolveu como possível substituto a Thornthwaite ao constatar que o método de Thornthwaite superestimava a

evapotranspiração no verão e subestimava no inverno. O método foi baseado no método de Penman 1948, que sempre foi um método bastante confiável, porém muito complexo, o método de Hamon foi calibrado utilizando valores obtidos em diversas localidades dos Estados Unidos, como Ohio e Novo México, e tem por diferencial o acréscimo do Fotoperíodo e da temperatura média e é expresso desta forma:

$$ET_0 = 0,55 \left( \frac{N}{12} \right)^2 \left( \frac{4,95 \exp^{0,062 t}}{100} \right) 25,4 \quad (13)$$

### 3.14 Camargo (CAMARGO, 1971) (CM)

Este modelo (Equação 14) foi desenvolvido analiticamente, baseando-se em resultados da evapotranspiração de referência para várias localidades (BEZERRA *et al.* 2014):

$$ET_0 = 0,01 R_{0 \text{ mm/dia}} t \quad (14)$$

### 3.15 Thornthwaite-Camargo (CAMARGO *et al.*, 1999) (TTC)

O método (Equação 15) de Thornthwaite modificado por Camargo *et al.* (1999) também foi testado, esse método tem como ponto diferencial do original a substituição da temperatura Tmed pelas temperaturas Tmax e Tmin, dando outra conformação ao método, e dessa forma sendo apresentado de acordo com a expressão a seguir:

$$ET_0 = \frac{16}{30} \left( 10^{\frac{0,36 (3 t_{\max} - t_{\min})}{I}} \right)^a \frac{N}{12} \quad (15)$$

### 3.16 Stephens-Stewart (WINTER *et al.*, 1995) (SS)

Trata-se de um método um pouco mais simples que o método padrão da FAO, porém utiliza variáveis de temperatura e radiação global, este método foi desenvolvido por winter *et al.* (1995) (Equação 16) sendo este um método de 11 métodos revisados e calibrados por winter para as condições de Williams Lake, Minnesota-USA, o método em questão apresenta-se como:

$$ET_0 = 0,4047 R_G [(0,01476 t) + 0,0724] \quad (16)$$

### 3.17 Tanner-Pelton (BERLATO e MOLION, 1981) (TP)

Método desenvolvido por Tanner e Palton, e revisado posteriormente por Berlato e Molion, (Equação 17) em 1981. Trata-se de um método simplificado, que utiliza o saldo de radiação para que seja calculada a  $ET_0$ , método esse sendo colocado desta forma:

$$ET_0 = 0,457 R_N - 0,11 \quad (17)$$

### 3.18 Radiação-Global (TOMAR e O'TOOLE, 1980) (RG)

Este método foi apresentado por Revisado e ajustado por V.S. Tomar e J. C O' Toole (Equação 18) em 1980 tendo como finalidade disponibilizar um método que substituísse o método padrão, para o uso em cultivo de Arroz em zonas húmidas do sul e sudeste da Ásia e utiliza a radiação solar para estimar os valores de evapotranspiração. De acordo com Jensen *et al.* (1990), o método é uma adaptação do método de Makkink (1957) em que, os coeficientes da equação de Makkink foram substituídos por um parâmetro R em função da umidade relativa do ar e da velocidade do vento (Pereira *et al.* 1997), método esse que havia sido desenvolvido inicialmente para as condições de umidade da Holanda.

Os autores ainda recomendam que este método seja utilizado, ao invés do método de Penman, quando medidas de velocidade do vento e umidade relativa não estiverem disponíveis. A estimativa da evapotranspiração é dada pela seguinte equação:

$$ET_0 = 0,9 + 0,115 R_G \quad (18)$$

### 3.19 Radiação-Líquida (BRUIN e STRICKER, 2000) (RL)

O cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Radiação-Líquida, proposto por BRUIN e STRICKER (Equação 19) em 2000 é uma versão mais simples do que o método de Penman-Monteith. O método em questão foi desenvolvido em para ambientes secos e arenosos localizadas na parte oriental dos países baixos. O método baseia-se em dados de saldo de radiação, e no calor latente de vaporização, dessa forma sendo dado por:

$$ET_0 = 0,86 \frac{R_N}{\lambda} \quad (19)$$

### 3.20 Hicks-Hess (BRUIN e KEIJMAN, 1979) (HH)

Este método (Equação 20) se mostra um método um pouco mais complexo, pois mostra a necessidade da utilização de variáveis referentes da curva de pressão de saturação, constante psicrométrica, calor latente de vaporização além de necessitar do cálculo do saldo de radiação, apesar da possibilidade do uso de valores constantes para a maioria das variáveis. O método em questão é dado pela equação:

$$ET_0 = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{s}{0,90 s + 0,63 \gamma} \right) R_N \quad (20)$$

### 3.21 McCloud (JACOBS e SATTI, 2001) (MC)

Método de simples obtenção de resultado foi desenvolvido por McCloud utilizando como campo experimental áreas gramadas e campos de Golf, posteriormente foi modificado por Jacobs e Satti (Equação 21) em 2001 para o clima da florida e costa da Islândia, desenvolvido no ano de 2001, necessita apenas da variável de temperatura média do ar. O método em questão é dado pela equação:

$$ET_0 = 0,254 \cdot 1,07^{(1,8 t)} \quad (21)$$

### 3.22 McGuinness-Bordne (OUDIN *et al.* 2005) (McB)

Método desenvolvido por Oudin *et al.* (2005) (Equação 22), foi calibrado utilizando dados retirados de 308 pontos distribuídas entre os Estados Unidos, Austrália e França, sendo este método uma forma simplificada do método de Penman, este método necessita de poucos dados de entrada sendo eles o calor latente de vaporização, temperatura média do ar, além da radiação extraterrestre. O método em questão é dado pela equação:

$$ET_0 = \frac{R_0}{\lambda} \frac{t + 5}{68} \quad (22)$$

### 3.23 Ivanov (DORFMAN, 1977) (IN)

Método desenvolvido por Ivanov em 1954, modificado por Dorfman (Equação 23) em 1977 para que se pudesse apresentar valores de ETo em escala menor que um mês, apresenta poucas variáveis de entrada, sendo elas apenas temperatura média do ar e umidade relativa. O método em questão é dado pela equação:

$$ET_0 = 0,006 (25 + t)^2 \left( 1 - \frac{f}{100} \right) \quad (23)$$

### 3.24 Kharrufa (KHARRUFA, 1985) (KR)

A equação foi desenvolvida por Kharrufa (Equação 24) em 1985 e baseia-se na correlação entre a razão da evapotranspiração e porcentagem do total do Fotoperíodo além da temperatura do ar conforme a relação:

$$ET_0 = 0,34 p t^{1,3} \quad (24)$$

### 3.25 Blaney-Morin (BLANEY e MORIN, 1942) (BM)

Método desenvolvido por Blaney e Morin (Equação 25) em 1942, foi desenvolvido como parte de uma revisão metodológica a cerca da evapotranspiração, este método foi desenvolvido para áreas com a presença de corpos hídricos, sendo utilizado para a formação do método localidades próximas a bacia do rio Pecos, Porém também foram utilizados dados coletados em estações localizadas em Carlsbad Novo México, esse método utiliza dado apenas de pressão atmosférica e umidade relativa, podendo ser, muito frágil em relação a métodos que utilizam variáveis de temperatura, e radiação. Este método é dado pela equação:

$$ET_0 = p (0,457 t + 8,13) (1,14 - 0,01 f) \quad (25)$$

### 3.26 Romanenko (OUDIN *et al.*, 2005) (RK)

Este método foi modificado por Oudin *et al.* (2005) (Equação 26). O método é derivado do método original de Romanenko desenvolvido em 1961, tendo originalmente como parâmetros de entrada os valores médios mensais de Temperatura e umidade relativa, as modificações feitas proporcionaram o uso do método em escala diária e não mais mensal como

no caso de sua versão original, trata-se de um método de cálculo bastante simples e que requerendo dados de temperatura e umidade relativa, em escala diária:

$$ET_0 = 4,5 \left(1 + \frac{t}{25}\right)^2 \left(1 - \frac{e}{e_s}\right) \quad (26)$$

### 3.27 Lungeon (ZIMMERMANN, 2000) (LG)

Método (Equação 27) que foi desenvolvido no ano de 1928, revisado por Zimmermann em 2000, tem por característica utilizar apenas variáveis de temperatura, pressão atmosférica, mostrado como opção ao método padrão da FAO.

$$ET_0 = 0,2985 (e_s - e) \left(\frac{273 + t}{273}\right) \left(\frac{760}{P - e_s}\right) \quad (27)$$

### 3.28 Abtew (OUDIN *et al.* 2005) (AT)

Método revisado por Oudin *et al.* (2005) (Equação 28) tem como característica o uso de variáveis de radiação global bem como também o coeficiente de reflectância e o calor latente de vaporização, sendo que para a maioria dos dados de entrada, os valores podem ser valores tabelados, para diversas condições ambientais. O método em questão é dado pela equação:

$$ET_0 = \frac{0,53}{\lambda} R_G (1 - r) \quad (28)$$

Para todos os métodos mencionados, os parâmetros para as equações utilizadas são:  $ET_0$  = evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $s$  = declividade da curva de pressão de saturação de vapor ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $R_n$  = saldo de radiação ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $G$  = fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ );  $\gamma$  = constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $t$  = temperatura média ( $^\circ\text{C}$ );  $U_2$  = velocidade do vento a 2 metros ( $\text{m s}^{-1}$ );  $e_s$  = pressão de saturação de vapor (hPa);  $e$  = pressão parcial de vapor (hPa);  $c$  = coeficiente de ajuste (adm);  $k$  = coeficiente local (adm);  $p$  = percentagem anual de luz (%);  $f$  = umidade relativa (%);  $R_G$   $\text{mm/dia}$  = radiação global ( $\text{mm/d}^{-1}$ );  $R_0$   $\text{mm/dia}$  = radiação extraterrestre ( $\text{mm/d}^{-1}$ );  $t_{\text{max}}$  = temperatura máxima ( $^\circ\text{C}$ );  $t_{\text{min}}$  = temperatura mínima ( $^\circ\text{C}$ );  $\lambda$  = calor latente de vaporização ( $\text{MJ kg}^{-1}$ );  $z$  = altitude do local (m);  $\varnothing$  = latitude do local (graus);  $t_d$  = temperatura do ponto de orvalho ( $^\circ\text{C}$ );  $N$  = fotoperíodo (h);  $R_G$  = radiação global ( $\text{MJ m}^{-2}$

$d^{-1}$ );  $R_0$  = radiação extraterrestre ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ );  $P$  = pressão atmosférica (hPa);  $a$  = constante do local (adm);  $I$  = índice térmico anual (adm) e  $t_i$  = temperatura mensal ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $r$  = coeficiente de reflectância (0,25).

### Análise de desempenho

A análise de desempenho dos modelos foi feita comparando-se os valores de ETo obtidos pelos métodos empíricos com o método de Penman-Monteith-FAO 56, proposta por Allen *et al.* (1989), e se fundamenta no erro padrão da estimativa (EPE):

$$\text{EPE} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (29)$$

Em que: EPE = erro-padrão da estimativa ( $\text{mm d}^{-1}$ );  $Y_i$  = evapotranspiração de referência estimada pelo método-padrão ( $\text{mm d}^{-1}$ );  $X_i$  = evapotranspiração de referência obtida pelo método testado ( $\text{mm d}^{-1}$ ); e  $n$  = número de observações.

Camargo e Sentelhas (1997) Sugeriram índices estatísticos para que pudessem ser avaliadas as capacidades do diversos métodos para estimativa da evapotranspiração de referência frente ao métodos padrão de Penman-Monteith FAO 56, dessa forma podendo servir como critério para que um método com menor número de variáveis de entrada possa ser utilizado como substituto ao método padrão, quando na ausência de dados de entrada que permitam o uso da equação padrão, bem como tendo em vista a complexidade para o cálculo por meio do método PMFAO56, desta forma os índices utilizados são:

Índice de concordância ou ajuste “d” (WILLMOT *et al.* 1985).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|Y_i - \bar{x}|) + (|X_i - \bar{x}|)]^2} \quad (30)$$

Coeficiente de correlação de Pearson (r).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (|X_i - \bar{x}|) (|Y_i - \bar{y}|)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2}} \quad (31)$$

Coeficiente de confiança ou desempenho “c”. Sendo “c” obtido pelo produto de  $d * r$ .

Na Tabela 1 está representada a classificação de Camargo e Sentelhas (1997) para análise do índice de confiança ou desempenho “c”.

**Tabela 1** - Critério para análise do desempenho ou confiança dos métodos empíricos.

<b>Índice c</b>	<b>Desempenho</b>
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas

Para cada regressão linear simples da evapotranspiração de referência, foram verificadas as seguintes hipóteses Ho: Não há regressão linear simples e H1: Há regressão linear simples, entre as variáveis estudadas por meio do teste estatístico t de Student de acordo com a Equação ao nível de significância de 1% e 5% de probabilidade.

Os valores de ETo dos métodos foram obtidos por dia. A avaliação dos resultados foi realizada para o período diário, utilizando-se análise de regressão e considerando-se o modelo linear ( $y = ax + b$ ), na qual a variável independente será o método de Penman-Monteith FAO 56 (y) e as estimativas da ETo pelos demais métodos será a variável dependente (x).

### **Avaliação da sensibilidade dos métodos**

Foram realizados também testes para avaliação da sensibilidade dos métodos à variação dos parâmetros de umidade relativa, temperatura máxima e mínima, velocidade do vento e radiação global. Em decorrência das diferentes abordagens utilizadas nos modelos parametrizados de evapotranspiração, há diferentes definições dos coeficientes de sensibilidade e diferentes maneiras de se realizarem as análises de sensibilidade nestes modelos. Ademais, diferentes variáveis têm diferentes dimensões e intervalos, o que torna difícil comparar a sensibilidade por derivadas parciais (Gong *et al.* 2006). Estudos anteriores, além de revisão de literatura revelam que não existe um procedimento comum ou padrão para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade para as variáveis climáticas (Irmak *et al.* 2006).

Tendo em vista as metodologias utilizadas por diferentes pesquisadores (Goyal. 2004; Xu *et al.* 2006), os elementos meteorológicos foram testados para uma gama de variabilidades específicas para análise. O procedimento para esta análise foi realizado da seguinte forma: Adotaram-se diferentes cenários de mudança nos elementos meteorológicos, ajustando-se os dados das series históricas, adicionando-se uma variação na média dos elementos, como segue:  $\Delta X = \pm 10\%, \pm 20\%$  de  $X(t)$  sendo  $X$  o elemento climático e “ $t$ ” o tempo, como sugerido por Alencar *et al.* (2012). Para a avaliação da sensibilidade dos métodos, foram feitas amostragens dentro dos métodos nos quais foram escolhidos o método padrão FAO 56, um método com um comportamento ‘ótimo’ ou ‘muito bom’ quando relacionado ao padrão, além de um terceiro método, sendo esse o que obteve o pior índice possível, dentre aqueles métodos que utilizam as variáveis climáticas que foram avaliadas. A sensibilidade dos métodos (CS) foi avaliada de acordo com a equação:

$$CS = \frac{DRES}{DVAR}$$

$$DRES = \frac{RES - RES_{base}}{RES_{base}} \quad (32)$$

$$DVAR = \frac{VAR - VAR_{base}}{VAR_{base}}$$

Em que DRES - variação relativa da resposta do modelo de simulação; DVAR - variação relativa do componente ou da variável de simulação; RES - resposta do modelo na simulação; VAR - valor do componente ou da variável na simulação;  $RES_{base}$  - resposta do modelo na formulação básica; e  $VAR_{base}$  valor do componente ou da variável na formulação básica. Lembrando que, para cada cenário de mudança de variável, as demais permanecem constantes.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Dados de Precipitação.

A precipitação é um parâmetro de extrema importância para a evapotranspiração pois a precipitação atua diretamente na sensação térmica, no calor sensível, bem como na mudança da umidade relativa local, mediante isso, a precipitação interfere em todos os parâmetros ligados a evapotranspiração. Desta forma, fez-se necessário, demonstrar os valores de precipitação acumulada ao longo do período estudado, além de seus valores médios ao longo do período de

um ano. A tabela 2 apresenta dados de chuva acumulada ao longo de cada ano de estudo, sendo subdividida por mês.

**Tabela 2** – Valores acumulados de precipitação referente a série histórica de 11 anos, de 2007 a 2017, em Mossoró, RN, ao longo dos meses.

	Janeir	Fever	Março	Abril	Mai	Junho	Julho	Agosto	Setem	Outub	Novem	Dezem	Total
-----mm-----													
2007	14,7	212,2	387,3	141,2	106,5	42,4	5,0	3,6	0,0	0,0	0,0	33,2	946,1
2008	56,4	8,2	320,5	238,3	47,5	54,2	13,4	26,9	5,1	0,0	0,0	0,8	771,3
2009	41,4	199,2	174,0	240,9	211,9	109,2	21,8	26,2	1,3	0,0	0,0	0,0	1025,9
2010	105,4	66,3	56,4	222,8	23,4	32,3	9,9	0,0	1,3	14,5	0,0	19,3	551,6
2011	100,6	150,6	89,7	237,0	219,8	18,6	115,4	15,3	0,0	10,0	0,0	0,0	957
2012	29,0	67,8	28,2	33,0	0,0	26,9	14,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	199,4
2013	0,0	18,0	3,8	332,0	25,2	63,8	33,0	1,8	0,5	0,0	0,0	0,0	478,1
2014	8,3	63,8	166,6	154,7	148,6	27,4	3,0	0,0	2,0	3,6	6,1	0,0	584,1
2015	4,6	166,6	212,6	53,3	56,6	18,5	17,5	0,0	0,0	0,0	3,8	4,8	538,3
2016	100,3	28,1	68,0	10,9	9,7	29,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	246,5
2017	7,4	142,7	73,9	96,2	85,6	31,7	62,7	0,0	0,0	0,0	1,0	0,5	501,7

Fonte: LABIMC-UFERSA

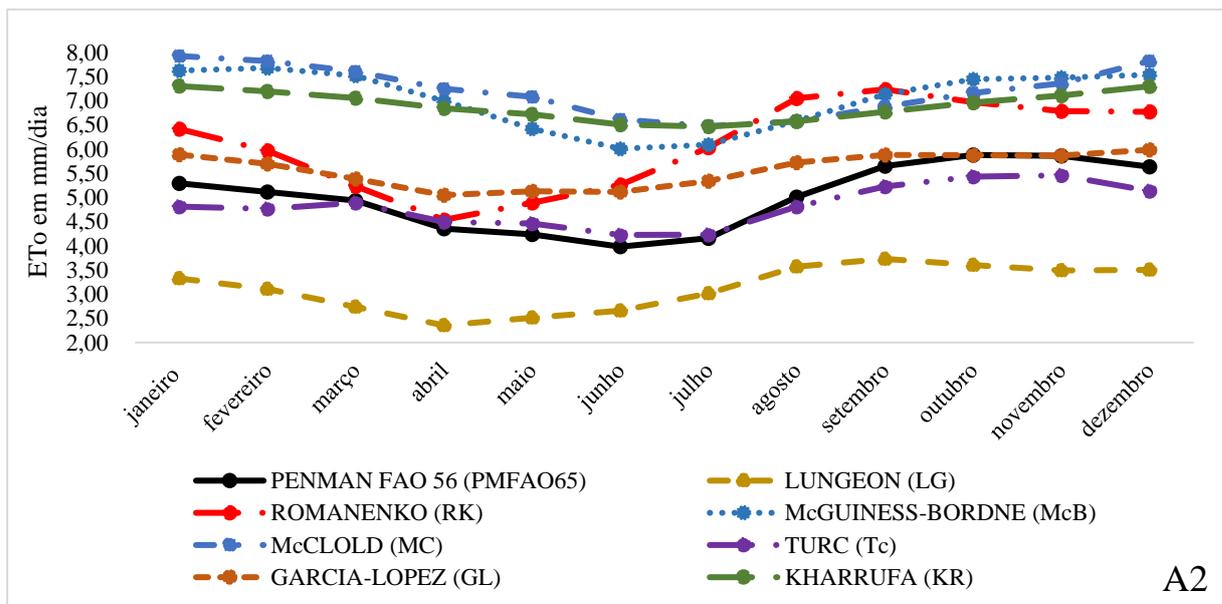
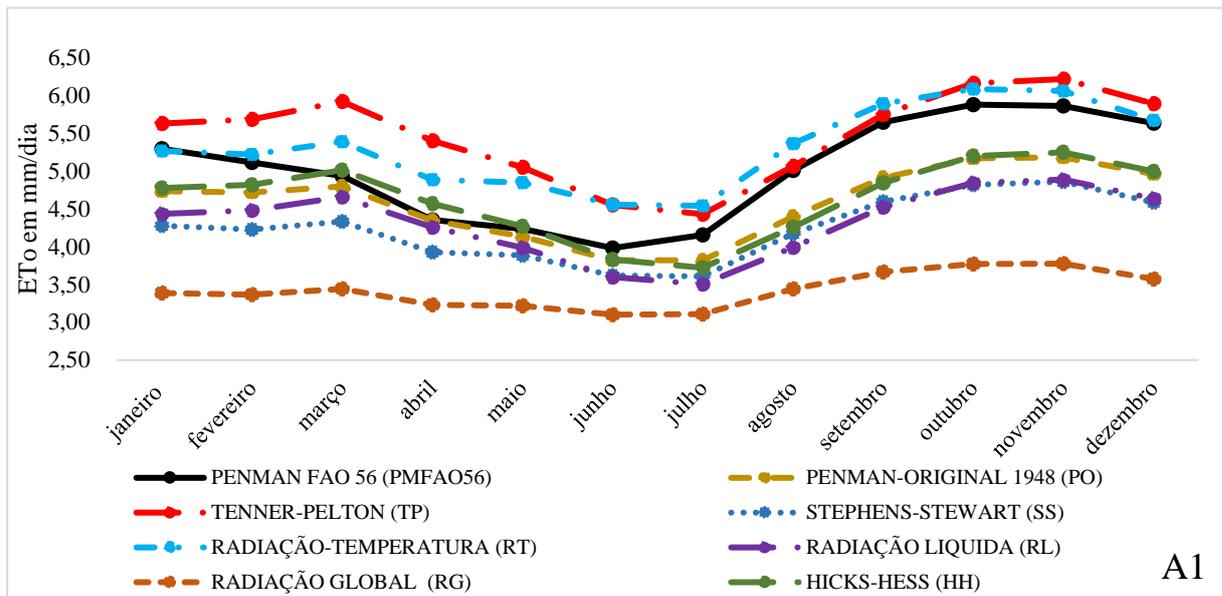
Os meses que apresentam os maiores valores de precipitação, foram os meses de março, abril e maio, contudo os meses de junho, julho e agosto também apresentaram acumulados pluviométricos, (Tabela 2), condição de pluviosidade característica do clima presente na região, com a ocorrência deste período chuvoso na região pode-se também verificar que a umidade relativa se tornando maior durante esse período chuvoso, decaindo durante o período seco, desta forma interferindo diretamente nos valores de ETo, pois a umidade interfere fortemente na temperatura e no potencial evaporativo do ambiente por diminuir o deficit de pressão de vapor existente entre a superfície e o ar, pode-se verificar que, em geral os valores de ETo apresentam um comportamento inverso ao da umidade na região, em meses que apresentam condições de umidade elevada, a ETo em geral apresenta um decréscimo, já nos meses em que são verificadas condições de baixa umidade relativa, podemos verificar um aumento nos valores de ETo.

#### 4.2 Evapotranspiração de referência.

Os diferentes métodos foram avaliados ao longo de uma série de dados de 11 anos, desde o ano de 2007 até o ano de 2017, então cada método pode ser colocado a prova sob diferentes circunstâncias, podendo ir desde anos com pouquíssimo regime pluviométrico, até anos com

grande precipitação pluviométrica acumulada, tornando possível observar esse comportamento, e determinar sob que condições um dado método tem melhor ou pior desempenho. As Figuras abaixo são referentes aos valores médios de evapotranspiração de referência nos diversos métodos, sendo estes confrontados com o método padrão durante o período analisado.

**Figura 1.a** – Valores médios de Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) de uma série histórica de 11 anos (2007 a 2017), comparando 27 métodos de estimativa de ET<sub>o</sub>, com o método padrão (Penman-Monteith-FAO 56).

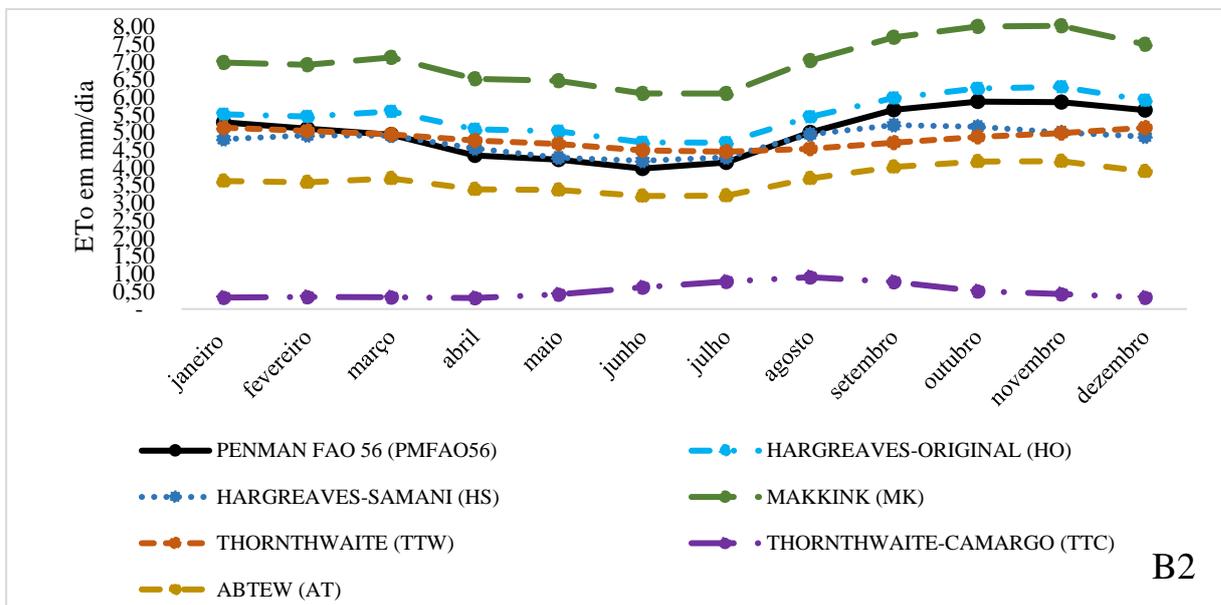
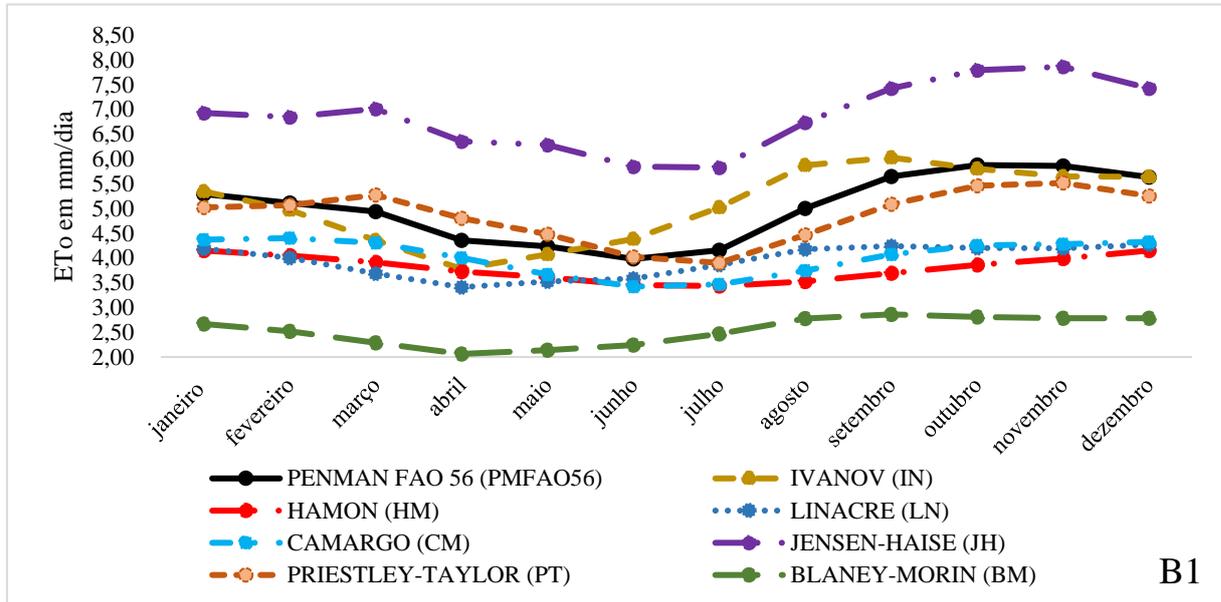


Ao verificar no gráfico 1. A1 a distribuição dos valores dos métodos de PO, RL, RG, SS, pode-se verifica a presença de distribuição sazonal semelhante, mostrando uma

subestimativas em seus valores ao longo de todo o ano, mostram valores distantes do método padrão dentro do período seco do ano, período em que a precipitação média é menor que a precipitação média anual, as temperaturas são mais elevadas, também a insolação se mostra mais intensa e a umidade relativa apresenta valores médios a baixo dos 70%, características climáticas essas, descrita por Cavalcante Junior *et al.* (2011) e posteriormente corroborada por Bezerra *et al.* (2014). E mostram valores mais aproximados ao padrão dentro do período chuvoso do ano. O método de HH apresenta também um comportamento semelhante ao dos demais descritos, Porém tendo como exceção os meses de março e maio, nos quais o método tem valores semelhantes ao padrão, e o mês de abril, no qual superestima o método padrão. Os métodos de TP e RT mostram valores que superestimam o método padrão em todos os meses. Oliveira, A. K. S. de. (2017) encontrou um comportamento semelhante ao encontrado no presente estudo para os métodos de PO e RT também para o município de Mossoró-RN. Cunha *et al.* (2013) encontraram um comportamento semelhante para os métodos de RL, RT, SS, RG e HH, para a localidade de Chapadão do Sul-MG.

Os métodos de McB, Mc, KR, RK superestimaram o método padrão PM-FAO56 (Figura 1. A2). O método de GL tendeu por subestimar os valores do método padrão em todos os meses, com exceção dos meses de outubro e novembro, que apresentaram valores bem aproximados aos valores do método padrão. O Tc apresentou oscilações no comportamento da curva, subestimando PM-FAO56 de agosto a março e superestimando de maio a junho, Porém sempre apresentando bastante aproximação com o método padrão. Tabari (2010) verificou que o Tc apresentou um ótimo desempenho quando comparado a PM-FAO56 tanto para clima semiárido quanto para clima húmido. Apresentando distribuição semelhante ao encontrado no presente estudo, da mesma forma, foram encontrados valores que corroboram com os encontrados por OLIVEIRA, A. K. S. de. (2017) para as condições de Mossoró-RN, para os métodos de Tc e GL. Os resultados dos métodos McB, Mc, KR e RK foram semelhantes ao encontrado por Cunha *et al.* (2013) em Chapadão do Sul-MG.

**Figura 1.b** – Valores médios de Evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) de uma série histórica de 11 anos (2007 a 2017), comparando 27 métodos de estimativa de ET<sub>o</sub>, com o método padrão (Penman-Monteith-FAO 56).



Observa-se na figura 1.B1 os métodos de LN, CM, BM, HM, estes subestimaram o método padrão em todos os meses do ano, enquanto o método JH superestimou. O método de PT, bem como IN apresentaram oscilações quanto as condições de sub ou superestimativa, pois PT somente subestima a ET<sub>o</sub> dos meses de julho a janeiro, e pouco superestima o método padrão nos meses de março, abril e maio, esse comportamento pode ter como motivo o fato de PT ser desenvolvido para regiões de clima ameno, que é a condição que se apresenta no período

referente aos meses de março, abriu e maio. Já IN apresenta superestimativa frente ao método padrão, nos meses de julho a setembro, subestimando o padrão, nos meses de março, abriu e maio, nos demais meses, tanto para IN quanto para PT os valores de ETo se aproximaram bastante dos valores encontrados para o método padrão. Em um estudo feito por Oliveira, A. K. S. de (2017), pode ser observado o mesmo comportamento que o encontrado no presente estudo para os métodos de JH, PT, LN para a cidade de Mossoró-RN. Em estudo anterior para as condições de Mossoró-RN, Cavalcante Junior *et al.* (2011) encontraram valores semelhantes ao presente estudo para o método de CM. O presente estudo também encontrou valores semelhantes para os métodos de HM e BM ao encontrado por Cunha *et al.* (2013) para a localidade de Chapadão do Sul-MG.

O Figura 1.B2 mostra o comportamento dos métodos de HS, TTW, AT, HO, TTC, e MK. A Figura mostra que, os métodos de AT e TTC apresentam um comportamento de subestimar seus valores de ETo frente ao método padrão, TTC é o método que mais se distancia do método padrão nos valores de ETo, já o método de HO tende a aproximar-se bastante do método padrão, tendendo a pouca superestimativa frente ao método padrão, o método de MK tende a superestimar muito os valores do método padrão, já os métodos de HS e TTW tendem a apresentar períodos em que a subestimação e períodos que há superestimação, com HS apresentando uma subestimação de valores de forma pouco acentuada, já TTW apresenta subestimativa desde o mês de agosto até janeiro e superestimativa de abriu a julho. Em um estudo feito por OLIVEIRA; A. K. S. de. (2017), pode ser observado o mesmo comportamento que o encontrado no presente estudo para os métodos de MK, HO e HS, tanto para períodos secos quanto para períodos de maior pluviosidade, para a cidade de Mossoró-RN, Ferreira *et al.* (2015) encontrou para região sul do Brasil, valores semelhantes aos encontrados no presente estudo para o método de TTW subestimando os valores de ETo quando comparado ao método padrão, Porém para Mossoró, o método apresenta uma variação menor, esse comportamento deve-se ao fato de que o método foi desenvolvido para regiões de clima árido. MOURA *et al.* (2013) encontrou um comportamento semelhante ao encontrado para o presente estudo com relação ao método de TTC.

Os métodos de AT e TTC subestimaram a ETo padrão. TTC apresentou a maior distância frente a ETo padrão, HO por sua vez tende a aproximar-se bastante dos valores de PM-FAO56, o MK tende a superestimar muito os valores do padrão, já HS e TTW tendem a apresentar períodos em que há subestimação e superestimação, com HS apresentando uma subestimação de valores de forma pouco acentuada, TTW apresenta subestimativa desde o mês

de agosto até janeiro e superestimativa de abriu a julho. O presente estudo apresentou um comportamento para os métodos de MK, HO e HS semelhante ao encontrado OLIVEIRA; A. K. S. de. (2017) para Mossoró-RN, tanto para períodos secos quanto para períodos de maior pluviosidade. Com relação ao método de TTW, o resultado encontrado é semelhante ao encontrado por Ferreira *et al.* (2015) para região sul do Brasil, valores estes que subestimam os valores de ETo quando comparado ao método padrão, porém à pesar de um comportamento semelhante ao de Ferreira, com valores mais próximos aos valores do método padrão, esse comportamento deve-se ao fato de que o método de foi desenvolvido para regiões de clima úmido com temperaturas amenas. Moura *et al.* (2013) encontrou um comportamento semelhante ao encontrado para o presente estudo com relação ao método de TTC.

Após obter os valores de ETo para todos os métodos, avaliados, todos eles foram confrontados com o método padrão FAO 56, para análise do desempenho de cada um frente ao método padrão, desta forma os valores dos coeficientes para validação e determinação do potencial de cada método estão presentes na tabela 3.

**Tabela 3** - Indicadores estatísticos de Camargo e Sentelhas para comparação entre os diferentes métodos de estimativa da ETo com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56, em escala diária.

<b>METODOS</b>	<b>R</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>D</b>	<b>C</b>	<b>EPE</b>	<b>Desempenho</b>
PENMAN-ORIGINAL 1948 (PO)	0,92	0,84	1,00	0,91	0,54	Ótimo
RADIAÇÃO-TEMPERATURA (RT)	0,88	0,78	1,00	0,88	0,55	Ótimo
STEPHENS-STEWART (SS)	0,88	0,78	0,99	0,87	0,81	Ótimo
HARGREAVES-ORIGINAL (HO)	0,87	0,77	0,99	0,87	0,66	Ótimo
TURC (Tc)	0,86	0,75	1,00	0,86	0,49	Ótimo
ABTEW (AT)	0,84	0,71	0,99	0,84	0,54	Muito Bom
PRIESTLEY-TAYLOR (PT)	0,82	0,69	1,00	0,82	0,57	Muito Bom
TENNER-PELTON (TP)	0,81	0,67	0,99	0,81	0,74	Muito Bom
HICKS-HESS (HH)	0,81	0,66	0,99	0,80	0,64	Muito Bom
RADIAÇÃO LIQUIDA (RL)	0,80	0,64	0,99	0,79	0,83	Muito Bom
GARCIA-LOPEZ (GL)	0,77	0,60	0,99	0,77	0,74	Muito Bom
JENSEN-HAISE (JH)	0,88	0,78	0,85	0,75	1,80	Bom
IVANOV (IN)	0,73	0,54	0,99	0,72	0,84	Bom
ROMANENKO (RK)	0,73	0,54	0,97	0,71	1,38	Bom
RADIAÇÃO GLOBAL (RG)	0,84	0,71	0,83	0,70	1,55	Bom
MAKKINK (MK)	0,86	0,74	0,81	0,69	1,97	Bom
LINACRE (LN)	0,73	0,54	0,95	0,69	1,17	Bom
BLANEY-MORIN (BM)	0,76	0,59	0,89	0,68	2,35	Bom
CAMARGO (CM)	0,68	0,47	0,96	0,66	1,14	Mediano
HARGREAVES-SAMANI (HS)	0,64	0,43	0,99	0,64	0,72	Mediano
McGUINNESS-BORDNE (McB)	0,68	0,47	0,94	0,64	1,97	Mediano
KHARRUFA (KR)	0,67	0,46	0,94	0,64	1,85	Mediano
HAMON (HM)	0,68	0,47	0,93	0,63	1,33	Mediano
LUNGEON (LG)	0,70	0,53	0,82	0,57	1,84	Sofrível
McCLOLD (MC)	0,59	0,36	0,93	0,55	2,12	Sofrível
THORNTHWAITE (TTW)	0,53	0,30	0,99	0,53	0,79	Sofrível
THORNTHWAITE-CAMARGO (TTC)	0,25	0,08	0,99	0,05	4,19	Péssimo

Erro padrão de estimativa (EPE), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), correlação de Pearson (r), concordância de Willmott (d), coeficiente de confiança (c) e desempenho de Camargo e Sentelhas.

Os métodos de PO, RT, SS, HO, TC tiveram desempenho ótimo, tendo em vista a condição semiárida na qual os métodos foram calculados, Cunha *et al.* (2013) encontraram para as condições da localidade de Chapadão do Sul-MG que tem um clima classificado como tropical úmido, resultado tido como “Ótimo” para o método de PO, bem como o desempenho “Muito bom” para os métodos SS, RT, TC, desta forma pode-se ver que esses métodos apresentam bons desempenhos mesmo quando submetidos a condições climáticas distintas. Da mesma forma, Araújo *et al.* (2010) observaram para as localidades de Jaguaruana e Guaramiranga, ambas no estado do Ceará, localidades essas que apresentam clima tropical de acordo com a classificação de Köppen, Araújo *et al.* (2010) obtiveram desempenho “Ótimo” para o método de PO, “Muito bom” para HO, e o desempenhos “Muito bom” para TC, pode-se verificar que, os autores citados apresentem em suas pesquisas, resultados levemente diferentes, isso se deve as características divergentes entre as localidades onde os autores confeccionaram seus trabalhos, porém, mesmos diante do exposto, os métodos apresentaram boa confiabilidade independentemente da localidade, sempre apresentando bons desempenhos. Desta forma, corroborando a eficácia destes métodos em diferentes tipos de clima, tendo em vista que desde um clima semiárido até climas tropicais húmidos, pode-se verificar desempenhos variando de ótimo até “Bom”. Também são mostrados na Tabela 3 os métodos de AT, PT, TP, HH, RL, BL, como tendo desempenho “Muito bom”, Araújo *et al.* (2010) encontraram para as localidades de Jaguaruana e Guaramiranga-CE desempenho tido como “Bom” para o método de PT, bem como, para BL foram encontrados desempenhos variando de “Bom” a “Muito bom” respectivamente referindo-se as localidades citadas, da mesma forma Bezerra *et al.* (2014) Para a cidade de Mossoró-RN encontrou desempenho tido como “Ótimo” para o método de BL, para PT o autor em questão encontrou desempenho tido como “Muito bom”, desta forma, tendo em vista se tratar da mesma localidade, podemos verificar que, o resultado encontrado no presente trabalho, corrobora com o resultado do autor . Os Métodos de JH, IN, RK, RG, MK, LN, BM, mostraram desempenho tido como “Bom”, Araújo *et al.* (2010) encontraram para as localidades de Jaguaruana e Guaramiranga-CE, desempenho “Mediano” e “Sofrível” respectivamente para JH, tendo em vista que, as localidades apresentam regime pluviométrico significativamente maior que o município de Mossoró-RN, com destaque para Guaramiranga que apresenta pluviosidade acumulada maior que 1200 mm/ano, sendo bem mais elevado que os 600 mm/ano de média, encontrada para o município de Mossoró-RN, para Cavalcante júnior *et al.* (2011), o método de JH apresentou desempenho “Bom”, podemos inferir que, JH não se comporta bem a condições de pluviosidade elevada, não sendo recomendado para regiões que apresentam essa característica. Cunha *et al.* (2013) para as condições de Chapadão do Sul-MG, obtiveram para

os métodos de JH, IN, RK, RG, MK, LN, BM, desempenho “Mediano”, “Mau”, “Péssimo”, “Mediano”, “Mau”, “Mau”, “Mau”, respectivamente. Podemos verificar que, apesar dos métodos em questão apresentarem um bom desempenho para condições semiáridas sendo essa em geral a condição para a qual os métodos em questão foram desenvolvidos ou calibrados, os mesmos não apresentam a menor aptidão para serem utilizados em localidades que apresentam temperaturas amenas e pluviosidade elevada, condições essas encontradas para Chapadão do Sul-MG. Bezerra *et al.* (2014) encontraram desempenho “Muito bom” para JH e LN, e “Bom” para MK, para a localidade de Mossoró-RN, desempenhos que se aproximam dos valores encontrados, muito se deve ao fato que, os métodos em questão como por exemplo JH terem sido desenvolvidos ou calibrados para regiões áridas ou semiáridas, ao passo que, com o maior período de dados, as oscilações nos valores ao longo dos anos causa diferenças nos valores de ETo obtidos.

Desta forma, os métodos que apresentaram desempenhos “ótimos”, em relação ao método padrão, foram Penman Original, Stephens-Stewart, Radiação-Temperatura, Turc e Hargreaves-Original. Destacamos ainda os métodos com desempenho “Muito bom” na classificação feita pela correlação de Pearson e concordância de Willmott. Foram eles: Tanner-Pelton, Radiação Líquida, Hicks-Hess, Benevidez-Lopez, Priestley-Taylor e Abtew. O pior desempenho, com classificação “Péssimo”, ficou para o método de Thornthwaite-Camargo, que conseguiu ser pior que Lungeon, McClold e Thornthwaite os quais receberam classificação “Sofrível”.

Podemos verificar também, que os valores de EPE variaram de 0,54 a 4,19 mm/dia, sendo o menor valor referente ao método Penman Original, e o maior valor EPE referente ao método Thornthwaite-Camargo. Cavalcante Junior *et al.* (2010) encontraram comportamento semelhante referente ao comportamento do PO também para a cidade de Mossoró, Almeida *et al.* (2014) também obtiveram bons resultados para os métodos de MK, JH, PT para a cidade Esperantina-PI, pode-se observar que estes métodos apresentaram comportamento “Muito Bom” e “Bom” neste trabalho realizado em Mossoró-RN, o que nos leva a acreditar que mesmo sendo um método desenvolvido para regiões frias, esse bom comportamento possivelmente se explica pelo fato do mesmo ter como parâmetro de entrada variáveis de radiação, este fato pode fortalecer o observado no presente trabalho de que métodos que apresentam como parâmetros de entrada temperaturas máximas e mínimas e/ou parâmetros de radiação, refletem em um bom resultado para a região. O comportamento dito como péssimo pelo método de TTC,

possivelmente ocorreu, em função do mesmo ter em seus valores de entrada dados mensais, não conseguindo refletir em seus valores diários um ajuste minucioso para o método.

Ainda com o intuito de verificar o desempenho dos diversos métodos e verificar se o seu comportamento apresenta variações significativas foi feito o teste t que está presente na Tabela 4.

**Tabela 4** – Análise da variância para a regressão linear ao longo do período de tempo estudado para Mossoró-RN.

<b>METODOS</b>	<b>Coefficiente angular (b)</b>	<b>Coefficiente linear (a)</b>
PENMAN-ORIGINAL 1948 (PO)	1,09	0,04**
TENNER-PELTON (TP)	0,68	1,24**
STEPHENS-STEWART (SS)	0,94	1,03**
RADIAÇÃO-TEMPERATURA (RT)	0,79	0,63**
RADIAÇÃO LIQUIDA (RL)	0,88	1,17**
RADIAÇÃO GLOBAL (RG)	1,56	-0,37**
HICKS-HESS (HH)	0,82	1,16**
LUNGEON (LG)	0,7	2,83**
ROMANENKO (RK)	0,38	2,68**
McGUINNESS-BORDNE (McB)	0,99	-1,94**
McCLOLD (MC)	0,66	0,38**
TURC (Tc)	0,9	0,64**
GARCIA-LOPEZ (GL)	0,87	0,14**
KHARRUFA (KR)	1,64	-6,19**
IVANOV (IN)	0,43	2,8**
HAMON (HM)	2,07	-2,79**
LINACRE (LN)	0,88	1,49**
CAMARGO (CM)	1,70	-1,85**
JENSEN-HAISE (JH))	0,58	1,04**
PRIESTLEY-TAYLOR (PT)	0,78	1,16**
BLANEY-MORIN (BM)	1,32	1,65**
HARGREAVES-ORIGINAL (HO)	0,73	1,02**
HARGREAVES-SAMANI (HS)	0,89	0,66**
MAKKINK (MK)	0,57	0,95**
THORNTHWAITE (TTW)	1,9	-4,04*
THORNTHWAITE-CAMARGO (TTC)	-0,004	4,95 <sup>NS</sup>
ABTEW (AT)	1,07	1,04**

Valor-*p*: (\*\*). Apresenta significância  $\leq 1\%$ , (\*). Apresenta significância  $\leq 5\%$ , (NS). Não significativo.

Por meio do teste de t pode-se observar que todos os métodos apresentaram significância a 1% de probabilidade com exceção dos métodos de TTW que apresenta significância apenas

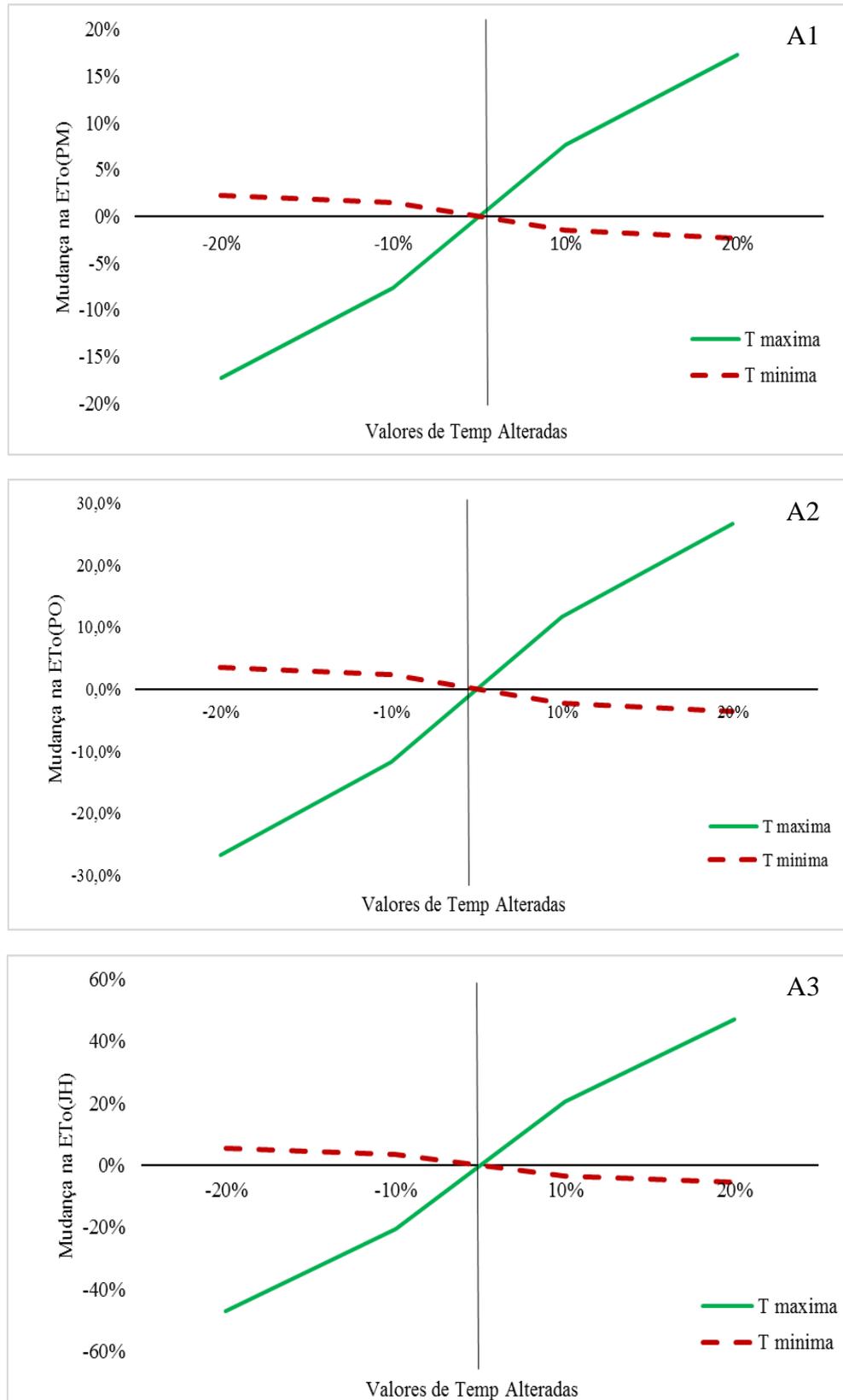
a 5% e TTC que não apresente significância dentro dos critérios estabelecidos, TTC apresentou também valores de  $(b) = -0,004$  e  $(a) = 4,95$ , TTC, os piores valores tanto para os parâmetros de EPE, d, c, quanto na análise de correlação e o teste de t corroborando com a ideia de que o método não deverá ser utilizado para obtenção de valores diários, sendo recomendado apenas para obtenção de valores mensais, Pereira *et al.* (2009) obteve resultados semelhantes para os métodos de MK, RT, JH, LN, HS, BC, PT, PO para a região da Serra da Mantiqueira-MG, mostrando que, mesmo em condições adversas entre as localidades, os métodos que utilizaram variáveis de temperatura e/ou radiação, apresentaram um bom desempenho. Desta forma, avaliando através do teste t de student juntamente com os demais parâmetros e índices, pode-se recomendar como os melhores métodos para o uso na região de Mossoró, os métodos de Penman Original 1948 e o método de radiação e temperatura, que apresentaram os melhores índices.

## **4.2 Curva de sensibilidade**

### **4.2.1 Temperatura**

Conhecendo-se os índices estatísticos para validação e o desempenho dos métodos, pode-se então escolher quais métodos seriam amostrados para verificar a sensibilidade dos mesmos às mudanças nas variáveis climáticas. Para as variáveis de temperatura máxima e mínima foram avaliados os métodos de PMFAO 56, PO, JH. A Figura 2.

**Figura 2** – Comportamento dos métodos frente a variação de temperatura.



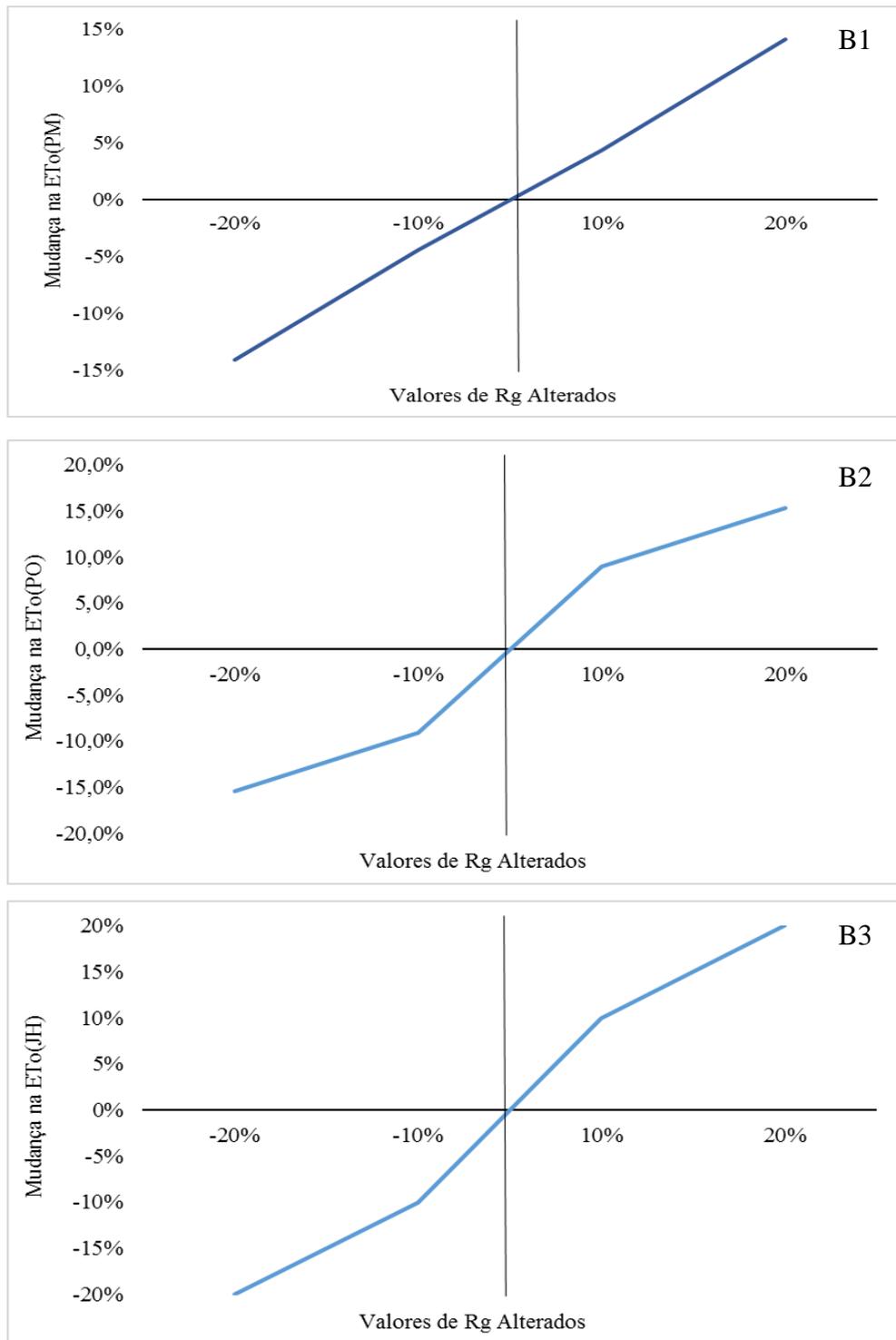
Observa-se na Figura 2 que, para os três métodos que foram avaliados, o comportamento foi semelhante, variando a intensidade da influência da variável de temperatura na ETo, dessa forma, podemos verificar que, quando acrescido temperatura máxima aos métodos, o comportamento dos métodos é de apresentar um grande acréscimo nos valores de ETo, o método que apresenta o maior acréscimo de ETo em função do acréscimo de 10% e 20% da temperatura, foi o método de JH (A3) que apresentou um acréscimo de 21% para o acréscimo de 10%, e 43% com o acréscimo de 20%, para os 3 métodos a retirada dos valores de temperatura causa um decréscimo da ETo na mesma proporção obtida na ocasião de acréscimo, o método que apresentou a menor mudança na ETo foi o método de PM-FAO56 (A1). Já quando a temperatura mínima é acrescida ou retirada na mesma ordem da Tmax a ETo toma um comportamento inverso ao da Tmax, quando acrescido valor a Tmin o comportamento da ETo é de decréscimo, e o contrário ocorre quando à retirada de valor na Tmin, onde os valores de ETo se elevam. Este comportamento pôde ser visto anteriormente para PM-FAO56 por Alencar *et al.* (2012) nas condições de Uberaba-MG, para os demais métodos avaliados não foi encontrado material que pudesse ser utilizado para comparação e verificação da possibilidade de um comportamento semelhante.

Conhecendo-se a sensibilidade destes métodos, podemos entender os cuidados no uso dos mesmos em condições de temperaturas muito elevadas ou muito baixas em uma determinada região, sabendo que poderá existir uma grande disparidade entre a ETo verdadeira e a ETo avaliada pelos métodos. Sendo assim, não recomendo o uso do método de JH para regiões que apresentam elevada amplitude térmica ao longo do dia.

#### **4.2.2 Radiação solar global**

Os métodos de PMFAO56, PO e JH também foram utilizados para avaliar sua sensibilidade às mudanças na variável radiação solar (Figura 3).

**Figura 3** - Comportamento dos métodos em função da variação de radiação solar global.



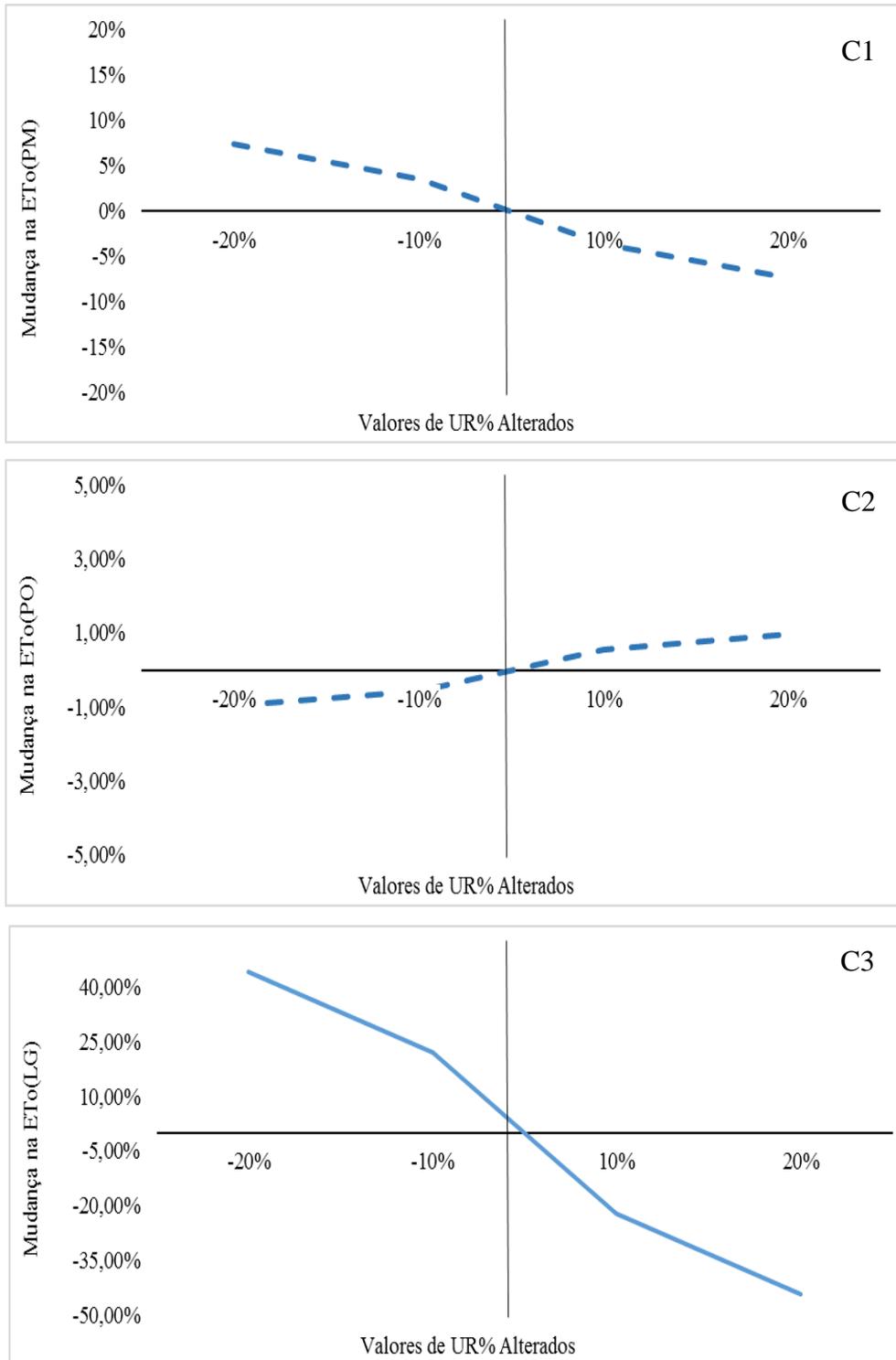
Os três métodos analisados mostraram que à medida que variam os valores da radiação solar ocorre variação quase que diretamente proporcional na ET<sub>0</sub>. O método de PM-FAO56 apresentou um comportamento linear para a variação da variável radiação solar. Para os métodos PO e JH o comportamento foi semelhante para os acréscimos ou decréscimos nos

valores de radiação solar, variando apenas a intensidade da influência no comportamento da ETo. A partir de 10% de acréscimo ou decréscimo nos valores da radiação a resposta nos valores da ETo foi mais lenta. Alencar *et al.* (2012) nas condições de Uberaba-MG, encontraram características semelhantes de sensibilidade frente a mudanças nos parâmetros de radiação. Da mesma forma, o presente trabalho encontrou comportamento semelhante ao visto por Oliveira *et al.* (2017) nas condições de Táua-CE para o método de PM-FAO56.

#### **4.2.3 Umidade relativa do ar**

Os métodos de PM-FAO56, PO e LG foram utilizados para avaliar sua sensibilidade às mudanças na variável de umidade relativa. Desta forma a Figura 4, mostra o comportamento da ETo frente a variação de umidade relativa.

**Figura 4** - Comportamento dos métodos em função da variação de umidade relativa.



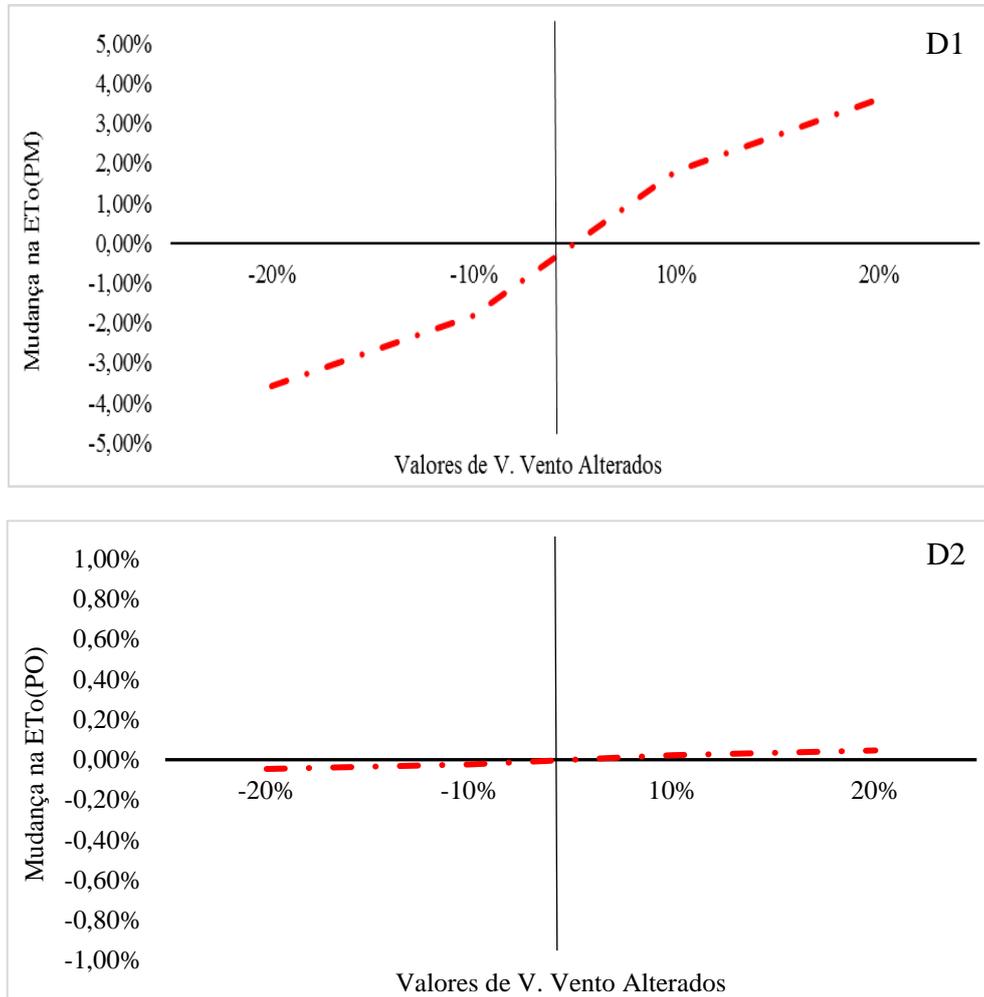
Percebe-se que, para os três métodos avaliados, o comportamento foi diferente para a condição de mudança na umidade relativa do ar. Observa-se que a variação além de ser na intensidade da influência da variável, foi também no comportamento da ET<sub>o</sub>. Isto pode ser observado também nos valores absolutos, para os métodos PM-FAO56 e PO, pois os dois

obtiveram comportamentos inversos, mesmo que em uma escala de valores bastante pequena. Enquanto os valores de ETo no PM-FAO56 diminuem conforme a umidade é acrescida, no método PO ocorre o inverso, ou seja, nas ocasiões em que a umidade relativa aumentou de valor, o valor da ETo em PO também se elevou. O método LG acompanhou o mesmo comportamento de PM-FAO56, com os valores de ETo diminuindo à medida que aumenta a umidade relativa. Com relação à intensidade da variação, o método que apresentou o maior decréscimo de ETo em função do acréscimo de 10% e 20% da umidade relativa, foi o método de LG que apresentou um acréscimo de 22,9% para um decréscimo de 10% na umidade relativa do ar, e acréscimo 45,18% na ETo com um decréscimo de 20% na umidade. O método que apresentou a menor resposta na mudança na ETo em função da umidade relativa do ar foi o método de PM-FAO56. O método de PO teve um comportamento inverso dos demais, porém, com valores muito baixos de acréscimo e decréscimo sendo menos de 1% de acréscimo e decréscimo em seus valores, desta forma tornando-se quase insignificante a ação da variável de umidade relativa na oscilação da ETo deste método. O presente trabalho encontrou comportamento semelhante ao obtido por Alencar *et al.* (2012) nas condições de Uberaba-MG frente a mudança de umidade relativa, e seu efeito no comportamento da ETo.

#### **4.2.4 Velocidade do vento**

Os métodos de PM-FAO56, PO foram utilizados para avaliar sua sensibilidade as mudanças na variável velocidade do vento. Desta forma a Figura 5, mostra o comportamento da ETo em função da variação de velocidade do vento.

**Figura 5** – Comportamento dos métodos em função da variação da velocidade do vento.



As Figuras acima mostram apenas dois métodos que foram avaliados devido ao fato de não haver outros métodos que utilizassem a velocidade do vento como um de seus parâmetros de entrada. O comportamento dos dois métodos para a condição de variação na velocidade do vento foi semelhante aos resultados apresentados para a temperatura e radiação solar, variando apenas a intensidade da influência da variável junto ao comportamento da ET<sub>0</sub>. Dessa forma, podemos verificar que, quando aumenta a velocidade do vento os métodos respondem com um aumento da ET<sub>0</sub>. Ou seja, a variação foi praticamente linear no PM-FAO56, enquanto na metodologia do PO a variação quase que não foi sentida. O método PM-FAO56 apresentou um acréscimo de 1,82% para o acréscimo de 10%, e 3,52% com o acréscimo de 20% nos valores de velocidade do vento, Alencar *et al.* 2012, nas condições de Uberaba-MG, encontraram características semelhantes de sensibilidade frente a mudanças nos parâmetros de velocidade

do vento junto a PM-FAO56. Da mesma forma o comportamento encontrado no presente trabalho corrobora com o encontrado por Oliveira *et al.* (2017) nas condições de Táua-CE.

## 5 CONCLUSÕES

Penman Original, Stephens-Stewart, Radiação-Temperatura, Turc, Hargreaves-original podem ser recomendados em projetos agrícolas na região de Mossoró-RN.

Os métodos de Hargreaves-Samani e Turc mostram-se como o mais simples dentre os métodos que apresentaram os melhores desempenhos, tanto para períodos mais secos quanto para anos mais úmidos.

O método de Thornthwaite-Camargo foi visto como o pior entre todos os métodos, desta maneira, de forma alguma, este método deve ser utilizado para a determinação da ETo para a cidade de Mossoró. Este desempenho tão ruim pode ser explicado pelo fato de que, esse método foi desenvolvido para localidade de clima ameno, úmido.

Os métodos que apresentam os melhores valores de ETo, são os que tem como variáveis de entrada dados de radiação e/ou temperatura.

A umidade relativa tem um papel inverso aos demais, quanto maior a umidade, menores os valores de ETo.

Após a análise de sensibilidade, a velocidade do vento foi o parâmetro que, menos afetou as mudanças na ETo, por sua vez a Umidade relativa apresenta a maior influência na alteração da ETo, esse fenômeno possivelmente ocorre em função da alta interferência que a umidade relativa tem em relação a intensidade nos efeitos dos demais fatores avaliados.

## 6 BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS/SISTEMA DE ACOMPANHAMENTO DE RESERVATÓRIOS. ANA/SAR. Brasília, 2018. Disponível em: <<http://sar.ana.gov.br/Nordeste>>.

AL-GHOBARI, H. M. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia. **Irrigation Sciencem**, v.19, n.2, p 81-86, 2000.

ALENCAR, L.P.; DELGADO, R.C.; ALMEIDA, T.S.; WANDERLEY, H.S. Comparação de diferentes métodos de estimativa diária da evapotranspiração de referência para a região de Uberaba. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.6, n.2, p.337-343, 2011.

ALENCAR, L.P.; SEDIYAMA, G. C.; WANDERLEY, H.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C.; SOUZA VIEIRA, G. H.; Evolução temporal da evapotranspiração de referência e sua sensibilidade aos principais elementos climáticos na cidade de Uberaba-MG. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, p.159-166, 2012.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy J.**, Madison, v. 81, n.4, p.650-662. 1989.

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PERRIER, A. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID BULLETIN**, v.43, n.2, p.1-34, 1994a.

ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PERRIER, A. An update for the calculation of reference evapotranspiration. **ICID BULLETIN**, v.43, n.2, p.35-91, 1994b.

ALLEN, R.G; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITHL M.; Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (FAO **irrigation and drainage paper**, 56).

ALMEIDA, K. N. S. de; SILVA, E. M.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de; SOUZA, K. B. de; RIBEIRO, A. A.; Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

para Esperantina-PI. In: **XLII I Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 2014, Campo Grande- MS.

ARAÚJO, E. M.; OLIVEIRA, J. B.; ARAÚJO, E. M.; LEDO, E. R. F.; da SILVA, M.G.; Desempenho de métodos de estimativa de ETo correlacionados com a equação padrão Penman-Monteith FAO 56, em cidades do estado do Ceará. **Revista ACTA Tecnológica**, v. 5, n. 2; p 84-101, 2010.

ARRAES, F. D. D. Influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Tauá, no Ceará. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, Recife, v. 2, n. 4, p.403-411, abril de 2017.

BARROS, V. R.; de SOUZA, A. P.; FONSECA, D. C.; da SILVA, L. B. D.; Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. Evaporação e evapotranspiração. Porto Alegre: **IPAGRO**/ Secretaria de Agricultura, 1981. 95 p. (Boletim Técnico, 7).

BENAVIDES, J.G.; LOPEZ DIAZ, J. Formula para el calculo de La evapotranspiracion Potencial adaptada al tropico (15° N - 15° S). **Agronomia Tropical**, Maracay, v. 20, n. 5, p. 335-345, 1970.

BEZERRA, J. M.; MOURA, G. B. A.; SILVA, E. F. F.; LOPES, P. M. O.; SILVA, B. B.; Estimativa da evapotranspiração de referência diária para Mossoró (RN, brasil). **Revista Caatinga: Sistema de Información Científica**, Mossoró-RN, v. 23, n. 3, p.210-220, set. 2014. Trimestral. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=237132104024>>. Acesso em: 24 jan. 2019.

BLANEY, H.F.; MORIN, K.V. Evaporation and consumptive use of water: empirical formulas. **Transaction American Geophysical Union**, Washington, v.23, n.1, p.76-83, 1942.

BRAGANÇA, R.; REIS, E.F.; GARCIA, G.O.; PEZZOPANE, J.E.M. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso para três localidades no estado do Espírito Santo. **Idesia**, Arica, v.28, n.2, p.21-29, 2010.

BRUIN, H.A.R.; KEIJMAN, J.Q. The Priestley- Taylor evaporation model applied to large, shallow lake in the Netherlands. **Journal of Applied Meteorology**, New York, v.18, n.7, p.898-903, 1979.

BRUIN, H.A.R.; STRICKER, J.N.M. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. **Hydrological Sciences Journal**, London, v.45, n.3, p.391-406, 2000.

CAMARGO, A.P. **Balço hídrico no estado de São Paulo**. 3. ed. Campinas: IAC, 1971. 24p. (Boletim, n. 116).

CAMARGO, A. P.; CAMARGO M. B. P. **Uma revisão da evapotranspiração potencial**. *Bragantia*, 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. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMARGO, A.P.; MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; PICINI, A.G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e super-úmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: Uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesq. Agropec. Trop.** Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, 2011.

CARVALHO, D.F. de; ROCHA, H.S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A.P. de. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, p.1-11, 2015.

CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; ALMEIDA, B. M.; OLIVEIRA, A. D.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.; ARAÚJO, E. M.; VIEIRA, R. Y. M. Estimativa da evapotranspiração de referência para a cidade de Mossoró-RN. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.4(2): 87-92, 2010.

CAVALCANTE Jr., E.G.; OLIVEIRA, A.D.; ALMEIDA, B.M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Semina**, Londrina, v.32, n. suplemento, p.1699-1708, 2011.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F.; Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência em Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 303-307, 2005.

CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; CASTRO, M. A. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul - MS. **Engenharia na Agricultura**, v.21(2): 159-172, 2013.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Efeito da água no rendimento das culturas. Tradução: GHEYI, H.R. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1994. 306 p. (Estudos da **FAO, Irrigação e Drenagem**, 33).

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Crop water requirements. Rome: FAO, 1977. 143p. (**Irrigation and Drainage paper**, 24).

DORFMAN, R. Critérios de avaliação de alguns métodos de cálculo da evapotranspiração potencial. Porto Alegre, Instituto de pesquisa Hidráulica (IPH), UFRGS. **Dissertação de Mestrado**, 1977. 210p.

FEITOSA, F. A. C.; FEITOSA, E. C. Realidade e perspectivas de uso racional de águas subterrâneas na região semiárida do Brasil. In: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande, **Instituto Nacional do Semiárido**, 2011, p.269-305.

FERREIRA, P. F.; PICCILLI, D. G. A.; CECONI, D. E.; FONTOURA J. R.; BASSO R. E. Análise comparativa dos métodos de estimativa da taxa de evapotranspiração de referência para a região sul do Brasil. **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Brasília-DF, v. 1, n. 1, p.1-8, nov. 2015.

GADIOLI, J.L.; DOURADO-NETO, D.; GARCIA Y GARCIA, A. Temperatura do ar, Rendimento de grãos de milho e caracterização fenológica associada à soma Calórica. Piracicaba, **Scientiae Agricola**, v. 57, n° 3, Jul./Set., 2000, pp. 377-383.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2.ed., rev. e atual. São Paulo, SP: Blücher, 2012.

GONG, L.; XU, C.; CHEN, D.; HALLDIN, S.; CHEN, Y.D. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Chang jiang (Yangtze River) basin. **Journal of Hydrology**, v.329, n.3-4, p. 620–629. 2006.

GOYAL, R.K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). **Agricultural Water Management**, v. 69, n.1, p. 1-11, 2004.

HAMON, W.R. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Hydraulics Division ASCE**, New York, v.87, n.3, p.107-120, 1961.

HARGREAVES, G.H. Estimation of potential and crop evapotranspiration. **Transactions of the ASAE**, Saint Joseph, v.17, n.1, p.701-704, 1974.

HARGREAVES, G. H. Defining and using reference evapotranspiration. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 120, n. 6, p.1132-1139, 1994.

HARGREAVES, L.G.; HARGREAVES, G.H.; RILEY, J.P. Irrigation water requirements for Senegal River basin. New York, **J. Irrig. Drain. Engr.**, v. 111, n° 3, 1985, pp. 265-275.

HARGREAVES, G.L.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. Basin. **Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE**, New York, v.111, n.1, p.113-124. 1985.

IRMAK, S.; PAYERO, J.O.; MARTIN, D.L.; IRMAK, A.; HOWELL, T. A. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. **Journal of Irrigation Drainage Engineer** in, v.132, n.6, p. 564-578, 2006.

JACOBS, J.M.; SATTI, S.R. **Evaluation of reference evapotranspiration methodologies and AFSIRS crop water use simulation model** (Final Report). Gainesville: Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, 2001. 114p.

JENSEN, M.E.; HAISE, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE**, New York, v.4, n.1, p.15-41, 1963.

JENSEN, M.W.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. *et al.* Evapotranspiration and irrigation water requirements New York: **American Society of Civil Engineers**, 1990. 329p. (ASCE. Manual and Reports on Engineering Practices, 70).

KHARRUFA, N.S. Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. **Beiträge zur Hydrologie**, Kirchzarten, v.5, n.1, p.39-47, 1985.

KLEIN, S. A. Calculation of Monthly Average Insolation on titled surfaces. **Solar energy**, v.9, p.325-329, 1977.

LINACRE, E.T. 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.

MARCUZZO, F. F. N.; MANZIONE, R. L.; WENDLAND, E. **Correlação de métodos de estimativa de evapotranspiração por temperatura com o método combinado padrão da FAO**. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Belo Horizonte – MG, p.1-5, set. 2009.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E.; LACERDA, F. F. **Variabilidade e mudanças climáticas o semiárido brasileiro**. In. MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. Recursos Hídricos em regiões Áridas e Semiáridas. Campina Grande, Instituto Nacional do Semiárido, 2011, p.383-422.

MARTINS, E.S.P.R.; COELHO, C.A.S.; HAARSMA, R.; OTTO, F.E.L.; KING, A.; OLDENBORGH, G.J.V.; KEW, S.; PHILIP, S.; VASCONCELOS JR., F.C. & CULLEN, H. 2017. A multimethod attribution analysis of the prolonged Northeast Brazil hydrometeorological drought (2012-16). **Bulletin of the American Meteorological Society**,99: 65-69.

MAKKINK, G.F. Testing the Penman formula by means of lysimeters. **Journal of the Institution of Water Engineers**, New York, v.11, n.3, p.277-288. 1957.

MEDEIROS, A. T. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE. 2002. 103 f. **Tese** (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 2002.

MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R.T. Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.2, p.196-202, 2010.

MONTEITH, J. L. **Evaporation and environment. In: the state and movement of water in living organisms**, 1965, Cambridge. Atas and abstract... Cambridge University, press, 1965, pag 205-234.

MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M<sup>a</sup>. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G.; SILVA, B. B.; OLIVEIRA, L. M<sup>a</sup>. M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco - Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Recife-PE, v. 28, n. 2, p.181-191, jun. 2013.

OLIVEIRA, A. K. S. de. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso e seco em Mossoró-RN. 2017. 53 f. **TCC** (Graduação) - Curso de Agronomia, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.

OLIVEIRA, J. B. de; BARBOSA, P. J. de A.; NOGUEIRA, D. H; ARAÚJO, E. M.; ARRAES, F. D. D. Influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Tauá, no Ceará. **Journal Of Environmental Analysis And Progress**, Recife-PE, v. 2, n. 4, p.403-411, ago. 2017. Trimestral.

LOUDIN, L.; MICHEL, C.; ANCTIL, F. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model: Part 1 - Can rainfall run off models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.303, n.1-4, p.290-306, 2005.

PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of Royal Society-Series A**, London, v.193, n.1, p.120-145, 1948.

PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. Netherlands. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.4, p.9-29, 1956.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDYIAMA, G. C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: **FEALQ**, 1997. 183 p.

PEREIRA, A R; ANGELOCCI, L. R; SENTELHAS, P. C. Evapo(transpi)ração. In: PEREIRA, Antônio Roberto; PEREIRA, Antônio Roberto; SENTELHAS, Paulo Cesar. **Meteorologia Agrícola**. 306. ed. Piracicaba, Sp: Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2007. Cap. 12. p. 78-91.

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 de Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, v.39, p.2488-2493, 2009.

PEREIRA, J. R.; ZONTA, J. H.; ARAÚJO, W. P.; ALMEIDA, E. S. A. B. DE.; FIRMINO, P. DE T.; SOUSA, J. Y. B. DE.; **Estimativas de coeficientes de cultivo do gergelim através do balanço hídrico no solo**. 2014. VI congresso brasileiro de mamona III simpósio internacional de Oleaginosas Energéticas, Fortaleza, CE. 2014.

PITA, R. F. Q. Influência das mudanças climáticas no cálculo da evapotranspiração no semiárido da Paraíba. 2011. 48f. **TCC** (Curso de Engenharia Civil) – UFPB – Centro de Tecnologia, João Pessoa, 2011.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v.100, n.2, p.81-92, 1972.

ROMANENKO, V. A. Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. Kiev: **Ukrainian Hydrometeorological Research Institute**, 1961. 3 p.

SENTELHAS, P. C. Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática. 1998. 97 f. **Tese** (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 1998.

SILVEIRA, S.S.; ANDRADE, E.M. de. Análise de componentes principais na investigação de estrutura multivariada da evapotranspiração. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.22, n.2, p.173-177, 2002.

SILVA, V. P. R.; GARCÊZ, S. L. A.; SILVA, B. B.; ALBUQUERQUE, M. F.; ALMEIDA, R. S. R. Métodos de estimativa da evapotranspiração da cultura da cana-de-açúcar em condições de sequeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19(5): 411-417, 2015.

SILVA, A. O.; MOURA, G. B. de A.; KLAR, A. E. Classificação climática de Thornthwaite e sua aplicabilidade agroclimatológica nos diferentes regimes de precipitação em Pernambuco. **Irriga**, Botucatu, v. 19, n. 1, p.46-60, mar. 2014.

SENTELHAS, P.C., GILLESPIE, T.J., SANTOS, E.A. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canadá. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 5, p. 635-644, 2010.

SMITH, M. **Report on the expert consultation of procedures for revision of FAO Guidelines for prediction of crops water requirements**. Rome, IT: FAO, 1991. 45 p.

TABARI, H. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates. **Water Resource Management**, Amsterdam, v. 24, n. 10, p. 2311- 2337, 2010.

TAGLIAFERRE, C.; SILVA, R.A.J.; ROCHA, F.A.; SANTOS, L.C.; SILVA, C.S. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis-BA. **Caatinga**, Mossoró, v.23, n.1, p.103-111, 2010.

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

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS / ABRH, 2001.

TOMAR, V.S.; O'TOOLE, J.C. Water use in low land rice cultivation in Asia: a review of evapotranspiration. **Agricultural Water Management**, New York, v.3, n.1, p.83-106, 1980.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. do. **Meteorologia Descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras**. 7. ed. São Paulo: Nobel, 1992. 374 p.

TURC, L. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formule simplifiée et mise à jour. **Annals of Agronomy**, v.12, n.1, p.13-49, 1961.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**. Brasília: INMET, 2000. 532 p.

VILLA NOVA, N.A. **Principais métodos de estimativa de aplicação de água de irrigação**. Piracicaba: Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP, 1987. 22p.

WELIGEPOLAGE, K. **Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remote sensing – A case study in Hupselse Beek, The Netherlands**, 2005, 114 p.

WILLMOT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K.; KLINK, D.R. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.5, p.8995-9005, 1985.

WINTER, T.C.; ROSENBERRY, D.O.; STURROCK, A.M. Evaluation of 11 equations for determining evapotranspiration for a small lake in the north central United States. **Water Resources Research**, v.31, n.4, p.983-993, 1995.

XU, C.Y.; GONG, L.; JIANG, T.; CHEN, D.; SINGH, V.P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration in Chang jiang (Yangtze River) basin. **Journal of Hydrology**, v. 30, n.1-2, p. 81-93, 2006.

ZIMMERMANN, E.D. **Evaporación, transpiración y evapotranspiración en Orsolini**. In: ZIMMERMANN, E. D.; BASILE, P. A. (eds.). *Hidrología: Procesos y Métodos*. Rosario: UNR Editora, 2000, p.65-89.