

Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. i-xii, 1996.

Recebido para publicação em 12/02/96. Aprovado em 16/05/96.

ISSN 0104-1347

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO: HISTÓRICO, EVOLUÇÃO E ANÁLISE CRÍTICA

EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATE: HISTORIC, EVOLUTION AND CRITICAL ANALYSIS

Gilberto Chohaku Sedyama¹

-ARTIGO ESPECIAL / INVITED PAPER-

SUMMARY

The study of evaporation or evapotranspiration initiated among the natural philosophers of the antique Greek. The works carried out by Fick contributed to the understanding of the mass transport phenomena, and Boussinesq extended his studies to turbulent fluids. Important step was done by Reynolds who studied the similarity of transport phenomena of heat and momentum. Finally, the basis of evaporation study was constructed from the knowledge of the energy balance derived by Bowen and others' scientists. The year of 1948 was the starting date of the water evaporation study in the present century mainly because the papers published by two scientists. The term *evapotranspiration* appears for the first time in one of these papers *An Approach Towards a Rational Classification of Climate* by Warren Thornthwaite. The other paper was *Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass* by Howard Penman. In the early fifties Blaney and Criddle initiated studies of consumptive use of water for irrigation projects. Pruitt and Angus developed a large weighing lysimeter. In the sixties, the water scientists acquired background on theories of aerodynamic profiles and energy budgets. The lysimeter, the net radiometers and neutrons probe became a routine equipment's to estimate evapotranspiration. In the years of space age technology of the 1970's produced more electronic measurement and computational capability more than expected even for the first world. In this period the biologic awareness within the ET process were integrated to water transport mechanisms. In 1977, the Food and Agricultural Organization (FAO) prepared a revision of methodologies to estimate the crop water requirements. The workgroup of

crop water requirements of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID) organizes a round table conference on evapotranspiration at Budapest, Hungary. In the years of eighties, the *American Society of Agricultural Engineering* (ASAE) organizes a symposium on advances in evapotranspiration. A workshop on evapotranspiration in plant community was also organized in Bunbury, West of Austria. Recently and mainly after the report of the meeting (held in Rome, Italy, in 1990) of consultant of crop water specialists in procedures to review the FAO guide to predict the crop water requirements, published by M. Smith, the Penman-Monteith (PM-FAO) has been the recommended method to estimate the reference evapotranspiration rates (ET_o). The PM-FAO method incorporates the surface resistance of 70 s.m⁻¹ fixed for a uniform short green crop of 0,12 m height and albedo of 0,23 to estimate the ET_o in 24 hours. The future researches should be directed to validate the PM-FAO equation to estimate the ET_o in tropical climate, mainly with criterious evaluation of the resistance terms of the equation to seek a better understanding of physical and biological mechanism involved in the evapotranspiration and to present crop evapotranspiration rates in just one step, with no need of crop coefficient (K_c).

1. HISTÓRICO

O livro de Brutsaert, de 1982, *Evaporation into the atmosphere*, aborda com detalhes os fatos históricos da evolução sobre os interesses de pessoas na área de evaporação ou evapotranspiração. O livro aborda também as teorias sobre a evaporação em ordem cronológica que vai desde a Grécia antiga, o período Romano e a idade média, os séculos XVII e XVIII quando começavam as medições iniciais e a experimentação, até as fundamentações das teorias do presente século.

O estudo da evaporação ou evapotranspiração ocupou posição de destaque na história dos povos já na antigüidade, principalmente na cosmologia da Grécia antiga. É aceito por muitos que o interesse formal na área de evaporação começou nos anos 600 a 500 a.C.. Entretanto, já em tempos pré-filosóficos haviam comentários sobre a formação de névoa, refletindo pensamentos intuitivos daqueles povos, que chegavam a incluir fatores interessantes do ciclo hidrológico na atmosfera, e insinuações de que a evaporação seria uma causa e um resultado do vento.

Aristóteles, como muitos de seus predecessores, acreditava no requerimento da radiação solar ou de alguma outra fonte de calor para exalação de umidade. Entretanto, recusava qualquer ligação direta entre a evaporação d'água e o vento, exceto que ambos, como exalações diferentes, isto é, a evaporação como exalação úmida e vento como exalação seca, seriam causadas pelo sol, não estabelecendo assim qualquer relação causa-efeito entre vento e evaporação. Comentava que o vento era o ar em movimento,

¹ Prof. Titular, Bolsista do CNPq, Departamento de Eng. Agrícola, UFV. 36.570-000 Viçosa, MG.

idéia essa defendida anteriormente por outros estudiosos. O fato importante era que o conceito de evaporação de Aristóteles já revelava uma vaga noção de calor latente.

Descartes foi um dos primeiros filósofos a desenvolver teorias fora da linha de Aristóteles. Em seu livro '*Os Meteoros*', ele arriscava uma explicação sobre a evaporação e vento e postulava a existência de pequenas partículas. A evaporação seria causada pelo calor do sol e seria equivalente à agitação das partículas. O vento seria o ar em movimento como resultado da evaporação. Os escritos de Descartes foram importantes, tendo em vista a dominação das teorias aristotelianas, uma vez que, a partir das teorias de Descartes, a experimentação tornou-se parte essencial das investigações.

A experimentação estimulou a reflexão, a qual resultou em diversas hipóteses e modelos teóricos para explicar o fenômeno da evaporação. O debate girou em torno de questões como se a evaporação seria um processo resultante da incidência do sol na água ou que ocorreria só na presença de ar, ou seria apenas uma dispersão de partículas. Desde que as partículas de vapor e a natureza do calor foram mal definidos e pouco entendidas, surgiram muitos pontos adicionais de incerteza.

Em meados do século XVI começavam a surgir teorias sobre o processo de evaporação por efeitos eletrostáticos. Pensavam-se que pequenas partículas de água se moviam em direção à atmosfera e o ar em movimento repelia as partículas de água quando estas se tornavam eletrizadas. Acreditavam que o vapor d'água, sendo menos denso, se elevaria pelo duplo efeito do vento, o de fazer o vapor se elevar e, quando seco, contendo grande quantidade de fluido elétrico, acentuaria a separação das partículas.

Após a teoria que aceitava a temperatura como uma medida padrão nas ciências físicas, diversos conceitos foram estabelecidos, inclusive para o desenvolvimento da teoria da evaporação e o conceito de 'grau de saturação' do ar, o qual corresponde hoje à temperatura do ponto de orvalho. Descobria-se, então, que o aumento no conteúdo de umidade do ar caracterizava também o aumento da quantidade de energia do ar.

Em meados do século XVII vários estudiosos observavam que a evaporação causava algum tipo de resfriamento. Foram registrados fatos como a diminuição da temperatura indicada de cinco a seis graus, devido ao molhamento do bulbo do termômetro de mercúrio, era resultado de causas espirituais. Por meio de observações quantitativas e, com base em trabalhos semelhantes conduzidos anteriormente por outros estudiosos, descobriam-se o conceito de calor latente e começavam-se os estudos quantitativos do resfriamento por evaporação.

Por meio da investigação experimental, chegava-se à conclusão de que quando a água evaporava era produzido um fluido expansivo e que ele seria chamado de vapor. A pressão exercida por esse fluido tinha um valor máximo constante a uma dada temperatura e, apesar da presença do ar, esse fluido afetava a leitura do manômetro devido à pressão, o higrômetro devido à umidade, e quando esses fluidos (água e

ar) estavam misturados, eles agiam sobre o manômetro ou o barômetro de acordo com a sua respectiva força. Essa descoberta continha claramente a essência da lei da pressão parcial em mistura de gases, atualmente associada ao nome de Dalton.

Assim, segundo Dalton, a pressão de um gás era independente da quantidade de outros gases e cada um deles pressiona separadamente como se ele fosse o único fluido elástico constituinte da atmosfera. Portanto, a 'força de vapor' produzida por um líquido dependia somente da temperatura. A aceitação da lei da pressão parcial fez com que a hipótese da necessidade da presença de ar para 'dissolver' a água se tornasse muito frágil, e abriu caminho para outras teorias quantitativas de evaporação.

Existem evidências claras, portanto, de que os grandes filósofos dos séculos XVI e XVII ponderaram vários aspectos do problema da evaporação. Entretanto, o trabalho de Dalton de 1802 representou o marco de maior significância nessa área de estudos. Ele teorizou que a evaporação, a partir de qualquer superfície úmida, deveria ser consequência dos efeitos combinados do vento, conteúdo de umidade da atmosfera e das características físicas da superfície. Além de uma recapitulação de sua visão sobre misturas de gases, Dalton elaborou uma tabela de pressão de vapor de saturação em função da temperatura.

De acordo com Dalton, a quantidade de qualquer líquido evaporado ao ar livre é diretamente proporcional à pressão de vapor do líquido à sua temperatura, diminuída daquela pressão parcial já existente na atmosfera. Esta idéia hoje pode ser expressa na seguinte notação (não escrita por Dalton):

$$E = C(e_s^* - e_a) \quad \mathbf{1}$$

em que E é a evaporação da lâmina d'água por unidade de tempo; C uma constante que inclui um termo empírico e a função vento; e_s^* a pressão de saturação de vapor à temperatura da superfície evaporante e, e_a a pressão parcial de vapor na atmosfera.

A partir das conclusões de Dalton, os estudiosos tem tentado expressar a evaporação como uma função linear da velocidade média do vento, u , e considerando-se que poderia ser também proporcional ao déficit de saturação do ar, muitos testaram experimentalmente a Equação 1. A utilização do déficit de pressão de saturação, na equação de Dalton, é admitir que a temperatura da superfície da água e do ar são as mesmas.

Conforme mencionado anteriormente, somente por volta do século XVI descobriu-se o significado do calor latente de vaporização e foi realmente entendido que a evaporação causava resfriamento e que requeria certa quantidade de energia traduzida em calor. Apesar do desconhecimento da natureza dessa energia, tornava-se possível expressar o calor latente em termos quantitativos.

O progresso subsequente na teoria da evaporação veio de diferentes direções, principalmente da mecânica dos fluidos e fenômeno de transporte em fluxos turbulentos. Os trabalhos de Fick, em 1855, deram nova contribuição para o entendimento do transporte de massa nos fluidos. O fluxo específico local de uma mistura de fluido era o resultado apenas da ação molecular e proporcional ao gradiente de sua concentração. Em acordo com a lei de Fick, Fourier propôs a propagação de calor num condutor e Ohm para a propagação de eletricidade de forma análoga à lei de Newton para líquidos viscosos, que mais tarde foi estendida para fluidos turbulentos por Boussinesq, em 1877.

Importante passo foi dado por Reynolds, em 1874, no contexto da equação de transferência de calor, que justificava a semelhança no mecanismo de transporte de calor e momentum em fluxos turbulentos, analogia esta aplicada também aos vapores. Isso conduziu à descrição do gradiente vertical da velocidade do vento sobre a superfície terrestre como princípio da transferência de momentum e outras propriedades do ar em movimento, sinalizando para o reconhecimento da evaporação como um problema ou resultado também de fluxos turbulentos.

As pesquisas sobre evaporação baseada em medições e experimentações só vieram a contribuir com os estudos na área de evapotranspiração em meados do século XIX. Os trabalhos sobre crescimento das plantas e suas exigências hídricas conduziram, eventualmente, ao sistema de classificação climática de Köppen. Outros estudos tiveram como objetivo determinar a influência das propriedades físicas e químicas do solo na evaporação. Em seguida, introduziu-se o conceito de balanço de energia, em termos aceitáveis até hoje, descrevendo a distribuição da radiação solar que chega à superfície da terra. Parte do saldo do balanço de energia era absorvida no processo de evaporação. Essa energia era então transferida para a atmosfera na forma de vapor (calor latente) e era liberada no ar superior e dispersa no espaço. Dessa forma o ar funcionaria como um ajustador térmico, de tal maneira que a terra e o mar seriam impedidos de se aquecerem indefinidamente. As relações entre evaporação, radiação solar e outros comportamentos do fluxo de calor num contexto de balanço de energia estava então implícito nos trabalhos de agronomia e de climatologia da época. Começavam também os estudos de medições quantitativas das relações solo-água, com interesse básico no resultado da evaporação.

Considerável interesse sobre evaporação partiu então antes mesmo do início do século XX, quando começaram os estudos incluindo a primeira analogia quantitativa e detalhada do balanço de energia na superfície da terra, por meio da determinação do fluxo diário de calor no solo a partir de medidas de temperatura e da capacidade de condução de calor do solo. A evaporação era determinada preenchendo-se um cilindro com solo e mantendo-se o fluxo horizontal com a vizinhança. O fluxo de calor sensível na atmosfera era tomado como o único termo desconhecido na equação do balanço. Essa contribuição veio em tempo em que rápidos avanços estavam acontecendo sobre o entendimento da

radiação como resultado das descobertas de Stefan e Boltzmann. Assim, a base foi sendo feita pelo desenvolvimento adicional dos procedimentos de balanço de energia por intermédio dos trabalhos de Schmidt, em 1915, e Bowen, em 1926, e outros. Anunciava-se portanto, neste início do século, o início da era moderna dos estudos dos fenômenos da evaporação.

Estudos da evaporação a partir de diferentes tipos de solo surgiram nas primeiras décadas do presente século. Descobriram que a pressão de vapor d'água no interior do solo estava relacionada com a velocidade com que a umidade se evaporava. Considerava-se, entretanto, que a evaporação era apenas um problema especial de difusão de gases da superfície do solo. Reconheciam também a natureza da mistura turbulenta do ar sobre a superfície evaporante e postulavam que os coeficientes de transferência nos processos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e momentum (K_H , K_W e K_M) deveriam ter a mesma ordem de magnitude, porém não necessariamente idênticos.

Pouco antes da década de 20 iniciavam-se os estudos de correlação entre evapotranspiração com as condições do tempo atmosférico e em seguida utilizavam-se de valores de evaporação medidos em vários tipos de atmômetros e tanques de evaporação para comparação entre os valores de transpiração com evaporação de superfícies de água-livre. Demonstrava-se então a existência de mecanismos morfológicos e fisiológicos da planta que afetavam as taxas de transpiração.

Nessa época, os trabalhos de Schmidt, em primeiro lugar e depois de Ångström, foram os precursores a fazerem um estudo detalhado do balanço de energia e evaporação. Ambos entendiam que o conhecimento do fluxo de energia envolvida na evaporação era de fundamental importância. Foram então avaliados os componentes da radiação solar global e seu componente refletido (albedo), a radiação de ondas longas das nuvens, da temperatura da superfície irradiante, fluxo de calor no solo e a transferência de calor sensível. Pelo balanceamento das radiações de chegada com as perdas, a energia disponível para evaporação foram calculadas como um resíduo do balanço.

Em 1925, conforme a pesquisa de Cummings, começava definitivamente a utilização do método do balanço de energia para estimação da evaporação, ponderando-se arbitrariamente que toda energia disponível participava do processo de evaporação. No ano seguinte, Bowen argumentava que a energia disponível deveria ser particionada em dois componentes, evaporação (calor latente = LE) e calor sensível (H) numa razão fixa da seguinte forma:

$$b = H / LE$$

2

conhecida hoje como razão de Bowen. Dava início, assim, às técnicas modernas que podem ser atribuídas às categorias de transporte de massa, aerodinâmico ou do perfil do vento, balanço de energia, as

combinações dessas técnicas e também as denominadas técnicas empíricas.

2. EVOLUÇÃO

Sem dúvida nenhuma, a maioria dos estudiosos da área de evapotranspiração concordam que o ano de 1948 foi realmente o marco divisor de épocas nesta área de estudos, principalmente pelos trabalhos publicados por dois pesquisadores, que tiveram profundo e duradouro impacto não só na agricultura como também na climatologia e hidrologia. Foi nesta época que apareceu o termo conhecido como 'evapotranspiração' no artigo denominado de "*An Approach Towards a Rational Classification of Climate*" de Warren Thornthwaite. Esse termo é, até hoje, definido como a combinação da evaporação direta da água de uma superfície úmida e da transpiração através das plantas. O outro artigo foi "*Natural Evaporation from Open Water, Bare Soils and Grass*" escrito por Howard Penman.

A preocupação principal de Thornthwaite era explicar as variações sazonais do balanço de água no solo e tentar definir as diferenças regionais do clima. Assim, a sua equação era apenas uma proposta de estimativa da evapotranspiração em função da temperatura média do ar a partir de um índice térmico anual e do comprimento do dia para um determinado mês em questão.

Como observa Monteith, a equação de Thornthwaite é apresentada no Apêndice do seu artigo e introduz um aposto como comentário: "O desenvolvimento matemático está longe de ser satisfatório. É uma equação genérica e empírica ... ela está completamente fora dos padrões da elegância matemática ... O principal obstáculo a ser destacado ao desenvolvimento de uma equação racional é a falta do entendimento do porquê da evapotranspiração potencial correspondente a uma dada temperatura não ser a mesma para diferentes locais". Monteith, em seu comentário sobre o trabalho de Thornthwaite, continua: "infelizmente o significado desta declaração honesta foi ignorada por alguns climatologistas que perseguiram a fórmula como um método conveniente para estimar a evaporação potencial e o balanço hídrico do solo pelo mundo, sem ter em conta que as taxas de evaporação poderiam ser severamente subestimadas em climas secos".

Penman, por outro lado, estava preocupado com os processos físicos envolvidos na evaporação e com a busca de uma fórmula que proporcionasse uma estimativa da taxa de evaporação da água-livre, da umidade da superfície do solo ou da vegetação, para ser estimada a partir dos elementos climáticos relevantes: energia radiante, temperatura, umidade e velocidade do vento. A sua fórmula original foi derivada com base na eliminação da temperatura da superfície nas equações de conservação da energia e de massa na interface entre o solo e a atmosfera, com respaldo, é claro, em princípios físicos. Entretanto, para aplicações práticas, ele não conseguiu evitar certo empirismo, por razões óbvias para a época. O saldo de

energia radiante tinha que ser calculado por intermédio da razão de insolação utilizando-se da equação de Ångström-Prescott e da equação de Brunt, uma vez que, naquela época não se utilizava, rotineiramente, os saldo-radiômetros. A função vento tinha que ser estimada por meio de pequenos lisímetros com problemas de exposição, a qual hoje poderia ser considerada inaceitável para um trabalho científico sério. Todavia, face a fundamentação física acertada, sua fórmula tem sido, até hoje, a base para a maioria dos estudos teóricos e experimentais de evaporação natural.

Penman combinou então o balanço de energia na superfície com um termo aerodinâmico, cuja equação resultante é comumente conhecida como "equação combinada". A equação original de Penman é mundialmente conhecida. Versões melhoradas de métodos combinados estão sendo utilizadas extensivamente por todo o mundo. Detalhes adicionais sobre os aspectos teóricos do assunto podem ser obtidos no livro Jensen et al. (1990) e os livros de Monteith (1973) e Brutsaert (1982).

Em princípios da década de 50 iniciaram-se também estudos de necessidades de água em projetos de irrigação, com desenvolvimento de metodologias mais simples, como o método de Blaney e Criddle, que introduziu o conceito conhecido como "uso consuntivo de água pela plantas", hoje quase em desuso. Essa década foi marcada também com o desenvolvimento de lisímetros de grande porte, como o de Davis, na Califórnia, construídos por Pruitt e Angus. Tanques de evaporação e atmômetros foram desenvolvidos e testados em todo globo, com o objetivo de estabelecer correlações entre as taxas de evaporação da água-livre com evapotranspiração de culturas agrícolas.

Com o desenvolvimento da instrumentação eletrônica moderna, tecnologia de computação e financiamentos de órgãos inclusive não governamentais de pesquisas, investigações de curtos períodos (5 minutos a períodos diários) de evaporação e transpiração liberalmente explodiram durante a década de 1960 e início de 1970. Numerosas publicações, em revistas técnicas e livros, registram que a evaporação e, ou, evapotranspiração é uma das matérias mais popular, estudada e reestudada, no campo da climatologia, hidrologia e da irrigação.

Realizaram-se conferências na década de 60 com o objetivo de direcionar as pesquisas na área. Nessa década, os pesquisadores já tinham conhecimento das modernas teorias, especialmente relativos ao balanço de energia, perfis aerodinâmicos e, inclusive, várias relações empíricas. Por um lado, os lisímetros, os saldo radiômetros e as sondas de neutrons foram os equipamentos que se tornaram rotineiros na estimativa da evapotranspiração e coeficientes de culturas. Incalculável número de dados foram coletados por meio de sistemas de aquisições automáticas. Os tanques de evaporação eram avaliados de diferentes formas, muitos enterrados no solo, alguns postos em flutuação em represas e outros inclusive cobertos com telas de proteção contra consumo da água dos tanques pelos animais. Por outro lado, o fenômeno da turbulência, advecção e correlações de turbilhões foram os principais desafios, nessa época, na estimativa

dos fluxos de evapotranspiração.

Nos anos 70, na era espacial propriamente dita, produziu-se inúmeras medições eletrônicas e aumentou-se a capacidade computacional muito mais do que se poderia esperar, mesmo no primeiro mundo. Emergiu também a preocupação com a necessidade de se incorporar os aspectos biológicos nas equações de evapotranspiração. As plantas começavam a ser literalmente dissecadas pelos fisiologistas para estudar os mecanismos de transporte de água. Ao mesmo tempo novos equipamentos e sistemas de medições foram desenvolvidas para estudar as atividades fisiológicas das plantas, que afetavam as taxas de evapotranspiração.

Pesquisas na área de modelagem da evapotranspiração (ET) para uma cultura em crescimento com cobertura incompleta foram desenvolvidas incorporando-se a idéia de que a evaporação direta da água do solo e a transpiração ocorriam separadamente, especialmente para pequenos valores de índice de área foliar (IAF), quando a evaporação direta da água do solo constitui a maior parte da evapotranspiração total.

Os modelos baseados nesse princípio de separação da evaporação e da transpiração (Black, 1970; Ritchie, 1972; Kanemasu et al., 1976; Tanner e Jury, 1976;) se apresentavam como uma alternativa, já que calculavam separadamente a evaporação direta da água do solo (Es) e a transpiração da cultura (Ep). Os modelos apresentavam as vantagens de precisarem de poucos dados climatológicos (temperatura máxima e mínima, radiação solar e precipitação). Além disso, mostravam-se sensíveis à variabilidade interanual, que afetavam o consumo de água pelas plantas. Uma outra vantagem desses modelos era a possibilidade de estimar a ET para diversos padrões de frequência de irrigação, podendo ser utilizado tanto em tempo real quanto em simulações na programação de irrigação. Recentemente, o modelo de Ritchie vem sendo usado como subrotina em modelos mais complexos, uma vez que inclui as propriedades físicas da água no solo, conteúdo de água no perfil do solo e o grau de cobertura vegetal na estimativa da ET.

Em 1977, por intermédio da publicação de Doorenbos e Pruitt (Boletim - 24), a *Food and Agricultural Organization* (FAO) das Nações Unidas elabora uma revisão de conceitos e metodologias para a estimativa do requerimento de água para as plantas. O grupo de trabalho sobre requerimento de água para as plantas do *International Commission on Irrigation and Drainage* (ICID) organiza uma conferência em “mesa redonda” sobre evapotranspiração em Budapeste, Hungria, em maio de 1977. As definições originadas na conferência de 1977 foram publicadas por Perrier, em 1985. Outro grupo de trabalho organiza uma conferência internacional sobre requerimento de água para irrigação, em Paris, em setembro de 1984.

Já nos anos 80, a *American Society of Agricultural Engineering* (ASAE) organiza um simpósio sobre os avanços na evapotranspiração, em dezembro de 1985, que envolveu vários conferencistas

internacionais. Nesse simpósio resumiram-se os avanços na teoria da evapotranspiração, medições e métodos de aplicações. Foi realizado também um “workshop” sobre evapotranspiração em comunidade de plantas em Bunbury, Oeste da Áustria, em maio de 1982. Alguns desses trabalhos apresentados no “workshop” foram selecionados para publicação.

Além disso, muitos livros de hidrologia e climatologia incluem seções de evapotranspiração. Alguns livros concentram nos princípios dos processos da evapotranspiração. Outros livros resumem os resultados das recentes conferências. Por exemplo, a recente publicação do *The Netherlands Committee on Hydrology Research* contém uma série de trabalhos, que foram apresentados no Technical Meeting 44 em Ede, Holanda, em março de 1987. Esses trabalhos resumem os recentes progressos feitos nessa área na Europa.

É oportuno mencionar que pesquisadores brasileiros participaram e participam dos avanços dos estudos na área de evapotranspiração, notadamente a partir da década de 60. É importante destacar também a participação dos cientistas do Estado de São Paulo, como os primeiros a se dedicarem a esta área de pesquisa no Brasil. Muitos trabalhos são e estão sendo desenvolvidos na atualidade.

3. ANÁLISE CRÍTICA

3.1. Aspectos gerais

Desde a introdução da equação de Blaney e Criddle, em 1950, e outras fórmulas empíricas com base numa simples correção entre a ET da cultura e algum elemento climático, tais métodos tem sido revistos e adaptados, conforme mostram diversas publicações inclusive a de Doorenbos e Pruitt, em 1977. Além disso, tem sido amplamente utilizada por causa da sua relativa simplicidade. As estimativas da ET pelos métodos empíricos, entretanto, geralmente são aplicáveis apenas para períodos longos, valores mensais por exemplo, e a exatidão das estimativas estão limitadas pela dependência de poucas variáveis.

As contribuições de Penman de 1948 e de 1963, sem dúvida nenhuma têm sido de maior relevância nos métodos comumente utilizados no presente. Várias formulações derivadas da equação original de Penman tem sido testadas e avaliadas, como as modificações sugeridas por Budyko, McIlroy, van Bavel, Monteith e a própria FAO (boletim 24). A equação Penman-FAO (Penman modificada pela FAO - 24), por exemplo, tem sido objeto de matéria obrigatória em muitos currículos que abordam estudos de manejo de água e projetos de irrigação.

O conceito do método combinado, isto é, a associação entre os termos diabáticos (saldo de energia na superfície) e adiabáticos (processos de transferência pelos componentes aerodinâmicos) da

evaporação introduzido por Penman com o mínimo de empirismo, tem proporcionado um meio conveniente para se estimar a ET, inclusive em base diária, por meio de dados meteorológicos normalmente coletados em estações climatológicas principais. Além disso, tem reforçado o conceito inicial de ET potencial de 1948. Entretanto, refinamentos foram necessários para corresponder às estimativas de ET de diferentes culturas e situações climáticas.

O ideal seria que um método para estimar a ET incorporasse todos os fatores que influenciam a ET, tais como a morfologia da planta, a taxa de crescimento da cobertura da superfície pela planta, estágio de crescimento, condições de solo, principalmente a forma com que as propriedades físicas do solo afetam diretamente a água disponível para a extração pelo sistema radicular e, é claro, as condições microclimáticas nos aspectos dos processos de transferências de energia e massa.

Tem sido rotina, nos últimos 20 anos, especialmente após a publicação do boletim FAO - 24, o procedimento que utiliza o conceito de evapotranspiração de referência (ET_o) relacionado com um conjunto de coeficientes de cultura (K_c) para estimação da ET da cultura específica (ET_c). Esta técnica pode utilizar fórmulas que incorporam os processos físicos da ET_o comparadas com as condições de ET de culturas específicas. Os métodos de estimação da ET_c a partir de coeficientes de culturas em função da ET_o requerem cuidados especiais, principalmente por causa dos coeficientes empíricos. Todavia, o método pode ser considerado uma técnica prática, uma vez que ela é baseada em dados relativamente fáceis de serem obtidos e tem potencial para se avançar no conceito de ET da cultura de referência e, principalmente, face a aceitação pela comunidade de usuários dessa metodologia.

O boletim da FAO - 24 oferece, portanto, procedimentos para determinar a ET_o, coeficientes de culturas e fatores de ajustes para calcular a ET_c para uma ampla gama de condições. Oferece ainda desenvolvimento de coeficientes de correção para quatro métodos de estimação da ET_o de forma que um conjunto de coeficientes de cultura seria suficiente para se chegar a ET da cultura específica.

3. 2. Evapotranspiração de referência

Esse conceito de ET_o tem sido adotado para evitar conflitos entre definições existentes para evapotranspiração potencial (ET_p). A ET_o, no boletim da FAO-24, refere-se a evapotranspiração de uma área com vegetação rasteira, na qual são feitas as medições meteorológicas, para obtenção de um conjunto consistente de dados de coeficientes de cultura, para serem utilizados na determinação da evapotranspiração (ET) de outras culturas agrícolas.

Da forma como está apresentado no boletim da FAO-24, o conceito de ET_o tem a ver com a grama, em crescimento ativo e mantido a uma altura uniforme de 0,08 a 0,12 m de altura. Representa,

portanto, uma extensão da definição original de Penman (1948, 1953 e 1963) de evapotranspiração potencial, que pode ser traduzido como:

a quantidade de água evapotranspirada, na unidade de tempo, por uma vegetação rasteira, de altura uniforme, em crescimento ativo, que cobre completamente a superfície e sem limitação de água no solo.

3.3. Métodos de determinação da ETo

3.3.1. Lisímetros

Pela conceituação apresentada anteriormente, verifica-se que os valores de ETo determinados em lisímetros, para atender a definição correta de ETo fica frequentemente prejudicada, uma vez que é muito difícil manter as condições internas do lisímetro iguais ou semelhantes às condições externas e vice versa. Normalmente, as plantas tendem a crescer mais no interior do lisímetro (efeito buquê) ou elas crescem além dos limites da borda externa dele. Além das dificuldades em se manter as condições internas e externas dos lisímetros com as mesmas características, existem grande dificuldades instrumentais associadas.

As diferenças de crescimento e maturação entre as plantas do lisímetro e as plantas na circunvizinhança para medição da ET no lisímetro em relação a ET medida na área circunvizinha podem ser significativas. Alguns valores altos de coeficientes de cultura que são relatados em estudos com lisímetros podem ser o resultado de tais diferenças no crescimento das plantas entre o lisímetro e a área circunvizinha. Existe consenso, entretanto, de que a relação entre a área da borda do lisímetro com a sua área efetiva interna deva ser menor que 0,1. Por exemplo, com 10 mm de folga e 5 mm de paredes interna e externa, essa relação seria 0,08 para o lisímetro que tem a dimensão interna de 1,00 x 1,00 m $[4(0,02)(1,02)/1,00]$, isto é, o erro seria, no mínimo, de oito por cento considerando apenas a folga e a espessura das bordas do lisímetro.

As diferenças em crescimento das culturas no interior dos lisímetros em relação à área externa, especialmente quando as plantas crescem mais no interior, o lisímetro provoca uma perturbação maior no movimento horizontal do ar e aumenta o grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura e aumenta a transpiração da vegetação. A interceptação da radiação solar incidente também aumenta numa proporção que pode chegar a 40%.

É fato real, portanto, que existe uma inconsistência muito grande nas medições da ETo em

lisímetros quando as condições do meio ambiente não são muito bem caracterizadas no manejo do lisímetro, até mesmo em condições similares de clima, face aos problemas anteriormente citados e aos problemas instrumentais associados na operacionalização dos lisímetros.

3.3.2. Métodos das propriedades conservativas da camada limite

Os métodos de estimativas da ET, que utilizam as propriedades conservativas da subcamada limite acima da superfície evaporante (balanço de energia e balanço aerodinâmico), isto é, os métodos baseados em sistemas de medições que utilizam o princípio da conservação de massa e de energia na camada limite acima do dossel vegetativo da planta, também apresentam dificuldades operacionais, especialmente porque envolvem medições e correlações de fluxos turbulentos e componentes da razão de Bowen, os quais exigem uma área tampão uniforme a barlavento para garantir que os fluxos horizontais não sejam significativos no processo.

Em acréscimo aos problemas na obtenção e manutenção da bordadura, os equipamentos necessários para medições de fluxos na camada limite envolvem sistemas com componentes sensíveis e exigem uma calibração e manutenção constante. Tais exigências limitam inclusive a utilização desses métodos, para fins de pesquisas em centros especializados. Os anemômetros sônicos apresentam erros devido aos problemas de molhamento dos sensores pela manhã e principalmente após a chuva. A dificuldade em estimar o fluxo de calor latente é extremamente problemático no método do balanço de energia, quando a razão de Bowen se aproxima de menos um (-1) nos horários de inversão térmica.

O método do balanço de energia para determinar a ET tem condições de ser utilizado para valores horários, especialmente durante as horas de brilho solar. A técnica da razão de Bowen é o método mais comumente utilizado, como método do balanço de energia. Valores noturnos precisos são difíceis de serem obtidos devido a necessidade de se conseguir valores extremamente precisos dos componentes da equação do saldo do balanço de energia ($R_n = E + H + G$), que podem ser negativos e ou praticamente iguais, porém de sinais opostos. Entretanto, desde que o método depende dos gradientes determinados acima do dossel da planta, os cálculos do fluxo de vapor d'água é independente das resistências estomatais de uma folha individual ou do próprio dossel vegetativo da planta. A precisão desse método, expressa como a percentagem do fluxo total, da mesma forma como os demais métodos, decresce com a redução do fluxo de vapor d'água causado pelo aumento na resistência do dossel, baixa demanda evaporativa, ou ambos.

A necessidade de instrumentação e procedimentos técnicos envolvidos geralmente limita o método para estudos em pesquisas de períodos relativamente curtos e raramente as medições tem sido

feitas de forma contínua para cobrir todas as estações do ano.

O método aerodinâmico de Thornthwaite e Holzman (T&H) tem demonstrado ser muito sensível para as diversas condições de estabilidade da massa de ar. Pesquisas tem mostrado que é típico uma subestimação da ET de uma ordem de grandeza, para condições altamente instáveis, por exemplo, como o que ocorre sobre a grama durante o período frio e úmido da manhã, com baixa velocidade do vento de 0,5 a 1 m.s⁻¹.

Uma forma generalizada da equação de T&H, com uma correção adiabática para o perfil logarítmico do vento, efeito da estabilidade no coeficiente de transferência de turbilhões e incluindo o termo de deslocamento do plano zero (d), pode ser expressa como:

$$E^* = \frac{-1rk^2(u_2 - u_1)(q_2 - q_1)}{[\ln(z_2 - d)/(z_1 - d)]^2} \frac{1}{\Phi_m^2} \frac{K_v}{K_m} \quad 3$$

onde os dois últimos termos da equação é a função de forma do perfil do vento de Monin-Obukhov (f_m^2). Com esses termos de correção da estabilidade desenvolvida de estudos básicos micrometeorológicos para $1/f_m^2$ e K_v/K_m , a equação de T&H pode ser muito precisa. A demanda de sensores sensíveis e específicos é grande e o método é recomendado somente para determinações em base horária ou períodos menores.

Outra técnica, para a qual se exige uma instrumentação também específica, é a do fluxo de turbilhões ou método de correlação de turbilhões. Em geral, qualquer método de transferência de massa requer instrumentação complexa e pessoal especializado e bem treinado para se obterem resultados precisos ou mesmo satisfatórios. O método de correlação de turbilhões foi proposto por Swinbank, em 1951. O método requer um pequeno valor para a constante de tempo (centésimo de segundos), anemômetros verticais e sensores de pressão de vapor. Todavia, a instrumentação comercial está disponível somente para aplicações sofisticadas para atender, principalmente, a teoria de fluxo de turbilhões. Esses instrumentos, quando utilizados em conjunto com microprocessadores e sistemas automáticos de aquisição de dados, podem facilitar a utilização do método para medições de rotina no campo.

Verifica-se portanto que, apesar de existirem métodos considerados precisos, principalmente com fundamentação física, para estimativa da ET, tanto as medições lisimétricas quanto os métodos de medições de fluxos na camada limite não satisfazem, plenamente, a padronização das estimativas da ETo, tendo como referência uma superfície gramada e especificamente definida para essa finalidade.

3.3.3. Método de Penman recomendado pela FAO-24

A equação de Penman para estimativa da ET de referência (grama), conhecida hoje como Penman-FAO (Boletim FAO - 24) recebeu modificações que envolveram a função devido ao vento mais sensível do que a utilizada originalmente por Penman, em 1956, e um fator de ajustamento c que é baseada nas condições locais de clima e a hipótese de que $G = 0$ (fluxo de calor no solo) para períodos superiores a 24 horas.

Os coeficientes apresentados por Frevert et al., para o fator de ajustamento c , tem sido arredondado e, um termo eliminado, por Allen e Pruitt, em 1991, de forma que os valores finais estão dentro de 0,01 do valor da regressão original de Frevert et al.. O novo fator de ajustamento c (equação 4) para a equação Penman-FAO proporciona valores de ajustes, que desviam menos daqueles valores de c obtidos pela equação original de Frevert et al., especialmente para valores típicos de URmax entre 60 a 90%.

$$c = 0,68 + 0,0028UR_{max} + 0,018R_s - 0,068U_d + 0,013\frac{U_d}{U_n} + 0,0097U_d\frac{U_d}{U_n} + 0,430.10^{-4}UR_{max}.R_s\frac{U_d}{U_n} \quad (4)$$

em que URmax é a umidade relativa máxima diária em percentagem, R_s a radiação global à superfície, em mm.d^{-1} , U_d/U_n a razão entre a velocidade do vento do período diurno e noturno, e U_d a velocidade do vento do período diurno (07:00-19:00 horas) em m.s^{-1} . Pruitt e Doorenbos comentam que o programa de computador incluído no apêndice do boletim da FAO-24 (Apêndice III) não extrapola além dos limites de URmax, R_s , U_d , e U_d/U_n em sua Tabela 3. Posteriormente, Pruitt, em 1986, comenta que uma extrapolação além desses limites produzem resultados não satisfatórios. Portanto, os seguintes limites devem ser usados com a expressão 4 de Frevert et al. modificada.

$$\begin{array}{ll} 0.5 \leq U_d / U_n \leq 4.0 & 3.0 \leq R_s \leq 12.0 \\ 30 \leq UR_{max} \leq 90 & U_d \leq 9.0 \text{ m.s}^{-1} \end{array}$$

A equação de Penman-FAO, portanto, inclui o fator de correção ou ajustamento c , que de alguma forma requer medições de dados meteorológicos adicionais e fatores relativos à equação original de Penman. Esse fato sinaliza que a aplicação dessa equação tornou-se um tanto quanto mais trabalhosa para aplicações de rotina, a não ser que a equação seja resolvida por meios computacionais.

Persiste ainda, segundo pesquisas realizadas em várias regiões do globo, uma dúvida quanto ao

emprego dessa equação, uma vez que tem sido observado, com muita frequência, uma superestimativa da ET_o , tendo a grama como referência, sob uma ampla gama de condições climáticas. Essa tendência é observada por Pruitt e Swan em suas pesquisas de 1986, baseadas em comparações feitas em medições lisimétricas de precisão em Davis, Califórnia, e medições micrometeorológicas de ET_o na Austrália.

No manual número 70 da ASCE, conforme Allen e colaboradores, essa tendência de superestimação é também observada para a ET_o , até mesmo com a utilização do fator de ajustamento c no método Penman-FAO. Tal superestimativa, de acordo com esses autores, chega próximo de 35% durante os meses de maior demanda evaporimétrica, em Davis, Califórnia e por uma média de 12% em valores sazonais. Em outras regiões, como na Austrália, de clima classificado como árido e semi-árido, a superestimativa atingiu 8%. Além disso, nas regiões consideradas úmidas e sub-úmidas o erro observado atingiu 35% para ambos os casos, durante os meses de maior demanda e também em termos médios sazonais.

Portanto, é notório que existe uma tendência de superestimativa da ET_o , pelo método de Penman-FAO, tendo a grama como referência. Além desse problema, existe a complexidade na utilização do fator de ajustamento c para estimativa da ET_o . É fato também que essa equação é utilizada por um grande número de pesquisadores de todo mundo e tem sido utilizado por muitos como padrão internacional, especialmente no Brasil.

4. NOVA PROPOSTA PARA O CONCEITO DE ET_o

Tendo em vista as dificuldades anteriormente mencionadas na utilização extensiva dos lisímetros e dos métodos de balanço de energia e aerodinâmicos ou combinados e, considerando-se ainda que a equação de Penman-FAO, ter sido adotada, inclusive como parte de currículos de cursos, apesar dessa tendência de superestimar os valores esperados de ET_o , a FAO promoveu, em Roma, Itália, no período de 28 a 31 de maio de 1990, um encontro de pesquisadores da área de evapotranspiração, composto de 14 especialistas de sete países, para atender a vários objetivos, dentre eles o de analisar os conceitos e procedimentos de metodologias de cálculos da ET_o , com enfoque ao estabelecimento de um critério que pudesse atender a nova definição para cultura de referência e o método para que pudesse estimar a ET_o para essa referência.

Além disso, as dificuldades, com relação ao estabelecimento de um padrão de ET_o , com a utilização das equações combinadas são encontradas na literatura. Por exemplo, são citados até oito diferentes métodos para a função devido ao vento e seis equações para o cálculo do déficit de pressão de vapor (DPV), conforme a disponibilidade de dados de temperatura e ou umidade relativa. Isso corresponde a combinação de oito funções devido ao vento com seis DPVs.

Como se sabe, o propósito de se determinar o valor correto de E_{To} por meio de equações, é o de facilitar a determinação da E_{Tc} pela simples multiplicação do valor da E_{To} por um coeficiente de cultura K_c . Esse procedimento é conhecido, atualmente, como procedimento de duas etapas, para determinação da E_{Tc} .

Procura-se, nos dias de hoje, definir uma cultura de referência com base numa cultura hipotética, a qual traz enorme vantagens com relação às culturas rasteiras em crescimento, tradicionalmente utilizadas em pesquisas, não só pela diversidade de manejo dessas culturas, como também pela necessidade de se caracterizar as condições de clima local associadas à fenologia da cultura. Em última instância, não há como considerar uma cultura rasteira como referência para todos os efeitos, desde que depende de vários fatores locais e especialmente o tipo de vegetação rasteira utilizada.

Baseado nessas questões, recentemente e principalmente após as recomendações definidas no encontro de especialistas em evapotranspiração, em 1990, os pesquisadores tem procurado desenvolver trabalhos no sentido de se avaliar a equação de Penman-Monteith para estimativa da E_{To} , uma vez que tem sido observado que ela tem dado melhores resultados para estimativa da E_{To} de uma cultura hipotética de referência e atende, mais de perto, a definição original de E_{Tp} de Penman e o conceito adotado pela FAO-24 para E_{To} .

A nova ET de referência, comumente aceita pelos pesquisadores, é a taxa de evapotranspiração de uma cultura hipotética, com uma altura de 0,12m, resistência aerodinâmica da superfície de 70 sm^{-1} e albedo de 0,23. Essa ET de referência assemelha-se, bem de perto, a ET de uma superfície extensa coberta com grama de altura uniforme, em crescimento ativo e cobrindo completamente a superfície do solo e sem restrição de umidade.

5. MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH

Penman, em 1948, não incluiu a função de resistência da superfície para a transferência de vapor d'água na sua equação original. Para aplicações práticas, ele propôs uma equação empírica para a função devida ao vento. Mais tarde, Monteith desenvolveu, com base na equação de Penman, uma equação, que incluía a resistência aerodinâmica e a resistência ao fluxo de vapor pela folha. A equação combinada com os termos de resistência aerodinâmica e da superfície da planta passou a ser chamada de equação de Penman-Monteith. Esta equação não somente concilia os aspectos aerodinâmico e termodinâmico, mas também inclui a resistência ao fluxo de calor sensível e vapor d'água no ar (r_a), e a resistência da superfície (planta) à transferência de vapor d'água (r_c).

O método combinado de Penman-Monteith para E_{To} da cultura hipotética, quando incorporado

com a resistência da superfície de 70 s.m^{-1} e com os cálculos da resistência aerodinâmica fixada para uma grama de 0,12 m de altura uniforme pode ser expressa, para fins de padronização dos procedimentos de cálculos da evapotranspiração de referência, para estimativas de 24 horas, com a seguinte notação:

$$ET_0 = \frac{d}{d+g^*} (R_n G) \frac{1}{1} + \frac{1}{d+1} \frac{900}{T+275} U_2 (e_a - e_d) \quad (5)$$

em que ET_0 é a evapotranspiração de referência em mm.d^{-1} , R_n o saldo de radiação a superfície em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, G o fluxo de calor sensível no solo em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, T a temperatura média do ar em $^{\circ}\text{C}$, U_2 a velocidade do vento à 2 m de altura em m.s^{-1} , $(e_a - e_d)$ o déficit de pressão de vapor em kPa, d a declividade da curva de pressão de vapor de saturação em $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$, λ o calor latente de evaporação em MJ.kg^{-1} , g^* a constante psicrométrica modificada igual a $(1+0,33U_2)$ em $\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$, e 900 a constante para converter o termo adiabático na mesma unidade do termo diabático em $\text{kJ}^{-1}.\text{kg.K}$.

As variações entre as medições das condições do tempo e superfície da cultura de referência pode ser parcialmente compensado para o método de Penman-Monteith pelo ajuste da velocidade do vento para refletir o tipo de superfície sobre a qual a medição é feita. Dados experimentais indicam que valores horários de r_c tendem a variar com o saldo de radiação. Monteith et al., em 1965, encontraram valores médios diários de r_c , ponderando os valores horários de acordo com saldo de radiação horária correspondente. Esses valores médios variam com a estação do ano e inversamente com o índice de área foliar (IAF), ou na proporção de $1/\text{IAF}$.

Geralmente, somente a metade superior do dossel denso da cultura é ativo em transferir calor e vapor, da mesma forma que é a zona de maior absorção do saldo da radiação. A troca de vapor através dos estômatos dentro do dossel da planta é governada pelos processos e resistências que são semelhantes daqueles para dióxido de carbono e perfis de fluxos gradientes. Portanto, em muitos casos, a resistência do dossel para uma cultura de referência adequadamente irrigada pode ser estimada pela divisão da resistência mínima da superfície para uma única folha pela metade do índice de área foliar do dossel.

A equação de Penman-Monteith é mais precisa quando usada em base horária e os valores somados para se obter a estimativa diária de ET_0 . Algumas simplificações empíricas são necessárias para se obterem as estimativas diárias de ET_0 usando somente totais diários ou valores médios dos elementos

climáticos. Exemplos de cálculos mostram claramente que, quando se usa valores médios diários climáticos, a equação de Penman-Monteith pode proporcionar estimativas muito confiáveis de ETo.

Quando se calcula o déficit de pressão de vapor diário ($e_z^o - e_z$), vários métodos podem ser utilizados. Todavia, o método usado pode afetar significativamente a magnitude do termo aerodinâmico. Os métodos para cálculo do déficit de pressão de vapor incluem: (1) pressão de saturação de vapor à temperatura média menos a pressão de vapor no ponto de orvalho (como utilizado originalmente por Penman); (2) pressão de saturação de vapor à temperatura média vezes um menos a umidade relativa média expressa como fração; (3) média da pressão de saturação de vapor às temperaturas máxima e mínima menos a pressão de vapor de saturação no ponto de orvalho determinada no início da manhã; (4) média do déficit de pressão de vapor às temperaturas máxima e mínima; e (5) média do déficit de pressão de vapor baseado em déficits horários.

Para fins de padronização, recomenda-se que o DPV seja calculado por meio do critério 3, anteriormente citado, isto é, tomar a média da pressão de saturação de vapor às temperaturas máxima e mínima menos a pressão de vapor de saturação no ponto de orvalho determinada no início da manhã, para determinações da ETo de 24 horas. Tal critério tende a superestimar o valor do DPV quando comparado com os valores horários, e em seguida obtido a média de 24 horas. Essa tendência de superestimar o DPV é vantajosa porque, quando associado com a função devido ao vento médio de 24h, que é menor do que o vento do período diurno, U_d , há uma compensação entre os dois termos. No caso em que a velocidade do vento diurno em relação ao vento noturno for de 2,0, a velocidade média do vento de 24h é, em torno de, $0,75U_d$, que pode ser da mesma ordem de magnitude da superestimativa do valor do DPV de 24h.

O saldo de radiação à superfície é calculado segundo a proposta de Wright (1982), utilizando-se ainda os seguintes critérios:

- a) utilizar a média de $(T_{max})^4$ e $(T_{min})^4$ ao invés de $(T_{med})^4$;
- b) os parâmetros a e b da equação de Ångström-PreScott iguais a 0,25 e 0,50, respectivamente, e,
- c) o albedo deve ser igual a 0,23.

O fluxo de calor no solo (G) pode ser considerado igual a zero para cálculos de ETo em períodos superiores a 24h, com bons resultados e, ainda, porque G é raramente medida rotineiramente em estações meteorológicas.

A equação de Penman-Monteith assim utilizada é conhecida como Penman-Monteith FAO ou PM-FAO.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os pesquisadores concordam que a cultura hipotética tem muita semelhança com a grama em condições ideais de crescimento e, portanto, é desejável calcular a E_{To} pelo método de PM-FAO, especialmente quando os dados climáticos são coletados em superfícies de condições semelhantes à cultura hipotética. Além disso, comentam que é preferível utilizar a equação de PM-FAO quando os dados climáticos são de qualidade duvidosa do que utilizar dados lisimétricos de qualidade também duvidosa.

Recomendam ainda que as pesquisas futuras devam ser direcionadas no sentido de validar a equação de PM-FAO em climas mais amenos, ou sub-úmidos, e partir para uma avaliação mais rigorosa dos termos de resistência da equação visando a melhor compreensão dos mecanismos físicos e biológicos envolvidos na evapotranspiração e facilitar a introdução do conceito de evapotranspiração da cultura de uma etapa.

Concluindo, pode-se dizer que os métodos correntemente utilizados para estimativa da E_{Tc} envolvem duas etapas. A primeira etapa seria a estimação de ET para uma cultura de referência adequadamente irrigada, com dossel vegetativo de característica padrão, aqui denominada de cultura hipotética de referência. Então, a estimativa da E_{Tc} é obtida pela multiplicação da E_{To} por um coeficiente de cultura ou K_c , que varia com o estágio de crescimento de cada cultura.

A distribuição do coeficiente de cultura durante o ciclo de crescimento da cultura é chamada de “curva de cultura”, que é correntemente obtida experimentalmente. Elas representam o efeito integrado da mudança na área da folha, da altura da planta, do grau de cobertura, da resistência do dossel da planta e do albedo sobre a ET da cultura em relação à E_{To} . Portanto, a proposta para pesquisas futuras seria o cálculo da E_{Tc} de apenas uma etapa, isto é, aperfeiçoar a equação de PM-FAO nos seus termos de balanço de energia e resistências aos fluxos de vapor, de calor e de momentum, para cada cultura em particular, em diferentes condições de cobertura dos solo e estádios fenológicos e calcular diretamente a E_{Tc} .

7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **Advances in evapotranspiration: Proceedings of the national conference on advances in evapotranspiration.** St. Joseph, Michigan. ASAE. 1985. 453 p.
- BLANEY, H. F., CRIDDLE, W. D. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation date.** Washington, USDA, 1950. 48 p. (Technical Paper nº 96).
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere: theory, history, and applications.** Boston, Reidel

Publishing Co., 1982. 299 p.

- BURMAN, R. D., LARAMIE, W. Y., NIXOX, P. R. et al. Water requirements. In: Jensen, M. E. (ed.) **Desing and operation of farm irrigation systems**. Michigan, ASAE, 1983. p. 189-225. (Monograph No. 3)
- CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 1, p. 163-213. 1962.
- CUENCA, R. H., NICHOLSON, M. T. Application of Penman equation wind function. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v. 108, p. 13-23, 1982.
- DOORENBOS, J., PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome, FAO. 1977.179 p. (Irrigation and Drainage Paper 24).
- DOORENBOS, J., KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome, FAO. 1979, 193 p. (Irrigation and Drainage Paper 33).
- FREVERT, D. R., HILL, R. W., BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, ASCE, v. 109, p. 265-270. 1983.
- GLOVER, J., McCULLOCH, J. S. F. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine. **Quart. J. Royal Met. Soc.**, v. 84, p. 172-175. 1958.
- HATFIELD, J. L. Methods of estimating evapotranspiration. In: STEWART, B.A. E NIELSEN, D. R., (eds.) **Irrigation of agricultural crops**, 1990. p. 435-474. (Agronomy monograph, 30).
- JENSEN, M. E., BURMAN, R. D., ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York, ASCE, 1990, 332 p. (Manual No. 70)
- JURY, W. A., TANNER, C. B. Advection modification of the Priestley and Taylor evapotranspiration formula. **Agronomy Journal**, v. 67, p. 840-842, 1975.
- KOHLER, M. A., PARMELE L. H. Generalized estimates of free-water evaporation. **Water Resource Research**, v. 3, n. 4, p 997-1005, 1967.
- MANTOVANI, E. C. **Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: Estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de los cultivos**. Córdoba, Univ. de Córdoba, 1993. 184 p. (Tese de DS).
- MARTINEZ-LOZANO, J. A., TENA, F., ONRUBIA, J. E. et al. The historical evolution of the Ångström formula and its modifications: Review and bibliography. **Agric. For. Meteorology**, v. 33, p. 109-128. 1984.
- McNAUGHTON, R. G., BLACR, T. A. A study of evapotranspiration from a Douglas fir forest using the energy balance approach. **Water Resources Research**, v. 9, p. 1579-1590. 1973.
- MORTON, F. I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and

- practice of hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 66, p. 1-76, 1983.
- MORTON, F. I. Practical estimates of lake evaporation. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, v. 25, p. 371-387, 1986.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proc. Royal Soc. London, Serie A**, v. 193, p. 120-146. 1948.
- PENMAN, H. L., ANGUS, D. E., VAN BAVEL, C. H. N., Microclimatic factors affecting evaporation and transpiration. In: R. M. Hagan, H. H. Haise, T. W. Edminster (Eds.). **Irrigation of Agricultural Lands. Amer. Soc. Agronomy**. 1967. p. 483-505.
- PEREIRA, A. R., VILLA NOVA, N. A. Analysis of the Priestley-Taylor parameter. **Agric. For. Meteorology**, v. 61, p. 1-9. 1992.
- PEREIRA, A. R. An analysis of the criticism of Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration. **Agric. For. Meteorology**, v. 46, p. 149-157. 1989.
- RITCHIE, J. T. Model to predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resources Research.**, v. 8, p. 1204-1213, 1972.
- RITCHIE, J. T., JOHNSON, B. S. Soil and plant factors affecting evaporation. In: STEWART, B.A. and NIELSEN, D.R., (eds.) **Irrigation of agricultural crops** 1990. p. 363-390. (Agronomy Monograph, 30).
- ROSENBERG, N. J., HOYT, E. H., BROWN, R. W. **Evapotranspiration - review of research**. Lincoln, University of Nebraska,. 1968. 80 p.
- SEDIYAMA, G. C. **A versão/proposta para o conceito de evapotranspiração de referência**. Campina Grande, SBA. 1995. 19 p.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome, FAO. 1991. 45 p.
- STIGTER, C. J. Assessment of the quality of generalized wind functions in Penman's equations. **Journal of Hydrology**, v. 45, p. 321-331. 1980.
- TANNER, C. B., JURY, W. A. Estimating evaporation and transpiration from a row crop during incomplete cover. **Agronomy Journal**, v. 68, p. 239-242, 1976.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geogr.Rev.**, v. 38, p. 55-94. 1948.
- van BAVEL, C. H. M., Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification. **Water Resources Research**, v. 2, p 455-467. 1966.
- WILSON, R. G., ROUSE, W. R., Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. **Journal. Applied Meteorology**. v. 11, p. 436-442. 1972.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**. Geneva, WMO 1966, 121 p. (Technical Note 83).