



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE SAÚDE E TECNOLOGIA RURAL
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA FLORESTAL
CAMPUS DE PATOS-PB**

RENNAN SALVIANO TERTO

**MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA PATOS-PB**

PATOS - PB

2017

RENNAN SALVIANO TERTO

**MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA PATOS-PB**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Patos/PB, para a obtenção do Grau de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Amador de Sousa

Patos-PB

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DO CSTR

T332m Terto, Rennan Salviano

Modelos empíricos para estimativa da evapotranspiração de referência para Patos-PB / Rennan Salviano Terto. – Patos, 2017.

48f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Florestal) –
Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Saúde e Tecnologia Rural, 2017.

“Orientação: Prof. Dr. Antonio Amador de Sousa”.

Referências.

1. Evapotranspiração. 2. Métodos empíricos. 3. Semiárido brasileiro. I. Título.

CDU 631.67

RENNAN SALVIANO TERTO

**MODELOS EMPÍRICOS PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PARA PATOS-PB**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, Campus de Patos/PB, para a obtenção do Grau de Engenheiro Florestal.

APROVADA em: ___/___/___

Prof. Dr. Antonio Amador de Sousa- UAEF/UFCG
Orientador

Prof.Dr. Izaque Francisco Candeia de Mendonça - UAEF/UFCG
1ª Examinador

Prof.Dr. Diércules Rodrigues dos Santos-UAEF/UFCG
2º Examinador

Dedico...

Este trabalho aos meus pais, **Gilberto Terto**, um pai exemplo de caráter para mim e de ser humano e **Liane Salviano**, uma mãe que me ensinou desde cedo a nunca desistir dos meus sonhos, a minha irmã, **Raissa Salviano** que sempre me apoiou e que me ajudou nessa caminhada, a minha avó materna **Iracema Costa** pela ajuda em todos esses anos. A minha avó paterna, **Luiza Leonardo** “*In Memoriam*” pelo amor e carinho e pelas frases de incentivo ao estudo.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas conquistas e pedras que me ajudaram e ajudam no amadurecimento diário;

Aos meus pais, irmã e avós, que sempre contribuíram para minha educação;

A todos os professores que passaram pela minha vida antes de entrar no curso de Engenharia Florestal e que contribuíram para meu amadurecimento e crescimento espiritual, humanístico e intelectual, em especial ao amigo, Marco Diodato, por ter me inserido na área.

Ao professor, Antonio Amador de Sousa, pela amizade, orientação nesta monografia, orientação na monitoria, pelas palavras de incentivo, pela paciência, pelo conhecimento transmitido e por ser uma pessoa com elevada sabedoria que contribuiu também para minha formação enquanto cidadão.

Aos membros da Banca Examinadora, Prof. Izaque Francisco Candeia de Mendonça e Prof. Diércules Rodrigues dos Santos, pelas contribuições de conhecimentos, disponibilidade, paciência e amizade.

À professora Naelza pelas correções, paciência e amizade.

À minha namorada, Rita de Cássia Henriques pela paciência, carinho, amor e por dividir comigo os momentos dessa trajetória.

Aos meus amigos de Natal pertencentes ao grupo "Os Batutinhas", obrigado pela amizade de tantos anos.

Aos meus amigos de curso, Josueldo Alves, José Lenildo, Fábio Junho e Ramon, obrigado por estarmos juntos durante a caminhada acadêmica e pelas inúmeras conversas na fila do Restaurante Universitário.

Às minhas amigas Jôsy, Andréia, Samara e Silvana, obrigado pelas inúmeras partidas de dominó e pela paciência que cada uma teve comigo durante os momentos difíceis que passei.

Ao amigo Jefferson Martins, obrigado pela amizade e pelas inúmeras conversas.

À amiga, Alciênia Albuquerque, obrigado pela amizade e pelas inúmeras conversas.

À turma 2012, por conviver cinco anos com cada um de vocês e vivenciar momentos únicos, principalmente nas viagens de campo. Obrigado aos floresteiros (Adão, Andréia, Adriel, Josias, Josueldo, José Lenildo, Jack, Fábio Junho, Fagner, Francisco Basílio, Guthemberg, Maria Amélia, Matthaus, Michele, Helton, Samara, Thalita, Vinícius e Whenderson).

Aos professores do Curso de Engenharia Florestal, obrigado por todos os conhecimentos que me foram transmitidos, pela amizade de cada um e por sempre estarem abertos ao diálogo. Obrigadom especial aqueles com os quais tive maior proximidade, Ricardo Viégas por sua amizade e discussões calorosas, Ivonete Bakke pelos conselhos, Jacob Souto pela orientação no projeto de Iniciação Científica, Joedla Rodrigues e Elisabeth Oliveira pela orientação no Programa de Educação Tutorial (PET), Olaf Bakke pela ajuda com os programas estatísticos e pelas brincadeiras, Maria do Carmo pelos trabalhos, estágios e conversas, Patrícia Carneiro pelos conselhos, Diércules Rodrigues pelo conhecimento na área de irrigação, Francisco Sales pela disponibilidade, amizade e conversas, João Batista pela amizade e conhecimentos, principalmente no que tange a apresentação de slides, Rivaldo Vital por ter sido meu primeiro orientador no campus, Antonio Lucineudo pela amizade, conversas e receptividade e Éder Ferreira pelas palavras de incentivo durante o curso.

Aos professores aposentados do Curso de Engenharia Florestal, Alana de Melo pelas palavras de apoio e amizade, ao professor Elenildo Queiroz, grande amigo e com o qual sempre conversei sobre temas da atualidade e sobre o uso do cálculo nas engenharias e ao professor Josuel Arcanjo pelo conhecimento e amizade.

Às turmas 2013, 2014, 2015 e 2016 obrigado pela amizade de cada um de vocês e por contribuírem na minha caminhada, minha ligação é forte com cada uma dessas turmas, pois recebi muitos de vocês quando estavam vindo para o curso a primeira vez, deixando seus lares em busca de uma realização.

A turma do vôlei da UFCG pela amizade de cada um de vocês e ao funcionário, Sr Jorge por abrir a quadra todos os dias.

Ao professor Walter por sempre permitir minhas idas para prática desportiva, mesmo já tendo pagado a disciplina.

A Aminthas pela amizade e ajuda nas análises de solo durante o curso e pelas brincadeiras.

A Francisco Leonardo do Laboratório de Nutrição pela amizade e ajuda com o projeto de iniciação científica.

Aos amigos, César, João, Romualdo, Andreza e Islanny pela amizade e ajuda durante o projeto de iniciação científica e por todo trabalho desenvolvido no Laboratório de Nutrição.

Ao pessoal do viveiro e da biblioteca pelas conversas e risadas durante essa trajetória.

Ao amigo Alielson, vulgo baixinho, pela amizade.

Às secretárias da graduação, Ivanice e Ednalva pela amizade e pelo carinho.

Ao secretário da pós-graduação, Paulo, pela amizade e brincadeiras.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pela disponibilidade dos dados meteorológicos, fundamentais para a realização deste trabalho.

A todos aqueles que porventura tenha esquecido de citar seus nomes e que contribuíram, direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e em minha graduação, meus sinceros agradecimentos. Agradeço de coração a oportunidade de conhecer cada um de vocês que formam essa família chamada Engenharia Florestal.

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2 OBJETIVO GERAL..... | 15 |
| 2.1 Objetivos específicos..... | 15 |
| 3 REVISÃO DE LITERATURA | 16 |
| 3.1 Descrição e Importância da Evapotranspiração..... | 16 |
| 3.2 Método Padrão de estimativa da ET_0 | 17 |
| 3.3 Fatores que afetam a Evapotranspiração..... | 18 |
| 3.3.1 Temperatura do ar..... | 18 |
| 3.3.2 Umidade atmosférica do ar..... | 19 |
| 3.3.3 Velocidade do vento..... | 19 |
| 3.3.4 Radiação Solar..... | 20 |
| 3.3.4.1 Parâmetros Solares..... | 21 |
| 3.3.4.1.1 Declinação Solar..... | 21 |
| 3.3.4.1.2 Fotoperíodo..... | 22 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 23 |
| 4.1 Caracterização da área de abrangência do estudo | 23 |
| 4.2 Aquisição e Tabulação dos dados | 23 |
| 4.3 Estimativa da ET_0 | 24 |
| 4.3.1 Modelos processados pelo software REF-ET | 25 |
| a) Método de Hargreaves-Samani..... | 25 |
| b) Método de Turc..... | 25 |
| c) Método de Penman-Monteith (FAO-56)..... | 26 |
| 4.3.2 Modelos processados pelo software Excel | 27 |
| a) Método de Ivanov | 27 |
| b) Método de Benevides-Lopes | 27 |
| c) Método de Hamon..... | 28 |
| d) Método de Linacre | 29 |

| | |
|--|----|
| e) Método de Kharrufa | 30 |
| 4.4 Análise de Regressão..... | 31 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 33 |
| 5.1 Climograma e dados climáticos médios..... | 33 |
| 5.2 Correlação simples de Pearson..... | 34 |
| 5.3 Regressão Linear dos modelos de estimativa da ET_0 | 36 |
| 5.4 Avaliação e classificação das equações de estimativa da ET_0 | 39 |
| 6 CONCLUSÕES..... | 42 |
| REFERÊNCIAS | 43 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 — Número de dias com e sem registros de dados climáticos e percentual de dias com registro na estação meteorológica de Patos-PB para o período de janeiro de 2003 a agosto de 2015..... | 24 |
| Tabela 2 —Proporção média diária (p) de horas de luz em cada mês para o município de Patos-PB..... | 30 |
| Tabela 3 —Dados climáticos médios diários obtidos na estação meteorológica de Patos-PB para o período de janeiro de 2003 a agosto de 2015..... | 33 |
| Tabela 4 —Matriz de correlação simples de PEARSON entre os métodos de Hargreaves-Samani (ET ₀ HS), Turc (ET ₀ TC), Penman-Monteith (ET ₀ PM), Ivanov (ET ₀ IVA), Benavidez-Lopes (ET ₀ BL), Hamon (ET ₀ HM), Linacre (ET ₀ LIN), Kharrufa (ET ₀ KF) e os parâmetros climatológicos para o período experimental de janeiro de 2003 a agosto de 2015 em Patos-PB..... | 35 |
| Tabela 5 —Resultado da análise estatística através das correlações entre o modelo de Penman-Monteith (ET ₀ PM) e os modelos de Hargreaves-Samani (ET ₀ HS), Turc (ET ₀ TC),Ivanov (ET ₀ IVA), Benavidez-Lopes (ET ₀ BL), Kharrufa (ET ₀ KF), Linacre (ET ₀ LIN) e Hamon (ET ₀ HM)..... | 37 |
| Tabela 6 —Evapotranspiração de referência média anual (mm dia ⁻¹) estimada com dados climatológicos diários de janeiro de 2003 a agosto de 2015 pelos métodos de Penman-Monteith (ET ₀ PM), Hargreaves-Samani (ET ₀ HS), Turc (ET ₀ TC), Ivanov (ET ₀ IVA),Benavidez-Lopes (ET ₀ BL), Kharrufa (ET ₀ KF), Linacre (ET ₀ LIN) e Hamon (ET ₀ HM),acompanhadas das percentagens de subestimação e superestimação, coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e desempenho (c) de cada método de ET ₀ para o município de Patos-PB..... | 39 |

RESUMO

A evapotranspiração é um dos componentes básicos do ciclo hidrológico e pode ser conceituada como a quantidade de água evaporada originária do solo ou do indivíduo vegetal acrescida da parcela transpirada por este último, sua determinação pode ser realizada de forma rápida através de métodos indiretos. O método padrão de Penman-Montheith é o modelo adotado como padrão pela FAO para o cálculo da evapotranspiração de referência, mas necessita do uso de muitas variáveis climáticas que nem sempre estão disponíveis em estações meteorológicas, por isso foram desenvolvidos outros modelos que apresentam um menor número de variáveis e que são comparados com o modelo tido como padrão. O objetivo dessa pesquisa foi comparar a evapotranspiração de referência (ET_0) estimada por diferentes modelos empíricos com o método de Penman-Montheith FAO-56, tomado como padrão, sob as condições climáticas da região de Patos-PB. As variáveis climáticas utilizadas são oriundas do acervo da Estação Meteorológica Convencional e se constituiu de uma série de janeiro de 2003 a agosto de 2015. A avaliação das estimativas da ET_0 , se baseou no coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação ($R^2_{ajustado}$), erro padrão da estimativa (EPE), índice de concordância (d), além do coeficiente de desempenho “ c ” que é o parâmetro mais utilizado na avaliação de modelos para com o método padrão. De acordo com os resultados, o modelo de Benavidez-Lopes apresentou classificação mediana para dados diários. Para os modelos de Hargreaves-Samani, Turc, Ivanov e Hamon ocorreu subestimação, apresentando classificação entre mau e sofrível, e nos demais, a saber: Benevides-Lopes, Kharrufa e Linacre ocorreu superestimação, com classificação entre mediano e péssimo em relação ao método padrão da FAO para a região de Patos-PB. Diante desses resultados pode-se concluir que apenas o modelo de Benavidez-Lopes pode ser utilizado com ressalvas, no período diário.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Métodos empíricos. Semiárido brasileiro

ABSTRACT

Evapotranspiration is one of the basic components of the hydrological cycle and can be conceptualized as the amount of evaporated water originating from the soil or the vegetal individual plus the portion transpired by the latter, its determination can be carried out quickly by indirect methods. The standard Penman-Montheith method is the standard adopted by FAO for the calculation of reference evapotranspiration, but it requires the use of many climatic variables that are not always available in meteorological stations. Number of variables and are compared with the standard model. The objective of this research was to compare the reference evapotranspiration (ET₀) estimated by different empirical models with the FAO-56 Penman-Montheith method, as standard, under the climatic conditions of the Patos-PB region. The climatic variables used come from the collection of the Conventional Meteorological Station and was made from a series from January 2003 to August 2015. The evaluation of the ET₀ estimates was based on the correlation coefficient (r), coefficient of determination (R² adjusted) , Standard error of estimation (EPE), concordance index (d), and the coefficient of performance "c", which is the most used parameter in the evaluation of models to the standard method. According to the results, the Benavidez-Lopes model presented median classification for daily data. For the models of Hargreaves-Samani, Turc, Ivanov and Hamon, there was an underestimation, presenting a classification between bad and suffering, and in the others, namely: Benevides-Lopes, Kharrufa and Linacre, overestimation occurred, with a medium to poor classification The FAO standard for the Patos-PB region. In view of these results, it can be concluded that only the Benavidez-Lopes model can be used with reservations, in the daily period.

Keywords: Evapotranspiration. Empirical methods. Brazilian semi-arid

1 INTRODUÇÃO

A água apresenta propriedades físico-químicas intrínsecas, a exemplo de elevado calor de vaporização e específico, que contribuem para a manutenção do equilíbrio térmico de vários sistemas, tanto animais quanto vegetais, o que leva a se considerar esse fluido como o componente mais importante dos sistemas biológicos. Portanto, a gestão cuidadosa e o uso sustentável desse bem são práticas necessárias que se apresentam como forma de preservar a própria vida.

Em regiões áridas e semiáridas, onde a água é um fator limitante, as pesquisas envolvendo esse recurso devem ser uma fonte de conhecimento para o seu melhor gerenciamento. Neste contexto, a cidade de Patos-PB apresenta-se como região semiárida, caracterizada pela baixa umidade, pluviosidade média anual de 500 mm e temperatura média anual de 27 °C (INPE, 2012).

A evapotranspiração é um dos componentes básicos do ciclo hidrológico e pode ser conceituada como a quantidade de água evaporada originária do solo ou do indivíduo vegetal acrescida da parcela transpirada por este último. O conhecimento desse parâmetro permite um gerenciamento mais efetivo dos recursos hídricos na gestão de bacias hidrográficas, na agricultura irrigada e no desenvolvimento de modelos matemáticos para predizerem situações meteorológicas e hidrológicas (BEZERRA et al., 2008).

Segundo Allen et al. (1994), existe uma relação direta entre as condições meteorológicas de uma área e a evapotranspiração dos vegetais a qual depende das características anatômicas e fisiológicas intrínsecas desses, de forma que ocorre variação entre a evapotranspiração de um indivíduo para outro. Diante disso é que foi considerada a necessidade de se definir uma evapotranspiração potencial de referência (ET_0), o que levou, para esse fim, à padronização de uma superfície extensa e uniforme, totalmente coberta com grama apresentando crescimento ativo e sem limitações de água, além de uma resistência estomática de 70 s.m^{-1} e albedo de 0,23 (ALLEN et al., 1998).

A determinação da ET_0 pode ser realizada por meio de métodos diretos, como aqueles que usam lisímetros e controle de umidade do solo, no entanto esses métodos normalmente exigem demanda por equipamentos específicos, além da necessidade de cuidadoso planejamento (KUMAR et al., 2008). Por outro lado, o uso de métodos indiretos, tais como os que utilizam evaporímetros e equações, proporcionam resultados mais rápidos e a um custo menor quando comparados aos métodos diretos. Considerando que o conhecimento da

evapotranspiração permite o acompanhamento do balanço de água no sistema solo-água-planta, o desafio é encontrar uma forma de equilibrar essas perdas com a disponibilidade de água para as plantas. Uma alternativa viável é lançar mão de modelos empíricos que possam estimar essa perda diária e permitir uma tomada de decisão sobre o melhor aproveitamento em bases sustentáveis dos recursos hídricos, seja na produção irrigada ou na otimização do manejo adequado do solo, da água e da cultura.

Dentre os métodos que utilizam equações destacam-se os seguintes: Hamon (1961), Turc (1961), Benevides-Lopez (1970), Ivanov, descrito por Jensen (1973), Linacre (1977), Hargreaves-Samani (1985) e Kharrufa (1985). Porém, esses métodos foram desenvolvidos nas mais diversas condições climáticas e de manejo de culturas, sendo necessária a calibração dos mesmos através da comparação com o método padrão de Penman-Monteith (FAO-56) para aplicação em regiões que apresentam condições climáticas diferentes daquelas em que cada um foi desenvolvido (RIGONI et al., 2013).

Os modelos de estimativa da ET_0 usam dados meteorológicos disponíveis em estações meteorológicas convencionais ou automáticas. Essas estações são equipamentos indispensáveis para monitorar as condições meteorológicas diárias locais através da padronização no armazenamento de dados para caracterização do estado atmosférico da região, auxiliando aos pesquisadores e agricultores na tomada de decisões em relação a situações de pesquisa e lavoura, respectivamente.

O uso do banco de dados dessas estações como *input* no método padrão de Penman-Montheith (FAO-56) muitas vezes não é satisfatório, por não dispor do número de informações que o modelo exige para ser aplicado. Assim, justifica-se a realização de pesquisas com o objetivo de analisar outros modelos de estimativa da ET_0 aos quais se ajustem os dados disponíveis nessas estações.

O presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de comparar a evapotranspiração de referência (ET_0) estimada por diferentes modelos empíricos com o método de Penman-Montheith FAO-56, tomado como padrão, afim de verificar qual o modelo que melhor se ajusta às condições de Patos-PB.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Comparar a evapotranspiração de referência (ET_0) estimada por diferentes modelos empíricos, na escala diária, com o método de Penman-Montheith FAO-56, tomado como padrão, sob as condições climáticas do município de Patos-PB.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar informações climáticas da área em estudo;
- Relacionar os parâmetros que influenciam nos modelos de estimativa da ET_0 ;
- Realizar ensaios de comparação entre os modelos relacionados e o método padrão;
- Identificar o modelo empírico que melhor se ajusta às condições climáticas de Patos-PB.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Descrição e Importância da Evapotranspiração

Atualmente existe uma maior sensibilização ambiental da sociedade em termos de recursos hídricos em relação à décadas anteriores, o que indica uma crescente preocupação com o aumento da demanda hídrica pelas populações (CAMPOS et al., 2008). Nesse contexto, a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) pode ser uma ferramenta importante para otimização no gerenciamento da água na agricultura irrigada (LIMA JUNIOR et al., 2016).

A evapotranspiração é um processo simultâneo e dinâmico de mudança do estado físico da água evaporada do componente solo, acrescido da transpiração do componente vegetal (ALENCAR et al., 2011). É uma fração ascendente oposta ao processo da chuva que apresenta a mesma unidade de medida (mm) (PEREIRA; VILLA NOVA; SEDIYAMA, 1997) formada pela água evaporada de uma superfície nua ou vegetada acrescida do componente respiratório dos vegetais (SILVA; SOUZA, 2011).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) a ET_0 é a perda de água de uma superfície vegetada extensa, uniforme e padronizada, totalmente coberta com uma cultura hipotética, de porte baixo (8-12 cm) com crescimento ativo e sem limitações de água, além de uma resistência estomática de 70 s.m^{-1} e albedo de 0,23 cobrindo completamente o solo, sem sofrer estresse hídrico e livre de doenças (DOORENBOS; PRUITT, 1977).

Sendo um valor dependente das variáveis climáticas, a ET_0 é um termo dinâmico de região para região, em virtude das mudanças de condições climáticas entre áreas (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

A ET_0 é um dos componentes essenciais do ciclo hidrológico com certo grau de dificuldade de se quantificar e sua determinação pode ser através de métodos diretos ou indiretos (TREZZA, 2008; BERNARDO et al., 1996). O uso de métodos diretos necessita de equipamentos sofisticados e caros, a exemplo do lisímetro, que apresenta bons resultados, mas restrição a pequenos volumes e/ou áreas, além do custo elevado (SANTOS et al., 2010). Por essa razão, tem-se recorrido aos métodos indiretos para estimativa da ET_0 com destaque ao método padrão de Penman-Monteith (FAO-56) no manejo da irrigação. Contudo, a utilização do método padrão necessita de obtenção de dados climáticos acurados de muitas

variáveis meteorológicas (PEREIRA et al., 2002; POPOVA et al., 2006; GONÇALVES et al., 2009)

A precisão de estimativa da ET_0 é de grande importância em estudos que visam um gerenciamento mais adequado dos recursos hídricos, seja através de balanço hidrológico, modelagem dos processos climatológicos ou manejos de irrigação. Ademais, pode ser utilizado na previsão de safras, avaliação da disponibilidade de recursos hídricos e caracterização climática (BACK, 2008; SANTOS et al., 2010). Em ambientes com falta ou distribuições irregulares das precipitações com períodos mais secos. Práticas de manejo adequado dos recursos hídricos combinadas com as reais necessidades hídricas das culturas são formas de manter ou aumentar a produtividade através de informações do comportamento da ET_0 (SILVA, 2013).

3.2 Método Padrão de estimativa da ET_0

Os métodos empíricos desenvolvidos para estimar a evapotranspiração, por utilizarem variáveis climáticas, apenas atendem de forma satisfatória em condições próprias de origem, isso proporcionou muitos erros que culminaram na necessidade de padronização de um modelo que se ajustasse a diferentes localidades, criando-se assim o método padrão de Penman-Monteith FAO-56 (PM FAO-56) (ALLEN et al., 1998). Método esse apresentado pela FAO para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_0) (FERRONATO et al., 2016).

O método padrão adotado pela FAO apresenta concordância com dados medidos diretamente com o uso de lisímetros ou em situações padronizadas de aplicação de balanço de energia (ALLEN et al., 2006). Além disso, apresenta satisfatoriamente a inserção de fatores físicos e fisiológicos que regem a ET_0 (CARVALHO et al., 2015; SOUZA et al. 2011) e que permitem sua ampla utilização em diferentes ambientes do mundo (BORGES; MENDIONDO, 2007). Contudo, é um método complexo que necessita da obtenção de vários elementos meteorológicos que nem sempre estão disponíveis em estações convencionais ou automáticas (CAMARGO; CAMARGO, 2000) porque ele incorpora dados termodinâmicos, aerodinâmicos, de resistência ao transporte de calor sensível e de resistência da superfície à transferência de vapor d'água, fatores que não estão presentes em nenhum outro método e que permitem uma melhor precisão desse modelo (OLIVEIRA, 2003). Assim, na ausência desses dados outros métodos que exijam um número menor de variáveis meteorológicas podem ser usados.

A escolha do método de estimativa da ET_0 parte da premissa de um levantamento dos dados climáticos disponíveis para utilização, pois os diferentes métodos disponíveis dependem dessas variáveis (ARAÚJO et al., 2007). Assim, é recomendável que antes do uso de qualquer modelo empírico seja avaliado o desempenho desse em relação ao método padrão de Penman-Montheith (FAO-56) (DOORENBOS; PRUITT, 1977). O uso do PM FAO-56 para calibrar diferentes equações empíricas é muito utilizado em vários trabalhos como os de Vescove; Turco (2005), Pereira (2009), Araújo et al. (2007), entre outros.

3.3 Fatores que afetam a evapotranspiração

Os fatores que intervêm na evapotranspiração podem ser agrupados em duas categorias, a saber: os relativos à atmosfera e os referentes à própria superfície evaporante. A primeira refere-se às condições meteorológicas, quais sejam: temperatura do ar, umidade atmosférica do ar, velocidade do vento e radiação solar (ALLEN et., 1998). A segunda caracteriza o estado da própria superfície, isto é, as condições de disposição da vegetação (solo nu, solo com vegetação), o tipo de cultura, estágio de desenvolvimento, arquitetura foliar, entre outros que estão associados ao coeficiente de cultura (K_c) (ALLEN et., 1998).

3.3.1 Temperatura do ar

A temperatura é o grau de agitação térmica de partículas diminutas que oscilam em torno das posições (x,y,z), além de ser um elemento meteorológico de suma importância, em virtude de evidenciar a dinâmica da atmosfera, além de ser uma expressão de energia desordenada do sistema (BARNI; BERGAMASCHI, 1992).

A temperatura do ar varia consideravelmente no tempo e no espaço em virtude do aquecimento ou resfriamento da superfície da Terra, bem como sofre a ação de fatores tais como: latitude, época do ano, hora do dia, altitude, concentração de gases aerossóis e características físicas da superfície do solo. Esse parâmetro atinge valor máximo após o meio-dia, pois nesse momento a energia incidente sobre a atmosfera é maior que a capacidade de dissipação do calor pelo ar (SILVA, 2008; SOARES; BATISTA, 2007).

A evapotranspiração de referência apresenta uma ligação com a temperatura do ar, pelo fato de esse último ser um dos elementos climáticos que mais influenciam nos estágios de desenvolvimento das plantas (VIRGENS FILHO et al., 2005). Seu efeito na agricultura remete ao fato de ser um fator determinante da distribuição natural de plantas e de ser um

agente que conduz às alterações físico-químicas em todo o sistema metabólico e de interação com o ambiente. Por exemplo, a elevação da temperatura do ar intensifica o processo de evapotranspiração. Já com uma diminuição da temperatura do ar pode ocorrer um prolongamento do ciclo fenológico (SOUZA, 2009).

3.3.2 Umidade atmosférica do ar

A radiação solar é a principal fonte de energia no processo de evaporação, sendo o déficit de pressão máxima de vapor de água fator determinante para a transferência de vapor para a atmosfera. Assim, em regiões áridas existe maior consumo de água, em virtude da alta disponibilidade energética, enquanto que em regiões úmidas, diante da saturação do ar ocorre diminuição da evapotranspiração (JESUS, 2014).

A umidade relativa do ar é a razão entre a umidade observada, em relação àquela que existiria se a atmosfera estivesse saturada à mesma temperatura (SILVA, R., 2008). Dessa forma, pode-se dizer que a umidade atmosférica do ar é a razão entre a pressão parcial de vapor a uma dada temperatura, isto é, uma pressão exercida pela massa fluida de vapor de água em uma atmosfera não saturada, e a pressão de saturação de vapor a essa mesma temperatura quando a atmosfera está saturada, o que implica num equilíbrio dinâmico entre os fenômenos de evaporação e condensação (SILVA, R., 2008).

3.3.3 Velocidade do vento

A rigor, define-se vento como o movimento da atmosfera. Esse deslocamento do ar atmosférico incerto no tempo e no espaço se deve ao gradiente de pressão atmosférica, entre duas regiões distintas, influenciadas por efeitos locais, pela orografia do local e por diferenças de temperatura (COSTA; LYRA, 2012; BAÊTA; SOUZA, 2010).

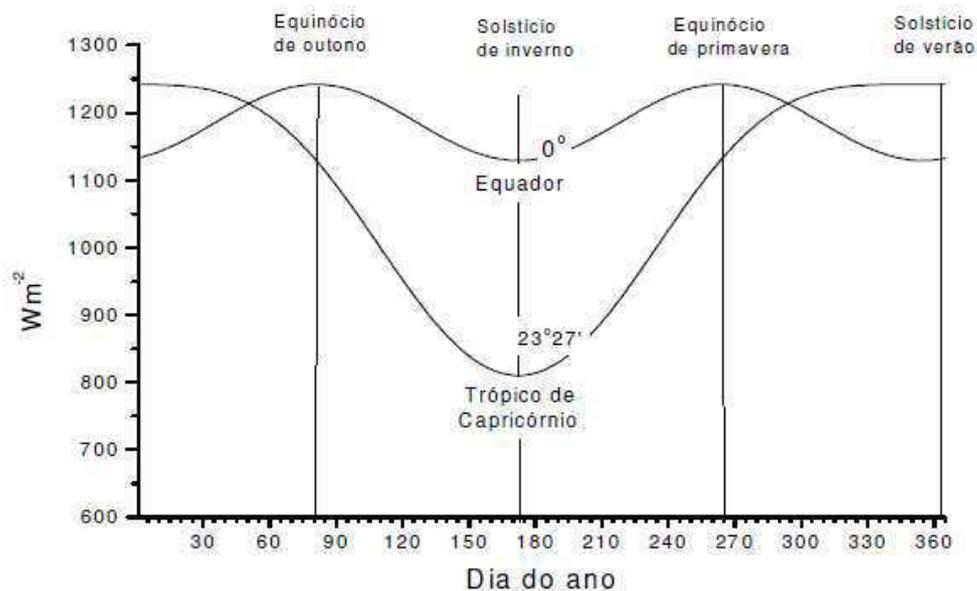
Por menor que seja a movimentação das partículas que constituem a atmosfera, existe uma interferência nos processos de troca de gases que ocorrem entre a planta e o meio, sendo a transpiração o processo mais afetado. Logo, existe uma influência de ventos sobre a morfologia de certas plantas, sendo dessa forma um indutor natural de resistência, pois a ação do vento promove a remoção da fina camada de vapor d'água que protege as folhas, com a geração de um gradiente entre a superfície dessas com o ar, o que implica na perda de água para o ambiente de forma mais rápida (BARNI; BERGAMASCHI, 1992).

3.3.4 Radiação solar

A radiação solar é uma forma de energia eletromagnética oriunda do Sol que incide sobre superfícies da Terra, sendo algo entre 0 e 5 Joules de energia em cada metro quadrado por minuto (BEGON et al., 2007). A radiação incidente é composta por radiação direta, isto é, ondas curtas, e radiação difusa, que resulta da interação da radiação direta com moléculas de ar e poluentes durante sua trajetória, além da fração da radiação solar que é convertida em energia térmica após atingir o solo e sofrer mudanças a partir da ação dos processos de radiação, condução e convecção que contribuem para alterar a temperatura do ar (BAÊTA; SOUZA, 2010).

A quantidade de radiação solar que chega à superfície terrestre depende muito da latitude, isto é, da posição geográfica do local. Na Figura 1 mostra-se que o máximo de radiação é recebido na linha do equador. A razão pela qual a intensidade da radiação solar diminui à medida que aumenta a latitude, é que os raios solares atingem a Terra na faixa do equador com maior elevação média em relação ao plano do horizonte (SILVA, R.,2006).

Figura1—Estimativa da variação da intensidade da radiação solar que atinge a superfície terrestre na faixa intertropical do Hemisfério Sul ao nível do mar.



Fonte: Silva (2006)

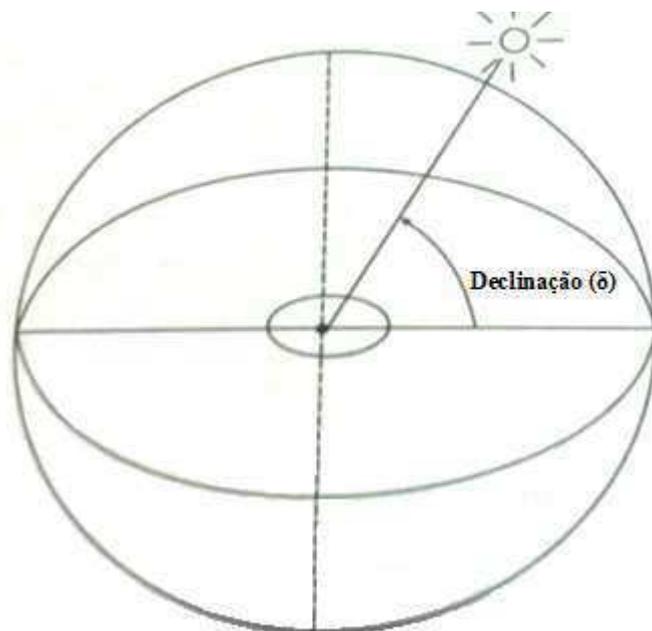
A radiação solar também está diretamente relacionada com a posição da Terra em relação ao Sol, por isso quando a Terra encontra-se no periélio, ou seja, ponto de sua trajetória em que situa-se mais próximo do Sol, recebe maior quantidade de energia. Já quando situa-se no afélio, isto é, ponto mais distante do Sol, ocorre menor incidência de energia solar (BAÊTA; SOUZA, 2010).

3.3.4.1 Parâmetros Solares

3.3.4.1.1 Declinação Solar

A declinação solar representa o ângulo formado entre a linha que liga o centro da Terra ao centro do Sol em relação ao plano do Equador (Figura 2). Sua variação é de $-23^{\circ} 27'$ a $23^{\circ} 27'$ entre 21 de dezembro a 22 de junho; nos meses seguintes, ocorre uma redução de $23^{\circ} 27'$ para $-23^{\circ} 27'$ de 22 de junho a 21 de dezembro, por isso a mudança da declinação estacional ou solar deve-se ao próprio movimento de translação da Terra (SILVA, R., 2006).

Figura 2—Representação do ângulo de declinação (δ) do Sol.



Fonte: Adaptado de Vianello e Alves (1991)

3.3.4.1.2 Fotoperíodo

O fotoperíodo é o comprimento de duração efetiva do dia em um dado intervalo de tempo, geralmente expresso em horas que representam o ciclo entre o nascimento do Sol e o ocaso do Sol. Portanto, não se deve confundir o fotoperíodo com a insolação que é o intervalo de tempo entre a aurora e o ocaso em que o disco solar esteve totalmente visível para um observador, isto é, não ocorreram perturbações de natureza atmosférica e/ou aparecimento de nuvens que de alguma forma interferiram nessa observação, de maneira que a insolação é um valor menor ou igual ao fotoperíodo (VAREJÃO-SILVA, 2006).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de abrangência do estudo

Considera-se como área de abrangência do estudo, o município de Patos-PB com uma área de 512 km² (IBGE, 2010), inserida na mesorregião do Sertão Paraibano.

Segundo a classificação climática de Köppen adequada ao Brasil por Alvares et al (2014), o clima da região é do tipo semiárido Bsh, com estação quente e seca no período de junho a dezembro e chuvas escassas no inverno de janeiro a maio, com médias pluviométricas anuais de 650 mm, distribuídas irregularmente, com registro de temperatura média de 27°C (SILVA et al., 2014). O relevo no entorno atua como uma barreira natural que dificulta a circulação das massas de ar que incidem sobre a região (SUDENE/EMBRAPA, 1972).

4.2 Aquisição e Tabulação de dados

Os dados foram obtidos da estação meteorológica convencional de Patos-PB (código OMM:82791), em operação, desde 17 de outubro de 1975, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Geograficamente, a estação se localiza no ponto de coordenadas 7° 00' 36'' S de latitude e 37° 15' 36'' W de longitude, com altitude média de 249,09 m.

Uma estação meteorológica convencional é composta de vários instrumentos isolados que registram continuamente os parâmetros meteorológicos, que são lidos e anotados por um observador que os envia para o centro em Brasília (INMET, 2016).

Os dados meteorológicos diários utilizados neste trabalho foram os seguintes: (1) Evaporação de Piche (EP), em mm; (2) horas de brilho solar (n), em h.dia⁻¹; (3) precipitação (P), em mm; (4) umidade relativa média do ar (URmed), em % ; (5) as temperaturas do ar máxima, mínima e média (Tmax, Tmin, Tmed), em °C, respectivamente sendo que a Tmed foi obtida pela média entre a máxima e a mínima de acordo com a expressão, abaixo:

$$\sum_{i=1}^{24} \frac{T_{med}}{24} \quad (1)$$

Sendo:

Tmed = Temperatura média em °C.

A velocidade média do vento (VMV), em m.s^{-1} , medida a 10 m de altura, foi convertida para o equivalente à altura de 2 m, que é a altura adotada no modelo padrão da FAO-56 para o termo aerodinâmico, conforme a seguinte expressão:

$$\frac{v_n}{v_{10}} = \left(\frac{z_n}{z_{10}}\right)^{1/7} \quad (2)$$

Sendo:

v_n = velocidade do vento ao nível de 2 m;

z_n = altura para qual se deseja converter a velocidade do vento.

O período considerado para a obtenção dos dados meteorológicos está compreendido de janeiro de 2003 a agosto de 2015, desconsiderando-se o ano de 2009, por este ter apresentado muitas falhas nos seus registros.

A série histórica, obtida do INMET, com valores diários das variáveis climáticas foi tabulada em planilha eletrônica. O resumo desses dados, mostrando o número de dias com e sem registros para cada ano da série, encontra-se na tabela 1.

Tabela 1 — Número de dias com e sem registros de dados climáticos e percentual de dias com registro na estação meteorológica de Patos-PB para o período de janeiro de 2003 a agosto de 2015

| ANO | Total de dias com registros | Total de dias sem registro | Percentagem de dias com registro (%) |
|------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 2003 | 364 | 1 | 99,73% |
| 2004 | 365 | 1 | 99,73% |
| 2005 | 325 | 40 | 89,04% |
| 2006 | 334 | 31 | 91,51% |
| 2007 | 335 | 30 | 91,78% |
| 2008 | 335 | 31 | 91,53% |
| 2009 | 271 | 94 | 74,25% |
| 2010 | 365 | 0 | 100% |
| 2011 | 365 | 0 | 100% |
| 2012 | 366 | 0 | 100% |
| 2013 | 365 | 0 | 100% |
| 2014 | 365 | 0 | 100% |
| 2015 | 291 | 74 | 79,73% |

Fonte: Terto (2017)

4.3 Estimativa da ET_0

A estimativa da evapotranspiração potencial de referência (ET_0) foi realizada para a série em escala diária, cujos dados foram processados por meio dos Software REF-ET e Excel, conforme descrito a seguir.

4.3.1 Modelos processados pelo Software REF-ET

Os modelos empíricos de estimativa da ET_0 atrelados à carência de informações que possibilitem um melhor gerenciamento dos recursos hídricos necessitam de uma resposta rápida através do uso de softwares computacionais. Nesta ótica, Silva et al. (2005) citam que a automação através do uso de softwares são ferramentas que aceleram a tomada de decisões, em tempo real.

Neste trabalho utilizou-se o software REF-ET versão 4.1, desenvolvido por Allen (2001) e projetado para uso exclusivo na área de evapotranspiração, para executar os cálculos envolvidos na estimativa da ET_0 através dos modelos empíricos de Hargreaves-Samani, Turc e o método padrão de Penman-Monteith (FAO-56) descritos abaixo:

a) Método de Hargreaves-Samani

O cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves-Samani é menos complexo do que o método de Penman-Monteith. Esse método foi desenvolvido a partir de dados obtidos no lisímetro de Davis, na Califórnia. A evapotranspiração de referência, em milímetros diário, pelo método de Hargreaves-Samani está descrito pela equação 3.

$$ET_{0HS} = 0,0023 \times (T_{med} + 17,8) \times (T_{max} - T_{min})^{0,5} \times Ra \quad (3)$$

Sendo:

T_{med} = Temperatura média do ar ($^{\circ}C$);

T_{max} = Temperatura máxima do ar ($^{\circ}C$);

T_{min} = Temperatura mínima do ar ($^{\circ}C$);

Ra = Radiação solar extraterrestre ($mm \cdot dia^{-1}$).

b) Método de Turc

O método foi desenvolvido no Oeste Europeu, em regiões onde a umidade relativa do ar é maior que 50 % (KASHYAP; PANDA, 2001). A equação 4 descreve como obter os valores de ET_0 pelo método de Turc (1961).

$$ET_0TC = at \times 0,013 \times \left(\frac{T_{med}}{T_{med}+15} \right) \times \left(\frac{23,8856 \times R_s + 50}{\lambda} \right) \quad (4)$$

Sendo:

at = É o fator da umidade relativa (se a umidade relativa do ar for maior ou igual a 50%, $at = 1,0$, senão pode ser calculado pela equação 5, a seguir:

$$at = 1 + \left(\frac{50 - UR}{70} \right) \quad (5)$$

T_{med} = Temperatura média do ar (°C);

R_s = Radiação solar global ($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$);

λ = Calor latente de vaporização ($MJ \cdot mm^{-1}$).

c) Método de Penman-Monteith (FAO-56)

O método padrão recomendado pela FAO (Food and Agriculture Organization) para estimativa da evapotranspiração de referência foi proposto por Penman-Monteith FAO-56 (ALLEN et al., 1994, 1998). A equação 6 descreve como são obtidos os valores de ET_0 para este modelo.

$$ET_0PM = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \frac{\gamma \cdot 900 \cdot U' \cdot (e_s - e_a)}{T_{med} + 273}}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U')} \quad (6)$$

Sendo:

Δ = É o gradiente da curva pressão vapor em função da temperatura ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

R_n = É a radiação solar líquida disponível ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dia}^{-1}$);

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

γ = É a constante psicrométrica ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

U' = É a velocidade do vento a 2 m ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

e_s = É a pressão de saturação do vapor de água atmosférica (kPa);

e_a = É a pressão atual do vapor de água atmosférica (kPa);

T_{med} = É a temperatura média diária do ar ($^\circ\text{C}$).

As equações padronizadas para o cálculo de todos os parâmetros da equação 6 são apresentadas em Allen et al. (1998).

4.3.2 Modelos processados pelo Software Excel

Os modelos empíricos desenvolvidos por Ivanov, Benevides-Lopez, Hamon, Linacre e Kharrufa, por não terem sido implementados no programa REF-ET versão 4.01, foram calculados com o uso do software Excel versão 2007 da Microsoft.

O uso de software Excel permite que o pesquisador possa acompanhar todo o processo de *input* e *outup* dos dados e analisar todo o processo por etapas. Nesse caso, diante da ausência de um software dedicado aos modelos empíricos acima mencionados, o software Excel se mostra como ferramenta viável para realizar os cálculos na estimativa da evapotranspiração pelos modelos citados.

As equações processadas pelo Software Excel foram as seguintes:

a) Método de Ivanov

$$ET_{0IVA} = 0,006 \times (25 + T_{med})^2 \times \left(1 - \frac{UR_{med}}{100}\right) \quad (7)$$

Sendo:

T_{med} = Temperatura média diária do ar ($^\circ\text{C}$);

UR_{med} = Umidade relativa média diária do ar (%).

b) Método de Benevides-Lopez

O método foi desenvolvido por Garcia Benevides e Lopez Diaz (1970), usando dados de temperatura média e umidade relativa do ar é possível estimar a evapotranspiração potencial pela Equação 8.

$$ET_{0BL} = 1,21 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T_{med}}{237,5 + T_{med}}\right)} \times \left(1 - \frac{UR_{med}}{100}\right) + 0,21 \times T_{med} - 2,30 \quad (8)$$

Sendo:

T_{med} = temperatura média mensal do ar ($^{\circ}C$);

UR_{med} = umidade relativa média do ar (%).

c) Método de Hamon

O método foi desenvolvido nos anos 60 por Hamon (1961), em razão de problemas de superestimativa e subestimativa do método de Thornthwaite. Esse método inclui o efeito da insolação, incorporando a duração do dia, baseado na latitude, e utiliza dados de temperatura média do ar para obter a pressão de vapor de saturação. A equação 9 descreve como obter os valores de evapotranspiração estimados pelo método de Hamon.

$$ET_{0HM} = 0,55 \times \left(\frac{n}{12}\right)^2 (0,0495 \times e^{0,062 \times T_{med}}) \times 25,4 \quad (9)$$

Sendo:

n = É o número de horas de brilho solar ($h \cdot dia^{-1}$);

T_{med} = É a temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$).

O fator n (horas de brilho solar) foi determinado pelas seguintes expressões:

Declinação solar (δ):

$$\delta = 0,4093 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,405\right) \quad (10)$$

Ângulo horário do pôr do sol (ω_s):

$$\omega_s = \arccos(-\tan \varphi \times \tan \delta) \quad (11)$$

Horas de brilho solar (n):

$$n = \frac{24}{\pi} \times \omega_s \quad (12)$$

Sendo:

J = É o dia Juliano;

φ = É a latitude do local em radianos (rad);

δ = É a declinação solar em radianos (rad).

d) Método de Linacre

O método de Linacre é um modelo simplificado do método de Penman-Monteith (FAO), utilizando menos variáveis meteorológicas. Este modelo foi originalmente testado para as condições climáticas da Austrália. A estimativa da ET_0 é baseada nos seguintes parâmetros climáticos: temperatura e umidade relativa do ar, além dos dados de localização, isto é, latitude e longitude (LINACRE, 1977). Os valores de evapotranspiração de referência pelo método de Linacre são obtidos pela Equação 13.

$$ET_{0LIN} = \left\{ \left[\frac{500 \times T_{med} + 3 \times h}{100 - L} \right] + \left(\frac{15 \times (T_{med} - T_{po})}{80 - T_{med}} \right) \right\} \quad (13)$$

Sendo:

T_{med} = É a temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$);

h = É a altitude do local (m);

L = É a latitude do local em módulo (graus);

T_{po} = É a temperatura média diária do ponto de orvalho ($^{\circ}C$).

$$T - T_{po} = 0,0023 \times h + 0,37 \times T_{med} + 0,53 \times (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}) + 0,35 \times R - 10,9 \quad (14)$$

Sendo:

R =É a diferença entre as temperaturas médias do mês mais quente e mais frio de um dado ano (°C).

e) Método de Kharrufa

A equação desse método, descrita pela equação 15, foi desenvolvida por Kharrufa (1985) e baseia-se na porcentagem do total do fotoperíodo e a temperatura do ar. É um modelo de implementação simples.

$$ET_{0KF} = 0,34 \times p \times T_{med}^{1,3} \quad (15)$$

Sendo:

P =É o valor percentual de insolação máxima mensal (%);

T_{med} = É a temperatura média diária do ar (°C).

O valor do percentual de insolação máxima mensal para a região de Patos-PB foi calculada a partir da interpolação quadrática dos dados dispostos no Quadro 1 pelo método de Gauss que gerou os dados dispostos na tabela 2.

Quadro 1—Proporção média diária (p) de horas de luz para diferentes latitudes

| Latitude | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
|----------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| 0 S | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,277 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 |
| 5 S | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,27 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
| 10 S | 0,29 | 0,28 | 0,28 | 0,27 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,27 | 0,27 | 0,28 | 0,28 | 0,29 |
| 15 S | 0,29 | 0,28 | 0,28 | 0,27 | 0,26 | 0,25 | 0,26 | 0,26 | 0,27 | 0,28 | 0,29 | 0,29 |
| 20 S | 0,30 | 0,29 | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,26 | 0,27 | 0,28 | 0,29 | 0,30 |
| 25 S | 0,31 | 0,29 | 0,28 | 0,26 | 0,25 | 0,24 | 0,24 | 0,26 | 0,27 | 0,29 | 0,30 | 0,31 |
| 30 S | 0,31 | 0,30 | 0,28 | 0,26 | 0,24 | 0,23 | 0,24 | 0,25 | 0,27 | 0,29 | 0,31 | 0,32 |
| 35 S | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,25 | 0,23 | 0,22 | 0,23 | 0,25 | 0,27 | 0,29 | 0,31 | 0,32 |
| 40 S | 0,33 | 0,31 | 0,28 | 0,25 | 0,22 | 0,21 | 0,22 | 0,24 | 0,27 | 0,30 | 0,32 | 0,34 |
| 46 S | 0,34 | 0,32 | 0,28 | 0,24 | 0,21 | 0,20 | 0,20 | 0,23 | 0,27 | 0,30 | 0,34 | 0,35 |
| 50 S | 0,35 | 0,32 | 0,28 | 0,24 | 0,20 | 0,18 | 0,19 | 0,23 | 0,27 | 0,31 | 0,34 | 0,36 |

Fonte: (Doorembos; Pruitt, 1990)

Tabela 2—Proporção média diária (p) de horas de luzem cada mês para o município de Patos-PB.

| Meses | p (%) | Meses | p (%) |
|-------|---------|-------|---------|
| JAN | 0,28522 | JUL | 0,26478 |
| FEV | 0,28000 | AGO | 0,27120 |
| MAR | 0,28000 | SET | 0,27000 |
| ABR | 0,27000 | OUT | 0,28000 |
| MAIO | 0,26478 | NOV | 0,27880 |
| JUN | 0,26598 | DEZ | 0,28522 |

Fonte: Terto (2017)

4.4 Análise de Regressão

Os dados obtidos da ET_0 foram comparados com o método padrão (FAO-56) considerada a variável dependente e a independente a ET_0 calculada pelos outros modelos empíricos. Na metodologia, foram utilizados índices estatísticos sugeridos por Camargo e Sentelhas (1997): o grau de precisão obtido a partir do coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 16), a exatidão do modelo pelo índice de Willmott (d) (Equação 17), o desempenho do modelo pelo indicador (c) obtido pelo produto de r por d (Equação 18) e em seguida classificado de acordo com o Quadro 2e da estimativa do erro padrão (EEP) (Equação 19) descrita por Allen et al. (1986).

$$r = \sqrt{1 - \left| \frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^n (Oi - O)^2} \right|} \quad (16)$$

$$d = 1 - \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (Pi - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N (|Pi - O| + |Oi - O|)^2} \right\} \quad (17)$$

$$c = r \times d \quad (18)$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Oi - Pi)^2}{n-1}} \quad (19)$$

Sendo:

P_i = corresponde aos valores estimados pelos métodos testados (mm.dia^{-1});

O_i = valores observados pelo método de Penman-Monteith (mm.dia^{-1});

O = média dos valores observados pelo método de Penman-Monteith (mm.dia^{-1});

n = número de observações.

Quadro 2— Avaliação do desempenho dos métodos de evapotranspiração de referência (ET_o), pelo índice “c”, segundo Camargo e Sentelhas (1997)

| Valor de desempenho do modelo (c) | Classificação do 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 e Sentelhas (1997)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

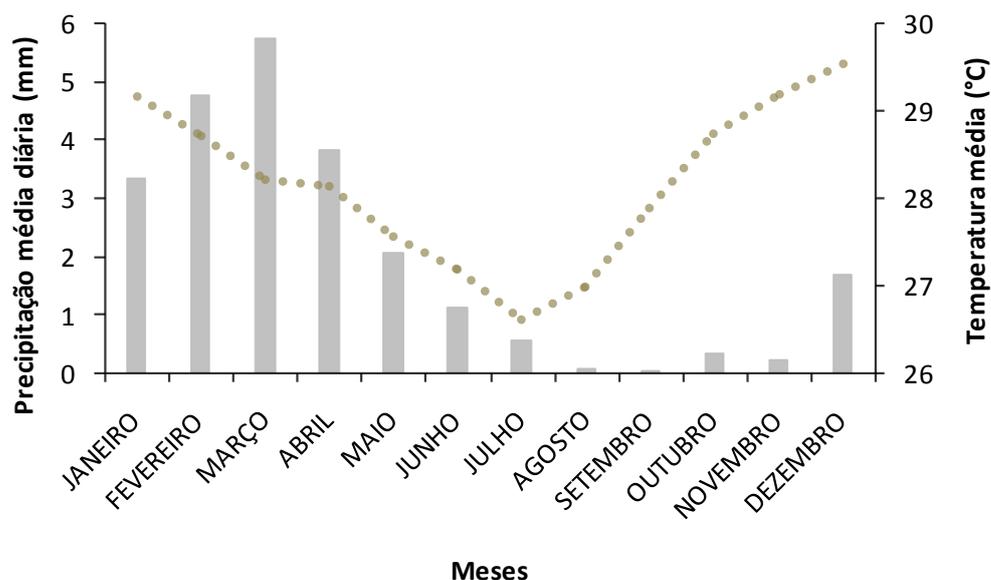
Como introdução a discussão dos dados, apresentam-se inicialmente o climograma para o período de estudo e a correlação simples de Pearson, nos itens 5.1 e 5.2, respectivamente, antecedendo a regressão linear.

5.1 Climograma e dados climáticos médios

O estudo do clima de um dado local pode ser realizado através de uma ferramenta chamada de climograma ou diagrama de ombrothermic, isto é, um gráfico que apresenta temperaturas e precipitações médias referentes a uma escala temporal e com isso mostrar de forma sintética os períodos seco e úmido de um dado local (GENTILE, 2005; CAMARASA, 2009).

A temperatura média e a precipitação média do período de janeiro de 2003 a agosto de 2015, exceto o ano de 2009 podem ser vistas na figura 3. Os dados do climograma corroboram com a afirmação de que o período de maior precipitação ocorre de fevereiro a abril e as médias térmicas anuais ficam compreendidas no intervalo em torno de 26,5 °C a 29,5 °C no município de Patos-PB (SILVA et., 2014). Além disso, pode-se inferir que no período de janeiro a março a precipitação e temperatura média são grandezas que se sobrepõem de forma inversa, isto é, enquanto crescem as precipitações diminuem as temperaturas médias, o que coincide com valores mais elevados de umidade relativa média do ar (Tabela 3), condição na qual a atmosfera retém maior quantidade de vapor, o que atenua o efeito cinético das partículas.

Figura 3—Climograma do período de janeiro de 2003 a agosto de 2015, construído a partir de dados médios diários de temperatura e precipitação para o município de Patos-PB.



Fonte: Terto (2017)

Tabela 3—Dados climáticos médios mensais obtidos na estação meteorológica de Patos-PB para o período de janeiro de 2003 a agosto de 2015.

| MESES | URmed (%) | Tmed (°C) | EP (mm) | VMV (m/s) |
|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|
| JANEIRO | 58,829 | 29,156 | 8,878 | 3,765 |
| FEVEREIRO | 65,715 | 28,726 | 7,489 | 3,224 |
| MARÇO | 69,112 | 28,215 | 5,754 | 2,812 |
| ABRIL | 69,465 | 28,132 | 5,243 | 2,535 |
| MAIO | 64,983 | 27,556 | 6,195 | 2,662 |
| JUNHO | 63,968 | 27,183 | 6,711 | 3,317 |
| JULHO | 59,090 | 26,613 | 7,291 | 3,531 |
| AGOSTO | 53,497 | 26,989 | 9,577 | 4,074 |
| SETEMBRO | 51,550 | 27,881 | 11,395 | 4,602 |
| OUTUBRO | 51,477 | 28,750 | 11,751 | 5,108 |
| NOVEMBRO | 51,232 | 29,200 | 11,504 | 4,768 |
| DEZEMBRO | 54,078 | 29,546 | 10,036 | 4,279 |

Informações: URmed (umidade relativa média do ar), Tmed (Temperatura média do ar), EP (Evaporação de Piche -evaporação calculada pelo evaporímetro de Piche) e VMV (velocidade média do vento).

Fonte: Terto (2017)

Pela Tabela 3, verifica-se que a evaporação calculada pelo evaporímetro de Piche foi maior nos meses de setembro a dezembro, e pode ser comparada com o mesmo intervalo de maiores médias térmicas no climograma da Figura 2, o que indica um aumento de temperatura

favorece o processo de evaporação, provavelmente em virtude de tornar a atmosfera mais saturada (GARCEZ; ALVAREZ, 2012).

Nesta série experimental, os ventos são, em sua maioria, classificados como moderado (2 a 5 m.s⁻¹) a forte (5 a 8 m.s⁻¹), conforme Doorenbos; Pruitt (1977).

5.2 Correlação simples de Pearson

O estudo das correlações simples entre as variáveis visa medir a intensidade com que se manifesta uma relação linear entre duas variáveis, sendo um número que varia de -1 a 1 e adimensional (RIBEIROJÚNIOR, 2013). Na tabela 4 estão os valores da correlação simples de Pearson entre as variáveis independentes para com os modelos de estimativa da evapotranspiração potencial, obtidos através do programa Statistica7 (STATSOFT, 2004).

Tabela 4— Matriz de correlação simples de PEARSON entre os métodos de Hargreaves-Samani (ET₀HS), Turc (ET₀TC), Penman-Monteith (ET₀PM), Ivanov (ET₀IVA), Benavidez-Lopes (ET₀BL), Hamon (ET₀HM), Linacre (ET₀LIN), Kharrufa (ET₀KF) e os parâmetros climatológicos para o período experimental de janeiro de 2003 a agosto de 2015 em Patos-PB.

| Métodos | Parâmetros Climatológicos | | | | | | | |
|---------------------|---------------------------|-------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|--------|-------|
| | EP | INSOL | P | T _{.max} | T _{.med} | T _{.min} | UR | VMV |
| ET ₀ HS | 0,38* | 0,23* | -0,03* | 0,87* | 0,66* | 0,12* | -0,23* | 0,37* |
| ET ₀ TC | 0,39* | 0,91* | -0,07* | 0,42* | 0,42* | 0,26* | -0,27* | 0,26* |
| ET ₀ PM | 0,63* | 0,58* | -0,16* | 0,60* | 0,56* | 0,28* | -0,67* | 0,75* |
| ET ₀ IVA | 0,56* | 0,23* | -0,19* | 0,42* | 0,44* | 0,30* | -0,98* | 0,45* |
| ET ₀ BL | 0,56* | 0,25* | -0,17* | 0,65* | 0,72* | 0,52* | -0,85* | 0,47* |
| ET ₀ HM | 0,37* | 0,20* | -0,04* | 0,83* | 0,94* | 0,69* | -0,29* | 0,34* |
| ET ₀ LIN | 0,35* | 0,20* | -0,08* | 0,97* | 0,82* | 0,29* | -0,26* | 0,34* |
| ET ₀ KF | 0,35* | 0,18* | -0,03* | 0,84* | 0,95* | 0,71* | -0,27* | 0,32* |

Informações: EP (Evaporação de Piche), INSOL (Insolação), P (precipitação), T_{.max} (Temperatura máxima do ar), T_{.med} (Temperatura média do ar), T_{.min} (Temperatura mínima do ar), UR (umidade relativa do ar) e VMV (velocidade média do vento).

(*) - Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

A precipitação e umidade relativa do ar são variáveis que assumem correlação negativa, logo indicam que valores altos desses parâmetros estão associados a valores baixos de ET₀, independente dos modelos avaliados. Os modelos ET₀PM, ET₀IVA e ET₀BL são os que apresentam correlação negativa mais próximas de -1 para o parâmetro umidade relativa do ar, possivelmente, em virtude de nesses modelos existir *input* dessa variável. Os demais

modelos apresentam uma correlação mais próxima de zero, para o mesmo parâmetro, indicando possivelmente maior dispersão dos pontos em relação à reta.

A ET_0 está negativamente correlacionada à umidade relativa e positivamente a parâmetros como temperatura do ar e velocidade do vento (Blindeman, 2000; Khanikar e Nath 1998; Schmidt et al., 1987). Essa afirmativa é confirmada pelas correlações estabelecidas na Tabela 4 para os parâmetros Evaporação de Piche, insolação, Temperatura máxima, média e mínima e velocidade do vento que apresentam correlação positiva, o que indica uma relação crescente entre as variáveis.

O modelo de ET_0PM apresentou maior correlação para a evaporação pelo método do evaporímetro de Piche e a velocidade média do vento o que retifica com o trabalho de Stanhill (1962) realizado no Iraque, que procurou investigar se existia ou não correlação desses parâmetros com a ET_0PM . A correlação desse modelo com a variável velocidade do vento se sobressai em relação aos outros modelos, possivelmente porque é o único que apresenta *input* do termo aerodinâmico.

O modelo de ET_0TC se destaca no parâmetro insolação, possivelmente em virtude de o mesmo apresentar a componente radiação solar global como *input* da expressão. O que constata com trabalhos que associam a radiação solar global a partir de dados de insolação, a saber: Campelo Júnior (1998), para Santo Antônio do Leverger (MT); Dornelas et al. (2006), para Brasília (DF); Borges et al. (2010), para Cruz das Almas (BA), entre outros.

Os modelos, de uma forma geral apresentam alta relação com o parâmetro temperatura, principalmente a temperatura máxima, pois em sua maioria exibem essa variável como *input* em suas expressões. Os modelos ET_0HS e ET_0LIN denotam os maiores valores de correlação, possivelmente, em virtude de suas expressões apresentarem várias entradas para o parâmetro temperatura do ar, seja máxima, mínima e média. Já para o modelo ET_0KF existe uma distribuição alta da correlação para o parâmetro temperatura do ar, seja na forma máxima, mínima e média, possivelmente porque na expressão este parâmetro seja o agente responsável pela maior variação da evapotranspiração.

5.3 Regressão Linear dos modelos de estimativa de ET_0

Os resultados dos testes de regressão linear na comparação entre o modelo ET_0PM e os demais modelos relacionados na metodologia estão na tabela 5.

Conforme se observa na Tabela 5, houve uma mediana correlação entre os modelos ET_0PM - ET_0TC , ET_0PM - ET_0IVA e ET_0PM - ET_0BL que apresentaram

o $R^2_{ajustado}$ (coeficiente de determinação ajustado) da ordem de 0,5431, 0,5217 e 0,5932, respectivamente. Já os demais modelos $ET_0PM - ET_0HS$, $ET_0PM - ET_0HM$, $ET_0PM - ET_0KF$ e $ET_0PM - ET_0LIN$ apresentaram em ordem decrescente os menores valores do $R^2_{ajustado}$.

Os métodos em ordem decrescente dos erros padrões de estimativa (EPE) seguem a seguinte conotação: ET_0HM , ET_0IVA , ET_0TC , ET_0LIN , ET_0KF , ET_0HS , e ET_0BL . A variação observada nas estimativas da ET_0 pelos modelos avaliados, indica a necessidade possivelmente de adoção de calibração dos modelos para as condições locais.

Tabela 5—Resultado da análise estatística através das correlações entre o modelo de Penman-Monteith (ET_0PM) e os modelos de Hargreaves-Samani (ET_0HS), Turc (ET_0TC), Ivanov (ET_0IVA), Benavidez-Lopes (ET_0BL), Kharrufa (ET_0KF), Linacre (ET_0LIN) e Hamon (ET_0HM).

| Correlações | | Parâmetros de Regressão Linear | | | |
|-------------|-----------|--------------------------------|---------|------------------|--------------------------|
| Y | X | Linear | Angular | $R^2_{ajustado}$ | EPE mm.dia ⁻¹ |
| ET_0PM | ET_0HS | 0,1605 | 1,0951 | 0,4109 | 1,3222 |
| ET_0PM | ET_0TC | 0,5614 | 1,1471 | 0,5431 | 1,6316 |
| ET_0PM | ET_0IVA | 2,8357 | 0,4902 | 0,5217 | 1,6468 |
| ET_0PM | ET_0BL | -0,8322 | 1,1918 | 0,5932 | 1,0000 |
| ET_0PM | ET_0KF | -3,7521 | 1,3906 | 0,3629 | 1,5295 |
| ET_0PM | ET_0LIN | -2,4656 | 1,2065 | 0,3369 | 1,5518 |
| ET_0PM | ET_0HM | -0,9499 | 1,7959 | 0,3948 | 2,5364 |

Fonte: Terto (2017)

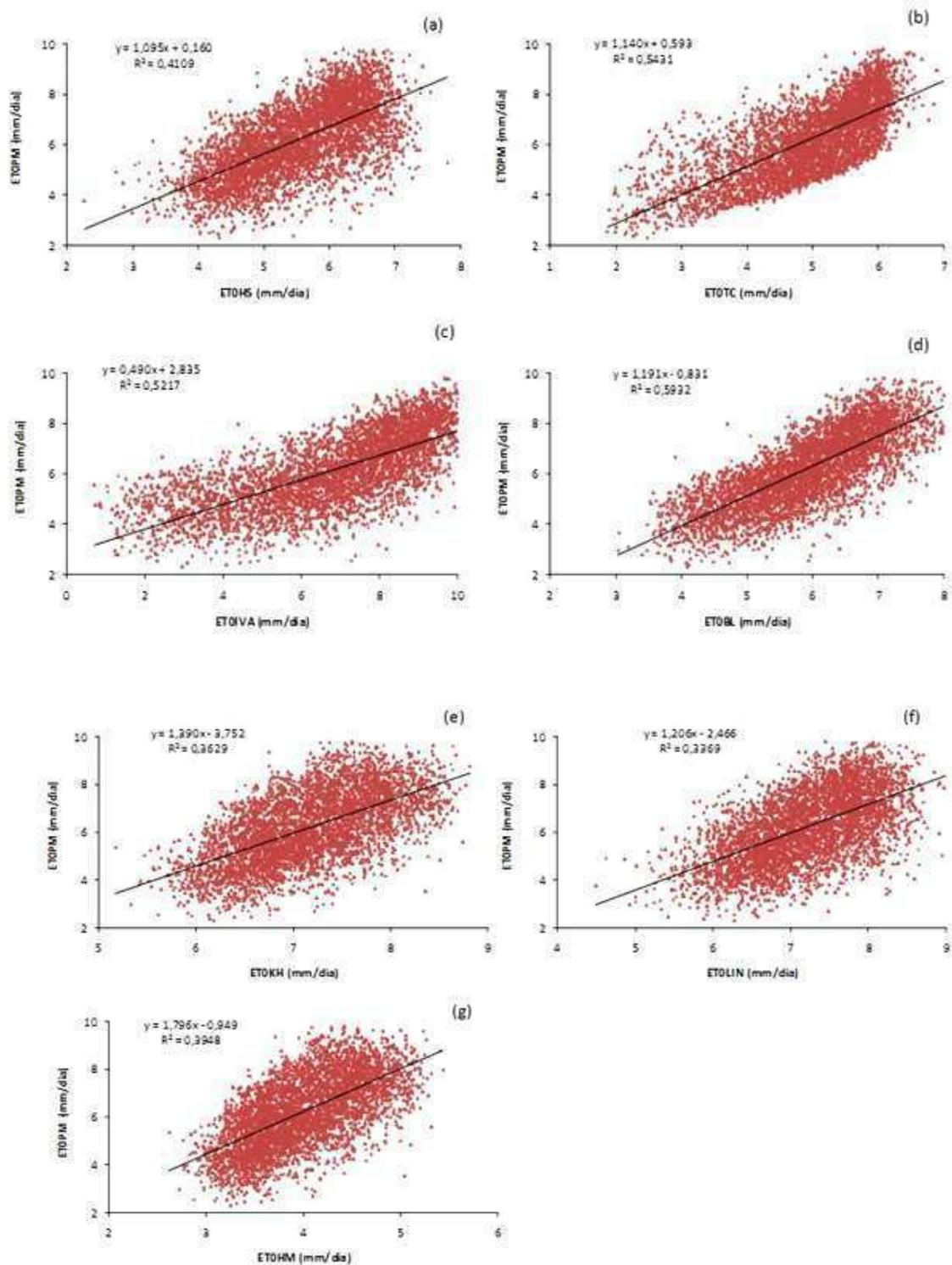
A regressão simples tem por objetivo verificar se uma variável dita dependente (Y) pode ser explicada através de uma dada variável independente (X) através de um ajuste linear (BERTOLO, 2012). O coeficiente de determinação $R^2_{ajustado}$ da regressão é o parâmetro que mede a existência ou não de explicação entre a variável dependente para com a independente, acrescido de um ajuste em relação ao número de variáveis independentes. Quando esse coeficiente tende a 1 (um) indica que existe uma forte relação entre as variáveis.

A Figura 4 apresenta relações de dispersão (3a a 3g) a partir de dados diários entre os modelos avaliados, sendo o modelo padrão de ET_0PM a variável dependente (eixo vertical) e os demais modelos correlacionados como variável independente (eixo horizontal).

Quando o coeficiente angular da reta de regressão tende a 1 significa que o modelo apresenta uma boa exatidão, logo é possível inferir que os modelos melhores em ordem decrescente de exatidão são os seguintes: ET_0HS , ET_0TC e ET_0BL . Da mesma forma, pode-se inferir que o modelo menos exato é o de ET_0IVA . Já o coeficiente de determinação é o

parâmetro utilizado para inferir a precisão de um modelo em relação aos dados testados. Assim, os modelos mais precisos em ordem decrescente são os seguintes: ET_0BL , ET_0TC e ET_0IVA .

Figura 4—Correlações entre os valores da ET_0 estimados com dados climatológicos diários de janeiro de 2003 a agosto de 2015 pelos modelos de ET_0HS em (a), ET_0TC em (b), ET_0IVA em (c), ET_0BL em (d), ET_0KF em (e), ET_0LIN em (f) e ET_0HM em (g) em relação ao modelo ET_0PM em ($mm\ dia^{-1}$) para o município de Patos-PB.



Dessa análise, depreende-se que os modelos de ET_0TC e ET_0BL são os que reúnem as características de maior precisão e exatidão, bem como os modelos ET_0KF , ET_0LIN e ET_0HM não reúnem características de exatidão e precisão e, portanto, não se ajustam ao modelo padrão de Penman-Monteith (FAO-56) para as condições deste estudo.

5.3 Avaliação e classificação das equações de estimativa da ET_0

Os valores médios anuais da ET_0 estimados ($mm.dia^{-1}$) pelos métodos Penman-Monteith (ET_0PM), Turc (ET_0TC), Hargreaves-Samani (ET_0HS), Benevides-Lopez (ET_0BL), Kharrufa (ET_0KF), Linacre (ET_0LIN), Ivanov (ET_0IVA) e Hamon (ET_0HM) a partir da base de dados diários encontram-se na tabela 6.

Tabela 6—Evapotranspiração de referência média anual ($mm.dia^{-1}$) estimada com dados climatológicos diários de janeiro de 2003 a agosto de 2015 pelos métodos de Penman-Monteith (ET_0PM), Hargreaves-Samani (ET_0HS), Turc (ET_0TC), Ivanov (ET_0IVA), Benavidez-Lopes (ET_0BL), Kharrufa (ET_0KF), Linacre (ET_0LIN) e Hamon (ET_0HM), acompanhadas das percentagens de subestimação e superestimação, coeficiente de correlação (r), índice de concordância (d) e desempenho (c) de cada método de ET_0 para o município de Patos-PB

| MÉTODOS | ET_0 anual ($mm.dia^{-1}$) | PSUB (%) | PSUPER (%) | r | d | c | Desempenho |
|-----------|-----------------------------------|-------------|---------------|--------|--------|--------|------------|
| ET_0PM | 6,2408 | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- | ----- |
| ET_0HS | 5,5341 | 11,32% | ----- | 0,6410 | 0,6871 | 0,4404 | Mau |
| ET_0TC | 4,9333 | 20,95% | ----- | 0,7370 | 0,6714 | 0,4948 | Mau |
| ET_0IVA | 5,9250 | 5,06% | ----- | 0,7223 | 0,7862 | 0,5679 | Sofrível |
| ET_0BL | 6,9300 | ----- | 11,04% | 0,7702 | 0,8168 | 0,6291 | Mediano |
| ET_0KF | 7,1683 | ----- | 14,86% | 0,6024 | 0,6005 | 0,3617 | Péssimo |
| ET_0LIN | 7,2025 | ----- | 15,41% | 0,5804 | 0,6095 | 0,3538 | Péssimo |
| ET_0HM | 3,9908 | 36,05% | ----- | 0,6283 | 0,9360 | 0,5881 | Sofrível |

Informações: PSUB (percentagem de subestimação), PSUPER (percentagem de superestimação)

Pela tabela 6, verifica-se que os modelos de estimativa da evapotranspiração de referência, ET_0HS , ET_0TC , ET_0IVA e ET_0HM tendem a subestimarem o valor anual de ET_0 para o modelo padrão de Penman-Monteith (FAO-56). Resultados semelhantes foram encontrados por Menezes et al (2014) para o modelo de ET_0HS , Tagliaferre et al (2010) para o modelo ET_0TC , Back (2008) para o modelo ET_0IVA , Borges e Mediondo (2007) para o modelo de ET_0HM . Contudo, trabalhos como o de Cavalcante Junior et al (2011) e Rigoni et al (2013) encontraram superestimação para os modelos de ET_0HS e ET_0TC . Já os modelos de

estimativa ET_{0BL} , ET_{0KF} e ET_{0LIN} tendem a superestimarem o valor anual de ET_0 em relação ao de Penman-Monteith (FAO-56) o que confirma com o trabalho realizado por Souza (2009) com os mesmos modelos.

Os modelos de estimativa da evapotranspiração de referência ET_{0HS} , ET_{0TC} , ET_{0IVA} e ET_{0HM} foram classificados de acordo com a metodologia descrita por Camargo e Sentelhas (1997), como mau, mau, sofrível e sofrível, respectivamente.

O método ET_{0HS} apresentou classificação semelhante no trabalho realizado por Medeiros (2002) no qual encontrou um índice "c" de 0,45. No entanto, Gonçalves et al (2009), Conceição e Mandelli (2005) classificaram o mesmo modelo como "muito bom".

O método de ET_{0TC} apresentou mesma classificação no trabalho realizado por Rigoniet al (2013), mas Bragança et al. (2010) constataram que o método de Turc obteve o melhor desempenho ($c = 0,93$).

O método de ET_{0IVA} apresentou classificação melhor do que os resultados para este mesmo modelo aplicado nas condições de Caicó e Currais Novos, ambos no RN, onde o resultado foi péssimo para ambas localidades (JESUS, 2014).

O método de ET_{0HM} apresentou classificação melhor do que os resultados para esse mesmo modelo nos trabalhos de Rigoniet al (2013) e Cavalcante Junior et al (2011) que o classificaram como péssimo para as condições de Aquidauana-MS e Mossoró-RN, respectivamente.

Os métodos que superestimaram os valores de ET_{0PM} foram classificados como mediano ET_{0BL} , e péssimos para ET_{0KH} e ET_{0LIN} . O método de ET_{0BL} é o melhor dentre os que foram avaliados neste trabalho, pois mesmo classificado como mediano, apresentou coeficiente de determinação da ordem de 0,5932 ou 59,32 %, e reúne as qualidades de modelo de boa exatidão e boa precisão. Resultados semelhantes foram encontrados para o período seco de Mossoró (CAVALCANTE JÚNIOR et al., 2011). Por conseguinte, para Rigoniet al (2013) o modelo ET_{0BL} apresentou maior tendência de superestimação dos valores de evapotranspiração potencial em relação ao método ET_{0PM} para as condições de Aquidauana-MS. Por fim, o resultado deste trabalho se opõe à afirmação de Silva et al (2014) que o modelo ET_{0BL} não se aplica às condições do Sertão paraibano.

O modelo de ET_{0KF} , classificado neste trabalho como péssimo, corrobora com o resultado encontrado por Souza (2009) em Rio Branco-AC. No entanto, para a região de Pelotas-RS, Terra et al. (2009) estimaram a evapotranspiração de referência, em escala de tempo diária, utilizando métodos de estimativa e dentre esses, o ET_{0KF} apresentou desempenho bom ($c=0,74$).

O modelo ET_0LIN , classificado neste trabalho como péssimo, atesta com o resultado apresentado por Sanches et al (2015) em 47 localidades da Região Norte do Brasil, possivelmente, em virtude da ausência de *input* das variáveis de velocidade média do vento e radiação solar. Já para as condições de Cruzeta, Currais Novos e Caicó, localidades do Estado do RN, região Nordeste do Brasil o modelo foi classificado como bom, obtendo os seguintes índices de desempenho: 0,69, 0,66 e 0,73, respectivamente (JESUS, 2014).

6 CONCLUSÕES

Após a análise e discussão dos resultados é possível apresentar as seguintes conclusões:

- O modelo de estimativa de evapotranspiração ET_0BL foi o que melhor se ajustou às condições climáticas da região de Patos-PB.
- Os baixos valores do coeficiente de determinação ajustado para cada modelo avaliado indicam a necessidade de ajuste regional dos mesmos através do processo de parametrização ou utilização de novos modelos.

REFERÊNCIAS

- 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.
- ALLEN, R. G. **REF-ET**: reference evapotranspiration calculator, Version 4.1. Idaho: IdahoUniversity, 2001. Disponível em:<<https://www.uidaho.edu/cals/kimberly-research-and-extension-center/water-resources/ref-et-software-request-form>>. Acessoem: 12 nov 2016.
- ALLEN, R. G., M. SMITH, A. PERRIER y L. S. PEREIRA. **An update for the calculation of reference evapotranspiration**. Boletín de la Comisión Internacional de Riego e Drenaje (ICID) 43: p. 35-92, 1994.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper, 5, 1998. 300 p.
- ALLEN, R.G. Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, n.4, p. 348-368, 1986.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M., **Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: FAO, 298p, 2006. (Estúdio FAO: Riego y Drainage, 56).
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Vol. 22, N°. 6, p.711–728, 2014.
- ARAÚJO, W. F; COSTA, S. A.; SANTOS, A. E. Comaparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) 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, vol. 13, n. 4, p. 449-466, 2008.
- BAÊTA, F. da C.; SOUZA, C. de F. **Ambiência em Edificações Rurais**. 2.ed. Viçosa-MG: UFV. 2010. 269 p.
- BARNI, N. A. Práticas agrícolas para minorar o impacto das secas e racionalizar a irrigação. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992. p. 31-39.
- BEGON, M., HARPER, J. L., TOWNSEND, C. R. **Ecologia**: de Indivíduos a Ecossistemas. 4.ed. Editora Artmed. 2007. 752p.

BENEVIDES, J.G.; LOPEZ, D. 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.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; PALARETTI, L. F. **Irrigação Princípios e Métodos**. 03.ed. Viçosa: Editora UFV, 2009.355p

BERNARDO, S.; SOUSA, E.F.; CARVALHO, J.A. **Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), para as “áreas de baixada e de tabuleiros” da região Norte Fluminense**. Campos dos Goytacazes: UENF, 1996. 14 p. Boletim Técnico.

BERTOLO, L. **Manual de estatística**. Online. 2012. Disponível em: <http://www.bertolo.pro.br/AdminFin/StatFile/Manual_Estatistica.htm>. Acesso em 28 dez 2016.

BEZERRA, B. G.; SILVA, B. B.; FERREIRA, N. J. Estimativa da evapotranspiração real diária utilizando-se imagens digitais TM - Landsat5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.23, n.3, p.305-317, 2008.

BLINDEMAN, L. Effect of air humidity on growth, keeping quality and water management of cut roses. **Verbodsnieuws**, v.44. p.8-18, 2000.

BORGES, A. C.; MENDIONDO, E. M. Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.3, p.293-300, 2007.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 74-80, 2010.

BRAGANÇA, R.; REIS, E. F. dos; GARCIA, G. de 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.

CAMARASA, V. **Cómo se comenta un climograma y ejercicios para practicar**. Online. 2009. Disponível em: <<http://vicentecamarasa.wordpress.com>>. Acesso em: 26 fev 2017.

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

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

CAMPELO JÚNIOR, J. H. Relação sazonal entre a radiação solar global e insolação no sudoeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 6, p. 193-199, 1998.

CAMPOS, J. H. B. C.; SILVA, V. de P. R. da.; AZEVEDO, P. V. de.; BORGES, C. J. R.; SOARES, J. M.; MOURA, M. S. B. de.; SILVA, B. B. da. Evapotranspiração e produtividade da mangueira sob diferentes tratamentos de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, vol.12, n.2, p.150-156, 2008.

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.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M. de.; SOBRINHO ESPÍNOLA, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina-PR, v. 32, suplemento 1, p. 1699-1708, 2011.

CONCEIÇÃO, M. A. F.; MANDELLI, F. Estimativa da evapotranspiração de referência diária para a região de Bento Gonçalves, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Campinas, v.13, n.2, p. 303-307, 2005.

COSTA, G. B.; LYRA, R. F. da F. Análise dos padrões de ventos no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria-RS, v. 27, n.1, p 31 - 38, 2012.

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

DORNELAS, K. D. S.; SILVA, C. L.; OLIVEIRA, C. A. S. Coeficientes médios da equação de Angstrom-Prezcott, radiação solar e evapotranspiração de referência em Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 8, p. 1213-1219, ago. 2006.

FERRONATO, A.; CHIG, L. A.; GOULART, D. de B.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; PEREIRA, L. C.; BIUDES, M. S. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Santo Antônio do Leverger-MT. **Revista de Ciências Agroambientais**, Mato Grosso, v.14, n.1, p.110-118, 2016.

VIRGENS FILHO, J. S. das.; LEITE, M. L.; CATANEO, A. Avaliação de três simulados de dados climáticos na geração de dados diários de temperatura do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais...** Campinas: Estatística e modelagem, p. 54-55, 2005.

GARCEZ, L.N.; ALVAREZ, G.A. **Hidrologia**. 8.ed. São Paulo: Blucher, 2013. 291p.

GENTILE, E.; **Quéesunclimograma?**. Online. 2005. Disponível em: <<http://www.educ.ar/dinamico/UnidadHtml>>. Acesso em: 26 fev 2017.

GONÇALVES, F. M.; FEITOSA, H. de O.; CARVALHO, C. M. de.; GOMES FILHO, R. R.; VALNIR JÚNIOR, M. 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. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Journal of Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

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

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/resultados_dou/PB201.pdf>. Acesso em 26 de novembro de 2016.

INMET, **Instituto Nacional de Meteorologia 2010**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>>. Acesso em: 27 nov 2016.

INPE, **Instituto nacional de pesquisas espaciais**. Disponível em: <<http://bancodedados.cptec.inpe.br>>. Acesso em: 27 de novembro de 2016.

JENSEN, M.E.; HAISE, H.R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation Drainage Division**, ASCE, New York, v.89, n.1, p.15-41, 1973.

JESUS, E.dos S. **Avaliação da Evapotranspiração na microrregião do Seridó: uma contribuição metodológica**. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Norte. – Natal, 2014.

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**, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 9-25, Aug. 2001.

KHANIKAR, P.; NATH, K. Relationship of open pan evaporation rate with some important meteorological parameters. **Journal of the agricultural Science Society of North East India**, v.11.p 46-50,1998.

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

KUMAR, M.; BANDYOPADHYAY, A.; RAGHUWANSHI, N. S.; SINGH, R. Comparative study of conventional and artificial neural network-based estimation models. **Irrigation Science**, v.26, n.6, p.531-545, 2008.

LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B. de.; NASCIMENTO, A. L. do.; MACÊDO, K. G. de. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, vol.47, n.3. p. 447-454, 2016.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação princípios e métodos**. 3.ed. Viçosa-MG: EdUFV, 2009, 355p.

MEDEIROS, A. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas em Paraipaba**. Tese (Doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. – Piracicaba, 2002.

MENEZES, S. M. de.; LIMA, D. F.; SILVA, T. V. e.; SILVA, P. F.; SANTOS, D. P. dos.; SANTOS, M. A. L. dos. Análise comparativa entre dois métodos de evapotranspiração de referência (ET₀) para a região Agreste de Alagoas. In: II INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2014, Fortaleza. **Anais eletrônicos**...Fortaleza: Disponível em: <<http://www.bibliotekevirtual.org/simposios/II-INOVAGRI-2014/a230.pdf>>. Acesso em 20 nov.2016.

OLIVEIRA, A. D. de. **Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência utilizando dados de uma estação meteorológica convencional e automática**. 2003. Tese (Doutorado em Agronomia)- Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária.Universidade de São Paulo, Jaboticabal.

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

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

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

POPOVA, Z.; KERCHEVA, M.; PEREIRA, L. S. Validation of the FAO methodology for computing ETo with limited data: application to South Bulgaria. **Irrigation and Drainage**, v. 55, n. 2, p. 201–215, Apr. 2006.
Disponível em:<<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ird.228/pdf>>. Acesso em: 04 nov. 2016.

RIBEIRO JÚNIOR, J. I. **Análises Estatísticas no Excel Guia Prático**. 2.ed.Viçosa-MG: EdUFV, 2013, 311p.

RIGONI, E. R.; OLIVEIRA, G. Q. de.; BISCARO, G. A.; QUEIROZ, M. V. B. de.; LOPES, A. S. de. Desempenho sazonal da evapotranspiração de referência em Aquidauana, MS. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa-MG, v. 21, n. 6, p. 547-562, 2013.

SANCHES, F. M.; XIMENES, A. R.; CORADI, P. C.; ROQUE, C. G.; CUNHA, F. F. da. Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil. **Revista de Ciências Agroambientais**, Alta Floresta-MT, v.13, n.2, p. 19-31, 2015.

SANTOS, W. O.; BATISTA, B. D. de O.; ASSIS, J.P.; RODRIGUES, W.M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J.Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀) para a região de Mossoró-RN. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, vol. 5, n. 5, p. 210-221, 2010.

SCHMIDT, G.M.; SMAJSTRLA, A.G.;ZAZUETA, F.S. Estimating potential evapotranspiration from temperature in a humid region.**Proceedings of the Soil and Crop Science Society of Florida**, v. 46, p. 17-21, 1987.

SILVA, A.P.N.; SOUZA, L.R. Estimativa de evapotranspiração de referência no Semiárido Pernambucano. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v.8, n.4, p.3-22, 2011.

SILVA, M. E. F.;SILVA, J. A.; MEDEIROS, B. M.; FERNANDES, J.N.V.; ROFRIGUES, L. N.; BORGES, P. F. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Patos-PB. In: II INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2014, Fortaleza. **Anais eletrônicos...**Fortaleza: Disponível em:<<http://www.bibliotekevvirtual.org/simposios/II-INOVAGRI-2014/a596.pdf>>. Acesso em 10 nov.2016.

SILVA, P. F. da.**Construção e instalação de lisímetros de drenagem para determinação do coeficiente de cultivo (kc) para a cultura do pimentão (*capsicumannuum l.*) no agreste alagoano**. Arapiraca, 2013. 48p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Alagoas, UFAL.

SILVA, R. G da.; **Biofísica ambiental:Os animais e seu ambiente**. Jaboticabal: Funep, 2008.393 p.

SILVA, R. G. da. Predição da configuração de sombras de árvores em pastagens para bovinos. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal-SP, v. 26, n.1, p. 268-281, 2006.

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

SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. **Incêndios Florestais: controle, efeito e uso do fogo**. Curitiba: FUPEF, 2007. 264 p.

SOUZA, A.P. de.;CARVALHO, D. F. de.; SILVA, L. B. D. da.; ALMEIRA, F. T. de.; ROCHA, H. S. da. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **PesquisaAgropecuária Brasileira**, v.46, p.219- 228, 2011

SOUZA, M. L. A. de. **Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em Rio Branco, Acre**. 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Produção Vegetal) – Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Acre, Rio Branco – Acre, 2009.

STANHILL,G. The use of the picheevaporimeter in the calculation of evaporation.**Quartrely Journal of the Royal Meteorological Society**.v.88, p. 80-82, 1962.

STATSOFT, INC. Programa computacional Statistica 7.0. E.A.U. 2004.1 CD-ROM

SUDENE/EMBRAPA. **Levantamento exploratório: reconhecimento de solos do Estado da Paraíba**. Rio de Janeiro: 1972. 683 p. (Boletim Técnico e Série Pedologia, 8)

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

TERRA, V. S. S.; TEIXEIRA, C. F. A.; REISSER JÚNIOR, C.; MADALAZ, L. M.; STEINMETZ, S.; ALMEIDA, I. R. de; TIMM, L. C. Evapotranspiração de referência por diferentes métodos para a região de Pelotas/RS. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 18.; ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 11.; MOSTRA CIENTÍFICA, 1., 2009, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Univesidade Federal de Pelotas, 2009.1 CD-ROM.

TREZZA, R. Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar?. **Bioagro**, Viçosa, v. 20, n.2, p.89-95, 2008.

TURC, L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. **Annales Agronomique**, Paris, v.12, p.13-49, 1961.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife-PE, mar.2006. Disponível em:

<http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2017.

VESCOVE, H.V.; TURCO, J.E.P. Comparação de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Araraquara-SP. **Engenharia Agrícola**., Jaboticabal, v.25, n.3, 2005. p.713-721.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa-MG. Editora UFV, 1991. 449p.