

ESTIMACION CLIMATICA DE LA EVAPOTRASPIRACION POTENCIAL EN LA ARGENTINA SEGUN EL METODO DE PENMAN 1948

E. A. Damario y C. L. Cattáneo (1)

Recibido: 22/2/82

Aceptado: 29/7/82

RESUMEN

La fórmula estimatoria de evapotranspiración potencial (ETP) propuesta por H. L. Penman en 1948, se aplica a la información climática de 186 localidades del territorio continental de la República Argentina. Se presentan las cartas de ETP correspondientes a los promedios anuales y de los meses de enero, abril, julio y octubre, las cuales se comparan con las producidas por otros sistemas estimatorios como los de Thornthwaite, de Papadakis y de Grassi-Christiansen, así como con estimaciones de ETO -"evapotranspiración potencial de referencia" obtenidas a partir de los promedios climáticos de mediciones de evaporación, corregidos por factores zonales variables de acuerdo a la probable magnitud del efecto oasis.

CLIMATIC ESTIMATION OF ARGENTINE POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION BY 1948, PENMAN METHOD

SUMMARY

The equation to estimate potential evapotranspiration (PE) proposed by Penman in 1948 is used on the climatic data from 186 weather stations in continental Argentine. Charts corresponding to annual, January, July, April and October averages are presented. They are compared to the values obtained by other estimating methods such as those by Thornthwaite, Papadakis and Grassi - Christiansen. They are also compared to estimations of ETO -"reference potential evapotranspiration"- obtained from climatic averages of evaporation measurements corrected by variable zonal factors according to the probable magnitudes of the oasis effect.

(1) Cátedras de Climatología y Fenología Agrícolas, Facultades de Agronomía, Universidad Nacional de La Plata (Calle 60 y 118 - 1900 La Plata, Bs. As.) y Universidad de Buenos Aires (Av. San Martín 4453 - 1417 Buenos Aires), respectivamente.

INTRODUCCION

Con posterioridad al año 1944, cuando el concepto de la evapotranspiración potencial fuera introducido en la ciencia climatológica (Thornthwaite *et al.*, 1944), innumerables contribuciones sobre los aspectos teóricos y aplicativos de este nuevo elemento han enriquecido proficuamente su conocimiento. Muchos de esos aportes se originaron o tuvieron aplicación inmediata en problemas agrícolas vinculados al balance de agua, en los cuales resulta imprescindible la información sobre las cantidades máximas de agua que se pueden perder por evaporación del suelo y transpiración vegetal en los diferentes ambientes naturales.

Lamentablemente, la dificultad para desarrollar un dispositivo medidor normalizado en cuanto a la influencia de factores superficiales de suelo y vegetación, ha impedido hasta el momento, la determinación experimental de la evapotranspiración potencial.

Esta imposibilidad ha provocado y estimulado, sin lugar a dudas, el desarrollo de numerosas fórmulas estimatorias integradas con aquellos elementos meteorológicos de mayor responsabilidad en el fenómeno, fórmulas cuya adecuación generalizada a las diversas condiciones climáticas y ecológicas es aún objeto de profundas discrepancias. No serían ajenas a este respecto, las sensibles modificaciones que, con cierto pragmatismo, fueron alterando a través del tiempo el sentido original puramente climático de la evapotranspiración potencial, para introducirle un cariz ecológico o agrícola.

A pesar de ello, cuando las fórmulas de estimación se calculan y aplican en términos climáticos, proveen una información aceptable sobre la magnitud de las necesidades hídricas potenciales, lo que permite utilizarlas, con cierta confianza, en evaluaciones agroclimáticas regionales.

Hasta el momento, se han aplicado a la información climatológica argentina tres di-

ferentes sistemas estimatorios de la evapotranspiración potencial con el objeto de relevar las modalidades geográficas y temporales que presenta este importantísimo parámetro agroclimático. Los disímiles resultados obtenidos señalan claramente la variable repercusión de los factores meteorológicos utilizados en cada caso para su estimación.

La primera contribución utilizó el sistema preconizado originalmente por Thornthwaite, (1948), basado sobre la relación geométrica existente entre la temperatura del aire y la máxima pérdida de agua posible; su aplicación a nuestro país permitió trazar la primera carta de evapotranspiración potencial media anual de la Argentina (Burgos y Vidal, 1951).

El segundo aporte consideró como factor esencial y único de la necesidad de agua al grado de insaturación del aire; los valores climáticos mensuales y anuales fueron computados y publicados por el mismo autor de la fórmula (Papadakis, 1961).

Por último, una estimación basada en factores de radiación, temperatura y grado de nubosidad (Grassi y Christiansen, 1964), originó una tercera serie de valores climáticos de evapotranspiración potencial en el país (Grassi y Tévez, 1966).

En el presente estudio, se publican los resultados alcanzados aplicando a la información climatológica argentina la ecuación estimatoria de Penman (1948), considerada por sus muchos adeptos como la única capaz de producir valoraciones confiables de evapotranspiración potencial en un amplio rango de condiciones ambientales (Hounam, 1966; Doorenbos and Pruitt, 1977). Algunos estudios realizados en el país parecieran confirmar parcialmente este aserto (Quintela, 1962, 1977; Sierra y Pórfido, 1978; Suero y Garay, 1979).

Los autores, sólo pretenden que la aplicación generalizada del método de Penman a todo el territorio continental argentino y la presentación y discusión de la cartografía respectiva, contribuyan a un mejor entendimiento de las características agroclimáticas de nuestro régimen hidrológico.

MATERIALES Y METODO

La aplicación de la fórmula original de Penman (Ver anexo C) al cómputo de las evapotranspiraciones potenciales medias mensuales de 186 localidades continentales argentinas, se realizó utilizando la información climatológica básica consignada en el Cuadro 1 y la metodología desarrollada por Frére, (1972). Por consiguiente, no fueron consideradas las modificaciones propuestas para incluir, en la fórmula original, la influencia de otros factores, como por ejemplo la duración del día y la resistencia estomática vegetal (Penman y Schofield, 1951), o aquella de la temperatura en el término aerodinámico (Frére y Popov, 1980), entre otras.

Solamente se modificaron los coeficientes de la ecuación de regresión estimadora de la radiación global, arbitrio al que debió recurrirse para suplir la falta de información publicada referente a mediciones locales de

este fundamental elemento del clima. Para ello, se realizó una prueba de adecuación a las condiciones argentinas de algunas fórmulas desarrolladas para estimar la radiación global sobre la base de la teórica-astronómica corregida según la heliofanía relativa.

Seis de estas ecuaciones de regresión lineal, incluyendo una especialmente desarrollada para el país, (Ver anexo A), fueron probadas mediante la escasa información publicada que pudo disponerse referente a promedios mensuales de radiación medida con piranógrafo (Cuadro 1 b). Esta limitada información impidió asimismo, adecuaciones regionales. Los resultados obtenidos, que se consignan en el Cuadro 2, estimularon a procurar mejorar el ajuste, lo que se consiguió modificando ligeramente y en forma estacional, el coeficiente angular de la ecuación propuesta por Penman, en la siguiente forma: aumentándolo a 0,60 para los cuatro meses más calientes (noviembre a febrero), manteniendo 0,55 para los cuatro meses más fríos (mayo a agosto) y considerando 0,57 para

CUADRO 1: Información climática utilizada.

Elemento climático	Período	Fuente de información
a Grado de nubosidad media mensual, en décimos	1901-50 1931-60 1941-50 1951-60	S.M.N., 1958 a S.M.N., 1972 b S.M.N., 1958 b S.M.N., 1972 a
b Radiación global media mensual, Ly/día	diversos	Abeledo <i>et al.</i> , 1970 Kurlat y Fernández, 1970 Burgos, 1970
c Heliofanía relativa media mensual, %	1901-20 diversos 1931-60	Knoche y Borzacov, 1946 S.M.N., 1944 S.M.N., 1972 b
d Temperatura media mensual, °C (Máx. + Mín.) /2 Tensión de vapor media mensual, mb. Velocidad de viento media mensual, km/h	1941-50 1951-60	S.M.N., 1958 b S.M.N., 1972 a
e Evaporación de tanque tipo A, mm/mes	diversos	Quintela <i>et al.</i> , 1970 Quintela, 1977 Galmarini y Raffo, 1961 Galmarini y Raffo, 1964

los meses restantes. Como puede observarse en el cuadro, la modificación, denominada "fórmula de adecuación", produjo aproximaciones mejores para las dos series más extensas y confiables de Buenos Aires y Pilar (Ver anexo B), así como para el conjunto de la información. Estos resultados y un mayor ajuste mostrado para el semestre frío, decidieron la utilización de esta fórmula de adecuación para reconstruir estimativamente las series de promedios mensuales de radiación global de las 186 localidades utilizadas.

La información climática oficial publicada en el país referente a heliofanía relativa es muy reducida, lo que obligó también a procurar su estimación sobre la base de la relación de este elemento con el grado de nubosidad, información ésta disponible para todas las localidades utilizadas. Para ello, el tratamiento estadístico apropiado de los datos proporcionados por las fuentes consignadas en el Cuadro 1 c, permitió deducir los promedios mensuales climáticos de heliofanía relativa desde series de 35 o más años para 15 localidades. Estos promedios, puntuados

gráficamente contra los respectivos valores de grado de nubosidad en décimos (Figura 1) mostraron ordenamientos curvilíneos bien definidos y propios para cada mes. Las líneas de ajustamiento trazadas a mano levantada, proveyeron una excelente medida para estimar los promedios mensuales de la duración del brillo solar en cada una de las 186 localidades a partir de sus valores climáticos de grado de nubosidad (*).

Estos promedios de nubosidad se sometieron previamente a una depuración y homogeneización cartográfica para tratar de eliminar o reducir algunas diferencias regionales y seriales. A tal fin, los promedios 1941-1960 de cada mes se volcaron sobre cartas 1: 7.000.000 en las que se trazaron las correspondientes isonefas de grado en grado que se transformaron luego en isolíneas de heliofanía relativa, haciendo uso de las relaciones halladas gráficamente. El trazado definitivo de estas isoheliofanías se ajustó para que mantuvieran entre sí una diferencia de 2,5%, espaciamiento considerado conveniente para no introducir errores mayores del 4% en la

CUADRO 2: Errores de estimación (Sxy) entre promedios climáticos mensuales de Radiación Global, observados en cinco localidades argentinas y los obtenidos mediante diversas fórmulas estimatorias. Valores en Ly/día.

Localidad y años analizados	Fórmula de estimación							
	1	2	3	4	5	6	7	
Buenos Aires (30)	30,9	50,7	16,3	16,3	15,7	16,8	14,5	
Pilar (25)	28,6	48,8	20,7	18,7	24,8	23,1	11,6	
Las Lomitas (9)	25,6	41,7	33,1	30,8	51,6	34,0	21,9	
Mendoza (6)	38,7	57,4	28,8	28,0	30,6	30,9	31,7	
Trelew (8)	49,9	65,8	25,7	22,4	37,5	15,6	30,8	
Para el conjunto de datos	Sxy	33,3	49,6	24,1	22,2	31,8	23,4	22,1
	r	0,991	0,991	0,992	0,992	0,983	0,993	0,991
	bxy	0,940	0,922	0,937	0,962	0,963	0,970	0,975

r: Coeficiente de correlación; bxy: Coeficiente de regresión.

Fórmulas: 1) Penman, 1948; 2) Penman, 1954; 3) Doorenbos y Pruitt, 1977; 4) Abeledo *et al.*, 1970; 5) Glover y Mc Culloch, 1958; 6) Turc, 1961 y 7) Fórmula de adecuación.

* El trabajo estaba terminado cuando apareció la "Estadística Climática", 1961-70 (S.M.N., 1981) con valores de heliofanía para muchas localidades, que agregados a los de las series utilizadas para realizar las gráficas referidas, no modificaron significativamente sus promedios.

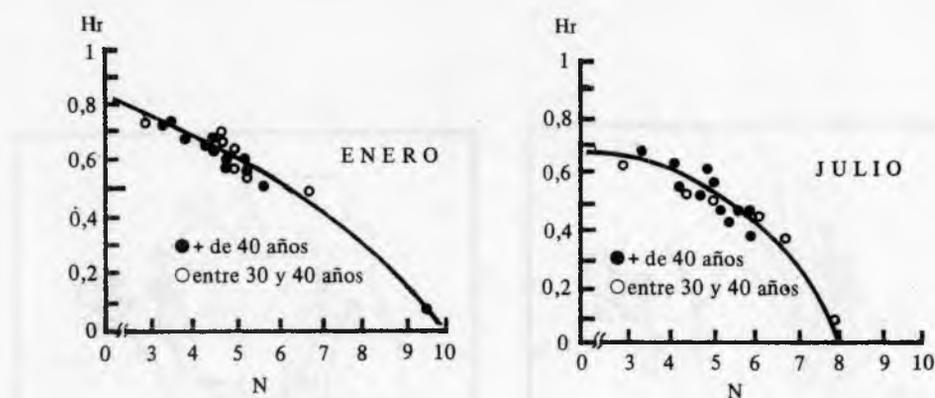


Figura 1: Relación entre los promedios mensuales de grado de nubosidad (N) y de Heliofanía relativa (Hr) observados en localidades argentinas.

estimación final de la evapotranspiración. Como ilustración, en la Figura 2 se reproducen las cartas para los meses de enero y julio obtenidas por este procedimiento.

A partir de estas cartas mensuales y por simple interpolación geográfica, se obtuvieron para cada localidad los promedios utilizados para el cálculo de la radiación global mediante la "fórmula de adecuación" explicada.

Otro elemento para el que también se decidió realizar una depuración de carácter cartográfico fue la velocidad del viento, cuya medición puede verse muy afectada por la ubicación particular de cada observatorio, los cambios de lugar, así como por la altura de instalación y defectos del instrumental. Por ello, cuando los promedios mensuales que figuran en las estadísticas climatológicas usadas (1 d) se volcaron en mapas, denotaron ciertas diferencias regionales. La zonificación de esas cartas mensuales según una escala de tres en tres kilómetros por hora, permitió corregir la mayor parte de estas diferencias asignando la velocidad media del intervalo escalar correspondiente a todas las localidades incluidas en una misma zona. Comprobaciones realizadas para diversas situaciones con velocidad de viento excesivamente fuerte, permitieron constatar que los errores máximos posibles en la ETP como consecuencia de este procedimiento, no superarían el seis por ciento del

valor mensual. De esta manera se extrajeron de tales cartas los valores de velocidad media mensual a utilizar en el cálculo de la evapotranspiración potencial, los cuales, suponiendo una altura media de observación entre 8 y 10 metros, fueron llevados al nivel estipulado en la fórmula, mediante el factor 0,78.

Los restantes elementos climáticos necesarios para la estimación por la fórmula de Penman, es decir: promedios mensuales de temperatura y tensión de vapor para el período 1941-1960, se utilizaron directamente sin corrección alguna.

Las evapotranspiraciones potenciales (ETP) medias mensuales de las 186 localidades utilizadas se computaron, entonces, a partir de la información básica obtenida en la forma explicada y siguiendo la metodología adoptada. Volcadas posteriormente, mes por mes, sobre mapas a escala 1: 7.000.000 y zonificados éstos mediante el trazado de isolíneas convenientemente valoradas, produjeron las cartas agroclimáticas de evapotranspiración potencial que fueron el objetivo principal del trabajo referente al presente informe. Por el carácter macroclimático establecido en el estudio y el origen estimativo de la mayor parte de la información de base, el dibujo de las isolíneas de ETP se hizo en forma muy suavizada; en ciertos casos, la manifiesta influencia de factores mesoclimáticos muy relevantes -como el valle cultivado

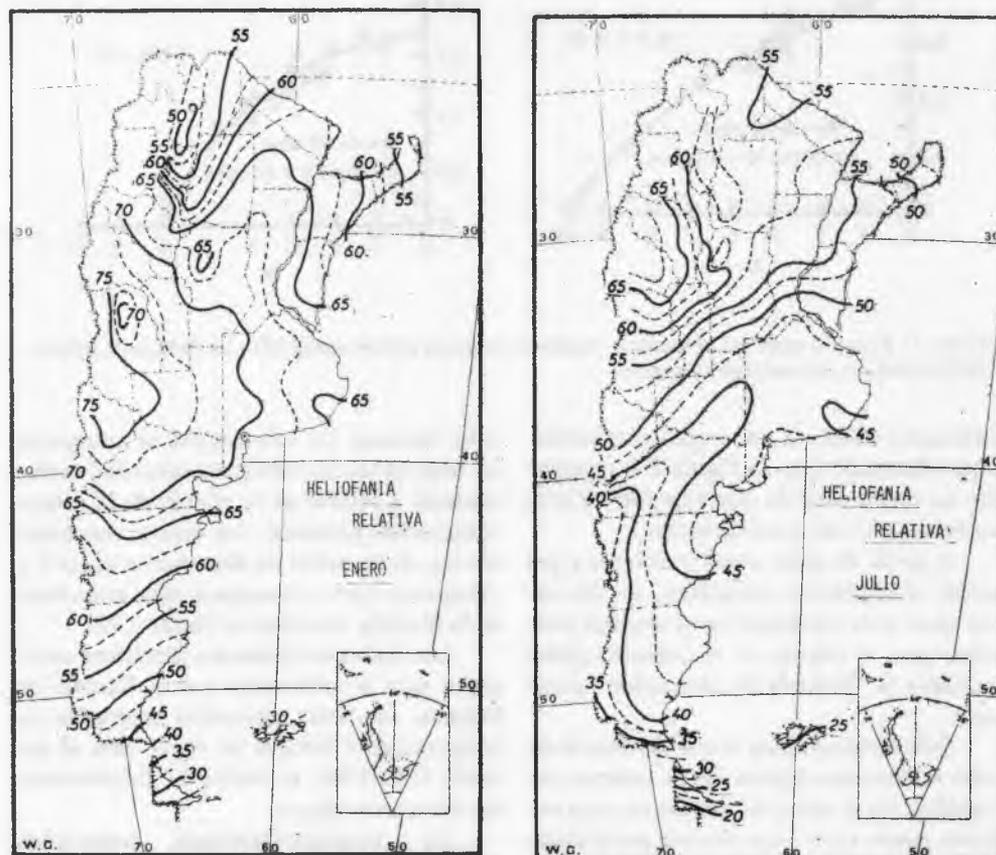


Figura 2: Cartas climáticas de Heliofanía Relativa, en %, estimadas en función del grado de nubosidad.

del Río Negro, por ejemplo- obligó a alterar la continuidad de las isolíneas para señalarla especialmente. El diseño en la región patagónica debe considerarse como tentativo, a causa de la escasa y altamente localizada información climática de referencia. Por otra parte, además de constituir una región para la cual el conocimiento de la ETP carece de importancia agrícola práctica, será donde la magnitud pristina de este elemento sufrirá mayores alteraciones por causa de las impredecibles modificaciones que deberán realizarse para mejorar el microclima de aquellas áreas donde fuera factible alguna explotación agrícola.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las cartas de evapotraspiración potencial del territorio continental argentino calculada según el método de Penman 1948, se presentan en la Figura 3 para los totales anuales, en la Figura 4 para los meses térmicamente extremos de enero y julio, y en la Figura 5 para los meses intermedios de abril y octubre.

La carta de valores anuales señala un rango de variación territorial de 850 milímetros, como diferencia entre los 1.400 mm

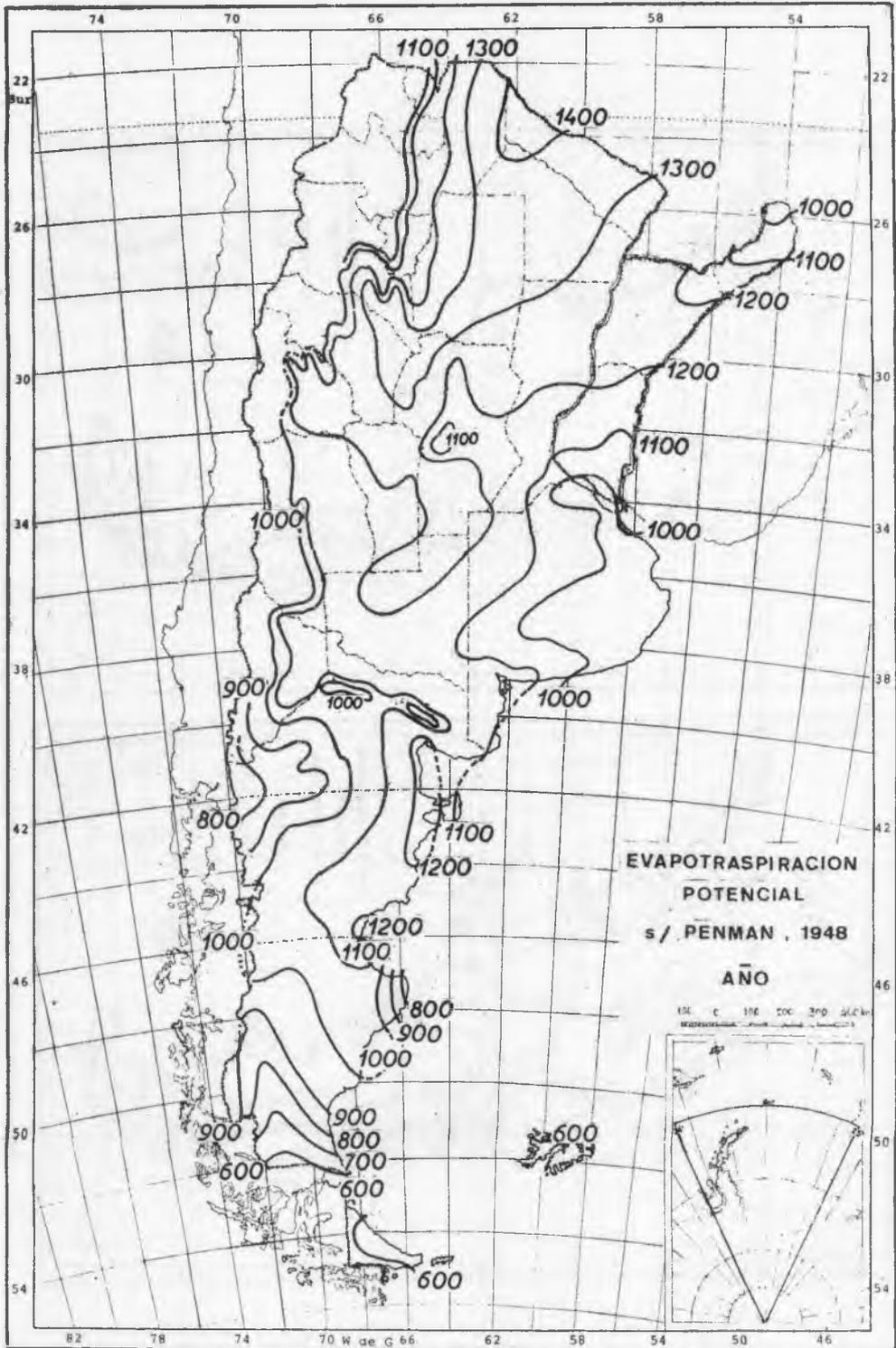


Figura 3: Evapotranspiración potencial media anual en mm, estimada según Penman, 1948.

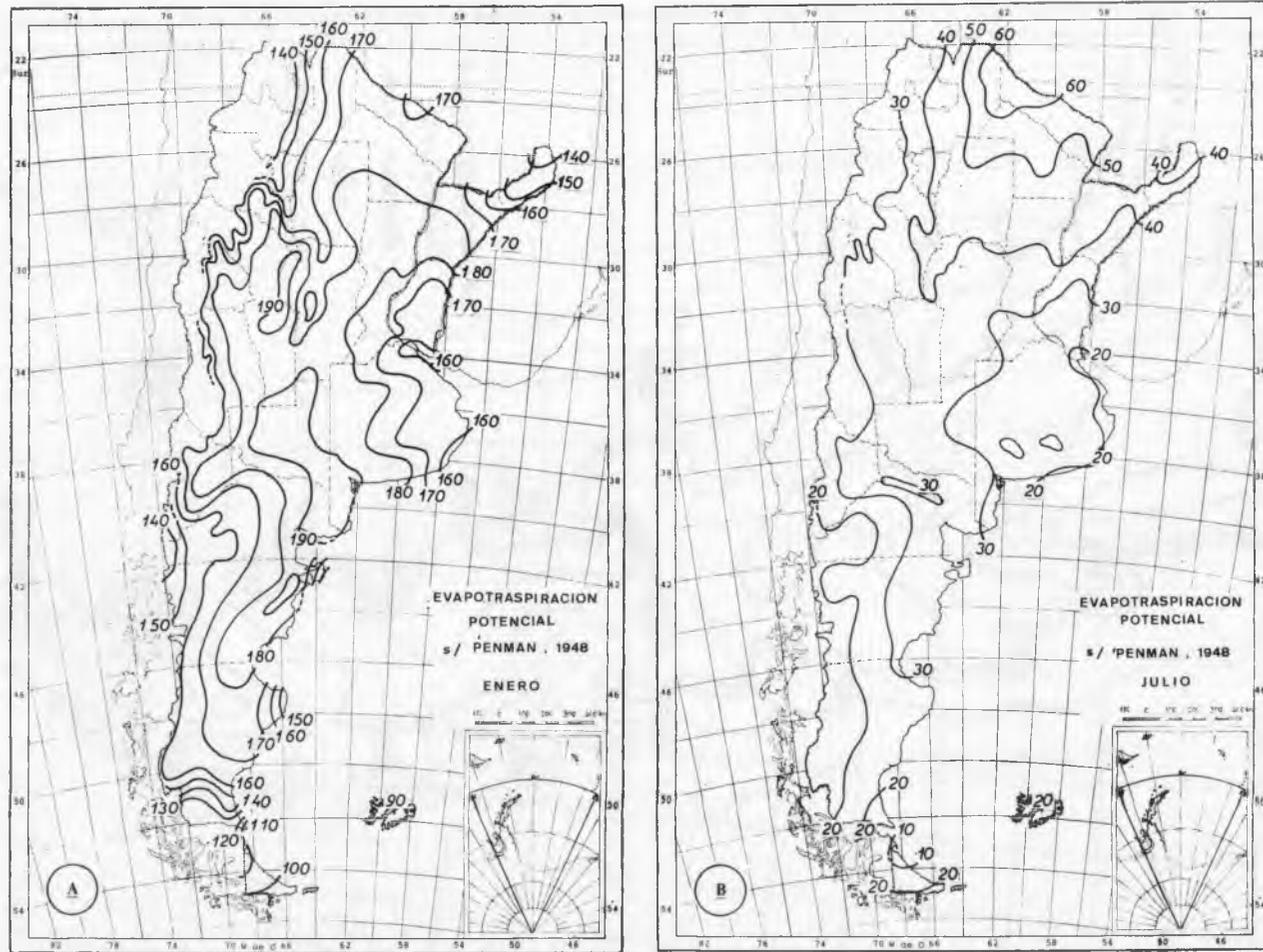


Figura 4: Evapotranspiración potencial media mensual en mm para enero y julio, estimada según Penman 1948.

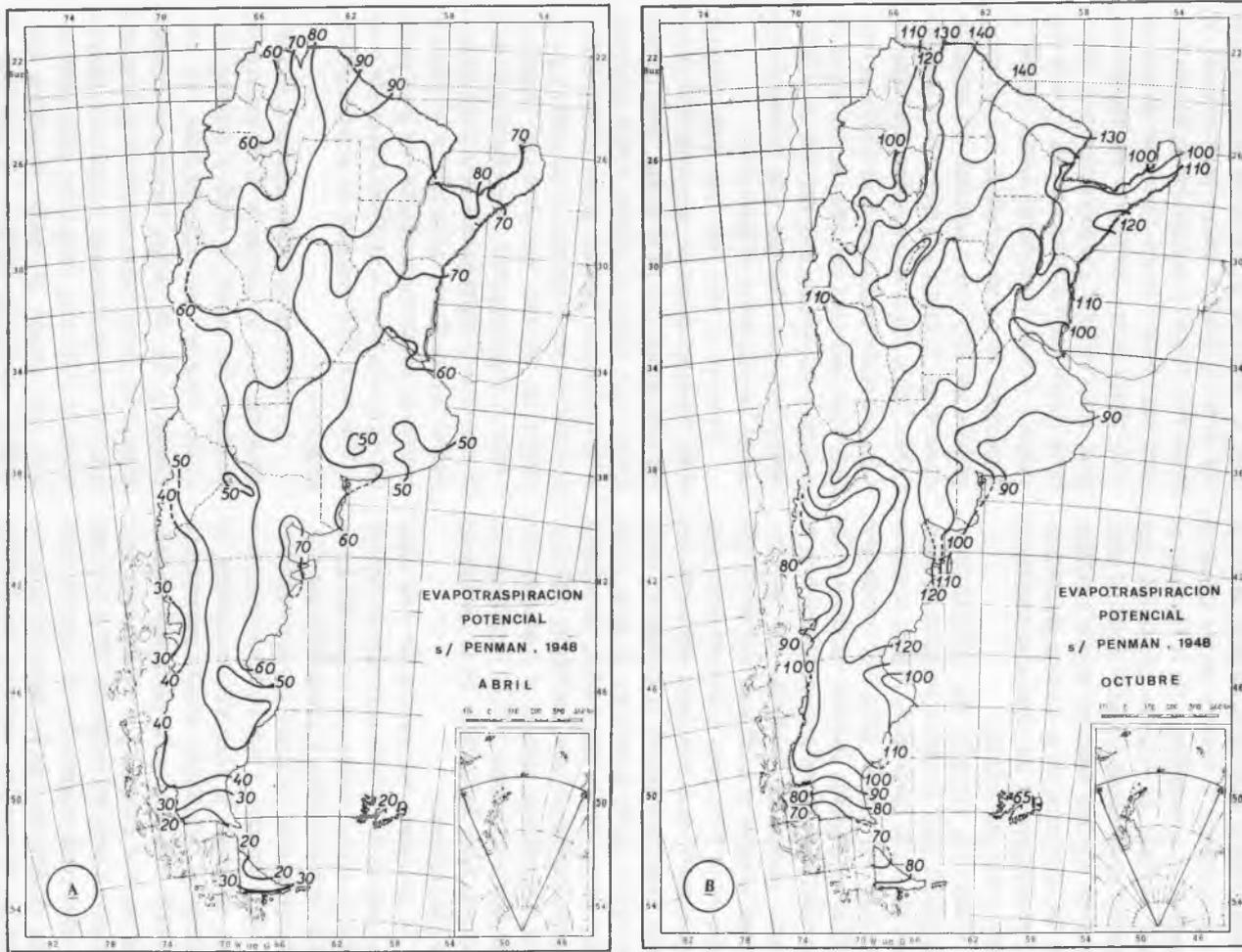


Figura 5: Evapotranspiración potencial media mensual en mm para abril y octubre, estimada según Penman 1948.

computados para la porción noroccidental formoseña y los casi 600 mm que acusa la región central atlántica de la Tierra del Fuego.

Siendo que el valor anual se integra con los mensuales y que éstos resultan de la acción concurrente y variable de los términos energético y aerodinámico de la fórmula, es difícil explicar el trazado particular que muestran las isolíneas de ETP anual, el cual, si bien en algunas regiones tiende a reflejar el de las isotermas, no se asemeja globalmente al de ninguno de los elementos climáticos usados como estimadores.

Llaman la atención las elevadas cifras consignadas para la región patagónica, especialmente en su parte norte, donde la mayor influencia del efecto advectivo produciría pérdidas potenciales anuales similares a las alcanzadas en el litoral mesopotámico o en la pradera pampeana húmeda. Al parecer, Penman exagera la incidencia del efecto advectivo en la ETP, pues si bien es cierto que el incremento de la velocidad del viento aumenta consecuentemente la intensidad de la evaporación desde superficies de agua, no es menos cierto que la transpiración responde a factores fisiológicos que, además de desconocer la dependencia directa y rectilínea con aquel factor (Soriano, 1953), establecen límites máximos específicos en la pérdida de agua por la planta.

Al comparar los valores de esta carta anual con las respectivas normales de precipitación, podrá advertirse que solamente las regiones mesopotámica y precordillerana neuquina mostrarían balances de agua equilibrados o con excesos, y que en la cuyana, pampeana semiárida y chaqueña occidental, se producirían deficiencias anuales superiores a los 1.000 mm. Aún en la parte más húmeda de la pradera pampeana se totalizarían deficiencias hídricas del orden de 200 a 400 mm por año; estas magnitudes no parecen concordar totalmente con las características corográficas ni con las aptitudes productivas agrícolas propias de esta región.

Con referencia a las cartas mensuales de ETP, la correspondiente a enero (Figura 4 A) indica una relativa uniformidad territorial de

los valores que, con excepción de la porción austral mas allá de los 48° de latitud, oscilan entre 140 y 190 mm, es decir con un rango de solamente 50 mm. La zona con mayor ETP se ubica en la provincia de La Pampa, sur de la de Buenos Aires y parte oriental de la de Río Negro. La coincidencia de una elevada heliofanía y fuerte advección de aire seco y cálido, lleva a configurar una región con gran potencialidad evapotranspiratoria. Similares condiciones alcanzan a casi toda la Patagonia, donde localidades como Trelew y Comodoro Rivadavia acreditan valores superiores a los 180 mm y aquellas tan australes como Lago Argentino, Gobernador Gregores o Pto. Santa Cruz, acusan cifras equivalentes a las del norte correntino o de Formosa central. Para este mes del año, en las regiones cuyana y patagónica más del 60% de la ETP obedecería, para Penman, a la influencia del efecto aerodinámico (Figura 6 A).

Durante el mes más frío, julio (Figura 4 B), Penman indica un campo de ETP todavía más parejo que en el verano, pues las isolíneas -que ahora adquieren cursos similares a las isotermas- indican como valores extremos 60 mm en el noroeste formoseño y poco menos de 20 mm en territorio fueguino. Como es lógico suponer, se intensifica durante este mes la dependencia de la evapotranspiración con el factor advectivo, y el balance radiativo, que se torna negativo en gran parte del país, alcanza a contribuir solamente con el 30% de la ETP mensual en el norte cálido (Figura 6 B)

La información gráfica ofrecida, se complementa con las cartas de ETP correspondientes a los meses de abril y octubre, los cuales señalan, aproximadamente, el comienzo y fin de ambas termofases anuales (Figura 5). Estas cartas muestran un trazado parecido en sus isolíneas, aunque con magnitudes de ETP muy superiores para octubre, mes con mayor provisión energética que abril, y registrando también, en casi todo el país, amplitudes térmicas y déficits de saturación más elevados. En ambos meses, la diferencia entre los valores extremos alcanza a unos 70 milímetros, anotándose también, es-

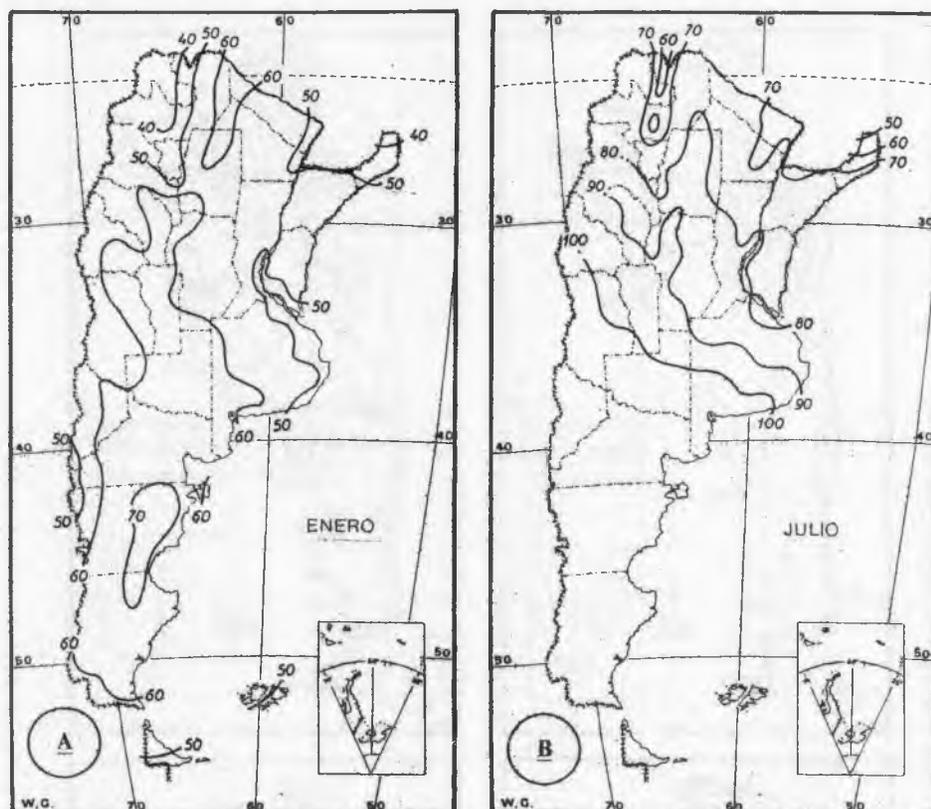


Figura 6: Participación porcentual en la ETP mensual del término aerodinámico de la fórmula de Penman.

pecialmente en octubre, elevadas valoraciones evapotraspiratorias en la región patagónica norte y central.

Es interesante comparar estas cartas con las confeccionadas mediante las estimaciones producidas por los otros tres métodos citados en la Introducción de este estudio. A tal efecto, en la Figura 7 se reproducen las cartas de ETP anual según las fórmulas de Thornthwaite (en adelante abreviado Th), de Papadakis (Pa) y de Grassi-Christiansen (Gr) (Ver anexo C).

En principio, se advierte que los valores anuales obtenidos por el método de Penman (Pe) resultan intermedios entre los de Th, que son totalmente inferiores, y los de Gr que por lo contrario, se manifiestan superiores en todo el territorio. En relación con las cifras de Pa, las diferencias cambian de signo según las regiones.

Para apreciar mejor el significado y sen-

tido de estas diferencias independizándolas de las cifras absolutas, las cartas de la Figura 8 reproducen la distribución geográfica que adquiere el valor de la relación entre Pe y cada uno de los otros estimadores.

La carta C muestra que la subvaloración de Pe con relación a Gr, se mantiene entre 0,65 y 0,80 para la mayor parte del territorio, alcanzando a 0,90 solamente en una pequeña porción de la Patagonia. Expresadas en magnitud las diferencias promedian 400 a 600 mm hasta los 36-37° de latitud y entre 100 y 300 mm en el resto territorial. Como la fórmula Gr no incluye factores advectivos ni higrométricos, y las mayores diferencias ocurren en la región donde es más reducido el efecto aerodinámico, puede suponerse con razón que la discrepancia entre ambas fórmulas reside en la valoración energética, la que al parecer, estaría exagerada en Gr.

Por lo contrario, las magnitudes de la re-

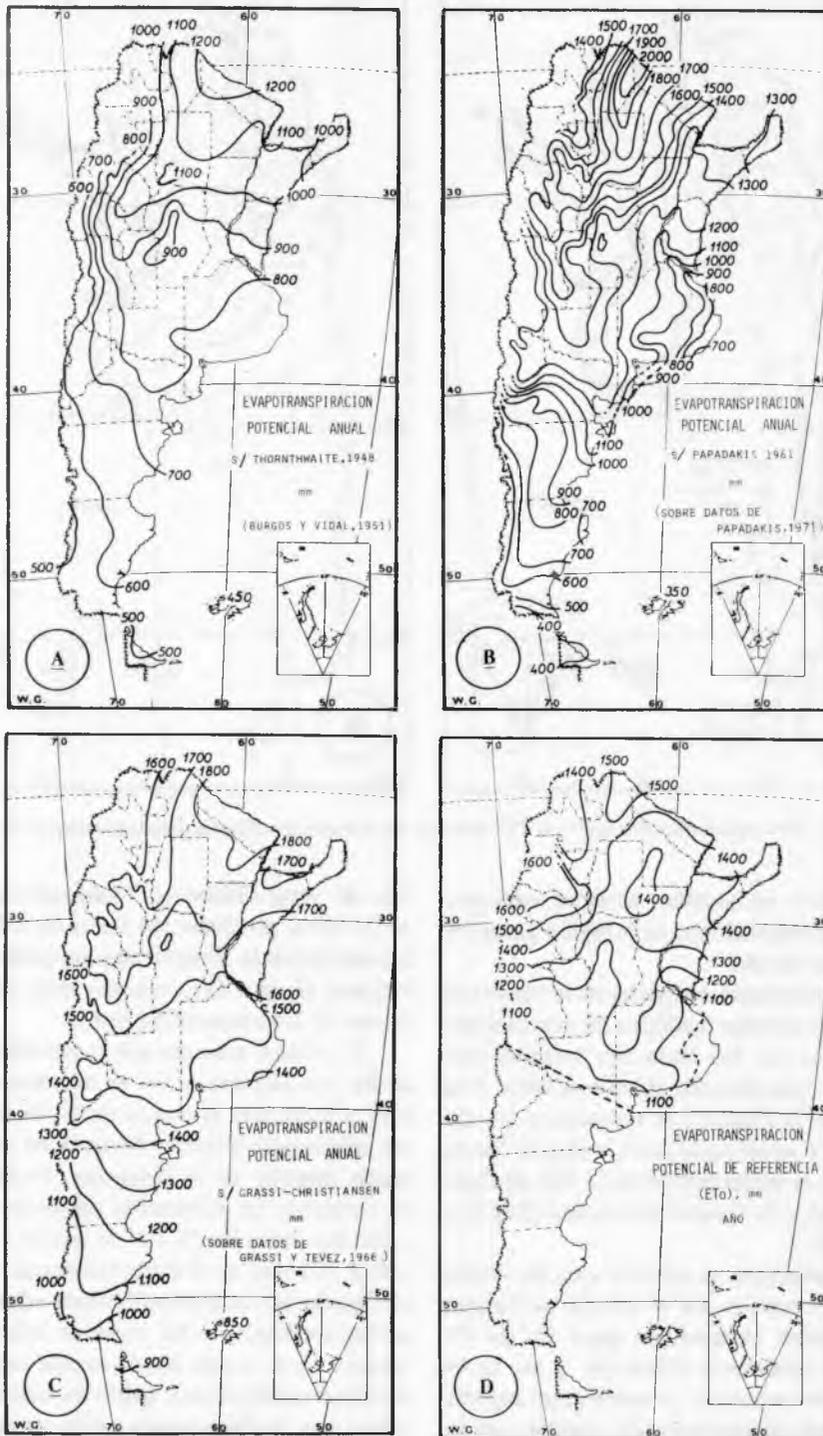


Figura 7: Evapotranspiración potencial anual estimada según diversos sistemas. Las cartas B y C han sido trazadas por los autores según la información anotada; la carta D fue trazada según el procedimiento explicado en el texto (siguiendo a Doorenbos y Pruitt, 1977).

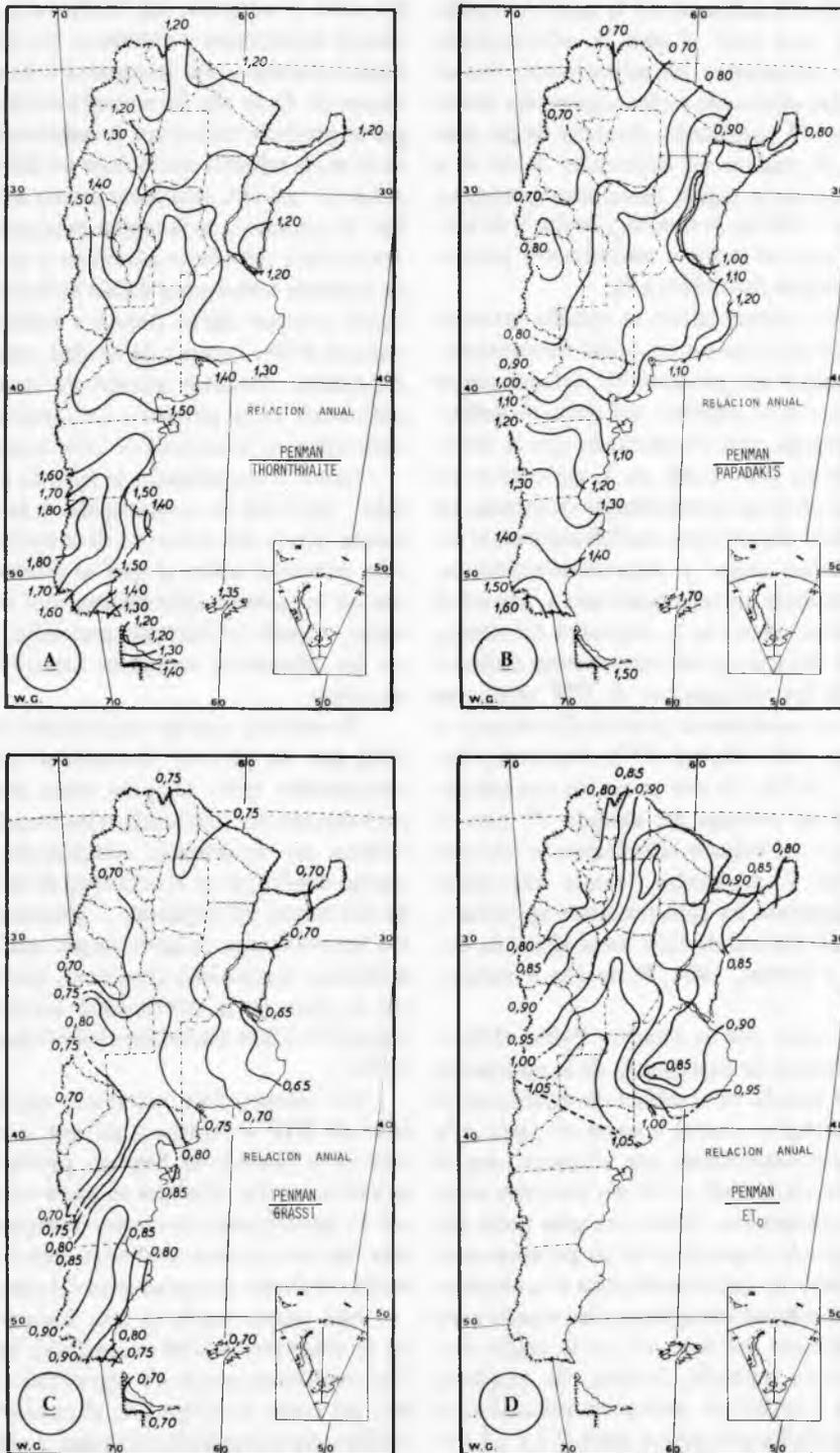


Figura 8: Relación entre los valores de ETP anual estimada por el método de Penman y por cada uno de las otras fórmulas de estimación discutidas.

lación Pe/Th indicadas en la carta A, confirmarían para todo el país la subvaloración que se reconoce a las estimaciones fundamentadas solamente en la temperatura media del aire. El significado absoluto de las relaciones se traduce en diferencias desde 50 a 150 mm en la región litoral mesopotámica, de 200 a 300 en la central y norte, y de hasta 400 mm en la parte central-norte patagónica, siempre favorables a Pe .

Esto concuerda con la opinión generalizada acerca de las estimaciones excesivamente reducidas que produce Th , defecto que se acentúa con el aumento del grado de aridez. Sin embargo, está comprobado que la introducción en gran escala de la agricultura de regadío en áreas anteriormente desérticas, ha producido importantes modificaciones de las condiciones meso y micrometeorológicas, especialmente de la temperatura y humedad del aire así como de la velocidad del viento, las que llevarían a una consecuente disminución de las estimaciones de ETP realizadas según las condiciones prístinas (Devenport y Hudson, 1967; Mattei, 1979; Hashemi y Habibian, 1979). No son pocos los que aún defienden las ventajas del método Th para el cómputo del balance hidrológico en regiones húmedas y semiáridas, donde expresaría acertadamente las características agrícolas o el paisaje natural de tales áreas (Páez de Camargo y Pereira, 1981; Forte Lay y Burgos, 1979).

La carta con la relación Pe/Pa , (Figura 8 B), destaca la supremacía de la estimación de ETP basada en el déficit de saturación en toda la región central y norte del país, y la creciente importancia que adquiere, con el aumento de latitud, el efecto advectivo en la región patagónica. Sobre una gran parte del territorio, la trayectoria de las isolíneas estaría señalando una coincidencia o asociación entre el balance energético y las condiciones higrométricas del aire. Así, en la región mesopotámica húmeda, lluviosa, de amplitud térmica y déficit de saturación reducidos, la relación Pe/Pa permanece entre 0,9 y 1,0 denotando gran coincidencia entre ambas estimaciones. A medida que se avanza con rum-

bo oeste y noroeste, las condiciones de humedad disminuyen y aumentan las temperaturas máximas y por consiguiente las estimaciones de Pa se van incrementando hasta llegar a producir relaciones de solamente 0,70 en el norte salteño, traducibles en diferencias netas de casi 600 mm entre ambos métodos. Por lo contrario, en la región patagónica con predominio del efecto advectivo y en la costa atlántica bonaerense donde el factor oceanidad produce climas frescos y húmedos, la relación Pe/Pa supera a la unidad, señalando diferencias absolutas anuales de hasta 350 milímetros en la primera y poco más de 100 milímetros en la segunda de estas zonas.

Como fuera señalado, la falta de un "patrón" universal de comparación y la discrepancia acerca del concepto de evapotranspiración potencial sobre el que se fundamentaron las ecuaciones estimadoras aquí mencionadas, tornan infructuoso pretender justificar las diferencias regionales mostradas por las cartas.

Es evidente que las estimaciones producidas por las diversas fórmulas no resultan comparables entre sí, pues están pensadas para representar potencialidades evapotranspiratorias no totalmente coincidentes. Hay mucha confusión en el concepto de la ETP y de allí surgen discrepancias y discusiones sobre los resultados de las fórmulas aplicadas a diferentes condiciones climáticas, que subsisten a pesar de la información actualmente disponible sobre mediciones lisimétricas confiables.

Por último, debe recordarse que los valores de ETP obtenidos aquí por la aplicación de la fórmula de Penman, provienen de una información climática en parte estimada, por lo que los posibles errores emergentes de esas aproximaciones pudieron manifestarse en los resultados expresados en las cartas.

Aún reconociendo la gran diferencia entre la evaporación desde superficies de agua y la evapotranspiración de superficies vegetadas, así como la dificultad, al parecer insuperable, para transferir recíproca y generalizadamente sus cifras, es posible utilizar algunas mediciones de evaporación realizadas en

el país, para procurar otra referencia que explique la distribución geográfica adoptada por la ETP.

Para ello, se han adecuado a las condiciones corológicas, pluviométricas, de humedad y viento de las diferentes regiones geográficas naturales de la Argentina, los coeficientes propuestos por Doorenbos y Pruitt (1977) para transformar las lecturas del tanque evaporimétrico tipo A en una estimación de la que llaman "evapotranspiración potencial de referencia", ETo ("reference crop evapotranspiration"): "la producida desde una extensa superficie de hierba verde, en activo crecimiento, cubriendo por completo el suelo y con una altura uniforme entre 8 y 15 centímetros, en condición de provisión hídrica ilimitada". Los coeficientes zonales que resultaron de esta adecuación y que se reproducen en la Figura 9 B, fueron aplicados a la carta de evaporación anual sin corrección -también reproducida en la misma figura- la cual fue trazada adaptando otra anteriormente propuesta para la Argentina (Quintela *et al.*, 1970) mediante la información provista por las fuentes citadas en el Cuadro 1 e.

Siguiendo este procedimiento fue confeccionada finalmente la carta de ETo anual (Figura 7 D), cuya comparación con la carta

de ETP anual por Penman, permitió derivar las diferencias anuales de la relación Pe/ETo que son mostradas en la carta D de la Figura 8. La falta de información sobre mediciones de evaporación, impidió extender el trazado a la región patagónica.

Aceptando que la ETo así obtenida, aprecia en forma aproximada la necesidad de agua regional, puede observarse que para la mayor parte de la superficie cartografiada, el valor de la relación oscila entre 0,90 y 1,05 indicando el buen ajuste de la fórmula de Pe a las condiciones de la Argentina. Las mayores subvaloraciones, que se anotan en el noroeste árido, equivaldrían, en valores absolutos, a diferencias inferiores a los 300 milímetros por año.

Al analizar las cifras mensuales que conforman los totales anuales, fue posible advertir que las diferencias entre ambos métodos se registran durante la termofase negativa, y especialmente en el trimestre invernal; y que, por lo contrario, existe una coincidencia muy aceptable entre los totales de ETo y Pe durante el semestre cálido.

Para confirmar esta asersión, en el Cuadro 3 se transcribe la magnitud que alcanza, en algunas localidades del país, la relación porcentual entre la sumatoria de las evapotranspiraciones de los meses integran-

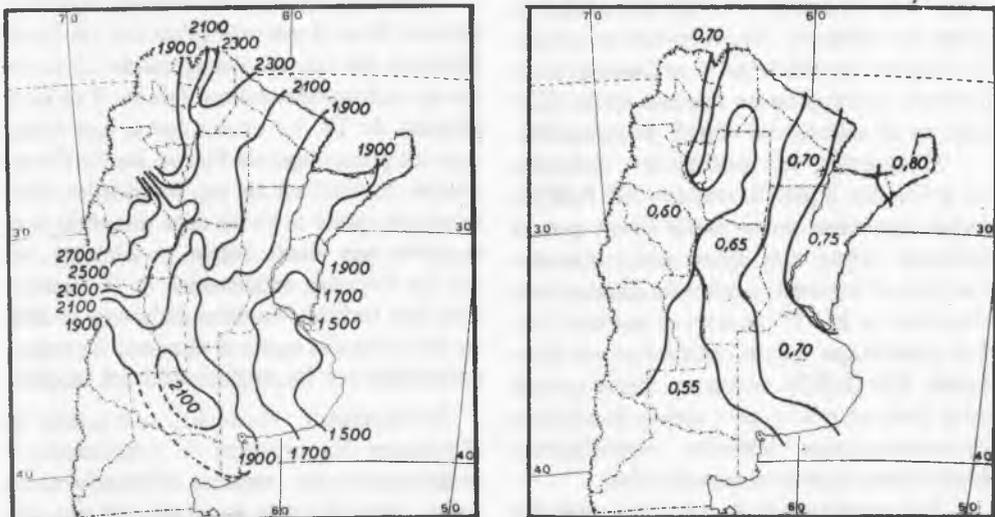


Figura 9: A): evaporación media anual, en mm, medida con tanques tipo A; valores sin corrección. B): coeficientes utilizados para transformar los valores anuales de Evaporación en valores de ETo .

tes de cada termofase, tal como fueran estimadas por cada uno de los métodos de Pe, Th, Pa y Gr, y las respectivas acumulaciones de ETo.

Los porcentajes de la relación 100 Pe/ETo durante la termofase positiva, con oscilaciones entre 92 y 104 según las localidades, supondría la excelente adecuación de Pe en la época del año de mayor importancia agrícola por ser la principal estación de cultivo. Por el contrario, es notable la subestimación que produce en la termofase negativa, con porcentajes tan reducidos como el de 61% en La Rioja, confirmando así la reconocida deficiencia estimatoria de esta fórmula durante el período invernal, ya anotada anteriormente y en forma aislada para algunas localidades del país (Quintela, 1977).

La subvaloración invernal también se verifica con el método de Th, aunque en este caso más acentuadamente; esta deficiencia fue atribuida por el autor del método y sus colaboradores (Mather, 1954), a la inadecuación de la temperatura media para expresar la disponibilidad calórica diurna, lapso durante el cual se ejecuta la traspiración. Este defecto se intensificaría en el invierno por la mayor duración de la noche, pero podría también producir desajustes en los valores estivales en climas de gran amplitud térmica, como son los áridos y semiáridos cálidos. A pesar de admitirla, Thornthwaite no propuso ninguna modificación a su fórmula al introducir la temperatura máxima media mensual en el cálculo del déficit de saturación.

Observando los porcentajes indicados en el Cuadro 3 para la relación 100 Pa/ETo, puede apreciarse un aceptable ajuste para el semestre cálido, con ligeras sobreestimaciones para el noroeste y, además, estimaciones excesivas de la ETP durante el período frío. Los porcentajes que se obtuvieron por la relación 100 Gr/ETo acusan en forma general para todo el país y para ambas termofases sobrevaloraciones definidas, especialmente importantes durante el semestre frío.

Los guarismos de las relaciones entre los totales anuales, que se transcriben en las últimas columnas del cuadro, confirman para

Th y Gr lo ya manifestado en ambas termofases: una subvaloración general del primero que produce un promedio de solo 68% para todas las localidades y una excesiva estimación con un promedio de 123% para el segundo. El sistema de Papadakis es el que produce el promedio más cercano a la relación ideal, aunque resulta afectado por una gran variabilidad en el conjunto de las localidades. Penman, en cambio, a pesar de acusar en promedio una leve subvaloración del orden del 90%, muestra un mejor ajuste general a las diferentes condiciones regionales, señalado por una desviación típica de solo 5,6 por ciento.

Como último elemento de juicio para el análisis comparativo hasta aquí desarrollado, se presentan en el Cuadro 9 las distribuciones estacionales relativas de los valores de ETP estimados por cada uno de los cuatro métodos estimatorios, en comparación con la repartición acusada por las mediciones de evaporación con tanques A (Eo) en seis localidades elegidas. Esta comparación se agrega a la discusión, en la suposición que, aún cuando pudiera cuestionarse la magnitud absoluta de las mediciones de evaporación, la distribución de los promedios mensuales en el curso del año aparecería como aceptable.

Como puede observarse en el cuadro, el método Pa es el que más ajusta con las distribuciones del tanque, consiguiendo 15 mejores aproximaciones contra 9 de Pe, 5 de Gr y ninguna de Th. La concordancia que muestran los porcentajes de Pa con los de Eo en verano, es total en las seis localidades. Este excelente ajuste de Pa no debe asombrar si se recuerda que, desde Dalton en adelante, todas las fórmulas estimatorias de la evaporación han incluido fundamentalmente al déficit de saturación como el elemento de mayor correlación con las mediciones de los tanques.

Extrañamente, Papadakis, que insiste en diferenciar los procesos de evaporación y evapotraspiración, termina utilizando como único estimador a la humedad del aire, elemento que, como dijera Thornthwaite y fue confirmado por las mediciones realizadas

CUADRO 3: Relación porcentual entre las sumatorias de ETP estimadas, por cada método, para ambas termofases, para el año total y las respectivas acumulaciones de ETo.

Localidad	Termofase Positiva (Octubre a Marzo)				Termofase Negativa (Abril a Setiembre)				Año			
	Pe/ETo %	Th/ETo %	Gr/ETo %	Pa/ETo %	Pe/ETo %	Th/ETo %	Gr/ETo %	Pa/ETo %	Pe/ETo %	Th/ETo %	Gr/ETo %	Pa/ETo %
1 Rivadavia	99	98	111	142	87	65	145	158	94	87	123	147
2 Pres. R. S. Peña	92	83	106	105	79	63	140	122	87	76	118	110
3 Mercedes, Corrientes	96	86	113	91	69	62	127	87	87	70	118	85
4 La Rioja	93	83	110	117	61	52	125	114	80	69	116	115
5 Jachal	99	74	122	116	62	33	110	97	82	58	117	108
6 Rafaela	95	69	115	83	68	50	140	93	86	64	123	86
7 Córdoba	100	75	112	94	84	54	138	120	95	68	121	102
8 San Juan	104	77	122	111	72	50	136	113	100	73	132	121
9 Pilar	94	79	111	94	65	43	121	94	84	61	114	90
10 V. Dolores	95	66	113	108	97	61	176	153	89	63	121	106
11 Mendoza	98	73	121	103	72	43	145	107	90	63	129	99
12 Gualaguaychú	94	89	123	94	68	63	164	93	83	71	130	90
13 Castelar	95	72	-	87	71	65	-	113	88	70	-	94
14 Santa Rosa	101	71	112	104	83	55	150	121	97	68	123	109
15 Gral. Pico	97	68	112	95	76	55	160	116	92	66	124	100
16 Balcarce	97	69	125	84	66	60	150	81	90	66	130	83
Promedio									89	68	123	103
Desviación típica									5,6	6,8	5,6	16,3

CUADRO 4: Repartición relativa estacional del total anual de evaporación medida en tanque A (Eo) y de los totales anuales de ETP estimada por los cuatro métodos discutidos. Los valores en bastardilla señalan la mejor aproximación en cada caso.

Localidad	Verano					Invierno				
	Año %					Año %				
	Eo	Pe	Th	Pa	Gr	Eo	Pe	Th	Pa	Gr
Pres. R. S. Peña	35	39	42	<i>35</i>	32	15	12	10	<i>16</i>	18
Rafaela	38	42	44	<i>38</i>	34	13	10	9	<i>15</i>	16
Pilar	36	41	45	<i>37</i>	34	15	11	9	<i>15</i>	16
Balcarce	43	47	44	<i>43</i>	38	10	8	9	<i>11</i>	13
Santa Rosa	42	45	47	<i>43</i>	36	11	8	7	<i>13</i>	14
Gualeguaychú	41	44	45	<i>41</i>	34	11	9	9	<i>12</i>	16

Localidad	Primavera					Otoño				
	Año %					Año %				
	Eo	Pe	Th	Pa	Gr	Eo	Pe	Th	Pa	Gr
Pres. R. S. Peña	30	<i>29</i>	25	28	27	20	<i>20</i>	22	22	22
Rafaela	29	<i>30</i>	24	26	<i>28</i>	20	18	22	<i>20</i>	22
Pilar	30	<i>30</i>	25	27	28	19	<i>18</i>	21	21	22
Balcarce	27	<i>28</i>	24	24	<i>28</i>	20	17	23	<i>21</i>	<i>21</i>
Santa Rosa	28	<i>28</i>	25	25	<i>28</i>	20	18	21	<i>20</i>	21
Gualeguaychú	28	<i>28</i>	23	24	<i>28</i>	20	<i>19</i>	22	22	22

en áreas abiertas a la irrigación, no es "conservativo", es decir, independiente en absoluto del proceso evaporador.

Penman acusa un mejor ajuste en primavera, y el otoño es la estación cuando los diferentes métodos producen porcentajes similares entre sí y con Eo. Al considerar estas cifras, se impone recordar que la relación evaporación/evapotranspiración no es constante durante todo el año, por lo que los porcentajes presentados en el cuadro pretenden solamente enfatizar la diferente distribución estacional de las estimaciones.

Resumiendo, todo el análisis hasta aquí desarrollado y las comparaciones y antecedentes aportados sobre la aplicación climática del método de Penman para la estimación de la evapotranspiración potencial del territorio continental argentino, podría completarse discutiendo las varias correcciones que -sin

asentimiento general- fueron propuestas como resultado de su aplicación en diferentes regiones del mundo, algunas de las cuales aparecen sistematizadas en un meduloso estudio de la FAO sobre requerimientos hídricos de los cultivos (Doorenbos y Pruitt, 1977).

Sin embargo, las razones anteriormente anotadas sobre la inexistencia de una base comparativa fidedigna, aconsejan no prolongar este análisis; por lo contrario, enfatizan la imperiosa necesidad de encarar un estudio experimental integral para evaluar con interés particularmente agrícola, las necesidades potenciales de agua regionales de la Argentina. Para ello deberán utilizarse dispositivos provistos de los recaudos técnicos que aconsejen los conocimientos actuales sobre el tema. Así lo reclama un país dominado por condiciones de aridez o semiaridez en más del 60 por ciento de su territorio.

ANEXO

A Estimación de la Radiación Global

Las fórmulas estimatorias de la Radiación Global (R_G), son modificaciones a la relación rectilínea propuesta por Angström en 1916 (*Met. Zeitung.*, 33: 529-538), bajo la forma:

$$R_G/R_A = a + b \cdot h/H$$

donde R_A es la radiación astronómica; h : heliofanía efectiva; H : heliofanía astronómica; a : coeficiente para radiación difusa y b : coeficiente de atenuación por heliofanía. Aunque esta fórmula y la mayor parte de las posteriormente desarrolladas se han derivado para valores anuales, se las suele aplicar -con o sin modificaciones- a los promedios mensuales, usándose también coeficientes de ajuste para diferentes regiones o climas; también se aplican relaciones curvilíneas.

Los coeficientes a (ordenada de origen) y b (pendiente) de las fórmulas utilizadas en el estudio, se dan a continuación

Ecuación	Coeficiente		Ecuación	Coeficiente	
	a	b		a	b
1 Penman, 1948	0,18	0,55	4 Abeledo <i>et al.</i> , 1970	0,24	0,51
2 Penman, 1954	0,20	0,48	5 Glover y Mc Culloch, 1958	0,29 x cos φ	0,55
3 Doorenbos y Pruitt, 1977	0,25	0,50	6 Turc, 1961	0,18	0,62

φ : latitud.

B Promedios mensuales de Radiación Global (Langley/día) medidos y estimados por la "fórmula de adecuación" para Buenos Aires y Pilar.

Elemento	Buenos Aires					
	E	F	M	A	M	J
Heliofanía Relativa (1931-60)	0,663	0,670	0,616	0,600	0,542	0,449
RA (s/ I.P.S. 1956)	1.052	948	789	611	464	395
RG medida (1946-75)	612	540	435	318	220	166
RG estimada	608	552	419	319	222	169
	J	A	S	O	N	D
Heliofanía Relativa (1931-60)	0,479	0,540	0,542	0,582	0,645	0,631
RA (s/ I.P.S. 1956)	419	536	706	873	1.009	1.071
RG medida (1946-75)	190	267	356	465	577	624
RG estimada	186	256	345	448	572	598
Elemento	Pilar					
	E	F	M	A	M	J
Heliofanía Relativa (1931-50)	0,672	0,666	0,611	0,634	0,597	0,554
RA (s/ I.P.S. 1956)	1.051	959	815	644	503	441
RG medida (1941-66)	615	553	432	341	240	203
RG estimada	618	558	436	348	256	220
	J	A	S	O	N	D
Heliofanía Relativa (1931-50)	0,621	0,642	0,625	0,620	0,682	0,665
RA (s/ I.P.S. 1956)	458	574	734	889	1.016	1.068
RG medida (1941-66)	235	307	410	497	600	635
RG estimada	228	311	391	474	598	621

C Fórmulas estimatorias de la EVAPOTRANSPIRACION POTENCIAL, mencionadas en el texto.

1) - Penman, 1948 (según Frère, 1972).

$$ETP, \text{ mm} = \frac{P_0/P \cdot \frac{\Delta}{\gamma} \left[0,75 R_A (0,18 + 0,55 \frac{h}{H}) - \sigma T_K^4 (0,56 - 0,079 \sqrt{e_d}) (0,10 + 0,90 \frac{h}{H}) \right] + 0,26 (e_a - e_d) (1,00 + 0,54 U)}{\left(\frac{P_0}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} \right) + 1,00}$$

donde:

- P_0 = Presión atmosférica, corregida a nivel del mar, mb.
 P = Presión atmosférica sin corregir a nivel del mar, mb.
 Δ = Pendiente en mb/°C de la curva de saturación de vapor, en el nivel de la temperatura media del período considerado.
 γ = Constante psicrométrica.
 R_A = Radiación astronómica en mm (1 mm = 59 calorías).
 h, H = Heliofanía real (h) y teórica (H), %.
 σT_K^4 = Radiación de un cuerpo negro, en mm, para la temperatura considerada.
 e_d = Tensión del Vapor real, en mb.
 e_a = Tensión del Vapor a saturación para la temperatura T en mb.
 U = Velocidad media del viento a 2 m de altura para el período considerado, en m/seg.

2) Thornthwaite, C. W., (1948).

$$ETP (\text{mm/mes}) = 16 \left(\frac{10 t}{I} \right)^a$$

donde:

- t = temperatura media mensual, °C.
 I = Índice calórico anual, sumatoria de los 12 índices calóricos i mensuales, siendo $i = (0,2 t)^{1,514}$
 $a = 0,000\ 000\ 675\ I^3 - 0,000\ 077\ I^2 + 0,0179\ I + 0,492.$

3) - Papadakis, J., (1961).

$$ETP \text{ cm/mes} = 0,5625 (e_{ma} - e_d)$$

donde:

- e_{ma} = Tensión de vapor a saturación, que corresponde a la temperatura máxima media mensual, en mb
 e_d = Tensión del vapor media mensual, en mb.

4) - Grassi y Christiansen, (1964).

$$ETP \text{ mm/día} = 5,46 (0,1824 + 0,0575 R_A) (1,15 - 0,05C) (0,6208 + 0,0263T - 0,000368T^2) (0,9361 + 0,00767TD)$$

donde:

- R_A = Radiación astronómica, en mm/día.
 C = Grado de nubosidad en décimos.
 T = Temperatura media en °C.
 TD = Diferencia entre las temperaturas máxima y media, en °C.

BIBLIOGRAFIA

- 1) Abeledo J. H., M. I. de Kurlat y R. O. Fernández, 1970. "Relación entre la duración relativa de la insolación y la radiación solar global en la República Argentina". 17 pág. mimeo., inédito, Buenos Aires.
- 2) Burgos J. J., y A. Vidal, 1951. "Los climas de la República Argentina según la nueva clasificación de Thornthwaite". *Meteoros*, 1 (1): 3-32, Buenos Aires.
- 3) Burgos J. J., 1970. "El clima de la región noreste de la República Argentina en relación con la vegetación natural y el suelo". *Boletín de la Soc. Arg. de Bot.*, 11: 37-102, Buenos Aires.
- 4) Davenport D. C. and J. R. Hudson, 1967. "Changes in evaporation rates along 17 km transect in the Sudan Geriza". *Agric. Met.* 4 (3): 339-352.
- 5) Doorenbos J. and W. O. Pruitt, 1977. "Crop water requirements". FAO. Irrigation and Drainage Paper, No 24, 124 pág., Roma.
- 6) Forte Lay J. A. y J. J. Burgos, 1978. "Verificación de métodos de estimación de almacenaje de agua en suelos pampeanos". Taller argentino-estadounidense sobre sequías, 22 pág. máq., Mar del Plata.
- 7) Frère, M., 1972. "A method for the practical application of the Penman formula for the estimation of potential evapotranspiration and evaporation from free water surfaces". FAO - AGP: AS/1972/2, Roma.
- 8) Frère M. y G. F. Popov, 1980. "Pronóstico de cosechas basado en datos meteorológicos". FAO, Cuadernos Técnicos sobre Producción y Protección Vegetal, No 17, 66 pág., Roma.
- 9) Galmarini A. G. y J. M. Raffo del Campo, 1961. "Caracterización climática de la provincia de La Pampa". CAFADE, Publ. Tecn. No 13, 56 pág., Buenos Aires.
- 10) Galmarini A. G. y J. M. Raffo del Campo, 1964. "Rastros fundamentales que caracterizan el clima de la región chaqueña". Consejo Nac. de Desarrollo, Publ. No 9, 178 pág., Buenos Aires.
- 11) Glover J. and J. S. McCulloch, 1958. "The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine". *Quarterly Journal Royal Met. Soc.*, 84 (360): 172-175.
- 12) Grassi C. I., 1964. "Estimation of evapotranspiration from climatic formulas" Master of Science Thesis, Utah State University, 101 pág. a máq., Utha, EE.UU.
- 13) Grassi C. I. y E. Tévez, 1966. "Evapotranspiración de los cultivos en la República Argentina estimada por la fórmula de Grassi y Christiansen". *IDIA*, 226: 65-80, Buenos Aires.
- 14) Hashemi F. and M. T. Habibian, 1979. "Limitations of temperature-based methods in estimating crop evapotranspiration in arid-zone agricultural developments projects". *Agr. Met.* 20 (3): 237-248.
- 15) Hounam C. E., 1971. "Problems of evaporation assessment in the water balance". W.M.O., Report M. 13, No 285, Genève.
- 16) Knoche W. y V. Borzacov, 1946. "Radiación solar, insolación y clima solar en las diferentes estaciones del año". Geografía de la República Argentina, Soc. Arg. de Estudios Geográficos, 4: 127-159, Buenos Aires.
- 17) Kurlat M. C. y R. O. Fernández, 1970. "Radiación solar global en la República Argentina". *Observ. de Fís. Cósmica. Acta Scientifica* 19: 1-55, San Miguel, Buenos Aires.
- 18) Mather J. R., 1954. "A summary of additional evaporation and evapotranspiration measurements". John Hopkins University, *Publ. in Climatology*, 7 (1): 177-199, Seabrook, N. Y., EE.UU.
- 19) Mattei F., 1979. "Environmental consequences of water cycle in the agrosysteme". Symp. Int. sulla Integraziones della Ricerca in Risorse Biologiche, IILA, : 345-352, Roma.
- 20) Paes de Camargo A. e A. R. Pereira, 1981. "A evapotranspiração potencial segundo Thornthwaite "II Congresso Brasileiro de Agrometeorología", *Resumos*: 11-118, Pelotas, R. G., Brasil.
- 21) Papadakis J., 1961. "Climatic Tables for the world". ed. por el autor, 175 pág., Buenos Aires.
- 22) Penman H. L., 1948. "Natural evaporation from open water, bare soil and grass". *Proc. Roy. Soc.*, A 193: 120-146, London.
- 23) Penman H. L. and R. K. Schofield, 1951. "Some physical aspects of assimilation and transpiration". *Symposia Soc. Exp. Biol.*, 5: 115-129, London.
- 24) Penman H. L., 1954. "Evaporation over parts of Europe". *A.I.H.S.*, 3: 1-170, Rome (citado por Turc 1961).
- 25) Quintela R. M. y H. B. Fesquet, 1962. "Cálculo y reducción de la evaporación", S.M.N., Publ. serie C No 2, (2da. ed., 1977), Buenos Aires.
- 26) Quintela R. M., L. Medina y L. Piazza, 1970. "Contribución al conocimiento del régimen de evaporación en la República Argentina". S.M.N., Publ. serie C No 8, 24 págs., Buenos Aires.
- 27) Quintela R. M., 1977. "La evaporación en zonas áridas en la República Argentina". S.M.N., Publ. serie B No 17, 35 págs., Buenos Aires.
- 28) Servicio Meteorológico Nacional, 1944. "Estadísticas climatológicas. 1928-37". Publ. serie B No 1., Buenos Aires.

- 29) Servicio Meteorológico Nacional, 1958a. "Estadísticas climatológicas 1901-50". Publ. B1 N° 1., Buenos Aires.
- 30) Servicio Meteorológico Nacional, 1958b. "Estadísticas climatológicas 1941-50". Publ. serie B N° 3., Buenos Aires.
- 31) Servicio Meteorológico Nacional, 1972a. "Estadística climatológica 1951-60". Publ. serie B N° 6, Buenos Aires.
- 32) Servicio Meteorológico Nacional, 1972b. "Normales climatológicas 1931-60". Publ. serie B N° 7, Buenos Aires.
- 33) Servicio Meteorológico Nacional, 1981. "Estadísticas climatológicas 1961-70". Publ. serie B N° 35, Buenos Aires.
- 34) Sierra E. y O. Pórfido, 1978. "Evaluación comparativa de diversas fórmulas de evapotranspiración potencial en la región pampeana". *Meteorológica* 8/9: 99-107; Buenos Aires.
- 35) Soriano A., 1953. "Observaciones experimentales sobre el efecto del viento en las plantas". *Rev. Inv. Agric.* 7: 253-275, Buenos Aires.
- 36) Suero R. E. y A. F. Garay, 1979. "Balance mensual entre Evapotranspiración potencial y precipitaciones en Balcarce". Inédito, 11 págs. mimeo., Est. Exp. Reg. Agrop., INTA Balcarce.
- 37) Thornthwaite C. W., H. G. Wilm *et al.*, 1944. "Report of the Committee on Transpiration and Evaporation". *Amer. Geophys. Union TRas.*, 5 (Citado en "The measurements of Pot. Evapotranspiration". *Lab. of Climatology, John Hopkins Univ.*, 2 (1), 1954).
- 38) Thornthwaite C. W., 1948. "An approach toward a rational classification of climate". *Geograph. Review* 38: 1-55.
- 39) Turc L., 1961. "Evaluation des besoins en eau d'irrigation - Evapotranspiration potentielle". *Inst. Nat. Rech. Agr., Annales Agronomiques*, 12 (1): 13-49, París, France.

ERRATA: En la pág. 286, párrafo 3^o, línea 13, donde dice:

"A pesar de admitirla, Thornthwaite no propuso ninguna modificación a su fórmula ...".

Debe decir:

"A pesar de admitirla, Thornthwaite no propuso ninguna modificación a su fórmula para superar esta deficiencia, tal como lo hiciera Papadakis ...".