

MARCELO CID DE AMORIM

**AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO
CONSTANTE, DO TANQUE CLASSE "A" E DO MODELO DE PENMAN-
MONTEITH (FAO) PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA (ET_o)**

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Curso de Meteorologia
Agrícola, para obtenção do título de
"Magister Scientiae".

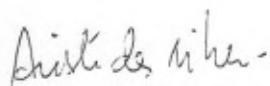
VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
MAIO – 1998

MARCELO CID DE AMORIM

**AVALIAÇÃO DA EFICÁCIA DO LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO
CONSTANTE, DO TANQUE CLASSE "A" E DO MODELO DE PENMAN-
MONTEITH (FAO) PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO
DE REFERÊNCIA (ET_o)**

Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Curso de Meteorologia
Agrícola, para obtenção do Título de
"Magister Scientiae".

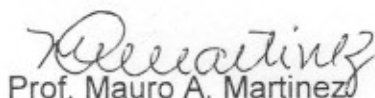
APROVADA: 7 de outubro de 1997.



Prof. Aristides Ribeiro



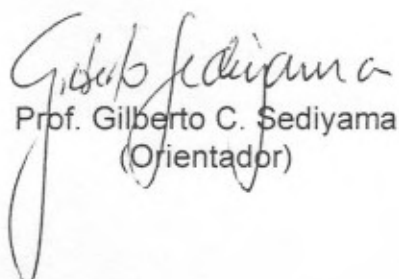
Prof. Carlos André Bulhões Mendes



Prof. Mauro A. Martinez



Prof. Rubens Alves Oliveira



Prof. Gilberto C. Sedyama
(Orientador)

Aos meus pais, Gilmar e Neide,
por acreditarem em seu Chuvisco.

À minha avó Maria Hilária (*in memoriam*),
pelo exemplo de humildade e amor ao próximo.

AGRADECIMENTO

A Deus, pela presença, ajudando-me a superar todos os obstáculos que surgiram na minha vida.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA-UFV), pela gratificante oportunidade de realizar este curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Ao professor Gilberto C. Sedyama, pelo apoio, pela orientação segura e competente, sendo modelo de um digno profissional.

A todos os professores do DEA-UFV, pela valorosa dedicação profissional, que eleva o nome desta Instituição, causando-me, acima de tudo, orgulho e prazer em participar desses trabalhos.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola da Escola Superior de Agricultura de Mossoró - RN, pelo crédito e apoio em mim depositado; em especial, ao professor José Espínola Sobrinho.

Aos colegas de pós-graduação do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo incentivo, pela amizade e pelo apoio nos estudos.

Ao professor Jorge Luís Pimenta Mello, pelas sugestões na elaboração deste trabalho, pelo apoio e pela amizade.

Ao amigo Daniel Mill, pela paciência na correção deste trabalho e pelas valorosas sugestões.

À minha família, pelo carinho, pela dedicação e simplicidade, em especial ao meu pai Gilmar Mafaldo de Amorim Fernandes.

Às pessoas que amo, pelo simples fato de poder amá-las, em especial à Dra. Mércia Jeanne Veríssimo Vidal.

A todos os funcionários do DEA-UFV, sem distinção, que de alguma forma, diretamente, ajudaram na elaboração deste trabalho.

BIOGRAFIA

MARCELO CID DE AMORIM, filho de Gilmar Mafaldo de Amorim Fernandes e Maria das Dores da Silva, nasceu em Macaíba, RN, em 16 de março de 1969.

Em janeiro de 1994, formou-se em Engenharia Agrônômica pela Escola Superior de Agricultura de Mossoró, Mossoró, RN.

Em março de 1995, iniciou o curso de mestrado em Meteorologia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, sob orientação do professor Gilberto C. Sedyama, submetendo-se à defesa de tese em 7 de outubro de 1997.

CONTEÚDO

EXTRATO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Obtenção dos dados climáticos	15
3.2. Características edafoclimáticas	18
3.3. Estimativa da evapotranspiração de referência.....	21
3.3.1. Método de PENMAN-MONTEITH.....	21
3.3.2. Método Blaney-Criddle (FAO)	21
3.3.3. Método FAO - Tanque Classe "A"	23
3.4. Investigações climatológicas sobre as propriedades dos elementos climáticos, sob os evaporímetros.....	24
3.4.1. Modelo de regressão.....	25
3.4.2. Análise de trilha.....	25
3.5 Estimativa do coeficiente de tanque (K_t).....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Modelos de regressão para avaliação da evapotranspiração em função dos elementos meteorológicos	30

4.2. Análise de trilha.....	42
4.3. Coeficiente de tanque para o tanque classe "A" para o semi- árido de Mossoró - RN	46
5. RESUMO E CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52

EXTRATO

AMORIM, Marcelo Cid de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, maio de 1998. **Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe "A" e do método de Penman-Monteith (FAO) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)**. Orientador: Gilberto Chohaku Sedyama. Conselheiros: Everardo Chartuni Mantovani e Luís Cláudio Costa.

Este estudo teve como objetivo avaliar o método de Penman-Monteith (FAO), o lisímetro de lençol freático constante e o evaporímetro tanque Classe "A" na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), em função dos principais dados climáticos disponíveis (temperatura do ar à sombra, umidade relativa, velocidade do vento e número de horas de brilho solar) na estação meteorológica principal, instalada no município de Governador Dix-Sept Rosado. Foi proposto também um modelo para determinar o coeficiente de tanque (K_t) para o tanque Classe "A". Para avaliar os efeitos direto e indireto de cada elemento climático na estimativas da ET_o obtidas pelos diferentes métodos utilizou-se a análise de regressão e de trilha. Em ambas as análises a evapotranspiração de referência foi a variável dependente (Y) e os elementos climáticos as variáveis independentes (X). As variáveis estudadas foram provenientes de dados diários e médias de períodos de cinco dias. De acordo com os resultados, o método de Penman-Monteith (FAO) apresentou melhor

coeficiente de correlação na análise de regressão quadrática com os elementos do clima, tanto para valores diários quanto para valores médios de cinco dias. Para os valores médios de cinco dias, os dados apresentaram substancial melhoria no coeficiente de determinação com os valores de ETo medidos pelos equipamentos. Pela análise regressão e de trilha os resultados foram semelhantes, comprovando que a duração do brilho solar diário é o principal elemento do clima no processo da evapotranspiração de referência, tanto como efeito direto quanto indireto. Observou-se que o Kt proposto para a região em estudo teve um coeficiente máximo de 0,73, muito inferior, portanto, ao valor recomendado pela FAO de 0,85.

ABSTRACT

AMORIM, Marcelo Cid de, M.S., Universidade Federal de Viçosa, May 1998.
Evaluating the effectiveness of the constant watertable lysimeter, class A pan and Penman-Monteith method (FAO) in estimation of the reference evapotranspiration (ET_o). Adviser: Gilberto Chohaku Sedyama. Committee Members: Everardo Chartuni Mantovani and Luís Cláudio Costa.

A field research work was carried out to evaluate the FAO Penman-Monteith method, the constant watertable lysimeter and the Class A pan for estimating the reference evapotranspiration (ET_o) as a function of the main climatic data (air temperature, relative humidity, wind speed and sunshine duration) obtained in a conventional meteorological station at Governador Dix-Sept Rosado county. A model for determining the class A pan coefficient (K_t) was also proposed for that location. The regression and path analysis were used in evaluating the direct and indirect effects from each collected climatic elements on estimated ET_o rates. In both analyses the reference evapotranspiration was the dependent variable (Y) and the climate elements were the independent variables (X). According to the results, the Penman-Monteith method showed a better adequacy in estimating the ET_o rates from the climatic elements data either for dally values or five days averaged values. For the five days averaged values the evapotranspiration measuring equipment

showed a substantial improvement in the coefficient of determination. The regression and path analysis showed similar results emphasizing that the sunshine duration is the main climatic element in the evapotranspiration process either as direct or indirect effect. It was observed that the Kt values for the study area was only 0.73, thus much less than 0.85 determined by FAO.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da demanda evaporativa na atmosfera constitui-se num fator fundamental para o ciclo hidrológico na natureza. Esta demanda desencadeia o fluxo de água no sistema solo-planta-atmosfera, sendo responsável pela perda da água no processo de evapotranspiração e pela ocorrência do déficit hídrico nas culturas. Na ausência das precipitações pluviais, a irrigação tem papel essencial no suprimento da água. Portanto, o conhecimento da evaporação e da evapotranspiração das culturas é imprescindível nas atividades de planejamento e de manejo do suprimento de água na agricultura irrigada.

Nas áreas tropicais e subtropicais do mundo, a irrigação é uma técnica poderosa para aumentar a qualidade e a quantidade das produções agrícolas. É importante mencionar que os países dessas regiões climáticas são responsáveis pela maior parte da produção de alimentos básicos para a humanidade. No Brasil, devido à sua ampla extensão territorial, existe uma diversidade de climas, mas predomina o clima tropical e suas variações de seco a úmido. Por isso, o País tem sido um dos maiores investidores em tecnologias e pesquisas na área de engenharia de irrigação e recursos hídricos direcionados à produção de alimentos, através da agricultura.

A quantificação do consumo de água pelas principais culturas agrícolas e o momento correto para sua aplicação são de extremo valor para o manejo das irrigações. Dessa forma, é possível fazer um monitoramento

eficiente dos recursos hídricos e gerar parâmetros que tornem o manejo uma atividade lucrativa e ecologicamente viável.

Atualmente, existem várias metodologias para determinar os parâmetros técnicos para o manejo da irrigação, porém dá-se maior destaque aos sistemas que, com simplicidade e funcionalidade, estimam o consumo de água pelas culturas, ou seja, a evapotranspiração.

Um dos métodos mais utilizados no cálculo da evapotranspiração de referência (ETo) e de uma cultura agrícola (ETc) é a conversão dos registros de evaporação potencial obtidos em tanque classe "A" pelos coeficientes de tanque (Kt) e de cultura (Kc), respectivamente, ambos tabelados por DOORENBOS e PRUITT (1977). Estes coeficientes dependem do estágio de desenvolvimento da cultura e das condições climáticas do local. Assim, a evapotranspiração de referência e a da cultura estimadas por este método não resultam em valores confiáveis, tanto pela modificação do comportamento fisiológico do crescimento das culturas agrícolas, resultante da introdução de novas cultivares, como também pela mudança do seu comportamento para os diferentes lugares de cultivo.

O modelo proposto por MONTEITH (1965), denominado método de Penman-Monteith, é uma alternativa para estimar a evapotranspiração de uma cultura agrícola, por ser estruturado dentro dos conceitos da termodinâmica atmosférica associada aos parâmetros de resistência que os vegetais apresentam no tocante às adversidades do local e do clima, que são as resistências aerodinâmica e estomática. Para medir estas resistências, é necessário conhecimento especializado e equipamentos sensíveis e de alto custo, o que, às vezes, torna inviável o uso deste método. Tal modelo foi padronizado pela FAO para estimar evapotranspiração de referência, e vários pesquisadores comprovaram sua eficácia na estimativa da ETo .

Os instrumentos que medem a evapotranspiração e a evaporação mais comuns no Brasil são o lisímetro de lençol freático constante e o tanque classe "A". Para o lisímetro, é fato real a grande inconsistência nas medições da ETo , devido a problemas instrumentais associados à operacionalização, principalmente quando as condições do ambiente não são bem caracterizadas para fins de manejo. No tanque classe "A" são observados outros problemas, principalmente a susceptibilidade à ação de fatores

externos, como contaminação da água por material em suspensão no ar, algas, consumo por animais etc. A literatura deixa explícita a recomendação de trabalhar os registros coletados nestes equipamentos por meio de médias superiores a cinco dias. Dessa forma, tais registros tornam-se representativos.

Tendo em vista o exposto anteriormente e a adoção do lisímetro de lençol freático constante, do método de Penman-Monteith e do tanque classe "A", associada ao conhecimento individual ou combinado da ação dos elementos meteorológicos sobre o processo de evapotranspiração, este trabalho teve como objetivos:

- 1) Submeter os valores de evapotranspiração de referência a um modelo de regressão múltipla de componentes lineares e quadráticos, para avaliar, de forma individual ou combinada, e quantificar estatisticamente a contribuição física de cada elemento no processo de evapotranspiração, medida nos instrumentos e estimada por modelos físico-matemáticos em escalas médias diárias e de cinco dias.
- 2) Aplicar uma análise multivariada, por meio da análise de trilha, nos elementos meteorológicos (vento, insolação, umidade relativa e temperatura), para determinar quais os elementos de maior importância no processo de evapotranspiração, por meio dos efeitos direto e indireto, em escalas médias diárias e de cinco dias.
- 3) Determinar a metodologia mais eficiente para medir e, ou, estimar a evapotranspiração na região agrícola de Mossoró, nos períodos estudados.
- 4) Calcular os coeficientes de tanque classe "A" (Kt) para o Município de Governador Dix-Sept Rosado, situado na região agrícola de Mossoró - RN.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O interesse dos povos pelo conhecimento da taxa de evaporação (EV) e, ou, evapotranspiração (ET) vem de períodos remotos. BRUTSAERT (1982) faz referência aos antigos gregos, no período romano e na Idade Média. Evoluções significativas foram obtidas nos séculos XVII e XXVIII, na tentativa de medir a evaporação com a introdução de técnicas experimentais. Entretanto, é consenso entre os pesquisadores que, no ano de 1948, deu-se um passo importante no que se refere aos atuais conceitos físicos que regem os fenômenos da evaporação e da evapotranspiração. Trabalhos científicos publicados nessa época, como os dos pesquisadores Warren Thornthwaite e Howard Penman, constituem uma das maiores contribuições no campo da modelagem físico-matemática para estimar esses processos. A partir dessas publicações, o estudo da evapotranspiração evoluiu de forma acelerada e consistente em todas as áreas de ciências ambientais, meteorologia, engenharias, física, matemática, geografia, fisiologia vegetal etc.

A evaporação e, ou, a evapotranspiração são elementos essenciais do ciclo hidrológico de qualquer área do planeta, em setores rurais ou urbanos. Valores confiáveis de evaporação e evapotranspiração são indispensáveis para projetos hidroagrícolas e de extrema importância para o uso racional das fontes de água, sendo necessários no planejamento e dimensionamento de reservatórios artificiais; na quantificação das necessidades hídricas dos cultivos; e nas classificações climáticas, por ser elemento de grande influência ecológica.

Assim, o conhecimento físico das relações dos elementos climáticos que influenciam o processo da ET vem contribuir de forma significativa para a atuação eficiente de técnicos de irrigação e drenagem ou pessoas diretamente envolvidas com as interações solo-água-planta-atmosfera.

Atualmente, existem várias metodologias para estimar e, ou, medir a evapotranspiração. SEDIYAMA (1990) faz referência à existência de números superiores a 50 metodologias de estimativa ou medição da evaporação e da evapotranspiração. PEREIRA et al. (1997) afirmam que, dependendo dos princípios envolvidos no desenvolvimento do método de estimativa, os métodos podem ser agrupados em cinco categorias: i) empíricos; ii) aerodinâmicos; iii) baseados no balanço de energia; iv) combinados; e v) correlações de turbilhões.

É importante enfatizar que essas metodologias de estimativa da ET possuem vantagens e desvantagens. Portanto, é imprescindível que se tenha o conhecimento necessário para avaliar essas metodologias, assim como as técnicas de coleta de dados climáticos, para obter valores consistentes, a fim de que possam ser feitos os devidos testes de significância.

Vários pesquisadores afirmam que muitos métodos desenvolvidos localmente, por meio de simples correlação de um ou mais elementos climáticos com os registros da evapotranspiração de referência (grama), produzem resultados mais significativos do que os métodos mais complexos e com fundamentação física (BLANEY e CRIDDLE, 1950; LINACRE, 1977; CAMARGO e CAMARGO, 1983; HARGREAVES e SAMANI, 1985). Alguns desses métodos apresentam uso quase universal, como: tanque classe "A", método de Penman modificado pela FAO, Jensen-Haise, Linacre, Hargreaves-Samani, Blaney-Cridde etc.

Os métodos baseados em fundamentações físicas, derivados principalmente das leis regidas pela termodinâmica atmosférica, são os que apresentam melhores resultados, pois é fácil constatar os problemas na coleta dos dados, aplicar técnicas de matemática e descrever os resultados. Os métodos baseados em conhecimentos físicos são os aerodinâmicos, o balanço de energia e os métodos combinados, tais como: Penman original, Penman-FAO, Penman-Monteith etc., bem como os métodos das correlações de turbilhões. Esses métodos requerem dados meteorológicos precisos e consistentes, que na maioria das vezes são de difícil obtenção e, ou, de elevado custo de

instrumentação, exigindo, portanto, conhecimento técnico especializado. Os dados mais comuns para esses métodos são de origem micrometeorológica, como: perfil do vento, transporte turbulento, balanço energético das superfícies envolvidas, umidade específica, parâmetros de rugosidade das superfícies estudadas, radiação, déficit de saturação, fluxo de calor no solo etc.

O lisímetro ainda é um instrumento-padrão para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o). É um tanque impermeável, contendo solo, que permite estudar todos os elementos envolvidos no balanço hídrico. Vários são os tipos de lisímetros. BURMAN e POCHOP (1994) subdividem este equipamento em três categorias: a) lisímetro de pesagem; b) lisímetro de não-pesagem; e c) lisímetro de lençol freático constante.

Os lisímetros de pesagem são os mais sensíveis e precisos. PEREIRA et al. (1997) e PRUITT e LOURENCE (1985) citam como exemplo o lisímetro da Universidade de Davis, na Califórnia, que apresenta erros mínimos na obtenção de dados, permitindo leituras contínuas, o que propicia as determinações instantâneas dos fluxos. São utilizados em testes dos transportes atmosféricos de massa, ou seja, nos processos turbulentos. Entretanto, esse equipamento apresenta limitações: é extremamente caro e requer acompanhamento técnico e manutenção especializada para que funcione de forma adequada.

Os lisímetros de drenagem apresentam custo relativamente baixo, sendo amplamente utilizados no Brasil. PEREIRA et al. (1997) recomendam leituras em períodos longos (de sete a dez dias) para obtenção de medidas confiáveis. Outros tipos de lisímetros desta categoria podem ser encontrados na literatura e em utilização no Brasil. Dentre eles, têm-se: lisímetro de lençol freático em nível constante e evapotranspirômetro de Thornthwaite (lençol freático constante), muito utilizado com grama em caixas de cimento-amianto, principalmente a grama-batatais (*Paspalum notatum* L), tendo sido adotado por ASSIS (1978), ENCARNÇÃO (1980), ESPÍNOLA SOBRINHO et al. (1989) e AMORIM (1994).

No Brasil, em especial nas regiões em que ocorrem longos períodos de estiagem pluviométrica, são observados vários problemas na utilização de lisímetro de lençol freático constante; porém, o principal é o relacionado à qualidade da água, ou seja, a alta incidência de radiação promove o aumento da evaporação dos mananciais de água, elevando a concentração de sais, o que saliniza o solo no interior do lisímetro. Muitos lisímetros brasileiros salinizaram,

descaracterizando o valor medido da ET, devido a alterações físico-químicas, modificando o potencial osmótico do solo e nos mecanismos fisiológicos dos vegetais e afetando, principalmente, o processo de transpiração.

Outros problemas podem ser evidenciados quando se usam os lisímetros. SEDIYAMA (1995) cita que a própria definição de evapotranspiração de referência (ET_o) fica prejudicada, pois é difícil manter as condições internas dos lisímetros iguais ou semelhantes às condições externas e vice-versa.

É comum observar um fenômeno denominado efeito buquê, caracterizado por um crescimento maior das plantas no interior do lisímetro, ultrapassando as bordas do instrumento. Esse aumento da massa foliar pode interceptar, em proporção, mais de 40% da radiação solar incidente, quando comparado com a grama fora da área do lisímetro. PRUITT e LOURENCE (1985), avaliando o lisímetro de pesagem na Universidade Davis, na Califórnia, tido como instrumento-padrão mundial na determinação da evapotranspiração de referência, mostram que todo elemento climático que provoca o processo de turbulência micrometeorológica na atmosfera altera a sensibilidade do valor medido de ET_o no lisímetro, principalmente a ação do vento. Assim, é importante considerar os registros de ET fornecidos por lisímetros como sendo elementos representativos apenas do meio em que estejam introduzidos.

De acordo com PERES (1994), apesar de o método original de Penman apresentar uma teoria bem estruturada dentro de conceitos físicos, ele pode ser classificado como empírico, pois considera em sua estrutura a função velocidade do vento, relativa ao termo aerodinâmico, que é uma equação empírica. Como a função velocidade do vento na equação original aplica-se a uma superfície de água-livre, DOORENBOS e PRUITT (1975), a partir de medidas lisimétricas em várias localidades do mundo, em diferentes condições climáticas e geográficas (relevo, solo, altitude etc.), calibraram esta função para grama, tornando de uso-padrão para estimativa da evapotranspiração de referência.

Para aplicação do método original de Penman, duas condições devem ser consideradas. A primeira é de que as fontes e os sumidouros de calor sensível e latente ocorram no mesmo plano, na lâmina de uma folha de vegetal, por exemplo. A segunda é de que a pressão do vapor da água na superfície

evaporante seja igual à pressão de saturação do vapor da água à temperatura desta superfície.

Pelo exposto, verifica-se que o método original de Penman é um caso particular, aplicado a medidas de evaporação em superfícies de água-livre, como um lago ou tanque classe "A", ou em quaisquer superfícies molhadas, como uma vegetação depois de uma precipitação ou irrigação.

MONTEITH (1965) desenvolveu um método fisiológico geral, ou seja, para qualquer tipo de vegetação e sob qualquer condição de estresse hídrico, generalizando este método fisiológico para o método de Penman através de uma analogia com a Lei de Ohm para os circuitos elétricos, introduzindo no termo aerodinâmico (γ^*) duas resistências à transferência do vapor da água: a resistência do dossel (r_c) e a resistência aerodinâmica (r_a). Assim, suprida a deficiência conceitual do método original de Penman, surgiu um novo método, denominado Penman-Monteith. O método apresenta a seguinte notação e as seguintes unidades no Sistema Internacional (SI) de medidas:

$$ET_o = \frac{\delta}{\delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\delta + \gamma^*} \frac{900}{T + 275} U_2 (e_a - e_d) \quad \text{eq. 1}$$

em que

- ET_o = evapotranspiração de referência [mm d⁻¹];
- R_n = saldo de radiação à superfície [MJ m⁻²d⁻¹];
- G = fluxo de calor no solo [MJ m⁻²d⁻¹];
- T = temperatura [°C];
- U₂ = velocidade do vento a 2 m de altura, m s⁻¹;
- (e_a-e_d) = déficit de pressão de saturação, kPa;
- δ = declividade da curva de pressão de saturação [kPa °C⁻¹];
- λ = calor latente de vaporização [MJ kg⁻¹];
- γ = constante psicrométrica [kPa °C⁻¹];
- γ^{*} = constante psicrométrica modificada [kPa °C⁻¹]; e
- 900 = fator de correção [kg K kJ⁻¹].

O método de Penman-Monteith é estruturado em consistentes conceitos físicos e de fácil entendimento, podendo-se nele utilizar informações

climatológicas padronizadas; tem seu uso prático limitado aos cultivos, em razão da dificuldade de medir valores confiáveis para resistências aerodinâmica e do dossel.

Em maio de 1990, a evapotranspiração e a irrigação receberam um grande impulso, quando um grupo de 14 pesquisadores especialistas em requerimento de água para agricultura, reunidos em Roma, reavaliaram o boletim FAO-24 de irrigação e drenagem (*Irrigation and Drainage Paper 24*), elaborado por DOORENBOS e PRUITT (1975). Na ocasião, estes pesquisadores propuseram grandes modificações de ordem técnica para determinação da evapotranspiração potencial e estabeleceram novos conceitos para uma cultura de referência. Esta cultura deveria ser uma grama "hipotética" com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica de superfície de 69 s m^{-1} e albedo de 0,23. Estas características assemelham-se a uma extensa área com grama de altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente a superfície do solo, sem restrição de umidade. Estes conceitos foram introduzidos ao método de Penman-Monteith para fins de padronização dos procedimentos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). De acordo com ALLEN et al. (1989), a padronização da cultura de referência é extremamente importante para as diversas condições climáticas do mundo, porque os parâmetros de rugosidade são de difícil obtenção.

Na quantificação da evapotranspiração de referência, o método de Penman-Monteith é o mais representativo e apresenta diversas vantagens sobre os demais métodos. O método de Penman-Monteith é o único que permite calcular, além da evapotranspiração potencial, a evapotranspiração real de uma cultura, bastando, para isto, medir a relação da resistência no dossel e o potencial de água no solo (GRANT, 1975; MONTEITH, 1980; HATFIELD, 1988; BEN-ASHER et al., 1989). PEREIRA et al. (1997) e SMITH (1991) afirmam que o método de PM-FAO é o mais adequado para estimar a evapotranspiração de uma cultura na escala diária, por evitar o uso de K_c para converter ET_o em ET_c.

SEDIYAMA (1996) relata alguns aspectos na sistemática do cálculo da ET_o pelo método Penman-Monteith (PM-FAO). De acordo com o relatório da International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), os pesquisadores concluem que a cultura "hipotética" tem muita semelhança com a grama, em condições ideais e crescimento ativo. Portanto, é aconselhável calcular a ET_o

pelo método de PM-FAO, especialmente quando os dados climáticos são coletados em superfícies que apresentam condições semelhantes às da cultura "hipotética".

ALLEN (1986) desenvolveu um estudo para avaliar o método de Penman e suas variantes em várias regiões dos Estados Unidos. Concluíram que o método de Penman-Monteith foi o que apresentou melhores resultados. ALLEN et al. (1989) avaliaram cinco metodologias diferentes para equação de Penman com dados climáticos e lisimétricos de 11 localidades no mundo, situadas em diferentes condições climáticas, abrangendo terras áridas e úmidas. Verificou-se que o método de Penman-Monteith forneceu estimativas mais consistentes para evapotranspiração de referência em todas estas localidades.

No Brasil, existem poucos trabalhos sobre o uso do método de Penman-Monteith. Sobre este assunto, PERES (1994) cita Folegetti (1988), Aguiar Neto et al. (1993), Azevedo et al. (1993) e Santos et al. (1993). PERES et al. (1995) avaliaram o método PM-FAO para três localidades do Estado de São Paulo e concluíram que ele estimou a evapotranspiração de referência de forma consistente e bem correlacionada com os valores medidos nos lisímetros, tanto na escala decendial quanto na mensal. Na região agrícola de Mossoró (RN), no Nordeste brasileiro, AMORIM et al. (1996) trabalharam com dados decendiais, tendo o método de Penman-Monteith como padrão, e verificaram uma superestimação nos instrumentos de medida da ETo, como o tanque classe A e o lisímetro de lençol freático constante. BARROS et al. (1996) adotaram o método Penman-Monteith como método-padrão para estimativa da evapotranspiração de referência, em escala diária para o Município de Garanhuns (PE). MANTOVANI e MEDEIROS (1995) avaliaram a evapotranspiração de referência diária, semanal e mensal para o Município de Viçosa (MG), tendo o método de PM-FAO sido adotado como padrão para avaliar outras metodologias de estimativa da ETo.

Atualmente, o tanque U.S.W.B. (United States Weather Bureau) classe "A" (Figura 1A) é um dos métodos mais utilizados no cálculo da evapotranspiração de referência em todo o mundo. A ETo é obtida pela conversão dos registros de evaporação potencial em tanques classe "A", por um coeficiente denominado coeficiente de tanque (K_t), tabelado por DOORENBOS e PRUITT (1975). Segundo SEDIYAMA (1990), o maior uso deste equipamento é devido à sua praticidade e aos baixos custos de instalação e manutenção.

Além disso, o tanque classe "A" tem sido recomendado pela O.M.M. (Organização Meteorológica Mundial), sendo empregado nas principais estações agroclimatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET/MA) para estimativa climática da evaporação potencial.

VILLA NOVA e OMETTO (1975) observam que, com o uso do valor da evaporação medida no tanque classe "A" e de um coeficiente de correção, estima-se a evapotranspiração de referência, ou seja, a quantidade de água perdida por uma superfície coberta de vegetação rasteira em fase de desenvolvimento ativo e cobrindo totalmente o terreno, no qual a umidade não limita o desenvolvimento das plantas. Estas condições observadas determinam que somente os parâmetros externos à superfície (parâmetros climáticos) são os responsáveis pelo processo de evapotranspiração. Estudos realizados por diferentes pesquisadores, em várias partes do mundo, revelam inúmeras correlações, demonstrando que o Kt varia em função da umidade relativa, da velocidade do vento e da maneira como o tanque é exposto.

O tanque classe "A" é descrito por BERLATO e MOLION (1981) como um recipiente circular de 1,21 m de diâmetro e 25,4 cm de profundidade, geralmente construído de chapa de ferro galvanizado, de espessura 22, ou em aço inoxidável reforçado. A instalação deve ser feita sobre estrado de madeira, de modo que o fundo do tanque fique 5 a 10 cm acima do solo. Normalmente, a leitura é feita através de parafuso micrométrico com precisão de 0,02 mm, instalado em um poço tranquilizador, colocado no nível superior da água no tanque, para evitar a formação de ondulações por ação do vento e permitir a determinação precisa do nível da água. Este nível deve ser mantido a uma distância mínima de 5 cm da borda superior do tanque. Por isso, convencionou-se, para efeito de padronização, que o reabastecimento e a drenagem devem ser efetuados quando o nível da água atingir 7,5 a 2,5 cm da borda, respectivamente.

O boletim técnico FAO-24 (DOORENBOS e PRUITT, 1977) apresenta uma tabela para os coeficientes de tanque (Kt) em função das seguintes condições: tanque circundado por uma vegetação rasteira (grama), com bordadura variando de 1 a 1.000 m; e tanque circundado com solo nu, com bordadura variando de 1 a 1.000 m para diferentes intervalos

de velocidade de vento (m s^{-1}) e umidade relativa do ar (%) (Quadro 3A). SEDIYAMA (1990) cita alguns critérios técnicos a serem observados quando se faz uma seleção do coeficiente K_t , considerando sempre as condições citadas anteriormente para o local onde se encontra instalado o tanque.

Devido à simplicidade e ao baixo custo de instalação e manutenção que o método do tanque classe "A" apresenta, muitos pesquisadores e empresas agrícolas o adotam. CURY e VILLA NOVA (1989) observaram que este método apresentou dados de evapotranspiração de referência mais próximos da realidade para a região de Botucatu (SP). Neste município, os mesmos resultados foram encontrados por DAL FABBRO e ANDRÉ (1991), trabalhando com o consumo de água e com a determinação do coeficiente da cultura (K_c) da batata-inglesa (*Solanum tuberosum* L.). Em Juazeiro - BA, AMORIM NETO et al. (1985) concluíram que este método apresentou bons resultados quando comparado com o padrão (lisímetro). Resultados similares foram apresentados por MELO SILVA e LIMA (1988), em Teresina - PI, considerando satisfatórios quando relacionados com os demais métodos, levando em consideração, principalmente, a simplicidade na sua utilização e também pelo fato de ele não necessitar de uma série histórica de dados meteorológicos para estimativa da evapotranspiração de referência. Segundo SMITH (1991), o tanque classe "A" tornou-se um instrumento de uso simples para medidas diretas, com baixos custos de implantação e manutenção, oferecendo, quando bem conduzido, resultados confiáveis na determinação da evapotranspiração de referência (E_{To}).

DELLA LIBERA et al. (1991), testando os métodos de Penman, radiação e tanque classe "A", para determinação do K_c da cebola (*Allium cepa*, L.), concluíram que, com exceção do tanque classe "A", os demais métodos subestimaram o K_c sugerido pela FAO. Esse comportamento foi observado para evapotranspiração de referência. ROCHA (1989) encontrou resultados opostos para determinação do K_c da cultura do arroz (*Oryza sativa*, L.), em que o método do tanque classe "A" subestimou a E_{To} e os K_c 's estabelecidos pela FAO.

Como observado anteriormente, muitos pesquisadores confiam nos valores obtidos em tanques classe "A". Alguns até afirmam que o tanque

classe "A" é o mais preciso de todos os métodos. Na ausência de um lisímetro, este método é normalmente utilizado como método-padrão. Para isto, os dados puros são coletados e multiplicados por um coeficiente de tanque estabelecido pela FAO para as regiões semi-áridas. O método do tanque classe "A", adotado como metodologia-padrão, pode ser encontrado nos trabalhos de FERNANDEZ e GONDIM (1980) e AMARO FILHO et al. (1981).

SILVA (1979) cita que, em condições de campo, o uso do tanque classe "A" pode ser questionável, em virtude de dificuldades práticas, como o consumo e, ou, a poluição da água do tanque por animais. Colocar uma tela não solucionaria o problema, porque os processos físicos envolvidos seriam modificados, ou seja, haveria diminuição da radiação incidente e o contato do vento na superfície líquida do tanque, descaracterizando, assim, o processo de evaporação da água livre.

SEDIYAMA (1990) reconhece as deficiências do tanque classe "A", mas afirma que, se instalado corretamente, este equipamento pode fornecer estimativas bastante representativas da evapotranspiração de referência para períodos de dez dias, desde que os valores de Kt selecionados sejam apropriados para o local em estudo.

Muitos pesquisadores têm observado que o método do tanque classe "A" não tem apresentado bons resultados, pois os valores medidos, geralmente, superestimam os padrões adotados. De acordo com ALLEN et al. (1989), devido aos resultados insatisfatórios apresentados por este método, quando comparado com os dados de lisímetros de precisão em várias localidades do mundo, estes pesquisadores classificaram-no de maneira incômoda, num "ranking" de comparações entre os principais métodos. No Brasil, esse comportamento foi observado por MANTOVANI e MEDEIROS (1995), para Viçosa – MG, e por AMORIM (1994), em áreas semi-áridas (Mossoró - RN).

Vários problemas são observados no uso do Kt proposto por DOORENBOS e PRUITT (1975). Os coeficientes apresentam grande dependência das características físicas das redondezas da localização do tanque (solo, vegetação, clima etc.) e da utilização de médias diárias de velocidade do vento, umidade relativa e distância da bordadura. De acordo

com PEREIRA et al. (1995), é extremamente difícil estimar a distância da bordadura, porque esta varia continuamente quando o solo está secando. Relacionando os Kt's do quadro de valores da FAO-24 com os Kt's medidos, foi observado que os valores tabelados de velocidade de vento, umidade relativa do ar e bordadura são estimados para variar logaritmicamente, o que força uma grosseira superestimação nos coeficientes tabelados. Se os dados forem coletados em regiões de clima tropical, onde se observa uma grande variação nos elementos climáticos durante o dia, os erros tornam-se mais evidentes. Outro aspecto técnico observado no Kt tabelado é que a primeira classe de velocidade do vento (aproximadamente 2 m s^{-1}) é muito alta para a maioria das regiões climáticas e agrícolas do mundo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Obtenção dos dados climáticos

Este trabalho foi realizado com dados climáticos coletados numa estação climatológica instalada no Município de Governador Dix-Sept Rosado, RN (5° 28' S; 37° 31' W, 36 m), localizada a 35 km da cidade de Mossoró - RN.

Os elementos climáticos coletados foram: temperatura do ar, umidade relativa, evaporação no tanque classe "A", insolação, precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência. Os registros dos dados tiveram início em novembro de 1987 e término em dezembro de 1989, sendo obtidos numa estação meteorológica convencional. A ETo foi determinada em lisímetros de lençol freático constante, com duas repetições. A cultura de referência utilizada foi a grama-bermuda (*Cynodon dactylon*, L.). O experimento, conforme a Figura 1, estava a aproximadamente 50 m do leito do rio Mossoró, nas margens do qual havia muitas carnaubeiras (*Copernicia cerifera*, L.).

ESCALA 1:400 (1mm = 0,4m)



Figura 1 - Croqui da área do experimento em Governador Dix-Sept Rosado.

Os equipamentos meteorológicos utilizados na coleta dos dados e suas especificações foram:

- Anemômetro totalizador, marca IH, instalado a 2,0 m.
- Heliógrafo tipo Campbell-Stokes, marca Fuess.
- Psicrômetro comum, com precisão de 0,2 °C.
- Termômetros de mínima e de máxima, ambos com precisão de 0,2 °C.
- Tanque classe "A", em chapa de ferro inoxidável e micrômetro de gancho, com precisão de medida do nível da água de 0,02 mm, assentado sobre estrado de madeira, ficando com aproximadamente 15 cm da superfície do solo gramado.
- Lisímetro de lençol freático constante ou evapotranspirômetro – método básico de Thornthwaite modificado por ESPÍNOLA SOBRINHO et al. (1989) para adaptá-lo aos materiais disponíveis da região (Figura 2).

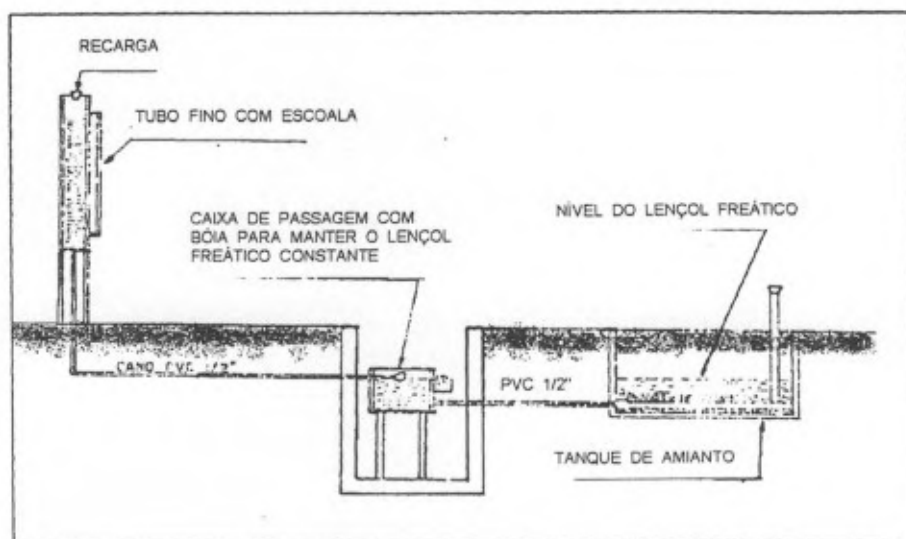


Figura 2 - Diagrama esquemático referente ao conjunto de lisímetros de lençol freático constante.

Diariamente, foram feitas leituras nos lisímetros e, simultaneamente, no tanque classe "A", por volta das 9 horas da manhã. A velocidade do vento foi medida por um anemômetro totalizador, instalado a 2,0 metros de altura da superfície do solo. A insolação foi medida, em horas e minutos, a partir de leituras diretas no heliógrafo. A umidade relativa (UR) e a temperatura do ar (T) foram medidas por um psicrômetro e dois termômetros, sendo um de máxima e outro de mínima, localizados no interior de um abrigo meteorológico. Posteriormente, os valores das médias diárias de umidade relativa e temperatura foram calculados, aplicando-se as seguintes fórmulas:

$$UR = \left[\frac{(U.R. 9:00 + U.R. 15:00 + 2 * U.R. 21:00)}{4} \right] \quad \text{eq. 2}$$

$$T = \left[\frac{(T 9:00 + 2 * T 21:00 + T_{max.} + T_{min.})}{5} \right] \quad \text{eq. 3}$$

em que 9, 15 e 21 horas são os horários de observação normal nas estações climatológicas.

3.2. Características edafoclimáticas

De acordo com as análises dos dados, a região em estudo apresenta um clima do tipo DdA'a', ou seja, semi-árido, megatérmico, com pouco ou nenhum excesso de água durante o ano, conforme a classificação climática de W.C. THORNTHWAITE, que se baseia numa série de índices térmicos, utilizando o balanço hídrico da região. Pelos regimes térmico e pluviométrico, os municípios de Mossoró e Governador Dix-Sept Rosado apresentam um clima do tipo BSwh', segundo W. KÖEPPEN, ou seja, clima muito seco, sendo a maior incidência de chuvas no verão, atrasando-se para o outono. A classificação de Gaussen e Bagnouls, citados por ESPÍNOLA SOBRINHO et al. (1989), refere-se a estes municípios como bioclima da área de 4aTh, ou seja, tropical quente, de seca acentuada, com índice xerotérmico na faixa de 200 a 150 e sete a oito meses secos.

Devido à pequena distância existente entre os dois municípios citados (35 km), não foram observadas variações significativas nas condições edafoclimáticas dos mesmos. As informações complementares sobre as características climáticas da região foram obtidas por CARMO FILHO e OLIVEIRA (1989) e ESPÍNOLA SOBRINHO et al. (1989), que conduziram experimentos na mesma área experimental. De acordo com os autores, a precipitação pluvial tem média anual de 674 mm, sendo as maiores ocorrências nos meses de fevereiro a maio, e as mais baixas, entre agosto e novembro. A temperatura média da região é de 27,4 °C, sendo dezembro o mês mais quente, com média de 28,3 °C. As temperaturas mínima e máxima do ar têm valores médios iguais a 22,6 °C e 33,3 °C, respectivamente. A insolação assume valores médios em torno de 236,6 horas mensais, ou seja, sempre ultrapassa 2.800 horas anuais, apresentando alta incidência da irradiância solar, atingindo aproximadamente o valor máximo de $1.045 \text{ W.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$. A pressão atmosférica média anual é de 0,1 MPa. A velocidade média diária do vento

normalmente assume valores entre 2,6 e 5,6 m s⁻¹, com média anual de 4,1 m s⁻¹. Os ventos predominantes são de NE e SE, e a umidade relativa média é de 67%. Durante o período experimental, a estação climatológica instalada no local registrou os seguintes dados médios: temperatura do ar, 27,7 °C; umidade relativa do ar, 69,5%; velocidade diária do vento 1,06 m s⁻¹; evaporação no tanque classe "A", 7,19 mm d⁻¹; e evapotranspiração média nos lisímetros, 4,53 mm d⁻¹.

O solo da área experimental é de textura média, classificado como aluvial eutrófico, com topografia plana. Conforme ESPÍNOLA SOBRINHO et al. (1989), são apresentadas no Quadro 1 e na Figura 3 algumas propriedades físicas do solo e a curva característica de umidade, respectivamente.

Do ponto de vista fitotécnico, o maior problema da região Nordeste é a irregularidade dos regimes pluviométricos anuais, ou seja, em grande parte da região, principalmente nas áreas semi-áridas, existem duas estações definidas. A primeira, chuvosa, ocorre no verão, estendendo-se até o outono, com duração de aproximadamente seis meses, podendo se prolongar por mais meses. Observa-se que mais de 95% das precipitações se concentram neste período. A outra estação é o período seco, durante o qual as chuvas são poucas ou inexistentes. O Quadro 2 evidencia as duas estações citadas, por meio dos dados pluviométricos mensais coletados pela estação climatológica da Escola Superior de Agricultura de Mossoró (ESAM), durante o período em que foram realizados os estudos.

Quadro 1 - Valores médios de algumas propriedades físicas do solo no local do experimento

Profundidade (cm)	Fração mineral (%)			Densidade mgm ⁻³		Porosidade (%)			CC ¹	Aa ²	PMP ³
	areia	silte	argila	global	real	micro	macro	total			
0 - 20	51	33	16	1,42	2,61	7,1	35,8	42,9	71,0	23,2	48,0
20 - 40	55	26	19	1,51	2,64	8,9	33,9	42,8	89,0	28,5	60,5
40 - 60	39	29	32	1,52	2,66	9,9	32,9	42,8	99,0	34,5	64,2

1. capacidade de campo; 2. água disponível; e 3. ponto de murcha permanente.

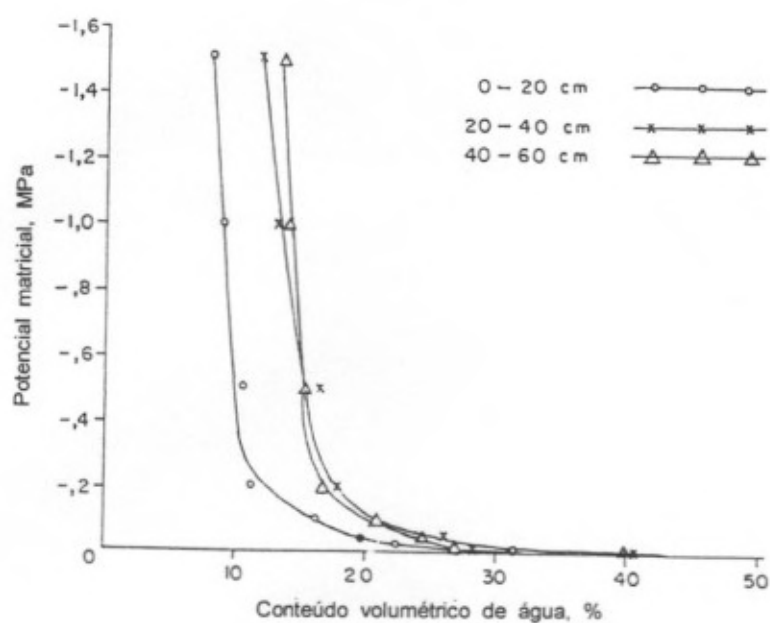


Figura 3 - Curvas características de retenção de água no solo, do local para as profundidades: 0 - 40, 20 - 40 e 40 - 60 cm.

Quadro 2 - Precipitação pluvial, ocorrida em Mossoró, RN, no período de 1987 a 1990

MESES	ANO			
	1987	1988	1989	1990
Janeiro	2,7	3,7	11,7	3,8
Fevereiro	60,4	143,2	94,6	52,4
Março	186,4	88,1	192,8	48,6
Abril	68,7	214,8	475,7	82,9
Maio	20,3	150,0	214,0	124,0
Junho	48,1	34,1	83,2	10,9
Julho	19,6	62,2	115,2	5,3
Agosto	0,2	15,5	4,3	9,2
Setembro	-	20,8	0,4	2,8
Outubro	-	-	3,0	0,8
Novembro	0,1	3,0	2,1	-
Dezembro	-	56,4	106,9	-
TOTAL	406,9	791,8	1238,3	340,7

3.3. Estimativa da evapotranspiração de referência

3.3.1. Método de PENMAN-MONTEITH

Este método determina a evapotranspiração de referência, baseando-se numa formulação teórica de conceitos puramente físicos. De acordo com PERES et al. (1995), este método utiliza dados climáticos padronizados, tendo limitações no seu uso prático, devido a dificuldades de obtenção de valores confiáveis e representativos para a resistência do dossel das culturas (r_c). Muitos pesquisadores afirmam que tal método é de pouco valor prático, a não ser que r_c seja parametrizado a partir de propriedades conhecidas e de fácil mensuração.

Em 1990, numa reunião promovida pela FAO, especialistas de vários países concluíram que o conceito de evapotranspiração de referência apresentava problema de conceitos básicos, como também em relação aos aspectos de ordem prática, principalmente no tocante à cultura de referência. Dessa forma, definiu-se uma cultura hipotética de referência, com determinadas características, como: altura (h_c) de 0,12 m, resistência aerodinâmica do dossel de 69 s m^{-1} e albedo de 23%. Com tais características, esta cultura foi padronizada para o uso do método de Penman-Monteith, eliminando-se a dificuldade de obter a resistência no dossel da cultura. A equação 1 representa o modelo matemático proposto por Penman-Monteith, padrão FAO, utilizado para estimar a E_{To} .

Os dados diários e de médias de cinco dias de velocidade do vento, umidade relativa, insolação, temperatura média compensada, evapotranspiração de referência, evaporação e precipitação do período avaliado foram submetidos ao software REF-ET, versão 2.1.

3.3.2. Método Blaney-Criddle (FAO)

A equação que representa este método foi utilizada de acordo com a proposta de DOORENBOS e PRUITT (1977), a qual apresenta o uso consultivo convertido em evapotranspiração de referência (E_{To}), em

mm d⁻¹, adaptada às escalas convencionais (sistema métrico decimal) e à escala de temperatura em graus Celsius.

Fórmula geral:

$$ET_o = c p (0,457T + 8,13) \quad \text{eq.4}$$

em que

ET_o = evapotranspiração de referência, em mm d⁻¹;

T = temperatura compensada, em graus Celsius;

p = percentagem de horas de brilho solar diário em relação ao total anual, para um dado mês e latitude do local; e

c = fator de correção, que depende da umidade relativa mínima, horas de brilho solar e estimativa da velocidade do vento diário, o qual é apresentado para três níveis: de umidade relativa, brilho solar e velocidade média do vento (DOORENBOS e PRUITT, 1977).

Os valores de ET_o, pelo modelo de Blaney-Criddle (FAO), foram calculados com o uso do software REF-ET versão 2.1, desenvolvido na Utah State University por ALLEN et al. (1989). Seguindo a nova padronização para evapotranspiração de referência, em função da cultura hipotética, a equação-base para determinação da ET_o pelo método de Blaney-Criddle (FAO) pode ser escrita da seguinte forma:

$$ET_o = a + bf \quad \text{eq.5}$$

sendo

$$a = 0,0043 \cdot UR_{\min} \cdot \frac{n}{N} - 1,41 \quad \text{eq.6}$$

$$b = 0,908 - 0,00483UR_{\min} + 0,7949\frac{n}{N} + 0,0768[\ln(U_d + 1)]^2 - 0,0038UR_{\min}\frac{n}{N} - 0,000443UR_{\min}U_d + 0,281[\ln(U_d + 1)]\left[\ln\left(\frac{n}{N} + 1\right)\right] - 0,00975[\ln(U_d + 1)][\ln(UR + 1)]^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{n}{N} + 1\right)\right] \quad \text{eq.7}$$

$$f = p(0,46T + 8,13) \quad \text{eq.8}$$

em que

$UR_{\min}$ = umidade relativa mínima observada, em %;

N = número de horas de insolação;

N = número máximo possível de horas de insolação, valor tabelado; e

U_d = velocidade do vento, em $m\ s^{-1}$.

3.3.3. Método FAO - Tanque Classe "A"

Os valores calculados por este método foram obtidos também com o software REF-ET, versão 2.1, com as seguintes parametrizações para o K_t :

Situação 1: solo gramado em torno do tanque:

$$K_t = 0,108 - 0,000331U_2 + 0,0422 \ln(\text{bordadura}) + 0,1434 \ln(UR_{\text{média}}) + 0,000631[\ln(\text{bordadura})]^2 [\ln(UR_{\text{média}})] \quad \text{eq.9}$$

Situação 2: solo nu em torno do tanque:

$$K_t = 0,61 + 0,00341UR_{\text{média}} - 0,00000187U_dUR_{\text{média}} - 0,000000111U_2\text{bordadura} + 0,0000378U_2\ln(\text{bordadura}) - 0,0000332U_2\ln(U_2) - 0,0106[\ln(U_2)][\ln(\text{bordadura})]^2 + 0,00063[\ln(\text{bordadura})]^2 [\ln(U_2)] \quad \text{eq.10}$$

Com os seguintes limites para as equações:

$$30 \leq UR_{\text{média}} \leq 84\%; \quad 84 \leq U_d \leq 700\ km\ d^{-1} \quad \text{e} \quad 1 \leq \text{bordadura} \leq 1000\ m$$

U_d = velocidade do vento, em m s^{-1} ;

U_2 = velocidade do vento a 2m, m s^{-1} ; e

bordadura = área gramada circundando o tanque, igual a 10 m.

3.4. Investigações climatológicas sobre as propriedades dos elementos climáticos, sob os evaporímetros

As investigações físicas demonstram que a quantidade de água perdida no processo de evapotranspiração em superfície vegetada e nos equipamentos que medem a evaporação e evapotranspiração depende de três componentes do clima:

- o primeiro descreve o processo energético, incluindo os processos de radiação, fluxo de calor do solo e temperatura do ar;
- o segundo descreve a aceitabilidade da atmosfera para o vapor de água, incluindo os parâmetros de umidade do ar ou o déficit de saturação; e
- o terceiro sistema representa o transporte do vapor de água ou a reposição da umidade pela massa de ar seco. Neste sistema estão incluídos a velocidade do vento, o efeito dos turbilhões e as difusividades.

Esses componentes não atuam separadamente na natureza, mas aparecem em várias combinações e efeitos recíprocos, interagindo e influenciando de forma significativa o processo da evapotranspiração nas diferentes condições climáticas. Dessa forma, foram analisados os dados de evapotranspiração em lisímetros de lençol freático constante e no tanque classe "A"; e a evapotranspiração de referência foi estimada pelos métodos Penman-Monteith (FAO), tanque classe "A" (FAO) e Blaney-Criddle (FAO), em função dos seguintes elementos meteorológicos: insolação média (h), temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa média do ar (%) e média diária da velocidade do vento (m s^{-1}), para a região agrícola de Mossoró.

3.4.1. Modelo de regressão

Para estudar as relações entre a evapotranspiração e os elementos meteorológicos citados anteriormente, foi analisado o grau de influência da interação desses elementos no processo de evapotranspiração. Para tanto, utilizou-se uma formulação quadrática, como proposta por Schneider (1968), citado por HOYNINGEN-HUENE (1980). Esse modelo é mais eficiente quando um elemento combina com outros, por considerar os efeitos mútuos. Um exemplo é o efeito mútuo da temperatura e da velocidade do vento no processo de advecção.

A aplicação do método dos quadrados mínimos produz uma área de regressão n-dimensional, que contém todas as informações sobre o comportamento dos parâmetros individuais com os seus efeitos mútuos. A expressão matemática geral é:

$$\hat{Y} = a_0 + \sum a_i \cdot x_i + \sum a_{ik} \cdot x_i \cdot x_k \quad \text{eq.11}$$

O valor-alvo Y é a evaporação e evapotranspiração medidas nos instrumentos (tanque classe "A" e lisímetro) e obtidas com os métodos de Penman-Monteith (FAO), tanque classe "A" (FAO) e Blaney-Criddle (FAO). Os valores de "x" são os elementos meteorológicos e os de "a" são coeficientes da regressão. A soma dos produtos de $a_i \cdot x_i$ são os componentes lineares, ao passo que a soma dos produtos de $a_{ik} \cdot x_i \cdot x_k$ ($i = k$) são os efeitos quadráticos. Os produtos $a_{ik} \cdot x_i \cdot x_k$ ($i \neq k$) representam os efeitos mútuos.

3.4.2. Análise de trilha

Em condições de campo, os elementos meteorológicos são freqüentemente interdependentes, dificultando o entendimento do efeito de um ou outro elemento isoladamente sobre uma determinada componente de produção (AUGUSTO, 1997). Técnicas de estatística multivariada, como a análise de trilha (*path analysis*), possibilitam realçar os efeitos diretos e indiretos de um conjunto de variáveis sobre uma variável

principal, podendo ser aplicadas no sentido de indicar a importância de um ou mais elementos meteorológicos no processo de evapotranspiração.

De acordo com CRUZ e REGAZZI (1994), os coeficientes de trilha (efeito direto) podem ser comparados entre si e com o efeito da variável residual, que é utilizado como referencial para a importância do efeito direto da variável explicativa sobre a variável principal. Quando o coeficiente de trilha (efeito direto) de uma variável explicativa for, em módulo, menor que o coeficiente da variável residual, mas o coeficiente de determinação (efeito total) for maior que o efeito da variável residual, significa que esta variável explicativa influencia a variável principal apenas indiretamente, sendo sua importância só em conjunto. Se o coeficiente de trilha for, em módulo, maior que o coeficiente da variável residual, é sinal de que existe efeito direto da variável explicativa sobre a principal.

Com as variáveis determinadas, efetuaram-se, inicialmente, as análises de correlação linear simples (correlação de Pearson), utilizando-se o programa estatístico SAEG 7.0 (Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas), para obter as matrizes de correlação e suas significâncias pelo teste "t", em níveis de 1 e 5% de probabilidade. A análise de trilha e o diagnóstico de multicolinearidade da matriz de variáveis explicativas foram realizados utilizando o programa GENES I (Análise de Métodos Biométricos Aplicados à Genética Quantitativa e Estatística Experimental). Tanto o programa SAEG 7.0 quanto o GENES I foram desenvolvidos na Universidade Federal de Viçosa. Foram considerados como variáveis explicativas os elementos meteorológicos (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e insolação) e como variável principal a evaporação e evapotranspiração (medida e estimada).

A obtenção de informações relativas à influência de elementos meteorológicos no processo da evapotranspiração é de extrema importância para o entendimento das relações físicas e dos aspectos micrometeorológicos das diferentes regiões e dos diferentes ambientes do planeta, possibilitando um estudo mais seguro da modelagem físico-matemática, a fim de estimar a evapotranspiração, como também para outros processos, observados na natureza, que sofrem influências físicas

dos elementos climáticos. Permite também ao pesquisador ser mais criterioso no momento de coletar e trabalhar os dados meteorológicos.

3.5 Estimativa do coeficiente de tanque (K_t)

A metodologia utilizada para determinar os coeficientes de tanque (K_{t1} e K_{t2}) foi semelhante à adotada por DOORENBOS e PRUITT (1975), ou seja, as relações entre evaporação e evapotranspiração de referência foram organizadas em função de intervalos de frequências observadas de umidade relativa e velocidade do vento (Quadro 3). Foi fixada a bordadura do tanque em 10 metros, valor observado na área do experimento e, normalmente, nas leituras de estações meteorológicas brasileiras.

O K_{t1} é a relação dos valores diários de evaporação (EV), medida no tanque classe "A", com os dados de evapotranspiração de referência medidos nos lisímetros, de acordo com a equação 12.

Quadro 3 - Valores dos coeficientes (K_t) de conversão da evaporação no tanque classe A para evapotranspiração de referência (E_{To}), para médias diárias de velocidade de vento e de umidade relativa

Velocidade do Vento (m/s)	Bordadura (m)	Umidade Relativa (%)		
		Baixa < 40 %	Média 40 - 70 %	Alta > 70 %
< 2,0 m/s (Leve)	10	K_{t1}	K_{t1}	K_{t1}
		K_{t2}	K_{t2}	K_{t2}
2,0 - 5,0 m/s (Moderado)	10	K_{t1}	K_{t1}	K_{t1}
		K_{t2}	K_{t2}	K_{t2}
5,0 - 8,0 m/s (Forte)	10	K_{t1}	K_{t1}	K_{t1}
		K_{t2}	K_{t2}	K_{t2}
> 8,0 m/s (Muito Forte)	10	K_{t1}	K_{t1}	K_{t1}
		K_{t2}	K_{t2}	K_{t2}

$$Kt_1 = \frac{ETo \text{ (lisímetro)}}{EV} \quad \text{eq.12}$$

O Kt2 difere do Kt1 apenas na metodologia utilizada para obtenção dos valores da evapotranspiração de referência, calculada pelo método de Penman-Monteith, ETo (Penman&Monteith), dado pela equação 13.

$$Kt_2 = \frac{ETo \text{ (Penman\&Monteith)}}{EV} \quad \text{eq.13}$$

A equação 14, proposta por PEREIRA et al. (1995), refere-se a um método para determinação do coeficiente de tanque (Kt), sendo utilizada como referência de metodologia nos valores calculados dos coeficientes de tanque, Kt₁ e Kt₂. A teoria formulada para o cálculo do Kt da equação 14 partiu do novo conceito proposto para determinação da evapotranspiração de referência, ou seja, aplicando a equação de Penman-Monteith, em escala diária, para áreas gramadas cobrindo completamente a superfície do solo, representada pela equação 15.

$$Kt = 0,85 \frac{s + \gamma}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_{ag}}\right)} \quad \text{eq.14}$$

em que

rc = resistência no dossel da grama para a difusão do vapor de água direto nas folhas [s m-1];

rag = resistência oferecida pela camada de ar para a troca de vapor de água numa superfície evaporante para o plano z de medidas [s m-1]; e

0,85 = coeficiente máximo (DOORENBOS e PRUITT, 1975).

$$ET_o = \frac{s(Rn_g - G_g) + \frac{C_p \cdot \rho \cdot \Delta e}{r_{ag}}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_{ag}}\right)} \quad \text{eq.15}$$

em que

ρ = densidade do ar [g cm^{-3}];

C_p = calor específico da mistura do ar [$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{°C}^{-1}$];

Rn_g = saldo da densidade do fluxo de radiação de uma superfície com grama [$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$];

G_g = densidade do fluxo de calor do solo [$\text{kJ m}^{-2} \text{s}^{-1}$]; e

Δe = déficit de pressão de vapor para uma altura z qualquer sobre a grama [kPa].

Os resultados descritos por DOORENBOS e PRUITT (1975) mostram que o $Kt_{\max}$ tende para um valor limite de 0,85. Assim, a equação 14 mostra que Kt é dependente da razão rc/r_{ag} e da temperatura do ar, a qual determina o valor de s .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Modelos de regressão para avaliação da evapotranspiração em função dos elementos meteorológicos

Os Quadros 4, 5, 6, 7 e 8 referem-se às análises estatísticas e aos parâmetros da equação de regressão múltipla, conforme a eq. 11. Os dados representam, também, as interações dos valores obtidos nos equipamentos e os estimados pelos métodos com os elementos meteorológicos (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e insolação), para um período de médias diárias, no Município de Governador Dix-Sept Rosado.

Para os dados diários, os instrumentos de medida de evaporação e evapotranspiração (tanque classe "A" e lisímetro de lençol freático constante) não apresentaram resultados satisfatórios (Quadros 4 e 5), ou seja, não se ajustaram de forma aceitável aos elementos meteorológicos coletados em Governador Dix-Sept Rosado, apresentando baixos coeficientes de determinação ajustados (R^2 ajust.) e maiores erros-padrões de estimativas (SEE). Os dados demonstram que o lisímetro de lençol freático constante apresentou resultados semelhantes aos valores medidos em tanque classe "A", porém um pouco superior, em função do menor erro-padrão de estimativa. Esses resultados estão coerentes com a literatura, pois é recomendada a utilização de registros de evapotranspiração com dados médios superiores a cinco dias.

Quadro 4 - Coeficientes de regressão e análise de variância para dados diários de evapotranspiração de referência medida no lisímetro de lençol freático constante, para o Município de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

Coeficientes

$a_0 = 95,8390$	$a_1 = -3,3568$	$a_2 = -1,4778$	$a_3 = 11,4559$	$a_4 = -1,4404$
	$a_{11} = 0,0263$	$a_{12} = 0,0244$	$a_{13} = -0,0806$	$a_{14} = 0,0425$
		$a_{22} = 0,0062$	$a_{23} = -0,0585$	$a_{24} = 0,0145$
			$a_{33} = -0,9660$	$a_{34} = -0,1853$
				$a_{44} = -0,0117$
$R^2 = 0,5475$ $R^2(\text{ajust.}) = 0,4808$ $SEE = 0,5452$				

em que

Subscrito 1 = temperatura média compensada ($^{\circ}\text{C}$);

Subscrito 2 = umidade relativa média compensada (%);

Subscrito 3 = velocidade do vento a 2,0 m (m s^{-1}); e

Subscrito 4 = insolação diária (h).

Estatística da regressão múltipla	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (LISÍMETRO)				
	Soma dos quadrados	GL	Quadrado Médio	F	nível - p
Efeito					
Regressão	34,1613	14	2,4401	8,2089	0,0000
Resíduo	28,2389	95	0,2973		
TOTAL	38,1277				

Quadro 5 - Coeficientes de regressão e análise de variância para dados diários da evaporação medida no tanque classe "A", no Município de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

Coeficientes

$a_0 = 4,8145$	$a_1 = 0,0852$	$a_2 = -0,1572$	$a_3 = 8,0157$	$a_4 = -0,3439$
	$a_{11} = 0,0225$	$a_{12} = -0,0266$	$a_{13} = 0,2162$	$a_{14} = -0,0036$
		$a_{22} = 0,0062$	$a_{23} = -0,0276$	$a_{24} = 0,0206$
			$a_{33} = -2,3366$	$a_{34} = -0,4161$
				$a_{44} = 0,0046$
$R^2 = 0,4202$ R^2 (ajust.) = 0,3348 SEE = 0,9757				

em que

- Subscrito 1 = temperatura média compensada (°C);
- Subscrito 2 = umidade relativa média compensada (%);
- Subscrito 3 = velocidade do vento a 2,0 m ($m\ s^{-1}$); e
- Subscrito 4 = insolação diária (h).

Estatística da regressão múltipla	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (TANQUE CLASSE "A")				
Efeito	Soma dos quadrados	GL	Quadrado Médio	F	nível - p
Regressão	65,5513	14	4,6822	4,9183	0,0000
Resíduo	90,4397	95	0,9520		
TOTAL	155,9910				

Quadro 6 - Coeficientes de regressão e análise de variância para dados diários de evapotranspiração de referência mmd^{-1} , estimados pelo método tanque classe "A" – FAO, no Município de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

Coeficientes

$a_0 = 38,9175$	$a_1 = -0,8020$	$a_2 = -0,8076$	$a_3 = 7,0864$	$a_4 = -0,8365$
	$a_{11} = 0,0034$	$a_{12} = -0,0058$	$a_{13} = 0,0749$	$a_{14} = 0,0189$
		$a_{22} = 0,0047$	$a_{23} = -0,0354$	$a_{24} = 0,0139$
			$a_{33} = -1,3736$	$a_{34} = -0,2250$
				$a_{44} = 0,0040$
$R^2 = 0,2559$ $R^2(\text{ajust.}) = 0,1463$ $\text{SEE} = 0,8329$				

em que

Subscrito 1 = temperatura média compensada ($^{\circ}\text{C}$);

Subscrito 2 = umidade relativa média compensada (%);

Subscrito 3 = velocidade do vento a 2,0 m (m s^{-1}); e

Subscrito 4 = insolação diária (h).

Estatística da regressão múltipla	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (FAO - TANQUE CLASSE "A")				
Efeito	Soma dos quadrados	GL	Quadrado Médio	F	nível - p
Regressão	22,6670	14	1,6191	2,3342	0,0082
Resíduo	65,8949	95	0,6936		
TOTAL	88,5619				

Quadro 7 - Coeficientes de regressão e análise de variância para dados diários de evapotranspiração de referência mmd^{-1} , estimados pelo método de Penman-Monteith, para o Município de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

Coeficientes

$a_0 = 36,2310$	$a_1 = -0,6536$	$a_2 = -0,4450$	$a_3 = -6,9715$	$a_4 = -1,0917$
	$a_{11} = -0,0011$	$a_{12} = 0,0009$	$a_{13} = 0,1843$	$a_{14} = 0,0355$
		$a_{22} = 0,0023$	$a_{23} = 0,0466$	$a_{24} = 0,0064$
			$a_{33} = -0,1478$	$a_{34} = -0,0356$
				$a_{44} = -0,0018$
$R^2 = 0,7872$ $R^2(\text{ajust.}) = 0,7559$ $SEE = 0,2922$				

em que

Subscrito 1 = temperatura média compensada ($^{\circ}\text{C}$);

Subscrito 2 = umidade relativa média compensada (%);

Subscrito 3 = velocidade do vento a 2,0 m (m s^{-1}); e

Subscrito 4 = insolação diária (h).

Estatística da regressão múltipla	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (PENMAN-MONTEITH)				
Efeito	Soma dos quadrados	GL	Quadrado Médio	F	nível - p
Regressão	30,0154	14	2,1440	25,1069	0,0000
Resíduo	8,1124	95	0,0854		
TOTAL	38,1278				

Quadro 8 - Coeficientes de regressão e análise de variância para dados diários de evapotranspiração de referência mmd^{-1} , estimados pelo método de FAO Blaney-Criddle, para o Município de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

Coeficientes

$a_0 = 16,6067$	$a_1 = -0,9489$	$a_2 = 0,2330$	$a_3 = -13,1227$	$a_4 = 0,1849$
	$a_{11} = 0,0269$	$a_{12} = -0,0172$	$a_{13} = 0,3778$	$a_{14} = 0,0164$
		$a_{22} = 0,0012$	$a_{23} = 0,0663$	$a_{24} = -0,0037$
			$a_{33} = -0,1046$	$a_{34} = -0,1045$
				$a_{44} = -0,0066$
$R^2 = 0,8487$ $R^2(\text{ajust.}) = 0,8264$ $SEE = 0,2488$				

em que

Subscrito 1 = temperatura média compensada ($^{\circ}\text{C}$);

Subscrito 2 = umidade relativa média compensada (%);

Subscrito 3 = velocidade do vento a 2,0 m (m s^{-1}); e

Subscrito 4 = insolação diária (h).

Estatística da regressão múltipla	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (FAO BLANEY-CRIDDLE)				
Efeito	Soma dos quadrados	GL	Quadrado Médio	F	nível - p
Regressão	32,9820	14	2,3559	38,0590	0,0000
Resíduo	5,88056	95	0,0619		
TOTAL	38,8626				

Outros aspectos podem ser considerados em função do tipo de manejo desses equipamentos. Não foi adotado, nos lisímetros, nenhum critério para qualidade da água. Assim, com o tempo, observou-se intenso processo de salinização, o que inviabilizou a continuação do trabalho. O Quadro 6 refere-se aos valores estimados pelo método do tanque classe "A" - FAO. Os resultados encontrados evidenciam que foi o método de menor confiança estatística, ou seja, apresentou coeficientes de determinação ajustados (R^2 ajust.) e erro-padrão de estimativa (SEE) iguais a 0,1463 e 0,8329, respectivamente. Tal resultado pode ser encontrado na literatura, pois essa metodologia só difere dos registros de evaporação no tanque classe "A" devido à conversão desses valores em ETo por um coeficiente K_t tabelado por DOORENBOS e PRUITT (1975). Para este estudo, esses coeficientes tabelados fazem com que os resultados não melhorem, dificultando o ajustamento dos valores de ETo aos elementos climáticos.

Nos Quadros 7 e 8 estão os resultados referentes à evapotranspiração de referência, estimados pelos métodos de Penman-Monteith e Blaney-Criddle (FAO). De acordo com os resultados, foram os métodos de melhor ajustamento aos elementos do clima em períodos diários, apresentando maiores coeficientes de determinação ajustados (R^2 ajust.) e menores erros-padrões de estimativas (SEE), sendo 0,7559 e 0,2922; e 0,8264 e 0,2488, respectivamente. O método Blaney-Criddle (FAO) foi desenvolvido com dados de regiões semi-áridas dos EUA. Nas condições de clima brasileiro, a literatura tem mostrado excelentes resultados na determinação da evapotranspiração.

Os Quadros 9, 10, 11, 12 e 13 referem-se à mesma análise, com médias utilizadas de cinco dias para todos os elementos climáticos e valores medidos e estimados de evaporação e evapotranspiração, respectivamente. Os resultados da análise de regressão mantiveram a mesma seqüência na eficiência dos métodos para valores diários, ou seja, o modelo de Blaney-Criddle (FAO) foi o mais representativo no ajuste da ETo aos elementos climáticos, seguido do modelo de Penman-Monteith, do lisímetro de lençol freático constante, da evaporação no tanque classe "A" e do método tanque classe "A" - FAO. Foi verificado aumento significativo na eficiência estatística quando se trabalhou com médias de cinco dias, uma vez que elas diminuem significativamente a variância

Quadro 9 - Coeficientes de regressão e análise de variância para dados médios de cinco dias, para a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}), medida em lisímetros, no Município de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

Coeficientes

$a_0 = -434,9320$	$a_1 = -20,8210$	$a_2 = 128,8680$	$a_3 = 59,5949$	$a_4 = 26,7474$
	$a_{11} = -0,4620$	$a_{12} = 11,7860$	$a_{13} = 2,3670$	$a_{14} = -0,5700$
		$a_{22} = -203,8420$	$a_{23} = -23,9640$	$a_{24} = -18,7530$
			$a_{33} = 0,1230$	$a_{34} = 0,2950$
				$a_{44} = -0,1850$
$R^2 = 0,8356$ $R^2(\text{ajust.}) = 0,5069$ $SEE = 0,3550$				

em que

Subscrito 1 = temperatura média compensada ($^{\circ}\text{C}$);

Subscrito 2 = umidade relativa média compensada (%);

Subscrito 3 = velocidade do vento a 2,0 m (m s^{-1}); e

Subscrito 4 = insolação diária (h).

Estatística da regressão múltipla	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (LISÍMETRO - 5 DIAS)				
Efeito	Soma dos quadrados	GL	Quadrado Médio	F	nível - p
Regressão	4,4839	14	0,3203	2,5418	0,1091
Resíduo	0,8820	7	0,1260		
TOTAL	5,3659				

Quadro 10 - Coeficientes de regressão e análise de variância para dados médios de cinco dias, para a evaporação mm d^{-1} , medida em tanque classe "A", para o Município de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

Coeficientes

$a_0 = -116,600$	$a_1 = 15,879$	$a_2 = -99,694$	$a_3 = -51,516$	$a_4 = -6,500$
	$a_{11} = -0,337$	$a_{12} = 0,671$	$a_{13} = 1,707$	$a_{14} = 0,039$
		$a_{22} = 36,521$	$a_{23} = -55,877$	$a_{24} = 11,478$
			$a_{33} = 11,634$	$a_{34} = 0,224$
				$a_{44} = -0,096$
$R^2 = 0,8628$ $R^2(\text{ajust.}) = 0,5883$ $\text{SEE} = 0,4093$				

em que

Subscrito 1 = temperatura média compensada ($^{\circ}\text{C}$);

Subscrito 2 = umidade relativa média compensada (%);

Subscrito 3 = velocidade do vento a 2,0 m (m s^{-1}); e

Subscrito 4 = insolação diária (h).

Estatística da regressão múltipla	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (TANQUE CLASSE "A" - 5 DIAS)				
Efeito	Soma dos quadrados	GL	Quadrado Médio	F	nível - p
Regressão	7,3728	14	0,526625	3,1434	0,0666
Resíduo	1,1727	7	0,167531		
TOTAL	8,5455				

Quadro 11 - Coeficientes de regressão e análise de variância para dados médios de cinco dias de evapotranspiração de referência, em mm d^{-1} , estimada pelo método de Penman-Monteith, para o Município de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

Coeficientes

$a_0 = -22,088$	$a_1 = 7,7640$	$a_2 = -186,072$	$a_3 = -12,925$	$a_4 = -2,897$
	$a_{11} = -0,157$	$a_{12} = 0,215$	$a_{13} = 0,7070$	$a_{14} = -0,260$
		$a_{22} = 108,718$	$a_{23} = -9,711$	$a_{24} = 6,269$
			$a_{33} = -1,079$	$a_{34} = -0,242$
				$a_{44} = -0,019$
$R^2 = 0,9387$ $R^2 \text{ (ajust.)} = 0,8162$ $SEE = 0,1701$				

em que

Subscrito 1 = temperatura média compensada ($^{\circ}\text{C}$);

Subscrito 2 = umidade relativa média compensada (%);

Subscrito 3 = velocidade do vento a 2,0 m (m s^{-1}); e

Subscrito 4 = insolação diária (h).

Estatística da regressão múltipla	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (PENMAN-MONTEITH -5 DIAS)				
	Soma dos quadrados	GL	Quadrado Médio	F	nível - p
Regressão	3,1046	14	0,2218	7,6620	0,0058
Resíduo	0,2026	7	0,0289		
TOTAL	3,3071				

Quadro 12 - Coeficientes de regressão e análise de variância para dados médios de cinco dias, para o modelo Blaney-Criddle (FAO), a fim de estimar a evapotranspiração de referência, em mm d^{-1} , para o Município de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

Coeficientes

$a_0 = 288,155$	$a_1 = -10,121$	$a_2 = -219,794$	$a_3 = -20,7240$	$a_4 = -12,714$
	$a_{11} = 0,148$	$a_{12} = -0,5680$	$a_{13} = -0,3830$	$a_{14} = 0,2990$
		$a_{22} = 100,703$	$a_{23} = 34,2780$	$a_{24} = 6,1670$
			$a_{33} = 3,4870$	$a_{34} = 0,0620$
				$a_{44} = -0,3200$
$R^2 = 0,9705$ $R^2(\text{ajust.}) = 0,9114$ $\text{SEE} = 0,1104$				

em que

Subscrito 1 = temperatura média compensada ($^{\circ}\text{C}$);

Subscrito 2 = umidade relativa média compensada (%);

Subscrito 3 = velocidade do vento a 2,0 m (m s^{-1}); e

Subscrito 4 = insolação diária (h).

Estatística da regressão múltipla	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (FAO BLANEY-CRIDDLE - 5 DIAS)				
	Soma dos quadrados	GL	Quadrado Médio	F	nível - p
Efeito					
Regressão	2,8040	14	0,2003	16,4352	0,0005
Resíduo	0,0853	7	0,0122		
TOTAL	2,8893				

Outros aspectos podem ser considerados em função do tipo de manejo desses equipamentos. Não foi adotado, nos lisímetros, nenhum critério para qualidade da água. Assim, com o tempo, observou-se intenso processo de salinização, o que inviabilizou a continuação do trabalho. O Quadro 6 refere-se aos valores estimados pelo método do tanque classe "A" - FAO. Os resultados encontrados evidenciam que foi o método de menor confiança estatística, ou seja, apresentou coeficientes de determinação ajustados (R^2 ajust.) e erro-padrão de estimativa (SEE) iguais a 0,1463 e 0,8329, respectivamente. Tal resultado pode ser encontrado na literatura, pois essa metodologia só difere dos registros de evaporação no tanque classe "A" devido à conversão desses valores em ETo por um coeficiente Kt tabelado por DOORENBOS e PRUITT (1975). Para este estudo, esses coeficientes tabelados fazem com que os resultados não melhorem, dificultando o ajustamento dos valores de ETo aos elementos climáticos.

Nos Quadros 7 e 8 estão os resultados referentes à evapotranspiração de referência, estimados pelos métodos de Penman-Monteith e Blaney-Criddle (FAO). De acordo com os resultados, foram os métodos de melhor ajustamento aos elementos do clima em períodos diários, apresentando maiores coeficientes de determinação ajustados (R^2 ajust.) e menores erros-padrões de estimativas (SEE), sendo 0,7559 e 0,2922; e 0,8264 e 0,2488, respectivamente. O método Blaney-Criddle (FAO) foi desenvolvido com dados de regiões semi-áridas dos EUA. Nas condições de clima brasileiro, a literatura tem mostrado excelentes resultados na determinação da evapotranspiração.

Os Quadros 9, 10, 11, 12 e 13 referem-se à mesma análise, com médias utilizadas de cinco dias para todos os elementos climáticos e valores medidos e estimados de evaporação e evapotranspiração, respectivamente. Os resultados da análise de regressão mantiveram a mesma sequência na eficiência dos métodos para valores diários, ou seja, o modelo de Blaney-Criddle (FAO) foi o mais representativo no ajuste da ETo aos elementos climáticos, seguido do modelo de Penman-Monteith, do lisímetro de lençol freático constante, da evaporação no tanque classe "A" e do método tanque classe "A" - FAO. Foi verificado aumento significativo na eficiência estatística quando se trabalhou com médias de cinco dias, uma vez que elas diminuem significativamente a variância dos dados e são mais representativas. O lisímetro e o tanque classe "A"

(Quadros 9 e 10) apresentaram resultados satisfatórios; entretanto, os métodos Blaney-Criddle (FAO) e de Penman-Monteith foram bem superiores (Quadros 11 e 12). O Quadro 13 refere-se ao método de FAO-tanque classe "A", que apresentou bom resultado, porém não foi suficiente para ser mais eficiente do que os outros métodos citados anteriormente.

4.2. Análise de trilha

Desdobrou-se, por meio de análise de trilha, a correlação de cada variável independente, ou seja, os elementos meteorológicos insolação (n), umidade relativa (UR), velocidade do vento (U) e temperatura (T), com a variável dependente evapotranspiração de referência, em seus efeitos diretos e indiretos, para verificar a influência de cada elemento meteorológico sobre a evapotranspiração medida e, ou, estimada por diferentes metodologias.

Os dados dos Quadros 14 e 15 fornecem os efeitos diretos e indiretos de cada elemento meteorológico sobre a evapotranspiração, em períodos de médias diárias e de cinco dias, respectivamente. Os efeitos diretos são apresentados sublinhados e estão em negrito quando o seu valor for superior ao da variável residual e a variável explicativa correspondente tenha apresentado correlação significativa a 1% ou a 5% de probabilidade pelo teste t. Os resultados das correlações parciais, determinados pela análise de trilha (*path analysis*) para evapotranspiração, foram semelhantes aos resultados do modelo de regressão múltipla de componentes lineares e quadráticos estudados anteriormente, isto é, foi mantida a mesma ordem em função do ajustamento das metodologias aos elementos climáticos, observando principalmente os coeficientes de determinação (R^2). Nesta análise de correlação parcial, foi observada a mesma tendência de melhorar o ajustamento dos dados quando se trabalha com médias de cinco dias.

Quadro 14 - Desdobramento das correlações em efeitos diretos e indiretos¹ dos elementos meteorológicos² sobre a evapotranspiração, em mm d⁻¹, medida e estimada por diferentes metodologias, para médias diárias de dados, na região agrícola de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

LISÍMETRO	T	UR	U	n	TOTAL ³
T	<u>-0,1033</u>	-0,0067	0,0574	-0,0222	-0,0749 ^{ns}
UR	0,0242	<u>0,0287</u>	-0,0341	-0,1569	-0,1382 ^{ns}
U	-0,0260	-0,0043	<u>0,2282</u>	0,1346	0,3325**
n	0,0039	-0,0076	0,0521	<u>0,5893</u>	0,6377**
Coeficiente de determinação: 0,4555			Efeito da variável residual: 0,7379		
PENMAN-MONTEITH	T	UR	U	n	TOTAL
T	<u>0,0961</u>	0,0136	0,0357	-0,0301	0,1154 ^{ns}
UR	-0,0225	<u>-0,0584</u>	-0,0212	-0,2126	-0,3147**
U	0,0242	0,0088	<u>0,1421</u>	0,1824	0,3574**
n	-0,0036	0,0155	0,0325	<u>0,7985</u>	0,8429**
Coeficiente de determinação: 0,7533			Efeito da variável residual: 0,4967		
EVAPORAÇÃO (TCA)	T	UR	U	n	TOTAL
T	<u>0,090</u>	0,0242	0,0500	-0,0168	0,1475 ^{ns}
UR	-0,0211	<u>-0,1034</u>	-0,0297	-0,1186	-0,2728**
U	0,0227	0,0154	<u>0,1989</u>	0,1018	0,3388**
n	-0,0034	0,0275	0,0454	<u>0,4455</u>	0,5151**
Coeficiente de determinação: 0,3384			Efeito da variável residual: 0,8134		
FAO - TANQUE	T	UR	U	n	TOTAL
T	<u>-0,4006</u>	-0,0162	0,2537	0,0876	-0,0755 ^{ns}
UR	-0,0951	<u>-0,0683</u>	0,1310	-0,0705	-0,1029 ^{ns}
U	-0,2685	-0,0236	<u>0,3785</u>	-0,0097	-0,0767 ^{ns}
n	-0,1343	0,0184	-0,0140	<u>0,2613</u>	0,1315 ^{ns}
Coeficiente de determinação: 0,1007			Efeito da variável residual: 0,9484		
BLANEY-CRIDDLE (FAO)	T	UR	U	n	TOTAL
T	<u>0,2725</u>	0,0458	0,0376	-0,0257	0,3302**
UR	-0,0637	<u>-0,1959</u>	-0,2237	-0,1818	-0,4637**
U	0,0685	0,0293	<u>0,1497</u>	0,1559	0,4034**
n	-0,0103	0,0522	0,0342	<u>0,6826</u>	0,7587**
Coeficiente de determinação: 0,7591			Efeito da variável residual: 0,4908		

^{1/} Leituras dos efeitos diretos na diagonal principal (sublinhado) e dos efeitos indiretos na horizontal (não-sublinhado)

^{2/} T: temperatura média compensada;

UR: umidade relativa média compensada;

U: velocidade do vento; e

IN: insolação.

^{3/} Coeficiente de correlação de Pearson.

^{ns} Não-significativo pelo teste t.

** Significativo a 1% pelo teste t

Quadro 15 - Desdobramento das correlações em efeitos diretos e indiretos¹ dos elementos meteorológicos² sobre a evapotranspiração (mmd⁻¹) medida e estimada por diferentes metodologias, para médias de cinco dias de dados, na região agrícola de Governador Dix-Sept Rosado (RN)

LISÍMETRO	T	UR	U	n	TOTAL ³
T	<u>-0,1438</u>	-0,0446	0,0371	-0,0054	-0,1567 ^{ns}
UR	0,04114	<u>0,1559</u>	-0,0594	-0,3973	-0,2597 ^{ns}
U	-0,0418	-0,0726	<u>0,1276</u>	0,2893	0,3025 ^{ns}
n	0,0009	-0,0730	0,0435	0,8485	0,8199**
Coeficiente de determinação: 0,7163			Efeito da variável residual: 0,5326		
PENMAN-MONTEITH	T	UR	U	n	TOTAL
T	<u>-0,0014</u>	0,0834	-0,0003	-0,0047	0,0770 ^{ns}
UR	0,0004	<u>-0,2916</u>	0,0004	-0,3473	-0,6381**
U	-0,0004	0,1358	<u>-0,0009</u>	0,2529	0,3874*
n	0,0000	0,1366	-0,0003	0,7416	0,8779**
Coeficiente de determinação: 0,8367			Efeito da variável residual: 0,4041		
EVAPORAÇÃO (TCA)	T	UR	U	n	TOTAL
T	<u>0,3443</u>	0,0058	0,0474	-0,0035	0,3939 ^{ns}
UR	-0,0985	<u>-0,0202</u>	-0,0758	-0,2590	-0,4535*
U	0,1001	0,0093	<u>0,1628</u>	0,1886	0,4610**
n	-0,0022	0,0095	0,0555	<u>0,5530</u>	0,6158**
Coeficiente de determinação: 0,5604			Efeito da variável residual: 0,6630		
FAO - TANQUE	T	UR	U	n	TOTAL
T	<u>0,3266</u>	0,0087	-0,0483	-0,0041	0,2829 ^{ns}
UR	-0,0934	<u>-0,0303</u>	0,0773	-0,2968	-0,3433 ^{ns}
U	0,0950	0,0141	<u>-0,1660</u>	0,2162	0,1593 ^{ns}
n	-0,0021	0,0142	-0,0566	<u>0,6339</u>	0,5894**
Coeficiente de determinação: 0,4500			Efeito da variável residual: 0,7416		
BLANEY-CRIDDLE (FAO)	T	UR	U	n	TOTAL
T	<u>0,2583</u>	0,0840	0,0429	-0,0040	0,3812 ^{ns}
UR	-0,0739	<u>-0,2935</u>	-0,0687	-0,2933	-0,7294**
U	0,0752	0,1367	<u>0,1475</u>	0,2136	0,5729**
n	-0,0016	0,1374	0,0502	0,6263	0,8124**
Coeficiente de determinação: 0,9057			Efeito da variável residual: 0,3068		

^{1/} Leituras dos efeitos diretos na diagonal principal (sublinhado) e dos efeitos indiretos na horizontal (não-sublinhado)

^{2/} T: temperatura média compensada;
UR: umidade relativa média compensada;
U: velocidade do vento; e
n: insolação.

^{3/} Coeficiente de correlação de Pearson.

^{ns} Não-significativo pelo teste t.

* Significativo a 5% pelo teste t.

** Significativo a 1% pelo teste t

O método Blaney e Criddle (FAO) foi o que se ajustou melhor aos elementos climáticos da região em estudo, apresentando maior coeficiente de determinação (R^2) entre os métodos avaliados, sendo 0,76 e 0,91 para médias diárias e de cinco dias, respectivamente. A insolação (n) foi o elemento do clima de maior contribuição para evapotranspiração, pois os resultados demonstram maior efeito direto sobre a variável principal (ET_o), tanto para os valores diários como para as médias de cinco dias. Com relação aos outros elementos estudados, observou-se que só os dados de média de cinco dias apresentaram contribuições, mas de forma indireta, ou seja, associados aos elementos estudados (T , U e UR).

O método Penman-Monteith, padrão FAO, apresentou o segundo melhor comportamento no ajustamento dos dados, tanto diário como nas médias de cinco dias. A insolação foi o elemento do clima que apresentou maior efeito direto sobre a variável principal. O efeito indireto só foi observado nas médias de cinco dias através do elemento climático umidade relativa (UR). A velocidade do vento (U) e temperatura (T) apresentaram coeficiente de trilha relativamente baixo, não sendo possível explicar variações na variável principal.

Os registros de evapotranspiração medidos nos lisímetros e no tanque classe "A", juntamente com a ET_o estimada pelo método tanque classe "A" - (FAO), apresentaram baixos coeficientes de determinação, o suficiente para que os elementos climáticos em estudo não ocasionassem efeitos diretos ou indiretos na variável principal, nos períodos estudados. Só se observou efeito direto da insolação no lisímetro nos períodos de médias de cinco dias. Estes resultados estão de acordo com aqueles apresentados por SEDIYAMA (1996) e PEREIRA et al. (1997), que citam a baixa eficiência desses equipamentos (lisímetro de lençol freático constante e tanque classe "A") nas medidas de ET_o em escala diária, recomendando o uso dos mesmos em períodos superiores a cinco dias. O coeficiente de tanque (K_t) proposto por DOORENBOS e PRUITT (1977), que converte os registros de evaporação, não melhorou o ajustamento da ET_o aos elementos meteorológicos, piorando significativamente os valores brutos do tanque classe "A".

Em geral, a insolação (n) foi o elemento climático de maior contribuição no processo de evapotranspiração, por apresentar maiores coeficientes de determinação, exceção feita apenas ao método tanque classe "A" (FAO). Quando

a análise de trilha apresentou péssimo ajustamento aos dados meteorológicos, a insolação não causou efeito direto e nem indireto nos processos de evaporação e evapotranspiração. Para médias de cinco dias, este elemento mostrou-se altamente significativo (em nível de 1%), sendo o elemento que causa efeito direto no processo de ET.

A temperatura média compensada foi o elemento que apresentou menores índices de efeitos diretos nos processos, para todos os métodos e todas as escalas de tempo estudadas, exceção feita ao método Blaney e Criddle (FAO) em médias de cinco dias. Pode-se observar que, com exceção do método citado anteriormente, todos os outros valores do coeficiente de correlação total da análise de trilha não foram significativos pelo teste *t*, impossibilitando a explicação da relação individual deste elemento com a evapotranspiração.

4.3. Coeficiente de tanque para o tanque classe "A" para o semi-árido de Mossoró - RN

No Quadro 16 são apresentados os coeficientes médios de tanque Kt_1 e Kt_2 calculados para o local de estudo. No Quadro 17 verifica-se que 92,4% dos coeficientes Kt_1 e Kt_2 referem-se ao intervalo de 40-70% de umidade relativa (UR) e a ventos (U) de velocidade inferior a 2 m s^{-1} . Observa-se que os coeficientes estabelecidos por DOORENBOS e PRUITT (1977) alteram-se nas diferentes regiões do mundo, em função do clima.

As Figuras 4 e 5 referem-se às distribuições diárias dos coeficientes estimados (Kt_1 e Kt_2) e tabelados pela FAO. Existe uma forte tendência de os Kt tabelados superestimarem os valores de ETo estimados pelo tanque classe "A", como é citado na literatura, pois a maioria dos coeficientes estimados (Kt_1 e Kt_2) está abaixo dos valores referentes aos Kt tabelados. Essas observações sugerem a possibilidade de os coeficientes tabelados causarem erros na estimativa da ETo . O Kt máximo observado para o lisímetro ($Kt_{1\text{max}}$) foi de 0,73 e, para o método de Penman-Monteith ($Kt_{2\text{max}}$), de 0,64. Essa diferença pode ser justificada pelas características fisiológicas da cultura utilizada nos lisímetros, com relação ao seu desenvolvimento e aos parâmetros de resistência (estomática e aerodinâmica), que não têm correspondência com o novo conceito para evapotranspiração de referência proposto pela FAO, em 1990.

A qualidade da água foi um outro fator de grande importância, pois propiciou a salinização dos lisímetros, alterando as características do solo e o comportamento fisiológico da cultura. O método de Penman-Monteith, de acordo com ALLEN et al. (1989), é o que estima a ETo em áreas tropicais com melhor resultado, apresentando menores erros e desvios quando comparado com os lisímetros de pesagem de precisão. Devido aos problemas operacionais e às limitações dos lisímetros de lençol freático constante, sugere-se que o método de maior confiança seja aquele baseado no coeficiente máximo estimado pela equação de Penman-Monteith.

Quadro 16 - Valores de coeficiente de conversão da evaporação no tanque classe "A" (Kt_1 e Kt_2) para evapotranspiração de referência (ETo), mm d^{-1}

Velocidade do vento (m s^{-1})	Bordadura (m)	Umidade relativa (%)			
		Baixa (< 40)	Média (40 - 70)	Alta (> 70)	
< 2,0 (Leve)	10	-	0,67 ¹ 0,63 ²	0,69 ¹	0,63 ²
2,0 - 5,0 (Moderado)	10	-	0,73 ¹ 0,64 ²	0,70 ¹	0,60 ²
5,0 - 8,0 (Forte)	10	-	-	-	-
> 8,0 (Muito Forte)	10	-	-	-	-

1. Valores de Kt medidos pela relação da evaporação com os dados do lisímetro de lençol freático constante.

2. Valores de Kt estimados pela relação da evaporação com os dados do modelo de Penman-Monteith.

Quadro 17 - Frequência observada para os intervalos de velocidade do vento (m s^{-1}) e umidade relativa (%) e o Kt médio para cada classe estudada

U. relativa (%)	Vel. do vento (m s^{-1})	Kt -Lis. (1)	Kt -PM (2)	Observações	%
40 - 70	< 2,0	0,67	0,63	158	92,40
> 70	< 2,0	0,69	0,63	4	2,34
40 - 70	2,0 - 5,0	0,73	0,64	8	4,68
> 70	2,0 - 5,0	0,70	0,60	1	0,58
TOTAL				171	100,0

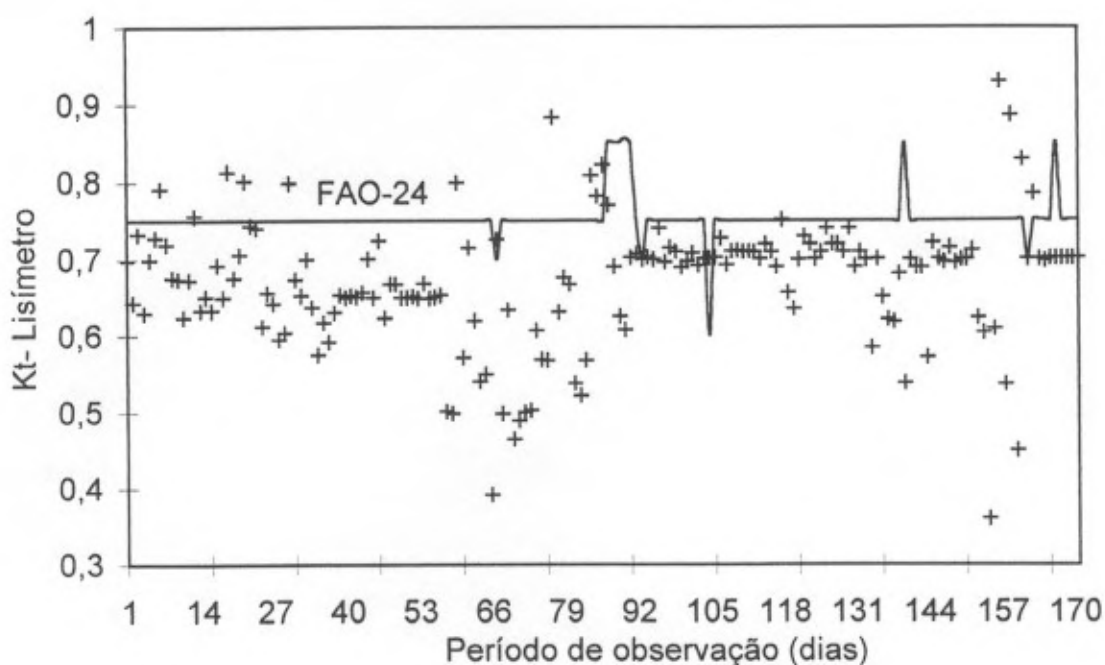


Figura 4 - Distribuição temporal dos coeficientes de tanque medidos em lisímetros de lençol freático constante, para a região agrícola de Mossoró - RN.

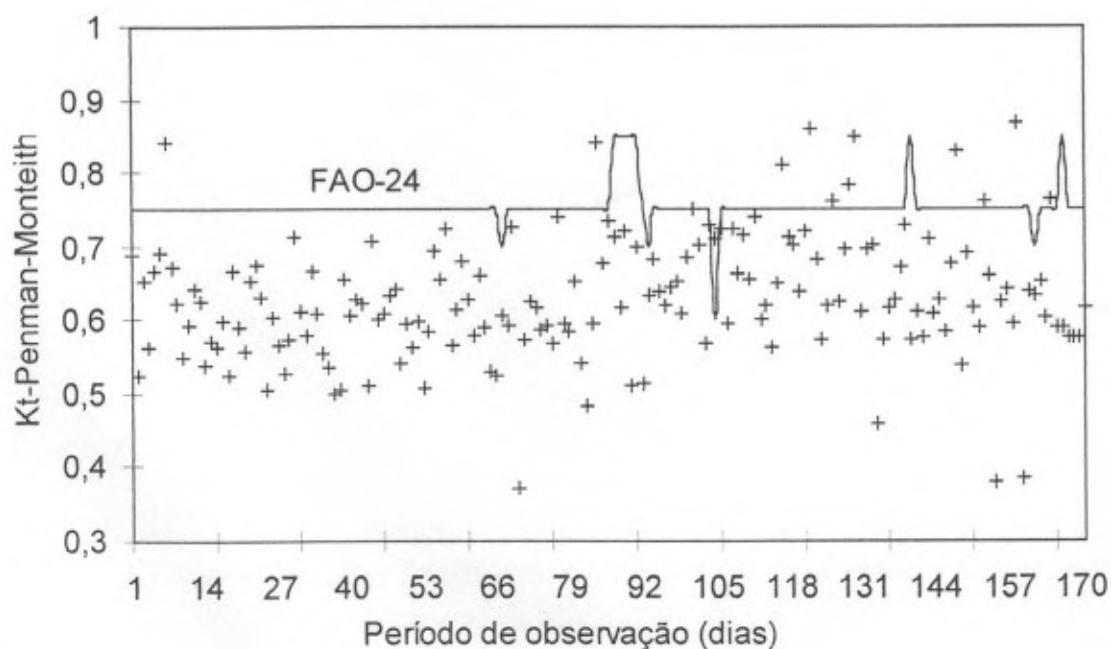


Figura 5 - Distribuição temporal dos coeficientes de tanque estimados pelo modelo de Penman-Monteith, para a região agrícola de Mossoró - RN.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivos avaliar a eficácia do uso do método de Penman-Monteith (FAO), do lisímetro de lençol freático constante e do evaporímetro tanque classe "A" e estimar os coeficientes de tanque (K_t) para a região agrícola de Mossoró - RN. Para isso, foram estudadas as inter-relações da evapotranspiração com os elementos climáticos, utilizando uma formulação quadrática baseada numa regressão de quadrados mínimos; para avaliar os efeitos direto e indireto de cada elemento climático coletado, utilizou-se a análise de trilha. Em ambas as análises a evapotranspiração medida e a estimada foram as variáveis dependentes (Y), e os elementos do clima, as variáveis independentes (X). Os dados foram estudados para períodos de médias diárias e de cinco dias.

De acordo com os resultados, o modelo de Penman-Monteith apresentou-se muito superior aos instrumentos de medição da evapotranspiração no ajustamento dos elementos climáticos à evapotranspiração de referência (ET_o), tanto em valores médios diários como em valores médios de cinco dias, respectivamente. Para os valores de cinco dias, os equipamentos apresentaram melhoria substancial no ajustamento dos dados. Os modelos determinados na análise de trilha foram semelhantes aos resultados do modelo quadrático, porém esta evidencia que a insolação é o principal elemento no processo de ET_o , tanto como efeito direto quanto indireto (associado com outros elementos em estudo). Na determinação do coeficiente do tanque (K_t), foi observado que, na tabela de

Kt proposta para o município em estudo, o coeficiente de tanque máximo foi 0,73, inferior ao valor determinado pela FAO, que é de 0,85.

Com base no que foi exposto, pode-se concluir que:

1. Para valores de médias diárias e de cinco dias dos elementos meteorológicos, o modelo de regressão mostrou que a equação Penman-Monteith (FAO) que estimou a evapotranspiração de referência foi mais eficiente e confiável do que o lisímetro de lençol freático constante.
2. Registros de evaporação e evapotranspiração medidos em lisímetros de lençol freático constante e em tanque classe "A" não apresentaram resultados satisfatórios para os valores de médios diárias, porém, com o uso de médias de cinco dias, estes equipamentos apresentaram resultados confiáveis.
3. Os resultados indicaram que, nas condições dos períodos estudados, a insolação foi o elemento meteorológico de maior influência no processo de evapotranspiração, sendo causa direta na maioria das metodologias estudadas, exceção feita ao modelo tanque classe "A" (FAO), em períodos de cinco dias. A temperatura média compensada foi o elemento que apresentou menor efeito no processo de evapotranspiração, mostrando menores coeficientes de correlação e, na maioria das vezes, não sendo significativo. Os elementos umidade relativa e velocidade do vento, na maioria das vezes, apresentaram causa indireta.
4. Para a região semi-árida do Nordeste brasileiro, trabalhar valores de médias de cinco dias (ou períodos superiores) para os elementos meteorológicos é uma medida prática para melhorar o ajuste destes elementos aos valores medidos e estimados da evapotranspiração. Tal fato pode ser observado de forma semelhante nas metodologias adotadas para avaliar o grau de ajustamento dos elementos climáticos (modelo de regressão com componentes lineares e quadráticos e análise de trilha).
5. No presente estudo, foi observado que o modelo tanque classe "A" (FAO) apresentou forte tendência em superestimar a ETo , pois, nas mesmas condições climáticas, a maioria dos Kt's calculados e medidos por Penman-Monteith e lisímetro foram inferiores aos coeficientes estabelecidos pela FAO. Essas observações sugerem que os coeficientes tabelados podem causar erros na estimativa da ETo . O Kt máximo observado para o lisímetro (Kt_{1max}) foi de 0,73 e, para o modelo de Penman-Monteith (Kt_{2max}), de 0,64. Esta

diferença pode ser justificada pelas características fisiológicas da cultura utilizada nos lisímetros e pela qualidade da água.

6. Devido aos problemas operacionais e às limitações dos lisímetros de lençol freático constante, sugere-se que o modelo para estimar o coeficiente de tanque de maior confiança seja aquele baseado no coeficiente máximo estimado pela equação de Penman-Monteith (FAO).
7. De modo geral, pode-se observar que a metodologia baseada em equações empíricas e combinadas para determinar a evapotranspiração de referência (Blaney-Criddle e Penman-Monteith) é mais satisfatória do que a adoção do uso de instrumentos pouco sensíveis, como: lisímetro de lençol freático constante e tanque classe "A". Exceção deve ser feita ao modelo tanque classe "A" (FAO).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G, JESSEN, M. E, WRIGHT, J. L., BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-62. 1989.
- ALLEN, R. G. A Penman for La seasons. **Journal of Irrigation Water and Drainage Engineering**, NewYork, v. 112, n. 4, p. 348-68, 1986.
- AMARO FILHO, J., AMARO, L. M., MEDINA, B. F. **Estimativa de evapotranspiração e probabilidade de chuva para o município de Mossoró - RN**. Mossoró, RN: Coleção Mossoroense, 1981. v.175, 48p.
- AMORIM, M. C. **Análise de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência, em áreas ribeirinhas do rio Mossoró, na região Oeste do Rio Grande do Norte**. Mossoró: ESAM, 1994. 93 p. Monografia (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Escola Superior de Agricultura de Mossoró, 1994.
- AMORIM, M. C., SOUZA, G. H. F., SAMPAIO, S. C., KOBAYASHI, M. K. Avaliação do lisímetro e métodos para medidas da ETo , em uma localidade do Rio Grande do Norte. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, CONGRESO LATINOAMERICANO DE INGENIERE AGRÍCOLA, 4, 1996, Bauru, SP. **Anais...** Bauru, SP: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. CD-rom.
- AMORIM NETO, M. S., OLIVEIRA, C. A. V., SILVA, D. D. Avaliação de diferentes métodos para estimativa da evapotranspiração potencial em regiões semi-áridas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 4, 1985, Londrina. **Anais...** Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, IAPAR, 1985. p. 211-29.

- ASSIS, F. N. **O uso do evapotranspirômetro no estudo de algumas relações entre a evapotranspiração medida e estimada.** Piracicaba: ESALQ, 1978. 73p. Tese (Mestrado em Agrometeorologia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1978.
- AUGUSTO, S. G. **Irrigação complementar nos diferentes estádios fenológicos da cultura do cacau (*Theobroma cacao* L.).** Viçosa, MG: UFV, 1997. 127 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- BARROS, A. H. C., AMORIM, M. C., SAMPAIO, S. C., et al. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração para localidade de Caruaru - PE. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 25, CONGRESO LATINOAMERICANO de INGENIERE AGRÍCOLA, 4, 1996, Bauru, SP. **Anais...** Bauru, SP: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996. CD-rom.
- BEN-ASHER, J., MEEK, D. W., HUTMACHER, R. B., PHENE, C. J. Computational approach to assess actula transpiration from aerodynamic and canopy resistance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, n. 4, p. 776-782. 1989.
- BERLATO, M. A., MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração.** Porto Alegre, IPAGRO, 1981. p.95.(IPAGRO boletim técnico, 7).
- BLANEY, H. F., CRIDDLE, W. D. **Determining water requirements in irrigated areas from climatologica and irrigation data.** Washington, DC: USDA, 1950. 48p.
- BRUTSAERT, W. H. **Evaporation into the atmosphere.** Dordrecht, Holland: D. Reidel, 1982. 299 p.
- BURMAN, R., POCHOP, L. O. **Evaporation, evapotranspiration and climatic data.** Amsterdam, Elsevier, 1994. 278 p.
- CAMARGO, A. P., CAMARGO, M. B. P. Teste de uma equação simples da evapotranspiiração potencial baseado na radiação solar extraterrestre e na temperatura média do ar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOLOGIA, 3, 1983, Campinas. **Anais...** Campinas: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, UNICAMP, p.229-244. 1983.
- CARMO FILHO, F., OLIVEIRA, O. F. **Mossoró: um município do semi-árido Nordeste, caracterização climática e aspecto florístico.** Mossoró: ESAM, 1989. p.62. (Coleção Mossoroense, série B, 672).

- CRUZ, C. D., REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa , MG: UFV, Imprensa Universitária, UFV. 1994. 390 p.
- CURY, D. M., VILLA NOVA, N. A. Determinação do coeficiente de cultura (Kc) do Repolho (*Brassica oleracea*, var. Capitata L.). **Científica, Revista de Agronomia**, Jaboticabal, SP, v. 17, n. 1, p.109-19, 1989.
- DAL FABBRO, H. C., ANDRÊ, R. G. B. Consumo da água e coeficientes de cultura para a batata (*Solanum tuberosum* L.). **Científica, Revista de Agronomia**, Jaboticabal, SP, v.19, n.1, p. 181-13, 1991.
- DELLA LIBERA, C. F. L.; NISHIMURA, T.; CASTELLANE, P. D. Relação entre a evapotranspiração máxima da cultura da cebola (*Allin cepa* L.) e a evapotranspiração de referência. **Científica, Revista de Agronomia**, Jaboticabal, SP, v. 19, n. 1, p. 257-68, 1991.
- DOORENBOS, J., PRUITT. J. O. **Crop Water Requerementes**. Roma, Food an Agricultura Organization of the United Nations, 1977. 144 p (FAO. Irrayation and Drainage Paper, 24).
- DOORENBOS, J., PRUITT. J. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Roma: Food an Agricultural Organization of the United Nations, 1975. 179 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 24).
- ENCARNAÇÃO, C. R. F. **Estudo da demanda de água do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) var. goiano precose**. Piracicaba: ESALQ, 1980. 62p. Tese (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1980.
- ESPÍNOLA SOBRINHO, J., MEDINA, B. F., MAIA NETO, J. M., et al. Estimativa da evapotranspiração máxima e coeficiente de cultivo para feijão-caupi [*Vigna unguiculata* (L.) WALP] e milho (*Zea mays* L.), **Caatinga**, Mossoró, RN, v.1, n. 6. p. 118-35, 1989.
- FERNANDEZ, B., GONDIM, A. W. A. Estimativa de evapotranspiração em Areia-PB. **Agropecuária Técnica**, Areia, PB, v. 1, n. 1, p. 23-9, 1980.
- GRANT, D. R. Comparison of evaporation from barley with Penman estimates. **Agriculture Meteorology**, Amsterdam, v.15, n.3, p. 49-60, 1975.
- HARGREAVES, G. H, SAMANI, Z. A. **Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature**. Chicago: America Society Agriculture Engeering Meeting, p. paper 85-2517, 1985.

- HATFIELD, J. L. Research priorities in ET: evolving methods. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 31, n. 2, 491-95, 1988.
- HOYNINGEN-HUENE, J. v. **Agrometeorological Investigations on evaporimeters and their physical properties**. Deutschen Wetterdienstes. n.148, p 26. 1980. (Berichte Deutschen Wetterdienstes)
- JESSEN, M. E, BURMAN, R. D. e ALLEN R. G. **Evapotranspiration and Irrigation water requirements**. Manuals no. 70. Am. Soc. of Civil Engineers, New York, 1990. 332 p.
- LINACRE, E. T. A simple formula for estimating rates in various climates using temperature data alone. **Agriculture Meteorological**, local: v. 18, n. 2 , p. 409-24, 1977.
- MANTOVANI, E. C., MEDEIROS, J. P. V. de. **Avaliação de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Viçosa, MG**. Seminário de graduação - UFV. 20 p. (1995).
- MELO SILVA, F. A. de, LIMA, M. G. de. **Relação entre a evapotranspiração máxima (ETm) da cultura do feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) e a evapotranspiração potencial obtida por diferentes métodos**. TERESINA, PI. UFPI. 1988, p. 23.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. In: **THE STATE AND MOVEMENT OF WATER IN LIVING ORGANISMS**, 1965, Cambridge. **Atas and abstract...** Cambridge University, Press, 1965, pp 205-234.
- MONTEITH, J. L. The development and extension of Penman's evaporation formula. In: HILLEL, D. (Ed.) **Applications of soil physics**. NewYork: Academic, 1980. Cap. 10, p. 247-53.
- PEREIRA, A. R., VILLA NOVA, N. A., PEREIRA, A. S. et al. A model for the class A pan coefficient. **Agriculture and Forest Meteorology**, v.76. p. 75-82, 1995.
- PEREIRA, A. R., VILLA NOVA, N. A., SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba, SP: FEALQ, 1997. 183 p.
- PERES, J. G. **Avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, para estimar a evapotranspiração de referência nas condições climáticas do estado de São Paulo**. Piracicaba: ESALQ, USP, 1994, 116p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1994.

- PERES, J. G., PEREIRA, A. R., FRIZZONE, J. A. Avaliação do modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência padronizado pela FAO. **Engenharia Rural**, Piracicaba, SP, n. 1, v. 6, p. 53-64, 1995.
- PRUITT, W. O., LOURENCE, F. J. Experiences in lysimetry for evapotranspiration and surface drag measurements. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, 1985, Chicago. **Proceedings...** St. Joseph: ASAE, 1985, p. 51-69.
- ROCHA, I. B. **Coeficiente de cultura (Kc) do arroz, cultivar rio Parnaíba, irrigado por aspersão**. Viçosa, MG: UFV, 1989. 56 p. Tese (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Viçosa, 1989.
- SEDIYAMA, G. C. **A versão/proposta para o conceito de evapotranspiração de referência**. Campina Grande, PB): Ed. Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995. 14 p.
- SEDIYAMA, G. C. **Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas**. Brasília, DF, ABEAS, 1996. 173 pM (Curso por tutoria à distância).
- SEDIYAMA, G. C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1990. 143 p.
- SILVA, W. J da. **Estimativa da evapotranspiração potencial, em condições de campo, usando o tanque classe "A" modificado**. Viçosa, UFV, 1979, 60 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Viçosa. 1979.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization, 1991. 45 p.
- VILLA NOVA, N. A., OMETTO, J. C. Instruções para utilização do TANQUE CLASSE "A" em estimativas de evapotranspiração potencial e frequência de irrigação. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 1975, Fortaleza, CE. **Anais...** Fortaleza, CE: SNID, 1975, v.3, p.63-74.