

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS CLIMATOLÓGICOS PARA
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO *

E.J. SCALOPPI **
A.E. KLAR **
N.A. VILLA NOVA ***

RESUMO

Neste trabalho foi observado o comportamento da fórmula de Penman e da radiação solar como base para estimativa da evapotranspiração de uma cultura de batata (*Solanum tuberosum* L.) submetida a três regimes de umidade do solo.

Concluiu-se que tanto a fórmula de Penman como os dados de radiação solar mostraram elevada correlação com a evapotranspiração determinada pelo método do balanço de água. No período inicial de crescimento a fórmula de Penman superestimou em 25-30% os valores de evapotranspiração determinados. Porém, no período de maior desenvolvimento vegetativo da cultura, as estimativas aproximaram-se daqueles determinados, exceto para o tratamento onde o potencial matricial

* Entregue para publicação em 21/09/1978.

** Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, "Campus" de Botucatu, SP.

*** Departamento de Física e Meteorologia, E.S.A. "Luiz de Queiroz", USP.

da água do solo era permitido atingir níveis da ordem de $-2,0$ bares, o que proporcionou uma redução na intensidade de evapotranspiração. As relações entre a evapotranspiração e os dados de radiação solar são apresentados em diferentes períodos do ciclo de crescimento da cultura.

INTRODUÇÃO

A razão de evapotranspiração das culturas constitui um dado fundamental em projetos de irrigação, sendo indispensável para caracterizar a aptidão agroclimática de uma região. Estas aplicações parecem justificar plenamente os estudos dos fenômenos envolvidos neste processo e os esforços desenvolvidos para sua determinação.

As interrelações dos fenômenos envolvidos no processo evaporativo de superfície naturais parecem ter natureza complexa. A transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera envolve a interação de variáveis físicas e biológicas que, em conjunto, determinam o retorno da água à atmosfera como parte do ciclo hidrológico (BAIER, 1965). Por outro lado, muitos pesquisadores admitem que a evapotranspiração de uma cultura com adequado suprimento de umidade no solo eleva-se a um valor máximo, que depende primeramente das condições meteorológicas predominantes (THORNTHWAITE, 1948; Van VIJK & de VRIS, 1954; EAGLEMAN & DECKER, 1965).

Existem muitos métodos propostos para avaliar a evapotranspiração (TANNER, 1967). Porém, apesar de numerosos, nem sempre reúnem precisão, simplicidade e baixo custo. A escolha do método depende da finalidade das determinações e dos recursos técnicos e materiais disponíveis. PENMAN (1948) desenvolveu uma equação para a estimativa da evapotranspiração potencial, baseada no balanço e energia na superfície evaporante, associado a uma re-

lação aerodinâmica semi-empírica. O teor de água do solo deve estar próximo à capacidade de campo e a superfície totalmente tomada por uma vegetação de porte baixo, cor verde e em fase de crescimento ativo.

O método de Penman tem sido extensivamente utilizado. STANHILL (1966) aplicando este método, obteve as estimativas mais precisas entre vários métodos comparados. TOVEY *et al.* (1969) conseguiram bons resultados em base semanal, mensal, ou estacional para espécies forrageiras. Por outro lado, ABDEL-AZIZ *et al.* (1964) concluíram que a fórmula de Penman e suas modificações propostas por TANNER & PELTON (1960) subestimaram acentuadamente os valores de evapotranspiração em condições semi-áridas. Atribuíram estes resultados à intensa advecção de energia térmica na área em estudo. ROSENBERG (1969), determinando a evapotranspiração de uma cultura de alfafa em lisímetros de precisão, concluiu que o método de Penman subestimou em 30% os valores de evapotranspiração potencial, principalmente em condições de forte advecção de calor sensível.

Estes resultados parecem indicar que a fórmula de Penman é mais apropriada para estimar a evapotranspiração em condições úmidas, onde os efeitos da advecção de radiação térmica podem ser desprezíveis (BAHRANI & TAYLOR, 1961).

RIJTEMA (1966) considera que a quantidade de energia disponível para vaporização da água e o transporte de vapor, das camadas de ar próximas à superfície evaporante às camadas mais distantes, sejam os principais fatores meteorológicos que determinam a evapotranspiração. Não havendo limitação de água no solo a evapotranspiração representa a maior proporção da radiação líquida sobre a superfície (TANNER, 1960; GRAHAM & KING, 1961). Os trabalhos de PELTON *et al.* (1960) mostraram elevada correlação entre a radiação líquida e a evapo-

transpiração potencial, mesmo em base horária. DOSS *et al.* (1964) encontraram correlações altamente significativas entre a radiação líquida e a evapotranspiração de espécies forrageiras submetidas a três regimes de umidade no solo.

As elevadas correlações observadas entre a radiação líquida e a radiação solar e a maior disponibilidade de dados da última em relação à primeira (FRITSCHEN, 1967), proporcionaram o aparecimento de relações empíricas entre a evapotranspiração medida e a radiação solar, determinadas durante o ciclo de crescimento da cultura. Conforme propõem JENSEN & HAISE (1963) estas relações assim obtidas, poderiam ser utilizadas para a estimativa da evapotranspiração em condições semelhantes, conhecendo-se apenas os dados locais da radiação solar. TANNER (1968) considera os métodos baseados na radiação solar como os melhores empíricos. NAMKEN *et al.* (1968) encontraram estimativas reais da evapotranspiração em períodos semanais ou quinzenais, usando relações pré-estabelecidas para uma cultura de algodoeiro desenvolvida em diferentes regimes de umidade no solo.

Os objetivos do presente trabalho resumem-se na determinação das correlações e os respectivos coeficientes de proporcionalidade entre a evapotranspiração real de uma cultura de batata submetida a três regimes de umidade do solo, e a evapotranspiração potencial estimada pela fórmula de Penman e os dados de radiação solar.

MATERIAL E MÉTODOS

Para atender os objetivos aqui propostos desenvolveu-se uma cultura de batata (*Solanum tuberosum* L.) cultivar Aracy (IAC-2), a partir de tubérculos-sementes certificados. O plantio efetuou-se em 24 de junho de 1971, seguindo um delineamento experimental de blocos casualizados com três tratamen-

tos e doze repetições. Cada parcela consistiu de três linhas de plantio tendo 4 m de comprimento, sendo que, apenas a linha central foi efetivamente considerada nas determinações. As plantas foram espacadas 0,35 m nas linhas, sendo 0,80 m a distância entre as linhas de plantio. Os tratamentos foram caracterizados por regimes de umidade do solo proporcionados à cultura, os quais assumiram os níveis mínimos médios anotados na Tabela 1.

Tabela 1 - Níveis mínimos médios de umidade do solo em 40 cm de profundidade (trat. de irrigação).

Trat.	Pot.matricial (bares)	teor de água do solo (cm ³ /cm ³)	% de água disponível
1	-2,00	0,262	25
2	-0,80	0,286	50
3	-0,35	0,299	75

A área experimental está localizada na Estação Experimental de Botucatu, Estado de São Paulo, a 22°52'55" de latitude sul e 48°26'22" de longitude oeste, a uma altitude médio de 800 m. Encontrava-se envolvida, em sua maior parte, por um cafezal, numa situação de meia encosta, sendo o relevo normal e ondulado.

O solo pertence à classe textural argila e o valor da massa específica aparente, determinada com anéis volumétricos, assumiu um valor médio de 1,15 g.cm⁻³ na profundidade 0-60 cm. Seguindo a metodologia para determinação da capacidade de campo, observou-se que as variações do teor de água com o tempo tornaram-se pouco significativas em torno de

0,338 cm³/cm³, médio para os 60 cm superficiais. Este valor foi considerado representar a capacidade máxima de retenção de água do solo.

O método de irrigação adotado foi sulcos fechados em nível. Os valores de evapotranspiração real foram obtidos utilizando-se o método do balanço de água descrito por SLATYER (1967), a partir de determinações gravimétricas do teor de água do solo, efetuadas em amostras obtidas observando-se os resultados de ALLMARAS & GARDNER (1956). A estimativa da evapotranspiração potencial foi calculada pela equação proposta por PENMAN (1948), na qual o termo relacionado à energia líquida na superfície foi estimado a partir da radiação solar (PENMAN, 1956), assumindo um albedo de valor médio igual a 0,24, conforme sugestão de FRITSCHEN (1967). Os dados de radiação solar foram anotados num actinógrafo marca Ota Keiki Seisakusko, cujo diagrama apresenta divisões de 0,05 cal.cm⁻². min⁻¹.

A diferenciação entre os tratamentos propostos foi iniciada 27 dias após o plantio, quando admitiu-se satisfatória a emergência das plantas no campo.

RESULTADOS

Os resultados obtidos estão representados na Figura 1. Convém salientar que aos 98 dias após o plantio, as plantas apresentavam visíveis sintomas de maturação, quando a irrigação deve ser suspensa (BOOCK, 1963) não havendo, portanto, maior interesse em se conhecer a evapotranspiração.

Uma análise superficial dos dados revela a ocorrência de consumos diferenciais de água no decorrer do ciclo de crescimento da cultura. De acordo com LEMON *et al.* (1957), estas diferenças estariam associadas às variações no potencial evaporativo da atmosfera, no estado de energia da água no solo e nas exigências em água pelas plantas du-

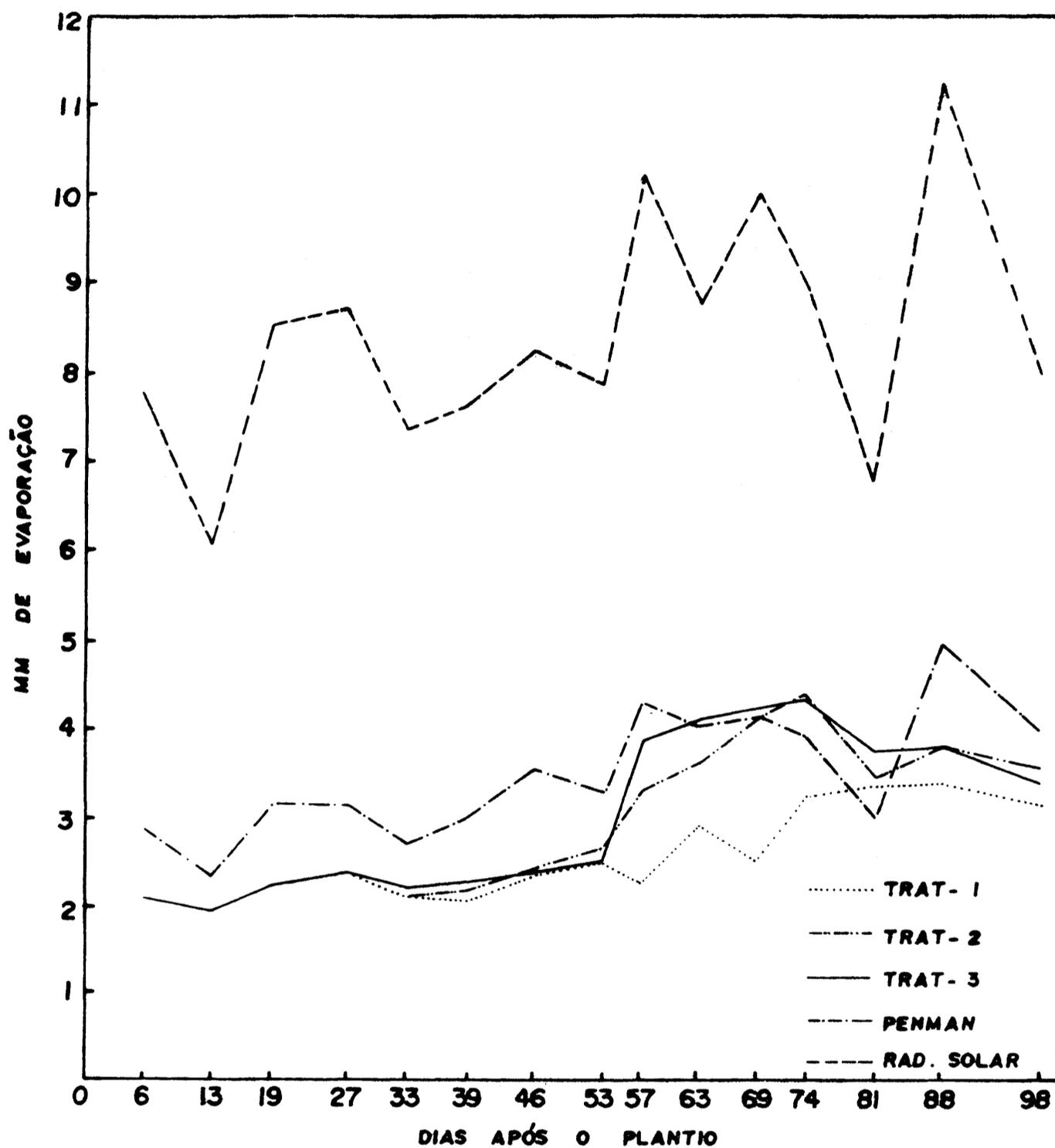


Fig.1 - Valores médios diários de evapotranspiração medida, estimada pela fórmula de Penman e, radiação solar em diferentes períodos do ciclo de crescimento da cultura.

rante o período de observação. Com o objetivo de identificar estádios caracterizados por diferentes exigências em água, durante o ciclo de crescimento das plantas, observou-se o comportamento da relação entre a evapotranspiração medida e a estimativa pelo método de Penman nos três regimes de umidade proporcionados à cultura. Este procedimento, segundo BAHRANI & TAYLOR (1961) e EAGLEMAN & DECKER (1965) reduz a influência de variações na demanda evaporativa da atmosfera sobre a evapotranspiração. Os resultados, anotados na Figura 2, permitem identificar três estádios bem definidos com relação à exigência em água. O primeiro, caracterizado por um menor consumo, abrange a emergência das plantas e o período inicial de crescimento, estendendo-se, aproximadamente, até aos 50 dias após o plantio. O segundo, revela um aumento acentuado nas perdas evaporativas, para em seguida declinar, aos 80 dias, quando a intensidade média de evapotranspiração foi reduzida, até o período final de observações. Os períodos de elevada exigência em água estariam associados à formação e desenvolvimento dos tubérculos (de LIS *et al.*, 1964).

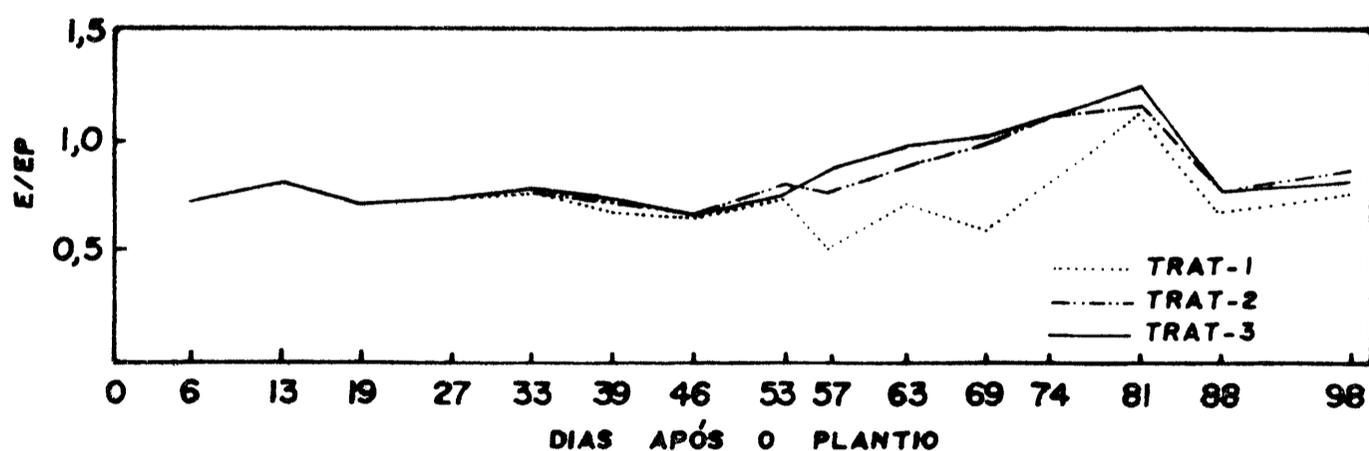


Fig.2 - Relações entre a evapotranspiração medida e estimada pelo método de Penman (E/EP) durante o ciclo de crescimento da cultura.

Os estudos de correlação, conduzidos para os períodos incluídos em dois estádios (o 2º e o 3º estádios foram considerados em conjunto - Tabela 2), parecem indicar que tanto a fórmula de Penman como os dados de radiação solar mostraram-se altamente correlacionados com a evapotranspiração medida nos três regimes de umidade estudados.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O tratamento no qual o potencial matricial da água do solo era permitido atingir níveis próximos a -2,0 bares mostrou uma razão de evapotranspiração inferior aos tratamentos com regimes mais elevados de umidade. De acordo com EAGLEMAN & DECKER (1965) a redução no potencial de água, e consequentemente, na condutividade hidráulica do solo poderia limitar o fornecimento de água às raízes e promover certas alterações fisiológicas nas plantas (VAADIA *et al.*, 1961) contribuindo assim para reduzir a intensidade de evapotranspiração (MAKKINK & Van HEEMST, 1956; BAHRANI & TAYLOR, 1961).

- Evapotranspiração estimada pela fórmula de Penman

A elevada significância dos coeficientes de correlação encontrados nos dois estádios de crescimento considerados para os três tratamentos, indica que a fórmula de Penman deve encerrar os parâmetros meteorológicos que predominam na determinação da evapotranspiração. Este resultado tem sido amplamente confirmado através da literatura (TANNER & PELTON, 1960; STANHILL, 1961; BAIER, 1965; ROSENBERG, 1969; TOVEY *et al.*, 1969) notadamente em condições de clima úmido, onde a advecção de calor sensível não constitui uma parcela significativa da energia disponível ao processo evaporativo (BAHRANI & TAYLOR, 1961; SLATYER, 1967).

Tabela 2 - Fatores de conversão e coeficientes de correlação (r) entre a evapotranspiração (E) e a estimativa pelo método de Penman (EP) e os dados de radiação solar (Rs).

Trat.	Estádio cresc.	E média mm.dia ⁻¹	EP média mm.dia ⁻¹	E/EP	r	Rs média mm.dia ⁻¹	E/Rs	r
1	1º	2,22	3,03	0,73	0,860**	7,78	0,28	0,895**
	2º	2,92	3,82	0,76	0,832**	8,75	0,33	0,758**
	3º	3,26	4,41	0,74	0,874**	9,31	0,35	0,780**
	ciclo	2,60	3,49	0,74	0,874**	8,32	0,31	0,780**
2	1º	2,26	3,03	0,75	0,924**	7,78	0,29	0,854**
	2º	3,78	3,82	0,99	0,884**	8,75	0,43	0,835**
	3º	3,67	4,41	0,83	0,884**	9,31	0,40	0,835**
	ciclo	2,94	3,49	0,84	0,884**	8,32	0,35	0,752
3	1º	2,24	3,03	0,74	0,873**	7,78	0,29	0,800**
	2º	4,03	3,82	1,05	0,857**	8,75	0,46	0,805*
	3º	3,56	4,41	0,81	0,834**	9,31	0,38	0,805*
	ciclo	2,98	3,49	0,85	0,834**	8,32	0,36	0,688

Os fatores de conversão próximos à unidade, observados no segundo estágio dos tratamentos com maior frequência de irrigação, refletem a precisão das estimativas obtidas pelo método de Penman, quando as condições aproximaram-se, tanto quanto possíveis, daquelas preconizadas na definição de evapotranspiração potencial. O tratamento com irrigação mais espaçadas apresentou fatores de conversão relativamente menores, justificados, quando se considera uma provável limitação da água imposta ao processo evaporativo, aliada ao menor desenvolvimento vegetativo das plantas. Apesar disso, os coeficientes de correlação entre os valores medidos e estimados mostraram-se altamente significativos, o que permite concluir que o nível mínimo de umidade do solo neste tratamento não deve ter sido suficientemente severo para provocar uma redução acentuada na evapotranspiração, conforme pode ser observado na Figura 1. DECKER (1962) empregando este método do Missouri, obteve grandes variações nas estimativas da evapotranspiração de uma cultura de milho quando a superfície do solo apresentava-se mais seca. Nestas condições, o valor estimado excedeu em até 70% o valor medido. Com a superfície do solo úmida, os desvios observados sugeriram um modelo de curva semelhante àquela de distribuição normal.

As diferenças entre os valores medidos e os estimados, principalmente nos períodos incluídos no segundo estágio dos tratamentos mais irrigados, têm sido observadas em outras condições. Van BAVEL & HARRIS (1962) na Carolina do Norte concluíram que o método de Penman pode fornecer estimativas razoavelmente precisas da evapotranspiração potencial para longos períodos, em culturas morfológicamente diferentes como gramíneas rasteiras e milho. Admitem, porém, que para períodos mais curtos o método é menos preciso, tendendo superestimar valores baixos e subestimar valores elevados.

- Relações entre a evapotranspiração e radiação solar

Baseado em FRITSCHEN (1967) e TANNER (1968), a elevada correlação observada entre a evapotranspiração determinada e os dados de radiação solar podem ser atribuídos à acentuada dependência da radiação líquida em relação à radiação solar. Não havendo limitação de água pelo solo e nem transferência de calor advectivo do ar atmosférico para a cultura, a energia utilizada na evapotranspiração representa uma elevada proporção da radiação líquida sobre a superfície (GRAHAM & KING, 1961; TANNER & LEMON, 1962; HANKS *et al.*, 1968).

Os fatores de conversão obtidos nos três estádios de crescimento, em cada regime de umidade proporcionado à cultura, podem ser empregados para estimar a evapotranspiração em condições semelhantes, conhecendo-se apenas os dados locais de radiação solar, conforme estabelecem JENSEN & HAISE (1963). É um método simples e tem se revelado preciso para esta estimativa, mesmo em períodos mais curtos, conforme mostram os resultados de NANKEN *et al.* (1968). Havendo disponibilidade de dados de radiação solar, este método parece reunir maiores vantagens práticas que outros métodos empíricos.

SUMMARY

EVALUATION OF CLIMATOLOGICAL METHODS FOR ESTIMATING EVAPOTRANSPIRATION

The major purposes of this work were to measure the evapotranspiration in a potato field-crop under three soil moisture regimes and to correlate these values with solar radiation data and to those employing Penman's formula.

The estimatives obtained by the two methods studied were

significantly correlated to the evapotranspiration values measured in the various periods of the plant growth. In the first stage of the growth season, Penman's formula overestimated the measured values in about 25-30%, however from the stage of tuber growth to maturity, it supplied the best estimates, except in the treatment where the matric potential of soil water reached -2.0 bars. This contributed to reduce evapotranspiration rate during all growth season.

The relationship between evapotranspiration and solar radiation is presented for various stages of the plant growth.

LITERATURA CITADA

- ABDEL-AZIZ, M.H.; TAYLOR, S.A.; ASHCROFT, G.L., 1964. Influence of advective energy on transpiration. *Agron. J.* 56(2): 139-142.
- ALLMARAS, R.R.; GARDNER, C.O., 1956. Soil sampling for moisture determinations on irrigation experiments. *Agron. J.* 48(1): 15-17.
- BAHRANI, B.; TAYLOR, S.A., 1961. Influence of soil moisture potential and evaporative demand on the actual evapotranspiration from an alfalfa field. *Agron. J.* 53(4): 233-236.
- BAIER, W., 1965. The interrelationship of meteorological factors, soil moisture and plant growth. *Int. J. Biomet.* 9(1): 5-20.
- BAVEL, C.H.M. Van; HARRIS, D.G., 1962. Evapotranspiration rates from Bermudagrass and corn at Raleigh, North Carolina. *Agron. J.* 54(4): 319-322.
- BOOCK, O.J., 1963. Instruções para a cultura da batatinha. *Bolm. téc. Inst. Agron. Est. Campinas* 128, 68 p.

- DECKER, W.L., 1962. Precision of estimates of evapotranspiration in Missouri climate. *Agron. J.* 54(6): 529-531.
- DOSS, B.D.; BENNETT, O.L.; ASHLEY, D.A., 1964. Moisture use by forage species as related to pan evaporation and net radiation. *Soil Sci.* 98(5): 322-327.
- EAGLEMAN, J.R.; DECKER, W.L., 1965. The role of soil moisture in evapotranspiration. *Agron. J.* 57(6): 626-629.
- FRITSCHEN, L.J., 1967. Net and solar radiations over irrigated field crops. *Agric. Met.* 4: 55-62.
- GRAHAM, W.G.; KING, K.K., 1961. Fraction of net radiation utilized in evapotranspiration from a corn crop. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 25(3): 158-160.
- HANKS, R.J.; GARDNER, H.R.; FLORIAN, R.L., 1968. Evapotranspiration climate relations for several crops in the Central Great Plains. *Agron. J.* 60(5): 538-542.
- JENSEN, M.C.; HAISE, H.R., 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. civ. Engrs* 89(IR4): 15-41.
- LEMON, E.R.; GLASER, A.H.; SATTERWHITE, L.E., 1957. Some aspects of the relationship of soil, plant and meteorological factors to evapotranspiration. *Proc. Soil Sci. Soc. Am.* 21(5):464-468.
- LIS, B.R. de; PONCE, I.; TIZIO, R., 1964. Studies on water requirements of horticultural crops. I. Influence of drought a different growth stages of potato on tuber's yield. *Agron. J.* 56(5):377-381.
- MAKKING, G.F.; HEEMST, H.D.J. Van, 1956. The actual evapotranspiration as a function of the potential evapotranspiration and the soil moisture tension. *Neth. J. Agric. Sci.* 4: 67-72.

- NAMKEN, L.N.; GERARD, C.J.; BROWN, R.G., 1968. Evapotranspiration of cotton and estimation methods. *Agron. J.* 60(1):4-7.
- PELTON, W.L.; KING, K.M.; TANNER, C.B., 1960. An evaluation of the Thornthwaite and mean temperature methods for determining potential evapotranspiration. *Agron. J.* 52(5): 387-395.
- PENMAN, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Serie A.* 193:120-145.
- PENMAN, H.L., 1956. Estimating evaporation. *Trans. Am. geophys. Un.* 37: 43-46.
- RIJTEMA, P.E., 1966. Derived meteorological data: transpiration, *Miscell. Repr. Inst. Land. Wat. Manag. Res.* 67, Wageningen, p. 55-72.
- ROSENBERG, N.J., 1969. Seasonal patterns in evapotranspiration by irrigated alfalfa in the Central Great Plains. *Agron. J.* 61(6): 879-886.
- SLATYER, R.O., 1967. *Plant-water relationship.* New York, Academic press, 366 p.
- STANHILL, G., 1961. A comparison of methods of calculating potential evaporation from climatic data. *Israel J. Agric. Res.* 11(3-4): 159-171.
- TANNER, C.B., 1960. Energy balance approach to evapotranspiration from crops. *Proc. Soil. Sci. Soc. Am.* 24(1):1-8.
- TANNER, C.B., 1967. Measurement of evapotranspiration. *Agronomy.* 11:534-574.
- TANNER, C.B., 1968. Evaporation of water from plants and soil. In Kozlowski, T.T. ed. *Water deficits and plant growth (vol. 1).* New York, Academic press, p. 73-106.

- TANNER, C.B.; PELTON, W.L., 1960. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. *J. geophys. Res.* 65(10): 3391-3413.
- TANNER, C.B.; LEMON, E.R., 1962. Radiant energy utilized in evapotranspiration. *Agron. J.* 54(3): 207-212.
- THORNTHWAITTE, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38(1): 55-94.
- TOVEY, R.; SPENCER, J.S.; MUCHEL, D.C., 1969. Turfgrass evapotranspiration. *Agron. J.* 61(6): 863-867.
- VAADIA, Y.; RANEY, F.C.; HAGAN, R.M., 1961. Plant water deficits and physiological processes. *A Rev. Pl. Physiol.* 12:265-292.
- WIJK, W.R. Van; VRIES, D.A. de, 1954. Evapotranspiration. *Neth. J. Agric. Sci.* 2: 105-119.