



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
CURSO DE AGRONOMIA

ANNA KÉZIA SOARES DE OLIVEIRA

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NOS
PERÍODOS CHUVOSO E SECO EM MOSSORÓ-RN**

MOSSORÓ

2017

ANNA KÉZIA SOARES DE OLIVEIRA

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NOS
PERÍODOS CHUVOSO E SECO EM MOSSORÓ-RN**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em agronomia.

Orientador: José Espínola Sobrinho, Prof. Dr.

Co-orientador: Wesley de Oliveira Santos, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2017

©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 mencionado os seus créditos bibliográficos.

O676c Oliveira, Anna Kézia Soares de.

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NO PERÍODO

CHUVOSO E SECO EM MOSSORÓ-RN / Anna Kézia Soares
de Oliveira. - 2017.

56 f. : il.

Orientador: José Espínola Sobrinho.

Coorientador: Wesley de Oliveira Santos.

Monografia (graduação) - Universidade Federal

Rural do Semi-árido, Curso de Agronomia, 2017.

1. Manejo de Irrigação. 2. Métodos Empíricos 3.
Agrometeorologia. I. Sobrinho, José Espínola,
orient. II. Santos, Wesley de Oliveira, co-orient.
III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ANNA KÉZIA SOARES DE OLIVEIRA

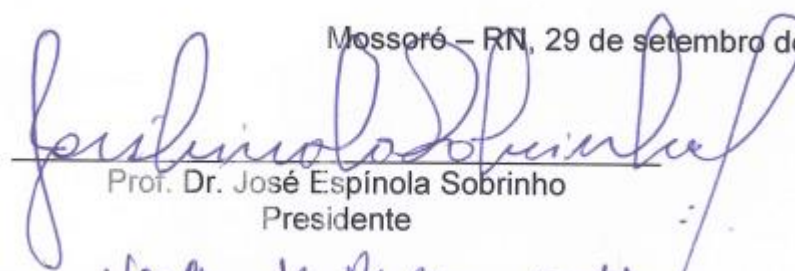
**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NOS
PERÍODOS CHUVOSO E SECO EM MOSSORÓ-RN**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em agronomia.

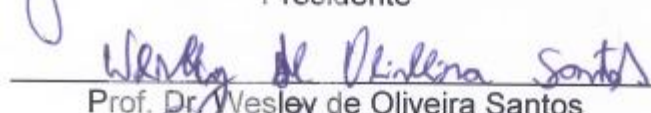
Defendida em: 29 / 09 / 2017.

BANCA EXAMINADORA

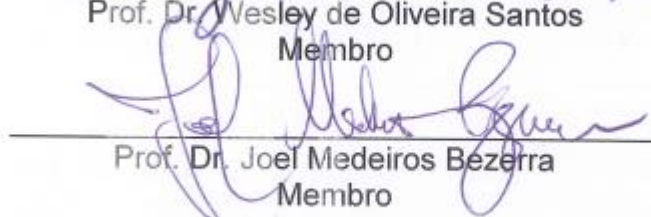
Mossoró – RN, 29 de setembro de 2017.



Prof. Dr. José Espínola Sobrinho
Presidente



Prof. Dr. Wesley de Oliveira Santos
Membro



Prof. Dr. Joel Medeiros Bezerra
Membro

*Aos meus queridos avós ANTONIO SOARES
DA SILVA E FRANCISCA LOPES DA SILVA;
JOÃO BATISTA DE OLIVEIRA E MARIA
MADALENA DE OLIVEIRA (In Memoriam).*

*Aos meus amados pais ANTONIA DALVA SOARES DE OLIVEIRA e JACINTO EVANDRO
DE OLIVEIRA (presentes)*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado forças para vencer cada dificuldade. Eis me aqui Senhor, Christo nihil praeponere.

Agradeço aos meus pais, aos meus irmãos Alexandre Henrique Soares de Oliveira e Anna Raquel Soares de Oliveira, a minha sobrinha Alice Soares de Sousa, por todo apoio, amor e carinho.

Agradeço à Universidade Federal Rural do Semi-Árido, pela oportunidade da realização do curso, e aos professores por terem partilhado seus conhecimentos e experiências.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Espínola Sobrinho, por todas as oportunidades e principalmente pelos ensinamentos, orientação e dedicação concedida.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelas bolsas de estudo concedidas.

Agradeço a Banca Examinadora Prof. Dr. Wesley de Oliveira Santos e Prof. Dr. Joel Medeiros Bezerra por terem aceitado o convite, e pela contribuição para o trabalho.

Agradeço a Isaac Alves da Silva Freitas, pelo companheirismo, apoio e carinho.

Agradeço aos grandes amigos que fiz na UFERSA e aos bons momentos que tivemos na graduação.

Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível.

(São Francisco de Assis)

RESUMO

O município de Mossoró-RN destaca-se no cenário agrícola regional, sendo considerado um dos polos fruticultores expressivos da região Nordeste. O município apresenta constante déficit hídrico, sendo necessário o desenvolvimento da agricultura irrigada e o uso eficiente da água, e para isso é necessário o conhecimento da evapotranspiração de referência (ET_o) para o cálculo da necessidade hídrica das culturas. Assim sendo, objetivou-se avaliar, para as condições climáticas de Mossoró, RN, diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, comparando-os com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56. Foi utilizada uma série de dados diários de dois anos distintos, sendo considerado um chuvoso (2011) e outro seco (2012). Os dados foram obtidos na estação meteorológica da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), situada no município de Mossoró-RN. Os dados diários obtidos pelos métodos foram correlacionados através de regressão linear aos do método padrão mediante índices estatísticos (r, d e c). Todos os métodos avaliados apresentaram razoável correlação com o método padrão, com destaque para os métodos de Penman-Original, Radiação-Temperatura e Hargreaves-Original que atenderam satisfatoriamente à estimativa da ET_o para o período chuvoso enquanto os métodos de Jensen-Haise; Radiação-Temperatura e Hargreaves-Original obtiveram desempenho satisfatório para o período seco. O método de Hargreaves-Samani não demonstrou viabilidade na utilização de estimativa da evapotranspiração de referência, pois, destacou-se como o pior método em ambos os períodos estudados, não sendo recomendado para o manejo da irrigação no município.

Palavras-chave: Manejo de Irrigação. Métodos Empíricos. Agrometeorologia.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	- Participação percentual dos estados no valor da produção da fruticultura no Nordeste em 2014.....	12
Figura 2	- Percentual de água armazenada em reservatórios no Nordeste por estado (dezembro de 2011 a julho de 2016).....	13
Figura 3	- Estação meteorológica Jerônimo Rosado, UFERSA, Mossoró-RN.....	33
Figura 4	- Variação diária da temperatura média (°C), umidade relativa média (%) e da precipitação (mm) durante o de 2011 em Mossoró, RN.....	38
Figura 5	- Distribuição mensal da ETo estimada através de distintos métodos indiretos, durante um ano chuvoso em Mossoró-RN.....	39
Figura 6	- Regressão linear entre os valores diários da evapotranspiração de referência (ETo) estimada por diferentes métodos e comparados com o método-padrão Penman-Monteith-FAO 56, durante o ano chuvoso de 2011, em Mossoró, RN.....	42
Figura 7	- Variação diária da temperatura média (°C), umidade relativa média (%) e da Precipitação (mm) durante o ano de 2012 em Mossoró, RN.....	43
Figura 8	- Distribuição mensal da ETo estimada através de distintos métodos indiretos durante um ano seco, em Mossoró, RN.....	44
Figura 9	- Regressão linear entre os valores diários da evapotranspiração de referência (ETo) estimada por diferentes métodos e comparados com o método-padrão Penman-Monteith-FAO 56, durante o ano seco de 2012, em Mossoró, RN....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Critério para análise do desempenho dos métodos empíricos pelo índice c....	36
Tabela 2	–	Análise de variância para a regressão linear, no período chuvoso e seco, em Mossoró-RN.....	37
Tabela 3	–	Indicadores estatísticos da comparação entre os diferentes métodos de estimativa da ETo com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56, em escala diária, para o período chuvoso.....	40
Tabela 4	–	Indicadores estatísticos da comparação entre os diferentes métodos de estimativa da ETo com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56, em escala diária, para o período seco.....	45

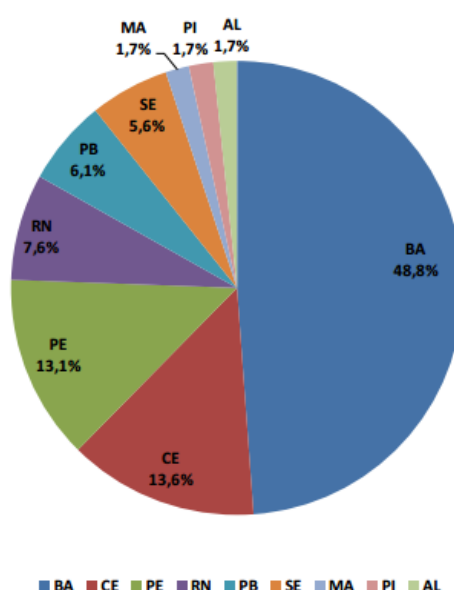
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Evapotranspiração	15
2.2 Evapotranspiração de referência	15
2.3 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.....	18
2.3.1 Penman-Monteith FAO 56	20
3.3.1.1 Parâmetros da equação de Penman-Monteith - FAO 56	22
2.3.2 Penman-Original.....	26
2.3.3 Makkink.....	27
2.3.4 Turc.....	27
2.3.5 Jensen-Haise	28
2.3.6 Garcia-Lopez	28
2.3.7 Priestley-Taylor	29
2.3.8 Hargreaves-Original	29
2.3.9 Linacre	30
2.3.10 Hargreaves-Samani.....	30
2.3.11 Radiação-Temperatura.....	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1 Área experimental e dados meteorológicos	33
3.2 Equações de estimativa da ETo	34
3.3 Comparação entre os métodos.....	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Período chuvoso	37
4.2 Período seco.....	43
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	48
REFERÊNCIAS	49
APÊNDICE A - Valores médios mensais da evapotranspiração de referência (mm) estimados pelos diferentes métodos durante o ano de 2011 em Mossoró-RN.....	55
APÊNDICE B - Valores médios mensais da evapotranspiração de referência (mm) estimados pelos diferentes métodos durante o ano de 2012 em Mossoró-RN.....	56

1 INTRODUÇÃO

A região Nordeste possui polos fruticultores tropicais que vêm apresentando resultados expressivos nos últimos anos, como os localizados no semiárido nordestino, especialmente os de Juazeiro na Bahia juntamente com Petrolina em Pernambuco, no Vale do São Francisco, e o de Mossoró, no Rio Grande do Norte (Figura 1) (OLIC, 2005).

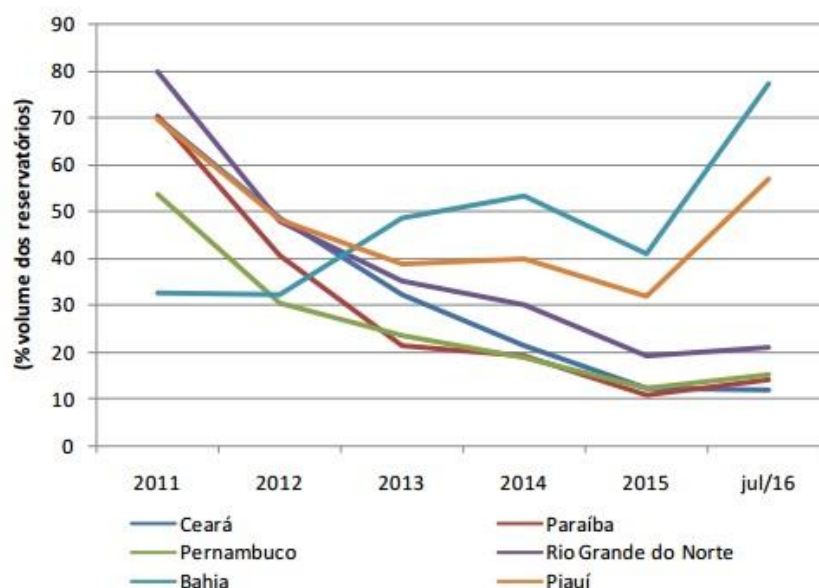
Figura 1 - Participação percentual dos estados no valor da produção da fruticultura no Nordeste em 2014.



Fonte: BNB (2016)

O Estado do Rio Grande do Norte-RN apresenta condições edafoclimáticas extremamente favoráveis ao cultivo de fruteiras adaptadas ao clima tropical. Com a utilização da irrigação, tem sido possível produzir, com qualidade, uma grande variedade de frutas, destinadas ao mercado nacional e internacional. A área agrícola irrigada no RN está em torno de 20.000 ha, dos quais 90% situada no Pólo Açu-Mossoró. As principais culturas plantadas são: melão, banana e manga. Outras culturas, como a do coco e a do caju, tradicionalmente exploradas como de sequeiro, já estão sendo trabalhadas em áreas irrigadas, apresentando excelentes níveis de produtividade (CGEE, 2004). Entretanto, eventos de seca tem inibido a expressão desse potencial, o que faz da irrigação atividade indispensável, e devido a escassez de água deve-se promover a racionalidade deste recurso (Figura 2).

Figura 2 - Percentual de água armazenada em reservatórios no Nordeste por estado (dezembro de 2011 a julho de 2016).



Fonte: BNB (2016)

Como forma de manter a produtividade agrícola e estabelecer técnicas de gerenciamento dos recursos hídricos em áreas irrigadas são empregadas metodologias para determinação dos fatores que afetam o balanço hídrico deste sistema, sendo possível quantificar as perdas de água (CAPORUSSO & ROLIM, 2015). A estimativa de consumo de água pelas culturas destaca-se como uma das variáveis importantes na elaboração de um projeto de irrigação, quando se deseja o uso racional da água e a maximização da produção.

Sendo consumo de água pelas culturas denominado evapotranspiração da cultura (ET_c), que é a ocorrência simultânea de dois processos importantes no cultivo das plantas, a evaporação da água do solo e a transpiração das plantas. Existem diversas maneiras de medir a ET_c, mas devido aos altos custos dos equipamentos, tais técnicas quase sempre se restringem à pesquisa (PEREIRA et al., 1997).

Na ausência de equipamentos de medidas de evapotranspiração da cultura, os pesquisadores, muitas vezes, utilizam medidas baseadas na evapotranspiração de referência (ET_o) e no coeficiente de cultura (K_c), o qual remete ao estágio de desenvolvimento da mesma.

A evapotranspiração de referência (ET_o) é definida como evapotranspiração de uma cultura hipotética que cobre todo o solo, mantida em condições ideais de crescimento. Podendo se medida por meio de técnicas e princípios físicos relativamente complexos

(ALLEN et al., 2011), e a forma direta mais precisa para sua estimativa é o balanço hídrico no solo com uso de lisímetros. No entanto, em virtude das limitações associadas ao método, o uso de modelos físico-matemáticos tem se tornado alternativa prática para a estimação da ETo (CARVALHO et al., 2015), contudo, para os produtores rurais, que nem sempre dispõem de recursos para aquisição de equipamentos com custo elevado.

A partir de resultados de inúmeros estudos conduzidos nas últimas décadas, a equação combinada de Penman-Monteith, modificada por Allen et al. (1998), é a que melhor representa os fatores físicos e fisiológicos que regem o processo da evapotranspiração. A principal desvantagem dessa equação é o grande número de variáveis meteorológicas necessárias para a sua aplicação, ao se considerar que muitas estações meteorológicas não têm todos os sensores necessários, os quais, mesmo quando presentes, ocorrem falhas na coleta dos dados (SILVA et al., 2010) e muitas vezes, fornecem dados com baixa qualidade (DROOGER & ALLEN, 2002). Esse fato é importante, especialmente para países em desenvolvimento, onde conjuntos confiáveis de dados de radiação, umidade relativa do ar e velocidade do vento nem sempre são comuns (TRAJKOVIC & KOLAKOVIC, 2009).

Dentre os vários métodos desenvolvidos para a estimativa da ETo usando dados meteorológicos, alguns destes podem ser pouco precisos, quando a equação não é adequada às condições locais. Em vista disto, na tentativa de escolher o melhor método de estimativa da evapotranspiração para um determinado local, vários estudos comparando os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência com o método de Penman-Monteith parametrizado pela FAO, são realizados para diferentes regiões, como forma de verificar a eficiência dos métodos, buscando o que melhor represente as condições locais (MOURA et al., 2012; CUNHA; MAGALHÃES; CASTRO, 2013; ALENCAR et al., 2011a; COSTA; MANTOVANI; SEDIYAMA, 2015; RIBEIRO et al., 2015).

A estimativa correta da evapotranspiração serve de subsídios para quantificar a lâmina real de água a ser fornecida ao solo durante a irrigação. Desse modo, estimar a evapotranspiração de forma precisa, contribui para o uso racional dos recursos hídricos naturais e reduz os custos de produção (EMBRAPA, 2010).

Assim sendo, objetivou-se avaliar, para as condições climáticas de Mossoró, RN, diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência, comparando-os com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56. Entre os objetivos específicos propostos na pesquisa, tem-se: determinar a distribuição diária dos diferentes métodos; verificar o efeito da sazonalidade em resposta aos métodos empregados; avaliar a viabilidade temporal dos métodos e identificar os métodos mais recomendados para o produtor rural.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração

O termo evapotranspiração foi utilizado por Thornthwaite, na década de 40, para expressar a ocorrência simultânea dos processos de evaporação da água no solo e da transpiração das plantas (MENDONÇA et al., 2003). A evapotranspiração (ET) é a variável mais ativa do ciclo hidrológico e a principal componente no balanço hídrico em ecossistemas agrícolas. Portanto, ela é um parâmetro chave para estudos de avaliação ambiental e de manejo de bacias hidrográficas (RAZIEI & PEREIRA, 2013), e para o planejamento e manejo de cultivos agrícolas irrigados, além do gerenciamento de recursos hídricos (ALENCAR et al., 2011b).

Vários fatores afetam a taxa de evapotranspiração, dentre eles, podemos citar fatores climáticos como: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, chuva, pressão de vapor, e fatores da própria planta, relacionados às suas características específicas, como área foliar, estágio de desenvolvimento e arquitetura foliar (MEDEIROS, 2002). Dentre os elementos climáticos, a radiação solar é o mais importante para a estimativa da evapotranspiração, pois ela é a maior fonte de energia que possibilita a passagem da fase líquida para gasosa da água. Por isso a evapotranspiração é função da quantidade de energia solar que chega até a área cultivada. Plantas isoladas ou pequenas áreas cultivadas próximas a áreas com solos descobertos terão maior taxa de evapotranspiração (BERNARDO et al., 2006).

2.2 Evapotranspiração de referência

Segundo Frizzzone (2004), o conceito de evapotranspiração de referência foi introduzido por pesquisadores e engenheiros de irrigação para evitar ambiguidades que existiam na definição da evapotranspiração potencial (ET_p) e foi definido por Doorenbos e Pruitt (1977) como aquela que ocorre em uma extensa superfície coberta com grama de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água (MENDONÇA et al., 2003).

O ideal seria que um método para estimar a ET_o incorporasse todos os fatores que influenciam a evapotranspiração, tais como a morfologia da planta, a taxa de crescimento da cobertura da superfície pela planta, estágio de crescimento, condições de solo, principalmente

a forma com que as propriedades físicas do solo afetam diretamente a água disponível para a extração pelo sistema radicular e, também, as condições microclimáticas nos aspectos dos processos de transferência de energia e massa (CUENCA & NICHOLSON, 1982).

A evapotranspiração de referência (ET_o) é utilizada nos balanços hídricos agrícolas e na modelagem dos processos climatológicos e hidrológicos, com finalidade de obter estimativa da necessidade de irrigação, na previsão de safras, avaliação de disponibilidade de recursos hídricos e caracterização climática (BACK, 2008).

Em 1990, os métodos recomendados pela FAO (Food and Agriculture Organization) em 1977 foram submetidos a uma revisão feita por especialistas em evapotranspiração, chegando-se à conclusão de que o método de Penman-Monteith parametrizado para grama, com 12 cm de altura, resistência aerodinâmica da superfície de 70 s m^{-1} e albedo de 0,23, apresentava melhores resultados, passando a ser recomendado pela FAO como método-padrão para estimativa da ET_o (SMITH et al., 1990). Assim, o novo conceito proposto para a ET_p passou a ser, de fato, a ET_o, tornando-se, este conceito, desde então, largamente utilizado, entretanto, apesar da proposição da FAO, ainda é bastante comum o uso dos termos ET_p e ET_o (CARVALHO et al., 2011).

O conceito de evapotranspiração de referência foi originalmente introduzido para estudar a demanda evaporativa da atmosfera independentemente do tipo de cultura, fenologia e tratos culturais. É um termo usado em estudos climáticos e um elemento indicativo da demanda hídrica das culturas de um determinado local e período (ALENCAR et al., 2011a). O conhecimento das necessidades hídricas das culturas é de grande importância para o estudo do manejo da água utilizada na agricultura irrigada. E a quantificação da evapotranspiração é imprescindível para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação (ORTEGA et al., 2009).

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) 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 Irrigadas e Vegetação Nativa, que iniciou seu trabalho em 1965. Um progresso limitado ocorreu em 1968. Em 1969 efetivou-se uma maior revisão, até que em 1973 o relatório de Uso Consuntivo foi terminado e finalmente publicado em 1974.

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

Já 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 referencia (ET_o), 2) o efeito das características da cultura no requerimento de água, dado pelo coeficiente da cultura (K_c) 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. 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 unanime que a equação combinada de melhor performance na estimativa de ET_o é a de Penman-Monteith.

A última publicação da FAO, o Boletim 56 (ALLEN et al., 1998), novamente atualiza os procedimentos de cálculo de evapotranspiração de referencia (ET_o) e no procedimento de cálculo da referida variável. Devido, principalmente, a 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 0,12 m e resistência do dossel de 70 s m⁻¹ sem restrições de água, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo. O Boletim também analisa aspectos relacionados a determinação do coeficiente das culturas (K_c) e recomenda procedimentos de avaliação dos dados empregados nas estimativas de ET_o (MEDEIROS, 2002). Ao longo dos anos, de acordo com Carvalho et al. (2011), muitos métodos foram desenvolvidos para a estimativa da evapotranspiração de referência. Três importantes razões concorreram para isto: adequação do método às condições climáticas da região, simplicidade de uso e limitação de elementos meteorológicos ou climatológicos que alimentam estes métodos. Devido à diversidade de métodos existentes, em razão da grande variabilidade dos parâmetros que influenciam o fenômeno e também considerando o empirismo de muitos deles é comum haver pesquisas para avaliar o método que tem maior aplicabilidade ao local de estudo.

2.3 Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência

A evapotranspiração tem sido estudada por muitos pesquisadores em diferentes regiões de cultivo e recorrendo-se a diferentes metodologias. Estas possuem características que podem se adaptar melhor a determinadas condições ou apresentar limitações devido a exigências de variáveis necessárias ou condições particulares de funcionamento. Um fator que tem intrigado os pesquisadores é que na aplicação de diferentes metodologias sob as mesmas condições, os resultados encontrados muitas vezes, têm variado dependendo do método empregado. Este fato tem estimulado estudos visando ajustar os métodos e avaliá-los objetivando estimativas mais precisas (SALES, 2008).

Bernardo et al. (1996) relatam que a ETo pode ser determinada por métodos diretos e indiretos, sendo os métodos diretos os que utilizam lisímetros, parcelas experimentais no campo, controle de umidade do solo e método de entrada e saída de água em grandes áreas. Dos métodos diretos, o procedimento mais preciso para se determinar a ETo é a utilização de lisímetros, os quais, são equipamentos que apresentam elevada precisão no monitoramento da ETo, sendo constituídos por um determinado volume de solo, armazenado em recipientes (tanques) que apresentam características físicas e químicas semelhantes às áreas adjacentes.

Os lisímetros são divididos em 2 categorias: pesáveis e não pesáveis. Os primeiros permitem a determinação de ET em períodos curtos – diário ou horário, e é importante para ajuste dos coeficientes de correção dos métodos indiretos ou empíricos de determinação de ET (BERNARDO et al., 2006).

O cálculo de ET pelo método do lisímetro de pesagem se dá pela variação do peso do solo em relação a área do tanque. Já os lisímetros não pesáveis, de drenagem ou de lençol freático constante, são adequados para grandes períodos de medição e se baseiam no princípio de conservação de massa para a água em um volume de solo (CAMARGO, 1962; PEREIRA et al., 2002).

A medida direta da evapotranspiração é difícil, portanto sua utilização só é justificável em condições experimentais (PEREIRA et al., 2002).

Segundo Bernardo et al (2006), outros métodos diretos para medição de ET seriam: métodos das parcelas experimentais, que deve ser usado para determinação da ET durante todo o ciclo da cultura e método do controle da umidade do solo, usado com resultados satisfatórios em locais de solo uniforme, com lençol freático profundo, de modo que não influencie na umidade na zona radicular da cultura.

Além dos métodos diretos de medição, tem-se os métodos indiretos, de estimativa da ETo, que são mais usuais e de fácil aferição. Para seu uso são necessários dados climáticos, em geral de fácil obtenção, e a disponibilidade destes é um dos principais fatores ao se escolher um método de estimativa de ETo (CAPORUSSO & ROLIM, 2015).

Os métodos indiretos são divididos em dois grupos: evaporímetros e equações de estimativa. No primeiro grupo destaca-se o tanque classe A (TCA), que, apesar de desvantagens como facilidade de acesso a animais e o fato da evaporação ocorrer também no período noturno (SENTELHAS, 2001), por seu manejo facilitado e baixo custo é uma opção bastante utilizada em campo. Ele se baseia na estimativa da evapotranspiração a partir da evaporação de água ocorrida num tanque padronizado, circular de aço inoxidável ou galvanizado em chapa número 22, com 121 cm de diâmetro (1,15 m² de área evaporante) e 25,5 cm de profundidade, devendo ser instalado a 15 cm do solo sobre um estrado de madeira, em área gramada (PEREIRA et al., 2002; BERNARDO et al., 2006). A leitura da evaporação é realizada num poço tranquilizador onde está instalado um parafuso micrométrico com gancho capaz de medir variações de 0,01 mm de água evaporada.

Os atmômetros são também evaporímetros nos quais a evaporação se dá por meio de uma superfície porosa e são menos usuais pela chance maior de erro devido ao risco de presença de sal ou sujidades em seus poros, além de sua maior sensibilidade ao vento (BERNARDO et al., 2006). Apesar dessas limitações, esses ainda são usados a nível experimental para dimensionamento de sistemas de irrigação.

Apesar de todas as possibilidades de estimativa de ETo por meios diretos ou indiretos com uso de estruturas físicas, o método indireto por equações com uso de dados meteorológicos, segundo Bernardo et al. (2006), é o meio mais usado para a estimativa de ETo. Apesar da possível complexidade na obtenção dos dados adequados para uso nas equações de estimativa dos diferentes modelos, seus resultados alcançam um desempenho bastante satisfatório em termos de evapotranspiração de referência.

Os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência podem ser classificados em: de radiação, de evaporação, de temperatura, de umidade, de múltiplas correlações e combinados (PEREIRA et al., 1997). Assim, dependendo dos princípios envolvidos no desenvolvimento do método de estimativa da ETo, tais podem ser agrupados em categorias: empíricos, aerodinâmicos, baseados no balanço de energia, combinados e correlação de turbilhões.

Existem mais de 50 modelos de métodos de determinação da evapotranspiração encontrados na literatura. A estrutura de tais modelos está relacionada com a complexidade do

fenômeno natural que depende de uma vasta gama de dados climáticos (McMAHON et al., 2013).

De acordo com Medeiros (2002) apesar da existência de diversos modelos para a estimativa da evapotranspiração de referência, os mesmos são utilizados em condições climáticas e agrônômicas muito diferentes daquelas em que inicialmente foram concebidos. Razão pela qual, ser de extrema importância, avaliar o grau de exatidão desses modelos, antes de utilizá-los para nova condição, sendo a equação Penman-Monteith, a referência padrão para esses ajustes.

A Comissão Internacional de Irrigação e Drenagem (ICID) e a FAO, recomendam o método de Penman-Monteith como padrão de estimativas da evapotranspiração de referência, a partir de dados meteorológicos, sendo também indicado para avaliar outros métodos (SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998). Essa metodologia facilitou os procedimentos de calibração e estimativa por meio de equações empíricas, permitindo potencialmente a extensão de estudos locais para outras regiões do planeta.

No entanto, seu nível de exigência de entrada de dados dificulta sua aplicação (PAIVA & PINHEIRO, 2016).

As pesquisas sobre o modelo de Penman-Monteith podem ser divididas em três frentes principais. A primeira e mais difundida é o uso da equação Penman-Monteith-FAO 56, para avaliação e calibração de equações empíricas; a segunda forma de uso da equação padrão é a avaliação e melhoria do seu desempenho em diversas condições climáticas; a terceira vertente de estudos sobre essa equação padrão revela o seu crescente uso em modelos matemáticos hidrológicos e hidráulicos, bem como aliada ao sensoriamento remoto (FERNANDES, 2006).

2.3.1 Penman-Monteith FAO 56

Em 1948, Penman combinou o balanço de energia com o método de transferência de massa e derivou uma equação para calcular a evaporação de uma superfície em águas abertas usando registros do sol, temperatura, umidade e velocidade do vento. Este método, também chamado de método combinado, foi desenvolvido por diversos pesquisadores e estendido às superfícies cultivadas por meio da introdução de fatores de resistência (SILVEIRA et al., 2011).

Mais tarde, na década de 1960, Monteith, com base no método de Penman, propôs um novo método que estimava diretamente a E_{Tc} , denominando-o de Penman-Monteith, e

Doorenbos & Pruitt (1977) introduziram o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o), em substituição ao termo ET_p (CARVALHO et al., 2011).

O método Penman-Monteith é de natureza puramente física, embora tenha aspectos empíricos por utilizar a temperatura do ar em lugar da temperatura da superfície evaporante, como é empregada na clássica equação de Dalton (CAMARGO & CAMARGO, 2000).

A FAO recomenda que os métodos empíricos de estimativas da ET_o, sejam calibrados e validados para outras regiões, sendo a equação de Penman-Monteith a referência padrão para esses ajustes, por apresentar excelente correlação com a evapotranspiração medida em lisímetros (ALLEN et al., 1998).

O método de Penman-Monteith requer dados de variáveis climáticas como a temperatura do ar, saldo de radiação, velocidade do vento e umidade do ar e, em muitos locais, essas variáveis não estão todas disponíveis (BACK, 2008). Esta falta de dados meteorológicos leva ao desenvolvimento de abordagens mais simples para estimar a ET_o que exigem apenas alguns parâmetros de entrada (CUNHA; MAGALHÃES; CASTRO, 2013).

Para a estimativa de ET_o pelo método de Penman-Monteith - FAO 56 utilizou-se a Equação 1 (ALLEN et al., 1998).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{(T+273)} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Em que: ET_o: evapotranspiração de referência, mm dia⁻¹; Δ: declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura kPa °C⁻¹; R_n: radiação líquida na superfície da cultura, MJ m⁻² dia⁻¹; G: fluxo total diário de calor no solo, MJ m⁻² dia⁻¹. Foi considerado o valor de G = 0, de acordo com Allen et al. (1998); T: temperatura média do ar, °C; U₂: velocidade média do vento a 2 m de altura, m s⁻¹; e_s: pressão de saturação de valor, kPa; e_a: pressão atual de vapor, kPa; γ : coeficiente psicrométrico, kPa °C⁻¹.

Com o propósito de padronizar o cálculo dos diferentes elementos climáticos, utilizou-se os algoritmos apresentados por Allen et al. (1998), tomando por base o fato da mesma ter sido testada, com resultados satisfatórios, sob várias condições climáticas, assumindo para alguns elementos valores fixos, a partir de sua variabilidade global.

3.3.1.1 Parâmetros e variáveis da equação de Penman-Monteith - FAO 56

a) 0,408 é o inverso do calor latente de evaporação a 20 °C (kg.MJ⁻¹);

b) Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor (kPa.°C⁻¹) obtido a partir da equação:

$$\Delta = \frac{4098.e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (2)$$

Em que: T é a temperatura média do ar (°C), dada pela média aritmética entre T_{máx} e T_{mín}; e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa).

A pressão de saturação de vapor foi calculada de acordo com o Boletim da FAO 56 (Allen et al., 1998), a partir da equação:

$$e_s = \left[\frac{e^\circ(T_{máx}) + e^\circ(T_{mín})}{2} \right] \quad (3)$$

Em que: e[°] (T_{máx}) é a pressão de saturação de vapor a temperatura máxima (kPa) e e[°] (T_{mín}) é a pressão de saturação de vapor a temperatura mínima (kPa) e são expressas pelas equações 4 e 5.

$$e^\circ(T_{máx}) = 0,6108 \cdot \exp \left[\frac{17,27 \cdot T_{máx}}{T_{máx} + 237,3} \right] \quad (4)$$

$$e^\circ(T_{mín}) = 0,6108 \cdot \exp \left[\frac{17,27 \cdot T_{mín}}{T_{mín} + 237,3} \right] \quad (5)$$

c) Saldo de radiação (R_n)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (6)$$

Em que: R_{ns} é o saldo de radiação de ondas curtas e R_{nl} o saldo de radiação de ondas longas.

O saldo de radiação de ondas curtas é dado pela equação 7.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (7)$$

Em que: α é o albedo ou coeficiente de reflexão, cujo valor recomendado para a cultura padrão é de 0,23, e R_s é a radiação solar global ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

O saldo de radiação de ondas longas é dado por:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\text{máx},k}^4 + T_{\text{mín},k}^4}{2} \right] \cdot (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \cdot \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (8)$$

Em que: σ é a constante de Stefan-Boltzman = $4,903 \times 10^{-9}$ ($\text{MJ}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); e_a é a pressão parcial de vapor (kPa); R_{so} é a radiação solar em dias de céu claro ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$).

d) Radiação solar em dias de céu claro (R_{so}), equação 9:

$$R_{so} = (e_s + b_s) R_a \quad (9)$$

Sendo e_s e b_s a fração da radiação extraterrestre em dias claros ($n = N$).

Quando não se dispõe dos coeficientes acima, toma-se o valor de $e_s + b_s = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \cdot z$, sendo z a altitude local.

A equação (9) em dias com nuvens toma o formato de:

$$R_s = (a_s + b_s \cdot n/N) R_a \quad (10)$$

Em que: R_a é a radiação solar no topo da atmosfera ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), dada por:

$$Ra = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} G_{sc} d_r [Ws \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(Ws)] \quad (11)$$

Em que: G_{sc} é a constante solar = $0,0820 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$; d_r é o quadrado da distância relativa (terra-sol) em radianos, cuja equação 12:

$$d_r = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (12)$$

Sendo: J o dia juliano; φ a latitude local em radiano; δ a declinação solar, em radiano, e Ws o ângulo horário ao pôr do sol (Ws):

$$\delta = 0,409 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \text{ (radianos)} \quad (13)$$

$$Ws = \arccos[-\text{tg}(\varphi) \cdot \text{tg}(\delta)] \text{ (radianos)} \quad (14)$$

e) Fluxo de calor no solo

$$G = C_s \left(\frac{T_i + T_{i-1}}{\Delta t} \right) \cdot \Delta z \quad (15)$$

Em que: G é o fluxo de calor do solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); C_s a capacidade calorífica do solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$); T_i a temperatura do ar no dia i ($^{\circ}\text{C}$); T_{i-1} a temperatura do ar no dia $i-1$ ($^{\circ}\text{C}$); Δt o intervalo de tempo (dia) e Δz a profundidade efetiva do solo (m).

O boletim FAO 56 (Allen et al., 1998) recomenda que para períodos diários, G pode ser desprezível.

f) Constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

$$\gamma = \frac{C_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} \quad (16)$$

Em que: γ é a constante psicrométrica, de acordo com Brunt (1952) citado por Smith (1991); λ é o calor latente de evaporação da água = 2,45 MJ.kg⁻¹ a 20°C; C_p é o calor específico a pressão constante = 1,013.10⁻³ (MJ.kg⁻¹.°C⁻¹); e P é a pressão atmosférica (kPa), conforme Bruman (1987) citado por Smith (1991) cuja equação é dada por:

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 \cdot z}{293} \right)^{5,26} \quad (17)$$

Sendo: z a altitude local (m); $\varepsilon = 0,622$ a relação entre peso molecular do vapor da água e do ar seco.

g) Temperatura média do ar medida a 2 m de altura ($T_{méd}$)

$$T_{méd} = \frac{(T_{máx} + T_{mín})}{2} \quad (18)$$

h) U_2 – velocidade média do vento a 2m (m.s⁻¹)

i) Déficit de pressão de vapor DPV em kPa, é expresso pela equação:

$$DPV = e_s - e_a \quad (19)$$

A pressão parcial de vapor (e_a), de acordo com o Boletim FAO 56 (Allen et al., 1998), deve ser calculado a partir da $UR_{máx}$ e $UR_{mín}$, caso os dados estejam disponíveis, conforme a equação seguinte:

$$e_a = \frac{\left[e^0(T_{mín}) \cdot \frac{UR_{máx}}{100} \right] + \left(e^0(T_{máx}) \cdot \frac{UR_{mín}}{100} \right)}{2} \quad (20)$$

Em que: $e^o(T_{\text{mín}})$ é a pressão de saturação de vapor para temperatura mínima (kPa) equação (5); $e^o(T_{\text{máx}})$ é a pressão de saturação de vapor para temperatura máxima (kPa) equação (4); $UR_{\text{máx}}$ é a umidade relativa máxima do ar (%); $UR_{\text{mín}}$ é a umidade relativa mínima do ar (%).

A relação $(1+0.34U^2)$ na equação (1) envolve as resistências da cobertura (r_c) e aerodinâmica (r_a), sendo $r_c = 70 \text{ s m}^{-1}$ e r_a calculada pela equação 21:

$$r_a = \frac{\left[\frac{(z_w - d)}{z_{om}} \right] \ln \left[\frac{(z_p - d)}{z_{ov}} \right]}{(0.41)^2 U_z} \quad (21)$$

Em que: r_a é a resistência aerodinâmica a transferência turbulenta de vapor e calor sensível a partir de superfícies da planta; z_w a altura de medição da velocidade do vento (anemômetro); z_p a altura de medição de temperatura e umidade (psicrômetro); z_{om} a altura da rugosidade da vegetação (cultura de referência, em m); z_{ov} a altura da rugosidade para transferência de vapor; d o deslocamento do plano zero na altura da vegetação (m); k_1 a constante de von Karman = $8,64 \times 10^4$ (quando U_z estiver em m s^{-1}) e U_z é a velocidade do vento a 2m.

2.3.2 Penman-Original

O método de Penman (1948) 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. Pereira et al., (2002) relatam que este método é baseado em princípios físicos corretos. Apesar de não ser operacionalmente perfeito e correto, ele é considerado, por muitos autores, como a melhor opção para estimar a ETo . Enquanto, que o método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998), considerado como método padrão pela FAO para a estimativa da ETo , porque é baseado em processos físicos e incorpora parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos, apresenta boa precisão, porém exige a determinação de grande número de dados meteorológicos e o seu cálculo é bastante trabalhoso (BERNARDO et al., 2006). Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Penman-Original foram obtidos pela Equação 22.

$$ET_o = \frac{S}{S + \gamma} 0,408 (R_N - G) + \frac{\gamma}{S + \gamma} 0,26 \left(1 + \frac{U_2}{160} \right) (e_s - e) \quad (22)$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); s = declividade da curva de pressão de saturação de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_N = saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G = fluxo de calor ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); U_2 = velocidade do vento a 2 m (m s^{-1}); e_s = pressão de saturação de vapor (kPa); e = pressão de vapor (kPa).

2.3.3 Makkink

O método de Makkink (1957) também é um método empírico, que relaciona a ET_o com a radiação solar ao nível da superfície, expressa em equivalente de evaporação. Este método leva em consideração a temperatura do bulbo úmido (T_u), mas na falta deste dado, pode haver a substituição pela temperatura média diária do ar (T_{med}), devendo considerar que para atmosfera não saturada, $T_{med} > T_u$, o que eleva o fator de ponderação utilizado na equação, fazendo com que a ET_o , no caso do uso de T_{med} em lugar de T_u , seja ligeiramente superestimada (PEREIRA et al., 1997). Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Makkink foram obtidos pela Equação 23.

$$ET_o = R_G \left(\frac{S}{S + \gamma} \right) + 0,12 \quad (23)$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_G = radiação global (mm dia^{-1}); S = declividade da curva de pressão de saturação de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

2.3.4 Turc

Em 1961, Turc estimou a ET_o , assim como o método de Makkink desenvolvido para o Oeste europeu, onde a umidade do ar é maior que 50% (KASHYAP & PANDA, 2001).

É um método simples, de uso geral, que utiliza apenas a temperatura máxima do ar e a radiação solar global. Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Turc foram obtidos pela Equação 24.

$$ET_o = \frac{0,013 t}{t + 15} (23,9 R_G + 50) \quad (24)$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_G = radiação global (mm dia^{-1}); t = temperatura média ($^{\circ}\text{C}$).

2.3.5 Jensen-Haise

Este método foi desenvolvido por Jensen e Haise (1963) para regiões áridas e semiáridas. Consiste em estimar a evapotranspiração de referência apenas com dados de temperatura do ar e radiação solar (PEREIRA et al., 1997). Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Jensen-Haise foram obtidos pela Equação 25.

$$ET_o = R_G (0,025 t + 0,08) \quad (25)$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_G = radiação global (mm dia^{-1}); t = temperatura média ($^{\circ}\text{C}$).

2.3.6 Garcia-Lopez

O método que foi desenvolvido por Garcia Benavides e Lopez Diaz (1970) e, baseia-se em dados de temperatura média e umidade relativa do ar (PEREIRA et al., 1997). Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Garcia-Lopez foram obtidos pela Equação 26.

$$ET_o = 1,21 \cdot 10^{\left(\frac{7,45 t}{243,7 + t}\right)} (1 - 0,01 f) + 0,21 t - 2,30 \quad (26)$$

Em que: ETo = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); t = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$);
 f = umidade relativa (%);

2.3.7 Priestley-Taylor

Uma aproximação empírica da equação de Penman combinada é feita por Priestley-Taylor para eliminar a necessidade de outros dados de entrada climatológicos (STAGNITTI et al., 1989). Analisando observações lisimétricas de evapotranspiração, em condições aparentemente não advectivas, Priestley-Taylor (1972) propuseram uma simplificação do método de Penman (1948), mantendo apenas o termo que contempla o balanço de radiação, corrigindo-o por um coeficiente de ajuste (α). Em suma, α considera a radiação líquida particionada entre fluxo de calor e evaporação (VISWANADHAM et al., 1991).

O método Priestley-Taylor (1972), embora simples, tem uma semelhança com a equação padrão Penman-Monteith FAO 56. A diferença está no termo aerodinâmico, que foi suprimido por um coeficiente de calibração (FERNANDES, 2006). Segundo McAneney; Itier (1996), apesar dessa aparente simplicidade, a equação de Priestley-Taylor apresenta suporte experimental substancial, especialmente em regiões úmidas, fato que pode revelar o modo com que as culturas interagem com as condições ambientais quando o solo não apresenta restrição hídrica durante o seu período de crescimento e desenvolvimento. Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Priestley-Taylor foram obtidos pela Equação 27.

$$ETo = 0,5143 \frac{S}{S + \gamma} (R_N - G) \quad (27)$$

Em que: ETo = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); S = declividade da curva de pressão de saturação de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); R_N = saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G = fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

2.3.8 Hargreaves-Original

O cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves (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 milímetros diário. Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Hargreaves-Original foram obtidos pela Equação 28.

$$ET_o = 0,408 \times 0,0023 (T_{med} + 17,8) * (T_{max} - T_{min})^{0,5} * R_a \quad (28)$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); T_{med} é a temperatura média do ar, T_{max} é a temperatura máxima do ar, T_{min} é a temperatura mínima do ar e R_a é a radiação solar extraterrestre.

2.3.9 Linacre

O método de Linacre foi testado originalmente para as condições climáticas da Austrália, o método é uma simplificação do método de Penman, onde variáveis como radiação líquida e déficit de saturação, foram substituídas por funções da temperatura do ar. Além das simplificações adotadas há uma expressão empírica usada para calcular a diferença entre a temperatura média e a temperatura de ponto de orvalho ($T - T_o$), que foi desenvolvida a partir de dados obtidos em diferentes localidades da África e América do Sul (PEREIRA et al., 1997). Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Linacre foram obtidos pela Equação 29.

$$ET_o = \frac{\frac{500 (t + 0,006z) + 15 (t - t_d)}{100 - \phi}}{80 - t} \quad (29)$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); t = temperatura média ($^{\circ}\text{C}$); z = altitude do local (m); ϕ a latitude local ($^{\circ}$); t_d = temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$).

2.3.10 Hargreaves-Samani

Usando dados obtidos nos lisímetros de Davis, no estado da Califórnia (clima semiárido), com gramado, Hargreaves-Samani (1985) propuseram um novo método para estimar a evapotranspiração (PEREIRA et al., 1997), considerado uma alternativa para

situações em que não se tem dados de radiação solar global, umidade relativa do ar e velocidade do vento (BEZERRA et al., 2014). Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade deste novo método, para diferentes partes do mundo, o método foi comparado com outros métodos em Haiti, Bangladesh, Austrália e Estados Unidos (HARGREAVES e SAMANI, 1985).

O cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves-Samani é mais empírico que o método de Penman-Monteith (EMBRAPA, 2010).

Esta equação de Hargreaves-Samani tem produzido resultados satisfatórios ao ar livre em diversas partes de mundo, apesar da sua aparente simplicidade (SHAHIDIAN et al., 2011). Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Hargreaves-Samani foram obtidos pela Equação 30.

$$ET_o = 0,0023 R_0 (t_{\max} - t_{\min})^{0,5} (t + 17,8) \quad (30)$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_0 = radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); $t_{\max}$ = temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); $t_{\min}$ = temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); t = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$).

2.3.11 Radiação-Temperatura

O cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Radiação-Temperatura, é mais simples do que o método de Penman-Monteith. O método que foi desenvolvido por OUDIN et al., (2005), baseia-se em dados de radiação global, temperatura máxima, calor latente de vaporização. Os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Radiação-Temperatura foram obtidos pela Equação 31.

$$ET_o = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{RG t_{\max}}{56} \right) \quad (31)$$

Em que: E_{To} = evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_G = radiação global (mm dia^{-1});
 λ = calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}); $t_{\text{máx}}$ = temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área experimental e dados meteorológicos

O trabalho foi desenvolvido a partir de dados meteorológicos obtidos por meio da estação meteorológica Jerônimo Rosado pertencente à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), cujas coordenadas geográficas são: 5° 11' 48'' S, longitude 37° 20' 44'' W e altitude de 40,5 m, em Mossoró no Estado do Rio Grande do Norte.

Figura 3. Estação meteorológica Jerônimo Rosado, UFERSA, Mossoró-RN.



FONTE: SOUSA (2016)

De acordo com a classificação de Koppen, o clima predominante na região é do tipo BSw^h, ou seja, semiárido muito quente e com estação chuvosa no verão atrasando-se para o outono, apresentando temperatura média de 27,4°C, com precipitação pluviométrica anual muito irregular e com umidade relativa média do ar de 68,9% (CARMO FILHO & OLIVEIRA, 1995).

Os dados diários utilizados na presente pesquisa foram: temperatura média, máxima e mínima (°C); umidade relativa média, máxima e mínima (%); velocidade do vento (m s^{-1}) e radiação global (kJ m^{-2}) referentes ao período de 01 de janeiro de 2011 a 31 de dezembro de 2012, sendo observada a ocorrência de La Niña e El Niño nos anos de 2011 e 2012 respectivamente. Onde 2011 foi considerado um ano chuvoso, com precipitação

pluviométrica anual de 974,42 mm, enquanto o ano de 2012 foi considerado seco, pois apresentou precipitação pluviométrica anual de 199,41 mm.

Os cálculos da ETo para todos os métodos em estudados foram realizados por intermédio de planilha eletrônica. Com o propósito de tornar os dados das variáveis agrometeorológicas mais homogêneos, foi feita uma verificação de consistência e posteriormente eliminação daquelas informações consideradas discrepantes visando obtenção de agrupamentos de dados mais representativos.

3.2 Equações de estimativa da ETo

Foi realizada análise, visando identificar os métodos que melhor se ajustam a de Penman-Monteith-FAO 56, e que sejam mais simples de se aplicar. Para essa análise foram selecionados 10 métodos: Penman-Original (PENMAN, 1948); Makkink (MAKKINK, 1957); Turc (TURC, 1961); Jensen-Haise (JENSEN e HAISE, 1963); Garcia-Lopez (GARCIA e LOPEZ, 1970); Priestley-Taylor (PRIESTLEY e TAYLOR, 1972); Hargreaves-Original (HARGREAVES, 1974); Linacre (LINACRE, 1977); Hargreaves-Samani (HARGREAVES e SAMANI, 1985); Radiação-Temperatura (OUDIN et al., 2005).

3.3 Comparação entre os métodos

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

A metodologia adotada para comparação dos resultados foi proposta por Allen et al. (1989), e se fundamenta no erro padrão da estimativa (EPE), calculada pela Equação 32. O melhor método para estimativa da ETo é aquele que apresentar o menor EPE.

$$EPE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (32)$$

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

A aproximação dos valores de ETo estimados por determinado método estudado, em relação aos valores obtidos com uso do método padrão, foi obtida por um índice designado concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985), onde seus valores variam desde zero, onde não existe concordância, a 1, para a concordância perfeita. O índice de concordância (d) foi calculado aplicando-se a Equação 33. Para validação do modelo, obteve-se também o coeficiente de correlação de Pearson (r) pela Equação 34 e o coeficiente de confiança ou desempenho (c) pela Equação 35.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|Y_i - \bar{x}|) + (|X_i - \bar{x}|)]^2} \quad (33)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (|X_i - \bar{x}|) (|Y_i - \bar{y}|)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{y})^2}} \quad (34)$$

$$C = r \cdot d \quad (35)$$

Em que: d = índice de concordância ou ajuste de Willmott; Y_i = evapotranspiração de referência estimada pelo método-padrão (mm.d^{-1}); X_i = evapotranspiração de referência obtida pelo método testado (mm.d^{-1}); $\bar{x}$ = média dos valores de evapotranspiração de referência obtidos pelo método testado (mm.d^{-1}); n = número de observações; r = coeficiente de correlação de Pearson; $\bar{y}$ = média dos valores de evapotranspiração de referência obtidos pelo método-padrão (mm.d^{-1}) e; c = coeficiente de confiança ou desempenho.

As variáveis foram analisadas através da estatística descritiva. As análises foram realizadas pelo programa Microsoft Excel® e para cada regressão linear simples da evapotranspiração de referência, foram verificadas as seguintes hipóteses H_0 : Não há regressão linear simples ($\beta = 0$) e H_1 : Há regressão linear simples ($\beta \neq 0$) 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.

$$t_{(\text{teste})} = \frac{\hat{b} - \beta}{s(\hat{b})} \quad (35)$$

Em que: $\hat{b}$ (coeficiente de regressão ou angular) é o estimador do parâmetro β da equação de regressão linear e $S_{(\hat{b})}$ é o desvio padrão de $\hat{b}$.

Na Tabela 1 está representada a classificação de Camargo & Sentelhas (1997) para análise do índice c.

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

Índice c	Desempenho
> 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 & SENTELHAS (1997)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2, pode-se visualizar os valores dos coeficientes das regressões para os períodos estudados. Nota-se que há regressão linear simples, conforme o teste t student ao nível de 2% e 5% de probabilidade de significância, para os parâmetros da equação de regressão.

Tabela 2. Análise de variância para a regressão linear, no período chuvoso e seco, em Mossoró, RN.

Métodos analisados	Período analisado	Coefficiente Angular (b)	Coefficiente Linear (a)
		Valor-P	
PM-FAO 56 e Penman-Original	Chuvoso	1,279	0,607**
	Seco	1,308	0,555**
PM-FAO 56 e Makkink	Chuvoso	1,755	0,880**
	Seco	1,129	0,937**
PM-FAO 56 e Turc	Chuvoso	1,432	0,560**
	Seco	0,967	0,611**
PM-FAO 56 e Jensen-Haise	Chuvoso	1,248	0,942**
	Seco	0,712	0,992**
PM-FAO 56 e Garcia-Lopez	Chuvoso	2,116	0,784**
	Seco	3,550	0,565**
PM-FAO 56 e Priestley-Taylor	Chuvoso	1,709	0,528**
	Seco	1,329	0,525**
PM-FAO 56 e Hargreaves-Original	Chuvoso	1,132	0,727**
	Seco	0,657	0,774**
PM-FAO 56 e Linacre	Chuvoso	1,180	0,610**
	Seco	2,265	0,472**
PM-FAO 56 e Hargreaves-Samani	Chuvoso	2,508	0,592**
	Seco	2,634	0,489**
PM-FAO 56 e Radiação-Temperatura	Chuvoso	0,739	0,813**
	Seco	0,286	0,841*

** significativo a $P \leq 0,01$; * significativo a $P \leq 0,05$.

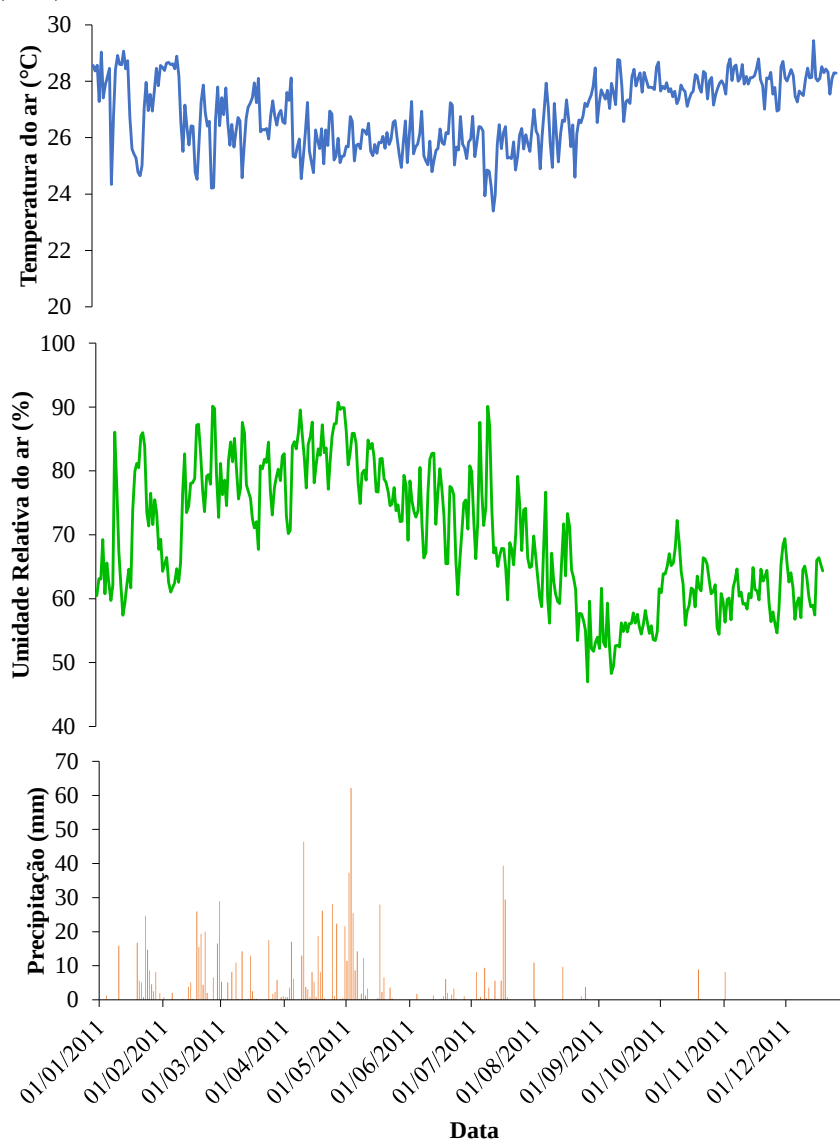
Fonte: Autoria própria (2017)

4.1 Período chuvoso

Na Figura 2 encontra-se a variação diária da temperatura média (°C), umidade relativa média (%) e da precipitação (mm), obtidos durante o ano de 2011, em Mossoró, RN. Os valores médios de temperatura do ar variaram de 23,40 a 29,44 °C, sendo o valor mínimo

encontrado no mês de julho e o valor máximo no mês de dezembro. Os valores médios de umidade relativa variaram entre 47% no mês de setembro a 90,7% no mês de maio. Em 2011 a precipitação pluviométrica foi de 974,42 mm.

Figura 2. Variação diária da temperatura média (°C), umidade relativa média (%) e da precipitação (mm) durante o de 2011 em Mossoró, RN.

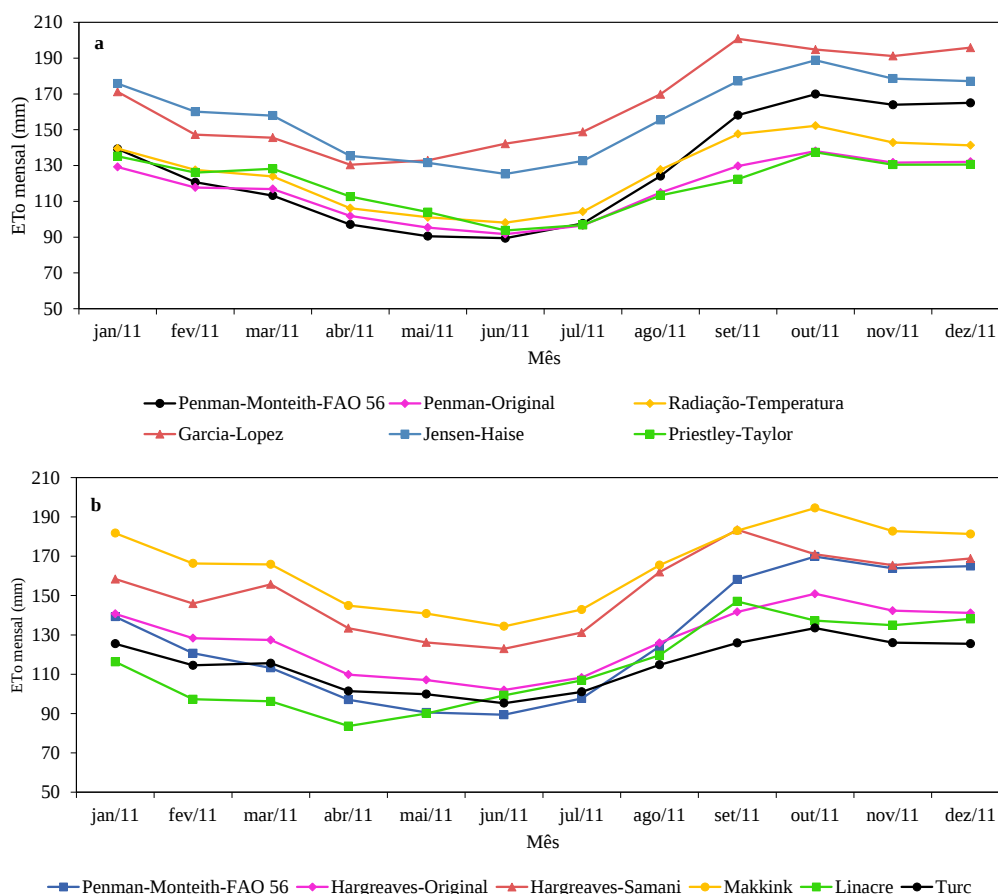


Fonte: Autoria própria (2017)

A Figura 3a e 3b ilustra a distribuição mensal da ETo pelos distintos métodos de estimada e comparada com o modelo padrão de Penman-Monteith-FAO 56 para o período chuvoso. A ETo, no transcorrer do ano apresentou diferentes amplitudes de variação. Nota-se que, os métodos testados mostraram alta similaridade de distribuição temporal com o método Penman-Monteith – FAO 56. Para todos os modelos, as estimativas de ETo foram menores no

período de maior intensidade pluviométrica e mais frio do ano (Primeiro semestre), enquanto que os valores mais elevados foram registrados entre agosto e dezembro, o que remete a época de maiores temperaturas e de menor umidade na região em estudo.

Figura 3. Distribuição mensal da ETo estimada através de distintos métodos indiretos, durante um ano chuvoso em Mossoró-RN.



Fonte: Autoria própria (2017)

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos índices estatísticos, entre os métodos em comparação com o método padrão, referente ano chuvoso, para a localidade de Mossoró-RN. Os resultados obtidos mostram que os métodos de Radiação-Temperatura, Hargreaves-Original e Penman-Original, apresentaram os menores EPE 0,543; 0,591 e 0,659 mm.dia⁻¹, respectivamente. Já os métodos de Makkink, Garcia-Lopez e Jensen-Haise, apresentaram os maiores EPE 1,403 mm.dia⁻¹; 1,295 mm.dia⁻¹ e 1,176 mm.dia⁻¹, respectivamente. O coeficiente de correlação de Pearson “r” indica o grau de correlação entre as modelos de estimativa de ETo testados, em relação ao método de Penman-Monteith-FAO 56, nas condições climáticas locais. De acordo com o coeficiente de correlação, todos os

métodos apresentaram valores em torno de 0,8 a 0,95, indicando que os métodos apresentam correlação muito forte positiva quando comparados ao método da FAO.

Dentre os modelos avaliados, os métodos de Radiação-Temperatura, Penman-Original e Hargreaves-Original apresentaram os melhores ajustes, ambos classificados como “Muito Bom” pelo coeficiente de desempenho ou confiança “c”, obtendo valores de 0,840; 0,830 e 0,804, respectivamente. O que evidenciou que estes métodos podem ser utilizados na forma proposta para estimativa da ETo nas condições de Mossoró-RN. Enquanto o método de Hargreaves-Samani apresentou o pior desempenho, com índice $c = 0,301$, sendo classificado como péssimo.

Tabela 3. Indicadores estatísticos da comparação entre os diferentes métodos de estimativa da ETo com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56, em escala diária, para o período chuvoso em Mossoró-RN.

Métodos	EPE (mm.dia ⁻¹)	R ²	r	d	c	Desempenho
Penman-Original	0,659	0,871	0,933	0,890	0,830	Muito Bom
Makkink	1,403	0,746	0,864	0,741	0,641	Mediano
Turc	0,778	0,740	0,860	0,756	0,650	Mediano
Jensen-Haise	1,176	0,778	0,882	0,808	0,713	Bom
Garcia-Lopez	1,295	0,863	0,929	0,743	0,691	Bom
Priestley-Taylor	0,772	0,663	0,815	0,839	0,683	Bom
Hargreaves-Original	0,591	0,761	0,872	0,922	0,804	Muito Bom
Linacre	0,786	0,750	0,866	0,773	0,670	Bom
Hargreaves-Samani	1,052	0,702	0,838	0,359	0,301	Péssimo
Radiação-Temperatura	0,543	0,797	0,893	0,941	0,840	Muito Bom

Erro padrão de estimativa (EPE), coeficiente de determinação (R^2), correlação de Pearson (r), concordância de Willmott (d) e coeficiente de confiança e desempenho (c).

Fonte: Autoria própria (2017)

Oliveira et al. (2008), analisando diferentes métodos tendo como referência medidas lisimétricas, também verificaram um bom ajuste do método Penman-Monteith 1948, na bacia experimental do Riacho Gameleira, PE.

Já Araújo et al. (2007), avaliando as estimativas de ETo para o município de Uberaba - MG, verificaram que o método de Hargreaves-Samani apresentou desempenho Sofrível ($c=0,57$). Tal fato justifica-se pelo método de Hargreaves-Samani ter sido obtido para a condição semiárida. Assim, o seu desempenho apresenta uma redução na precisão da estimativa da evapotranspiração nos meses chuvosos (ALENCAR et al., 2011).

Tagliaferre et al. (2010) avaliaram o desempenho dos métodos empíricos em relação ao método padrão Penman-Monteith FAO-56 para as condições climáticas do município de Eunápolis-BA e verificaram que, o método de Hargreaves-Samani foi o que obteve o pior desempenho.

A Figura 4 apresenta as regressões lineares entre os valores diários de evapotranspiração de referência, estimados pelos métodos analisados nesta pesquisa, em função do método padrão Penman-Monteith-FAO 56 para o período chuvoso. O método de Penman-Original apresentou o maior coeficiente de determinação ($r^2 = 0,871$).

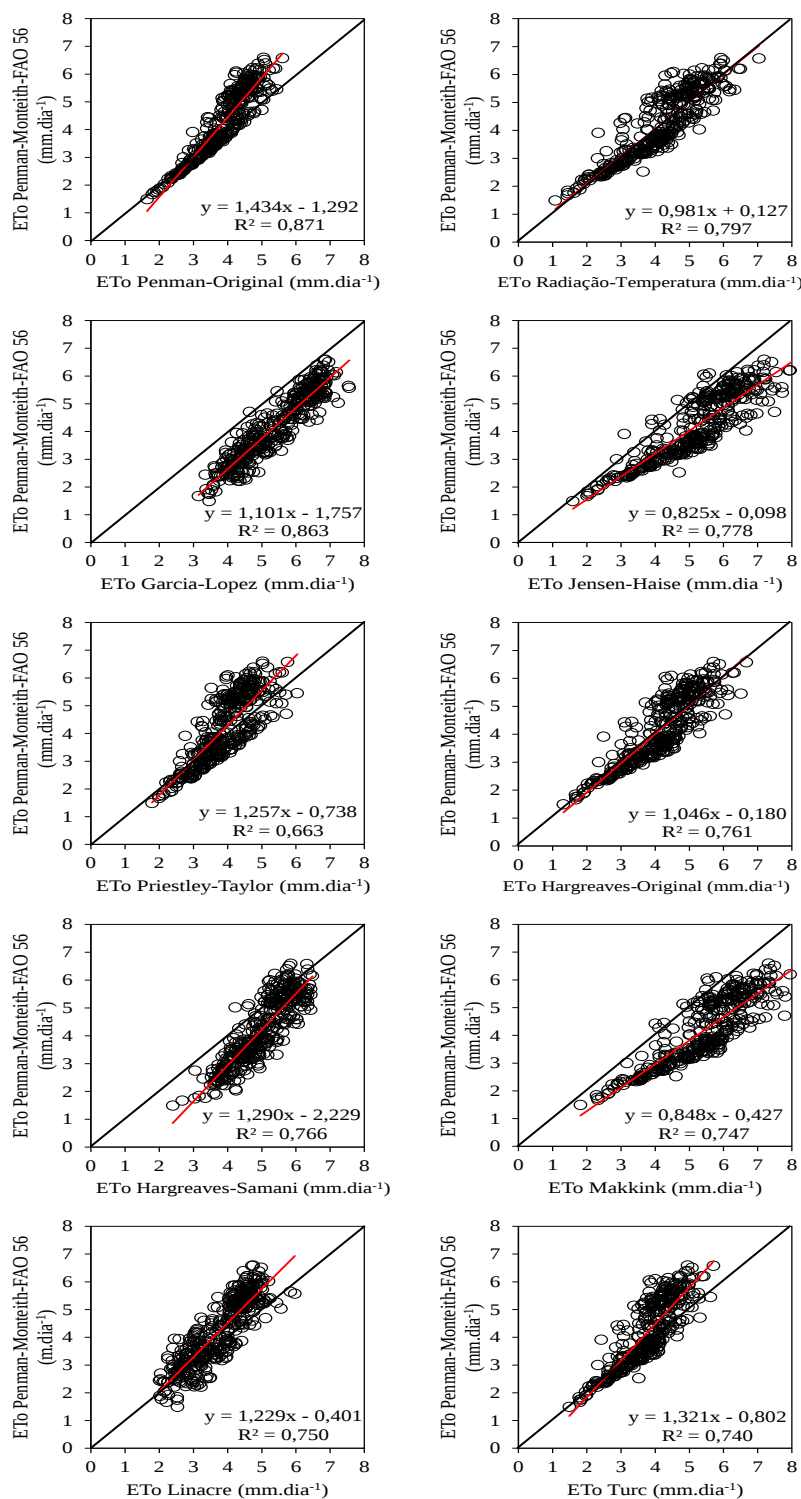
Os métodos de Garcia-Lopez, Hargreaves-Samani, Makkink e Jensen-Haise subestimaram os valores de ETo calculados pelo método padrão. Os demais métodos apresentaram, ao longo do ano, estimativas que subestimaram e superestimaram os valores de ETo obtidos pelo método-padrão.

Valores subestimados usando o modelo de Makkink foram encontrados por Alcântara, Silva e Caldas (2013) para a cidade a cidade de Juazeiro-BA.

Medeiros, 2002, encontrou os valores de ETo estimado por Hargreaves-Samani subestimando aqueles calculados pelo método, para a região de Paraipaba-CE.

O método de Penman-Original foi o que apresentou valores mais próximos aos estimados pelo método de Penman-Monteith-FAO 56, e apresentou um bom ajuste ao método padrão, o que demonstra a viabilidade da utilização da equação na determinação da ETo para a localidade de Mossoró, RN durante o período chuvoso.

Figura 4. Regressão linear entre os valores diários da evapotranspiração de referência (ET_o) estimada por diferentes métodos e comparados com o método-padrão Penman-Monteith-FAO 56, durante o ano chuvoso de 2011, em Mossoró, RN.

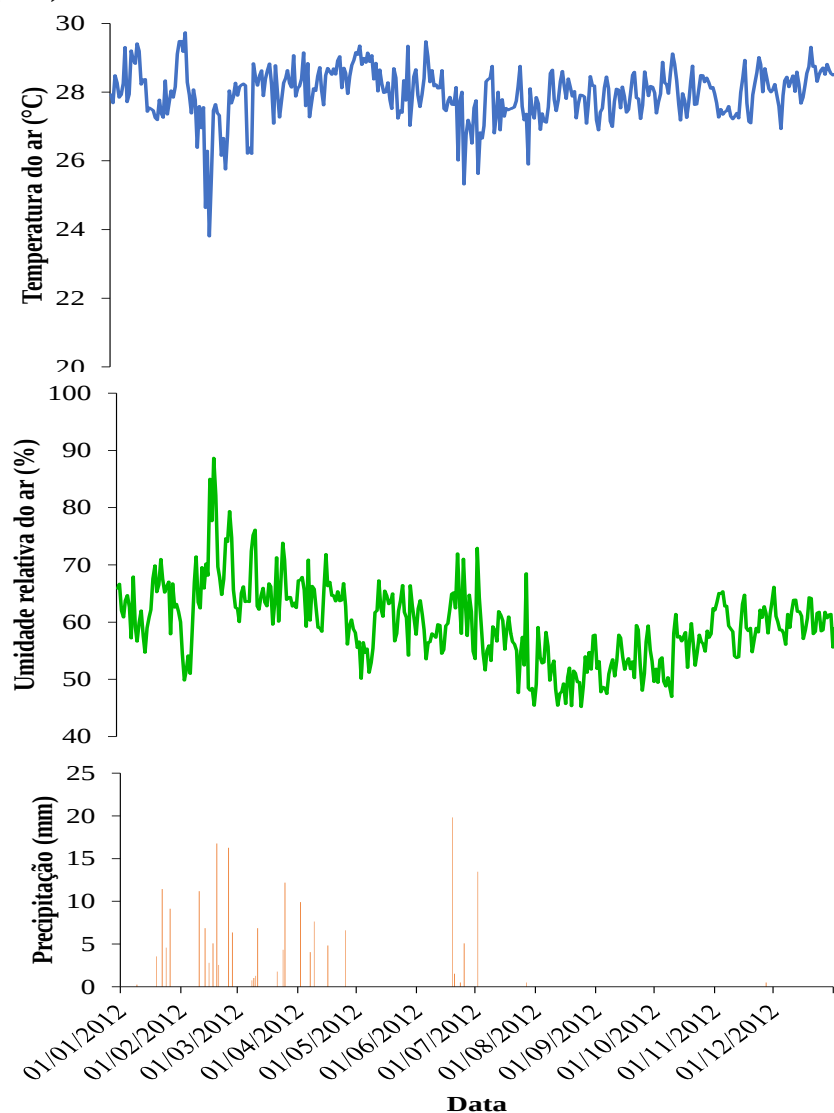


Fonte: Autoria própria (2017)

4.2 Período seco

Na Figura 5 encontra-se a variação diária da temperatura média (°C), umidade relativa média (%) e da Precipitação (mm), obtidos durante o ano de 2012, em Mossoró, RN. Os valores médios de temperatura do ar variaram de 23,80 a 29,74 °C, sendo o valor mínimo encontrado no mês de julho e o valor máximo no mês de fevereiro. Os valores médios de umidade relativa variaram entre 45,2% no mês de agosto a 88,7% no mês de fevereiro. No ano de 2011 a precipitação pluviométrica anual foi de 199,41 mm.

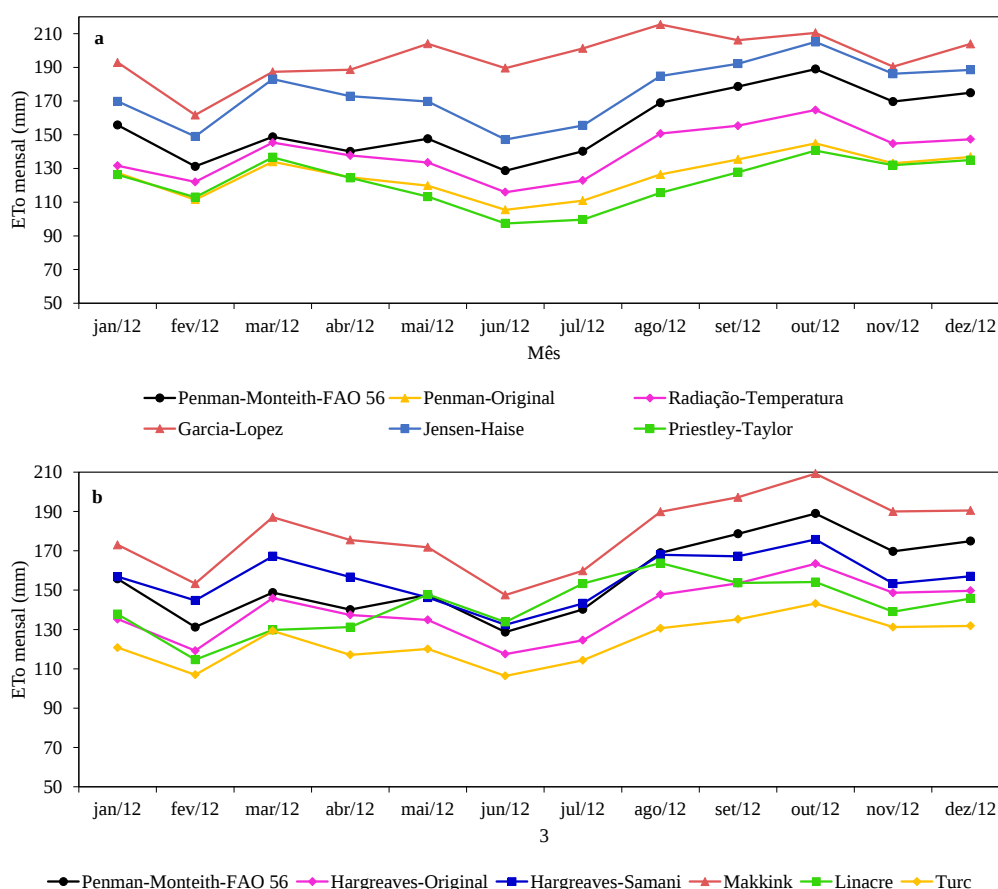
Figura 5. Variação diária da temperatura média (°C), umidade relativa média (%) e da Precipitação (mm) durante o ano de 2012 em Mossoró, RN.



Fonte: Autoria própria (2017)

A distribuição mensal dos distintos modelos de ETo comparados ao modelo padrão Penman-Monteith-FAO 56 para o período seco encontra-se ilustrado na Figura 6a e 6b. A ETo, no transcorrer do ano seco também apresentou similaridade na tendência das curvas para todos os modelos, as estimativas de ETo mostraram-se mais constantes quando comparadas ao ano chuvoso, em função da pequena variabilidade anual dos parâmetros climáticos de entrada. Verificou-se também um pequeno declínio nos valores apenas nos meses mais frios do ano de maio a julho.

Figura 6. Distribuição mensal da ETo estimada através de distintos métodos indiretos durante um ano seco, em Mossoró, RN.



Fonte: Autoria própria (2017)

Os resultados dos indicadores estatísticos de análise de desempenho dos métodos de estimativa da ETo para o período seco, no município de Mossoró-RN, estão apresentados na Tabela 4. De acordo com os resultados observados, os métodos de Hargreaves-Samani, Radiação-Temperatura e Hargreaves-Original apresentaram os menores EPE 0,665, 0,782 e

0,792, respectivamente. Já os métodos de Garcia-Lopez, apresentaram os maiores EPE 1,456 mm.dia⁻¹, 1,304 mm.dia⁻¹ e 1,211 mm.dia⁻¹, respectivamente.

De acordo com o coeficiente de correlação de Pearson “r” os métodos estudados apresentaram valores em torno de 0,60 a 0,9, indicando que os métodos apresentaram uma correlação de moderada a muito forte positiva ao método da FAO.

Dentre os métodos avaliados, os que apresentaram os melhores ajustes foram: Radiação-Temperatura, Jensen-Haise e Hargreaves-Original sendo classificados como “Bom” pelo coeficiente de confiança “c”, obtendo valores: 0,690; 0,686 e 0,678, respectivamente. Além disso, apresentaram altos valores dos coeficientes de determinação “R²” e de correlação de Pearson “r” acima de 0,80, indicando correlação muito forte positiva com o método padrão. Enquanto método de Priestley-Taylor foi classificado como “Péssimo”. É importante ressaltar que neste ano seco, nenhum modelo apresentou índice de desempenho “Muito Bom”.

Tabela 4. Indicadores estatísticos da comparação entre os diferentes métodos de estimativa da ETo com o método padrão de Penman-Monteith-FAO 56, em escala diária, para o período seco.

Métodos	EPE (mm.dia ⁻¹)	R ²	r	d	c	Desempenho
Penman-Original	1,075	0,768	0,876	0,611	0,535	Sofrível
Makkink	1,059	0,721	0,849	0,758	0,644	Mediano
Turc	1,211	0,723	0,850	0,577	0,491	Mau
Jensen-Haise	0,938	0,743	0,862	0,796	0,686	Bom
Garcia-Lopez	1,456	0,582	0,763	0,538	0,410	Mau
Priestley-Taylor	1,304	0,538	0,734	0,534	0,392	Péssimo
Hargreaves-Original	0,792	0,732	0,855	0,792	0,678	Bom
Linacre	0,818	0,458	0,676	0,705	0,477	Mau
Hargreaves-Samani	0,665	0,536	0,732	0,775	0,567	Sofrível
Radiação-Temperatura	0,782	0,726	0,852	0,810	0,690	Bom

Erro padrão de estimativa (EPE), coeficiente de determinação (R²), correlação de Pearson (r), concordância de Willmott (d) e coeficiente de confiança e desempenho (c).

Fonte: Autoria própria (2017)

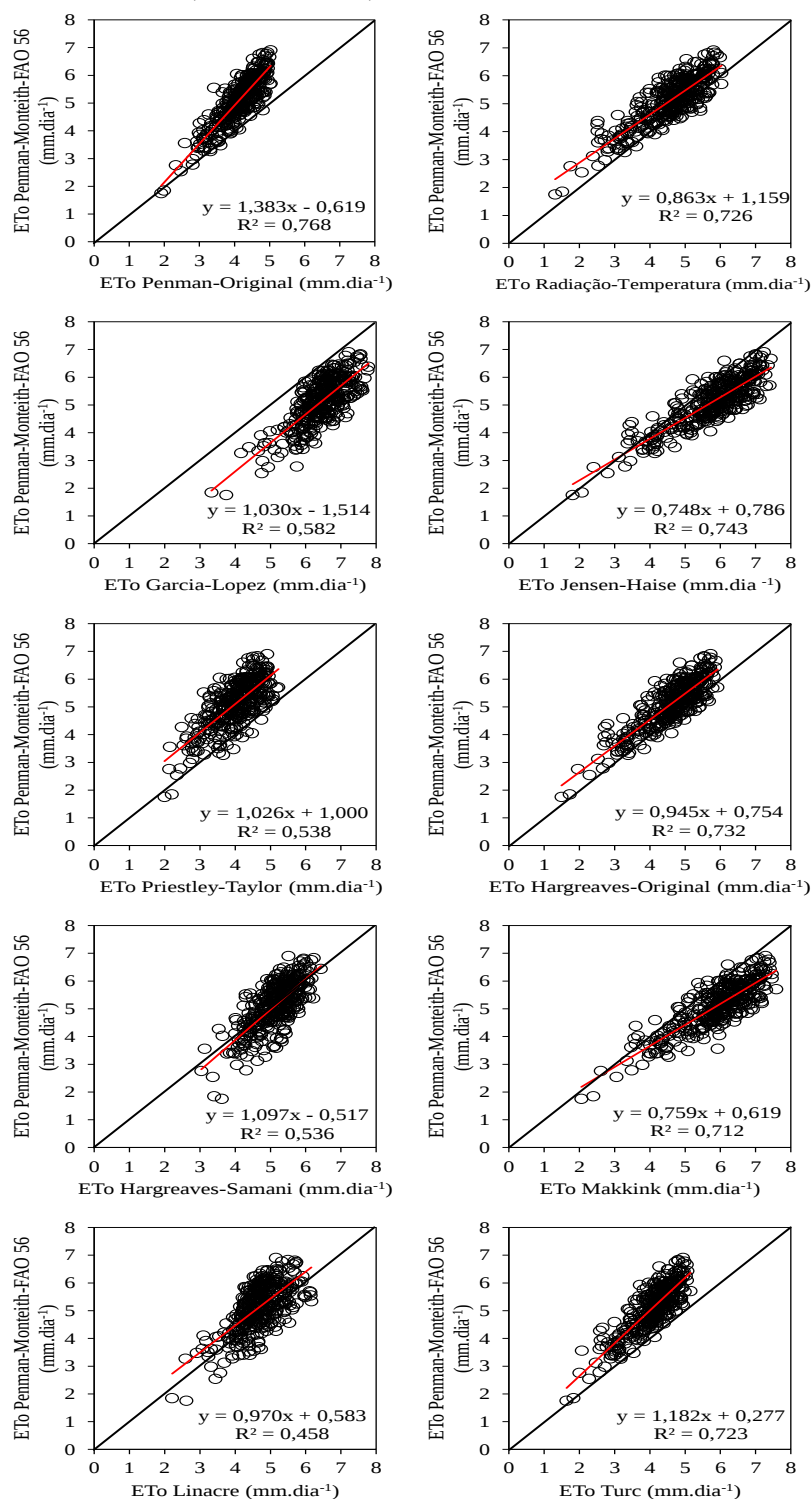
A equação de Jensen-Haise apresentou boa adaptabilidade para o período seco onde obteve o melhor resultado, o bom desempenho do método é explicado em virtude de ter sido desenvolvido em condições semelhantes ao local de estudo. Gonçalves et al. (2009) em estudos para o município de Sobral-CE, encontraram, também, desempenho classificado como bom para o método de Jensen-Haise, com índices de confiança desempenho “c” de 0,69, coeficiente de correlação “r” de 0,76 e estimativa de erro-padrão “EPE” de 0,97 mm dia⁻¹.

Na região da Serra da Mantiqueira-MG, Pereira et al. (2009) verificaram o mesmo comportamento “péssimo” para o método de Priestley-Taylor, onde apresentou redução elevada nos indicadores estatísticos no período seco, em relação aos obtidos para o período chuvoso. Segundo os autores, a variabilidade observada no desempenho da equação de Priestley-Taylor para o período chuvoso e seco, pode ser explicada pelo efeito da sazonalidade das chuvas no local.

Observam-se na figura 7 as regressões lineares entre valores diários de evapotranspiração de referência estimados pelos métodos, em função do método de Penman-Monteith-FAO 56 para o período seco. O método de Jensen-Haise obteve uma correlação forte com o método de Penman-Monteith-FAO 56, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,743. Lucena et al. (2016) também encontraram bom desempenho para o método de Jensen-Haise no período seco para o município Bom Jesus, PI.

Em ambos os períodos pode-se observar que o método de Hargreaves-Samani apresentou o pior desempenho, dessa forma, não sendo recomendado para cálculo da estimativa da ETo para a localidade estudada. Os métodos de Garcia-Lopez e Linacre apresentaram desempenho considerado “Bom” para o período chuvoso e “Mau” para o período seco. Já o método de Makkink apresentou desempenho mediano para ambos os períodos.

Figura 7. Regressão linear entre os valores diários da evapotranspiração de referência (ET_o) estimada por diferentes métodos e comparados com o método-padrão Penman-Monteith-FAO 56, durante o ano seco de 2012, em Mossoró, RN.



Fonte: Autoria própria (2017)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Todos os métodos avaliados apresentaram correlação razoável com o método padrão para a região de Mossoró-RN, com destaque para, os métodos de Penman-Original, Radiação-Temperatura e Hargreaves-Original para o período chuvoso e os métodos de Jensen-Haise, Radiação-Temperatura e Hargreaves-Original os quais obtiveram desempenhos satisfatórios para o período seco.

O método de Hargreaves-Samani não demonstrou viabilidade na utilização de sua equação na estimativa da evapotranspiração de referência nos dois anos (chuvoso e seco) em Mossoró-RN, pois, destacou-se como o pior método em ambos os períodos estudados, não sendo recomendado para o manejo da irrigação no município.

Recomenda-se a realização de estudos mais aprofundados destes métodos e com período avaliado mais extenso.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, Clênia Rodrigues; SILVA, Glauciene Justino Ferreira da; CALDAS, Rosimary de Almeida. COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA JUAZEIRO-BA. **Revista Okara: Geografia em Debate**, João Pessoa, Pb, v. 8, n. 1, p.156-178, 2013.
- ALENCAR, L. P; et al. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v.19, n. 5, p. 437-449, 2011a.
- ALENCAR, L. P; et al. 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, 2011b.
- ALLEN, R.G; et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO irrigation and drainage paper, 56).
- ALLEN, R.G; et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v.98,p.899-920, 2011. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.12.015.
- ALLEN, R.G; et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.4, p.650-662, 1989.
- ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) para Boa Vista-RR. **Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.
- BACK, A.J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de referência em Urussanga, SC. **Irriga**, Botucatu, v.13, n. 4, p. 449-466, 2008.
- BANCO DO NORDESTE. CADERNO SETORIAL ETENE: **Comportamento recente da fruticultura nordestina: área, valor da produção e comercialização**. 2 ed. Aaa: Aaa, 2016. 9 p.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação**. 8ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. 625p.
- BERNARDO, S.; SOUSA, E. F.; CARVALHO, J. A. **Estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀), para as “áreas de baixada e de tabuleiros” da região Norte Fluminense**. Campos dos Goytacazes: UENF, 1996. 14 p. Boletim Técnico.
- BEZERRA, J. M. et al. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para Mossoró (Rn, Brasil). **Revista Caatinga**, v. 27, n. 3, p. 211-220, 2014.
- Brunt, D. **Physical and dynamical meteorology**. Cambridge: University Press. 1952, 428p.

CAMARGO, A. P. Contribuição para a Determinação da Evapotranspiração Potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, p. 164–213, 1962.

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

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAPORUSSO, N. B.; ROLIM, G. de S. Reference evapotranspiration models using different time scales in the Jaboticabal region of São Paulo, Brazil. **Acta Scientiarum. Agronomy** (Impresso), v. 37, p. 1-9, 2015.

CARMO FILHO F.; OLIVEIRA O. F. 1995. **Mossoró: um município do semi-árido nordestino, caracterização climática e aspecto florístico**. Mossoró: ESAM, (Coleção Mossoroense, Série B) 62p.

CARVALHO, D. F. de; et al. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 1, p.1-11, jan. 2015.

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

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos Ciência Tecnologia e INOVAÇÃO. **Arranjos Produtivos Locais do Rio Grande do Norte**. 2004. Disponível em: <<http://www.cgEE.org.br/atividades/redirect.php?idProduto=1731>>. Acesso em: 12 out. 2017.

COSTA, Monalisa Soares; MANTOVANI, Everardo Chartuni; SEDIYAMA, Gilberto Chohaku. Comportamento dos diferentes métodos de determinação da evapotranspiração de referência nas cinco regiões brasileiras. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 5, p.310-319, set. 2015.

CUENCA, R. H.; NICHOLSON, M. T. Application of Penman equation wind function. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE, New York, v. 108, n. 1, p. 13- 23, 1982.

CUNHA, Fernando França da; MAGALHÃES, Fernando Fagner; CASTRO, Marco Aurélio de. Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul - MS. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 21, n. 2, p.159-172, abr. 2013.

DOORENBOS, J. PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 2 ed. Rome: FAO, 1977. 179p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).

DROOGERS, P.; ALLEN, R.G. Estimating referencem evapotranspiration under inaccurate data conditions. **Irrigation and Drainage System**, v.16, p.33-45, 2002. DOI: 10.1023/A:1015508322413.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos / Diego Simões Fernandes ... [et al.]. - Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão**, 2010. 44 p.

FERNANDES, L. C. **Avaliação de diversas equações empíricas de, evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão-RJ**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

FRIZZONE, J.A. Otimização do uso da água na agricultura irrigada: perspectivas e desafios. **Eng. Rural**, Piracicaba, v. 15, p. 37-56, 2004.

GARCIA, B.J.; LOPEZ, D. Formula para el caçulo de la evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15° N - 15° S). **Agronomia Tropical**, Maracay, v.20, n.5, p.335-345, 1970.

GONCALVES, F.M. et al. Comparação de métodos da estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Sobral, CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.3, n.2, p.71-77, 2009.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. **Applied Engineering in Agriculture**. v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

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.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.

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; et al. **Evapotranspiration and irrigation water requirements** New York: American Society os Civil Engineers, 1990. 329p. (ASCE. Manual and reports on Engineering Practices,70).

KASHYAP, P. S.; PANDA, R. K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. **Agricultural Water Management**, Amsterdan, v. 50, n. 1, p. 9-25, Aug. 2001.

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.

LUCENA, F. A. P. de; et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no município de bom Jesus, PI. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 3, p.663-675, maio 2016.

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.

McANENEY, K.J.; ITIER, B. Operational limits to the Priestley-Taylor formula. **Irrigation Science**, Berlin, v.17, n.1, p.37-43, 1996.

MCMAHON, T.A; et al. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis, **Hydrol. Earth Sys. Sci.**, 17, 1331-1363, 2013.

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. 103p. **Tese** (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MENDONÇA, J.C. et al. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p. 275-279, 2003.

MOURA, Ada Ravana Costa et al. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco - Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Pernambuco, v. 28, n. 2, p.181-191, set. 2012.

OLIC, N. B. Brasil: exportações frutificando. **Revista Pangea Quinzenário de Política, Economia e Cultura**. Disponível em: <<http://www.clubemundo.com.br/revistapangea/show-news.asp?>>. Acesso em: 1 out. 2005.

OLIVEIRA, L. M. M.; et al. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando lisímetros e métodos indiretos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v. 3, n. 1, p. 58-67, 2008.

ORTEGA-FARIAS, S.; IRMAK, S.; CUENGA, R.H. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling. **Irrigation Science**, Sidney, v. 28, n.1, p. 1-13, 2009.

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

PAIVA, C. M. de S.; PINHEIRO, A. da S. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo da irrigação. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 42–51, 2016.

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.

PEREIRA, A. R., ANGELOCCI, L. R., SENTELHAS, P. C.: **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478p.

PEREIRA, A. R.; VRISMAN, A. L.; GALVANI, E. Estimation of daily global solarradiation as a function of the solar energy potential at soil surface. **Revista Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 59, n. 2, p. 211-216, 2002.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. 1.ed. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREIRA, D.R.; et al. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.39, n.9, p. 2488-2493, 2009.

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.

RAZIEI, T; PEREIRA, L.S. Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Management**, v.121, p.1-18, 2013.

RIBEIRO, Aureliano Albuquerque et al. Avaliação de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência em Sobral, CE. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 7, n. 4, p.71-81, dez. 2015.

SALES, Júlio Cesar de. **CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA E COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA REGIÕES DO ESTADO DO CEARÁ**. 2008. 194 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia – Irrigação e Drenagem, Universidade Estadual Paulista “júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2008.

SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. In: MIRANDA, J. H.; PIRES, R. C. M. Irrigação. Piracicaba: Funep, 2001. p. 63-120.

SHAHIDIAN, R. P.; SERRALHEIRO, R. P.; TEIXEIRA, J. L.; SERRANO, J.; SANTOS, F. L.; GUIMARÃES, R. C. **Utilização da equação de Hargreaves Samani para o cálculo da ET₀ em estufas**. IV Congresso Ibérico de Agrolngeniería, Universidade de Évora, Portugal, Setembro, 2011. 11p. CD-ROM.

SILVA, M. G. et al. Estimativa da ETo pelos métodos Penman-Monteith FAO 56 e HargreavesSamani a partir de dados de Tx e Tn para Sobral e Tauá no Ceará. **Revista Acta Tecnológica**, v.5(2): 52-68, 2010.

SILVEIRA, C. da S; et al. Análise espacial da evapotranspiração no estado do Ceará: análise comparativa entre métodos. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2011. 19p.

SMITH, M. **Report on the expert concultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction os crop water requirements**: Rome FAO, 1991. 54 p.

SMITH, M; et al. Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements. **Rome**: FAO, 1990. 59 p.

STAGNITTI, F.; PARLANGE, J.-Y.; ROSE, C.W. Hydrology of a small wet catchment. **Hydrol. Sci.**, 3: 137-150. 1989.

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

TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Estimating reference evapotranspiration using limited weather data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.135, p.443-449, 2009. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000094.

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.

VISWANADHAM, Y.; SILVA FILHO, V.P.; ANDRÉ, R.G.B. The Priestley Taylor parameter a for the Amazon forest. Forest Ecology **Management Journal**, v.38, p.211- 225, 1991.

WILLMOT, C.J; et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.5, p.8995- 9005, 1985.

APÊNDICE A - Valores médios mensais da evapotranspiração de referência (mm) estimados pelos diferentes métodos durante o ano de 2011 em Mossoró-RN

Mês	Penman-Monteith FAO 56	Penman-Original	Radiação - Temperatura	Garcia - Lopez	Jensen - Haise	Priestley- Taylor	Hargreaves- Original	Hargreaves- Samani	Makkink	Linacre	Turc
jan/11	4,49	4,17	4,50	5,52	5,67	4,36	4,54	5,11	5,86	3,75	4,05
fev/11	4,31	4,20	4,55	5,26	5,72	4,50	4,58	5,21	5,94	3,47	4,09
mar/11	3,65	3,77	4,00	4,69	5,09	4,13	4,11	5,02	5,35	3,10	3,73
abr/11	3,23	3,39	3,54	4,35	4,51	3,75	3,66	4,45	4,83	2,79	3,38
mai/11	2,92	3,07	3,26	4,29	4,24	3,35	3,45	4,07	4,54	2,90	3,22
jun/11	2,98	3,06	3,27	4,74	4,18	3,12	3,40	4,10	4,48	3,31	3,18
jul/11	3,15	3,11	3,36	4,80	4,28	3,12	3,49	4,23	4,61	3,45	3,26
ago/11	4,00	3,71	4,12	5,48	5,01	3,66	4,06	5,23	5,34	3,86	3,70
set/11	5,27	4,32	4,92	6,69	5,91	4,08	4,72	6,12	6,10	4,90	4,20
out/11	5,48	4,45	4,91	6,28	6,09	4,43	4,87	5,52	6,27	4,43	4,31
nov/11	5,46	4,39	4,76	6,37	5,95	4,35	4,74	5,51	6,09	4,50	4,20
dez/11	5,32	4,26	4,56	6,32	5,71	4,21	4,55	5,45	5,85	4,46	4,05
Média	4,19	3,83	4,15	5,40	5,20	3,92	4,18	5,00	5,44	3,74	3,78

APÊNDICE B - Valores médios mensais da evapotranspiração de referência (mm) estimados pelos diferentes métodos durante o ano de 2012 em Mossoró-RN

Mês	Penman-Monteith FAO 56	Penman-Original	Radiação-Temperatura	Garcia-Lopez	Jensen-Haise	Priestley-Taylor	Hargreaves-Original	Hargreaves-Samani	Makkink	Linacre	Turc
jan/12	5,02	4,11	4,25	6,22	5,48	4,07	4,36	5,06	5,58	4,45	3,90
fev/12	4,52	4,01	4,21	5,75	5,38	4,08	4,30	5,17	5,54	4,07	3,86
mar/12	4,80	4,32	4,69	6,04	5,90	4,41	4,71	5,39	6,03	4,19	4,17
abr/12	4,67	4,16	4,59	6,29	5,76	4,15	4,58	5,22	5,85	4,37	4,06
mai/12	4,76	3,86	4,31	6,58	5,48	3,65	4,35	4,72	5,54	4,77	3,87
jun/12	4,29	3,51	3,86	6,32	4,90	3,25	3,92	4,41	5,03	4,61	3,55
jul/12	4,52	3,58	4,02	6,49	5,10	3,22	4,08	4,62	5,24	4,95	3,69
ago/12	5,45	4,19	4,96	6,95	6,09	3,82	4,87	5,42	6,25	5,28	4,31
set/12	5,95	4,51	5,18	6,87	6,41	4,26	5,12	5,58	6,57	5,12	4,50
out/12	6,10	4,68	5,31	6,79	6,62	4,54	5,27	5,67	6,75	4,97	4,62
nov/12	5,66	4,44	4,83	6,35	6,21	4,40	4,96	5,11	6,33	4,63	4,37
dez/12	5,64	4,42	4,75	6,58	6,08	4,35	4,83	5,21	6,15	4,70	4,25
Média	5,12	4,15	4,58	6,44	5,78	4,02	4,61	5,13	5,91	4,68	4,10