

## ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL FLUJO EN LISÍMETROS EN LA REGIÓN DE MADRID

**LÓPEZ-VERA, F. y MAHMOUD, M.**

Cátedra de Hidrogeología. Facultad de Ciencias C-VI.  
Universidad Autónoma de Madrid.

### Resumen

Se han medido las condiciones de evapotranspiración y balance de agua utilizando cuatro lisímetros libres, en condiciones naturales, cargados con suelos arcillosos y arenosos del terciario detrítico de Madrid y un lisímetro cubierto permanentemente saturado. Estos datos se han contrastado con los obtenidos mediante la aplicación de fórmulas semiempíricas obteniéndose que la ETR anual calculada por Turc es similar a la lisimétrica y que los años con precipitaciones menores de 312 mm no existe flujo en el suelo. Por otra parte sólo se produce éste en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Mayo y Noviembre. La percolación media se estima en 161 mm para suelos arenosos y 138 para suelos arcillosos. Los valores de ETP mensuales por Thornthwaite se separan mucho de los valores lisimétricos.

### Abstract

The conditions of evapotranspiration and water balance have been measured using four free lisimeters. These were in natural conditions and felled with clayey and sandy soils from the tertiary detritic of Madrid. One covered, permanently saturated lisimeter was also used. These data contrast with those obtained by applying semiempiric formulae. The annual RET calculated by Turc ecuation is similar to the lisimetric and there is no flow in years with a precipitation of less than 312 mm. Flow is only produced in the months of January, February, March, May and November. The average percolation is estimated at 161 mm for sandy soil and 138 mm for clayey soils. The monthly PET values by Thornthwaite are very diferent from the lisimetric values.

### Introducción

La evaluación de la recarga y las condiciones de flujo en la Zona No Saturada del acuífero del Terciario detrítico es una de los aspectos menos conocidos de la hidrogeología de la región, López-Vera, F. (1977a)

La dificultad de evaluar la recarga de un acuífero se pone de manifiesto por el gran número de técnicas disponibles, no resultando ninguna de ellas totalmente satisfactoria. Esta depende de la infiltración y el flujo de humedad en la zona no saturada, Knapp, B.J (1978). Podría parecer que la medida directa sea la más fiable y determinante, desafortunadamente no es así. Para establecer el balance hídrico en una porción de terreno es necesario realizar ciertas manipulaciones que perturban el medio natural. A pesar de ello, las experiencias mediante lisímetros sirven para contrastar y acotar los resultados obtenidos por otros métodos.

Aquí recogemos los resultados obtenidos en experiencias lisimétricas entre 1981-89 en la estación Hidroclimatológica de la UAM. Las medidas fueron realizadas por Mahmoud, M (1986) y los resultados lisimétricos se contrastan con los obtenidos mediante fórmulas empíricas y semiempíricas en registros climáticos en la misma estación.

**Condiciones ambientales**

\* *Geomorfología*, la estación experimental se sitúa en la zona de interfluvio de los ríos Jarama y Manzanares, en la superficie Madrid, López-Vera *et al.*, (1977b). Por lo que todas las características y condiciones ambientales son las de la zona de recarga del acuífero.

meses / años	1981	1982	1983	1984	media mensual
Enero	—	103.4	—	26.9	32.5
Febrero	—	76.1	10.3	31.2	29.4
Marzo	56.9	4.4	—	59	30.0
Abril	71.6	27.5	43.6	31.5	43.5
Mayo	41.2	53.8	49.7	85.1	57.4
Junio	21.2	20.2	6	32.6	20
Julio	—	19	—	2.2	5.3
Agosto	—	—	17.3	10.7	7
Septiembre	32.5	10	9.1	5.8	14.3
Octubre	—	29.5	23.1	28	20.1
Noviembre	—	60.1	110.7	142.9	78.4
Diciembre	31.3	2.5	52.5	9.5	23.9
Total	254.7	406.5	322.4	465.4	361.8

Tabla I. - Datos de precipitaciones, totales mensuales, anuales y medias mensuales.

\* *Precipitaciones*: Se han utilizado los datos de precipitación medidos in situ, durante el tiempo que duraron las experiencias; con ellos se han obtenido las medias mensuales y las cantidades totales tanto mensuales como anuales de precipitación, tabla I. Las medidas se han realizado en dos tipos de aparatos: Pluviómetro de Hellman, que es el que se usa oficialmente en España, y Pluviógrafo del tipo Hellman-Fues. La variabilidad de las precipitaciones es considerable, de hasta un 45 % entre los años considerados y también mensualmente; el valor de la precipitación media del período que duró la experimentación fue de 361,8 mm./año.

\* *Temperatura*: Se determinó mediante los termómetros de máxima y de mínima. En la tabla II recogemos los valores medidos durante cuatro años en la misma estación, tomándolos como media mensual en °C, siendo el rango de variación  $\pm 1^\circ$  C entre las medias anuales.

\* *Evaporación:* Expresada en mm de altura de lámina de agua evaporada. Para medir la evaporación de superficie de agua libre hemos empleado el evaporímetro de Piché. Según la lectura directa del evaporímetro hemos conseguido el total mensual. En la tabla III se muestran los datos recogidos durante el mismo período.

meses / años	1981	1982	1983	1984	media mensual
Enero	6.9	6.6	5.2	3.9	5.6
Febrero	7.2	5.7	3.7	6.3	5.7
Marzo	11.2	9.0	10.2	5.6	10.8
Abril	11.2	10.4	10.2	12.7	11.1
Mayo	14.2	16.9	12.2	4.7	13.2
Junio	21.0	19.9	21.1	16.9	19.7
Julio	23.6	23.3	23.2	28.3	24.6
Agosto	21.2	19.8	19.1	22.2	10.6
Septiembre	19.6	17.8	20.6	19	19.2
Octubre	14.4	13.1	15.4	12.7	13.9
Noviembre	11.7	8.4	11.4	9.2	10.2
Diciembre	6.9	5.8	4.5	6.1	5.8
Media anual	14.1	13.0	13.1	12.7	

Tabla II. - Datos de temperaturas medias mensuales.

\* *Estimación de la evapotranspiración.* Para acotar las pérdidas por evapotranspiración en la estación experimental se utilizan la fórmula de Turc (1954) para evaluar la ETR (evapotranspiración real) y la de Thornthwaite (1944) para la ETP (evapotranspiración potencial). Ambas nos acotan las condiciones en que existe agua susceptible de percolar y servir de recarga a los acuíferos o bien difundiendo lateralmente y escurrir superficialmente, Elias Castillo *et al.* (1966) y Llamas J. (1993).

La ecuación de Turc, expresa que:

$$E.T.R. = P/0,9 + P^2/L^2$$

E.T.R. = evapotranspiración real en mm/año

P = precipitación en mm/año

L =  $300 + 25T + 0,05 t^2$

t = temperatura media anual en °C

Aplicando la ecuación a nuestro período de estudio con los datos obtenidos in situ, obtenemos la tabla IV, de cuya observación se desprende obviamente un hecho importante: suponiendo una validez de la ecuación de Turc, hemos de concluir que en los años en los que no se superan los 312

mm de lluvia (1981, tabla I), no existe excedente de agua como resultado de la evapotranspiración del suelo.

Mes/año.	1981	1982	1983	1984	Media
Enero	93	86	58.9	89.9	82.1
Febrero	81	81.6	100.8	144	101.8
Marzo	108.5	139.5	120.9	269.7	159.6
Abril	108	168	174	285	183.7
Mayo	170.5	198	159.6	266.6	198.6
Junio	297	263.5	205.5	318	271.0
Julio	359.6	254	305.3	347.2	316.5
Agosto	291	155	286.7	307.8	259.1
Septiembre	217	144	229.4	240	207.6
Octubre	130.2	148.8	114	108.0	125.0
Noviembre	75	51	83.7	177.5	96.8
Diciembre	62	49.6	114.7	241.8	117.0
Total	1992.8	1739.7	1953.5	2459.8	176.5

Tabla III.- Datos de evaporación según Piché (mm), total mensuales y media ponderada.

Para la estimación de la E.T.P. Thornthwaite utiliza como variable primaria para el cálculo de E.T.P. la media mensual de las temperaturas medias diarias del aire; con ella se calculó un índice de calor anual según la fórmula:

$$I = (c/5)^{1.514}$$

Y halla el valor del índice de calor anual,  $I = \sum i$ , siendo el sumatorio de  $i$  la suma de los índices mensuales del año considerado, para meses teóricos de 30 días, con doce horas diarias de sol, la fórmula será de la siguiente expresión:

$$\sum i = 16 (10t/I)^a$$

$i$  = E.T.P. media en mm/día

$t$  = temperatura media diaria del mes °C

$I$  = índice de calor anual

$$a = 675 \times 10^{-9} I^3 - 771 \times 10^{-7} I^2 + 1972 \times 10^{-5} I + 0,49239$$

Tiene en cuenta la duración final del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar y llega a la expresión: E.T.P. = K

$$\text{siendo : } K = N/12 \times d/30 \times d$$

E.T.P. = evapotranspiración potencial en mm/mes

$N$  = número máximo de horas de sol, según la latitud

$d$  = número de días del mes

$K$  = valor obtenido con la fórmula

Al poder contar sólo las temperaturas diarias del período, hemos expresado únicamente en la tabla V, los valores de E.T.P. según Thornthwaite, correspondiente a los meses de esos años.

De dicha tabla extraemos que la E.T.P. teórica obtenida por estas formulas semiempíricas oscila alrededor de los 820 mm, cantidad ésta bastante superior al volumen de agua que suele incidir de forma natural. Se cumple pues, uno de los criterios que es utilizado a veces para clasificar un área de ámbito semi-árido, una mayor E.T.P. que el agua de lluvia incidente. Estos valores son, no obstante, menores que la capacidad evaporante de la atmósfera, medida mediante evaporímetro Piché (tabla III).

AÑO	1	2	3	4
1981	254.7	14.09	243.04	11.6
1982	406.5	13.05	310.28	96.2
1983	322.4	13.05	278.41	44
1984	465.4	12.7	320.19	159.2

Tabla IV. - Valores de evapotranspiración real (E.T.R.). Calculado según método de Turc (1954). (1) Pluviómetro anual en mm. (2) Temperaturas medias anuales °C. (3) E.T.R. según Turc en mm (anual). (4) Pluviometría - E.T.R.

### Condiciones experimentales

La toma de datos climáticos y las experiencias lisimétricas se realizaron en la Estación Hidro-Climatológica de la UAM, que es una estación meteorológica completa, situada en Lat. 40° 32' 52" y Log. 3° 41' 27" (Datum internacional) y altitud de 713m.

En relación a la cuenca, el lugar se encuentra en el interfluvio de los ríos Jarama y Manzanares en una situación intermedia entre Madrid y el borde de la Sierra del Guadarrama, por lo que se considera la ubicación óptima, casi en el centro del acuífero del Terciario detrítico de Madrid.

Se han utilizado cinco lisímetros de dos tipos diferentes - libres y cubierto- con cargas de suelo diferentes. Las características constructivas de los lisímetros libres (que denominamos tipo A) se describieron en la fig. 1a y los lisímetros cubiertos (tipo B) en la figura 1b.

Los lisímetros tipo "A" están diseñados para obtener medidas directas de E.T. a partir del balance de agua mediante la ecuación:

$$E.T. = A - G - DR$$

E.T. = evapotranspiración real en mm

A = aportación en mm

G = salida o gasto de agua (no debido a evapotranspiración) en mm

DR = incremento en la reserva del agua del suelo utilizable por las plantas en mm.

	1	2	3	4		1	2	3	4
1 Enero	1981	16.1	—	6.9	1 Enero	1982	17.2	103.4	6.6
2 Febrero	"	17.1	—	7.2	2 Febrero	"	13.8	76.1	5.7
3 Marzo	"	42.4	56.9	11.2	3 Marzo	"	33.4	4.4	9.0
4 Abril	"	45.7	71.6	11.2	4 Abril	"	44.5	27.4	10.4
5 Mayo	"	74.3	41.2	14.2	5 Mayo	"	101.7	53.8	16.9
6 Junio	"	138.3	21.2	21.0	6 Junio	"	130.3	20.2	19.9
7 Julio	"	168.0	—	23.6	7 Julio	"	166.2	19	23.3
8 Agosto	"	132.5	—	21.6	8 Agosto	1982	122.1	—	19.8
9 Septiembre	"	102.8	32.5	14.6	9 Septiembre	"	91.7	10	17.8
10 Octubre	"	58.5	—	14.4	10 Octubre	"	54.0	29.5	13.1
11 Noviembre	"	36.3	—	11.7	11 Noviembre	"	24.2	60.1	8.4
12 Diciembre	"	<u>15.5</u>	<u>31.3</u>	6.9	12 Diciembre	"	<u>13.7</u>	<u>2.5</u>	5.8
Total		847.5	254.7	$\bar{M}=14.1$	Total		812.8	406.5	$\bar{M}=13.0$
1 Enero	1983	11.8	—	3.9	1 Enero	1984	8.0	26.9	3.9
2 Febrero	"	7.1	10.3	6.3	2 Febrero	"	16.1	31.2	6.3
3 Marzo	"	39.6	—	5.8	3 Marzo	"	16.7	54	5.6
4 Abril	"	42.6	43.6	12.7	4 Abril	"	59.8	31.5	12.7
5 Mayo	"	62.4	44.7	9.7	5 Mayo	"	45.3	85.1	9.7
6 Junio	"	141.6	6	16.9	6 Junio	"	102.7	32.6	16.9
7 Julio	"	164.9	—	28.3	7 Julio	"	220.8	2.2	28.3
8 Agosto	"	115.3	17.3	22.2	8 Agosto	"	144.5	10.7	22.2
9 Septiembre	"	110.3	9.1	19	9 Septiembre	"	101.0	6.8	19.0
10 Octubre	"	67.9	23.3	12.7	10 Octubre	"	51.7	28	12.7
11 Noviembre	"	37.4	110.7	9.2	11 Noviembre	"	27.7	142.4	9.2
12 Diciembre	"	<u>9.2</u>	<u>52.5</u>	6.1	12 Diciembre	"	<u>14.8</u>	<u>9.5</u>	6.1
Total		813.0	322.5	$\bar{M}=13.1$	Total		809.1	466.4	$\bar{M}=12.7$

*Tabla V: Valores de evapotranspiración potencial (ETP) según el método de Thornthwaite (1944), precipitación mensual y la temperatura media mensual.*

*1.- Meses del año. 2.- E.T.P. mensual en mm. 3.- Precipitación mensual en mm. 4.- Temperatura media mensual en °C; M.- Temperatura media anual en °C.*

Los lisímetros tipo A consisten en depósitos enterrados y rellenados (dos con suelo arcilloso y dos con material del mismo terreno, arenas arcosicas). En la superficie se planta un césped continuo. El fondo tiene un tubo colector que recoge las salidas (G) y las conduce a un depósito colector, también encerrado y situado a nivel inferior, para medirla (fig.1 A).

El lisímetro reposa en un colchón de agua y se prolonga por un manómetro para medir las variaciones del contenido hídrico (DR) que podría ser negativo. Se utilizaron cuatro lisímetros simultáneamente. Desde la fecha comienzo de la experiencia en el mes de Enero se procedió a su saturación con agua.

Los dos lisímetros arenosos (AR) se saturaron con un volumen de agua de 75 litros y se recogieron 5 litros después de 48 horas. Suponemos por

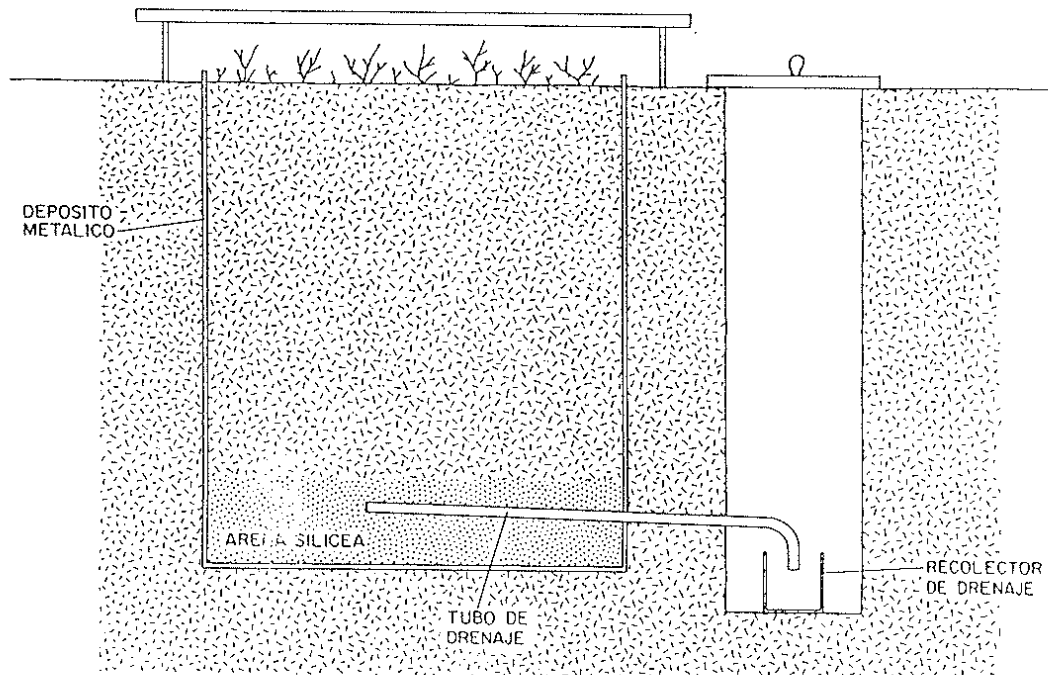
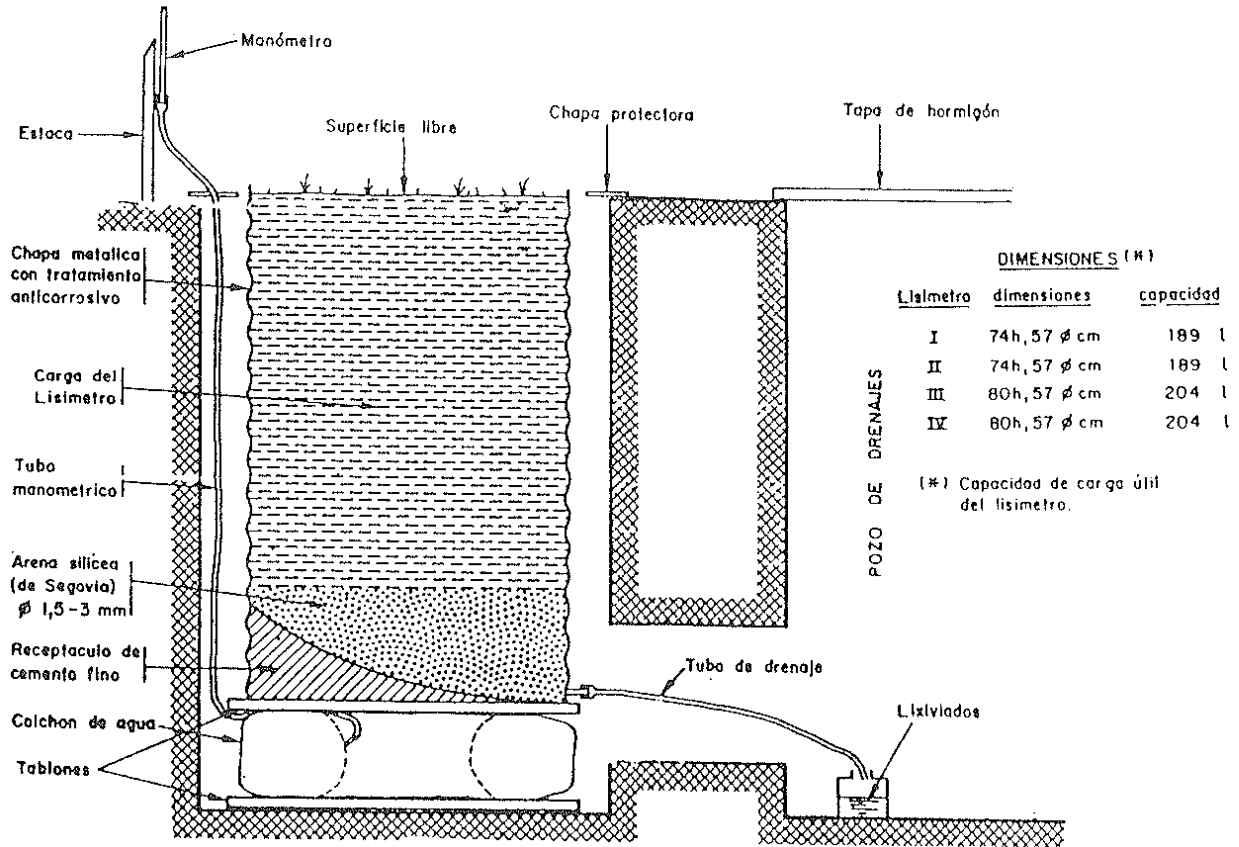


Figura 1.- Sección de lisímetros experimentales. A) Lisímetro libre. B) Lisímetro cubierto.

tanto que fueron necesarios del orden de 70 litros para saturar el lisímetro. Estos 70 litros, que expresados en mm son unos 280 mm, representan una porosidad total teórica del orden de 36,5%.

Los dos *lisímetros arcillosos* (AC) se saturaron con un volumen de agua de 120 litros y se recogieron 8 litros de agua después de 48 horas. Fueron necesarios del orden de 112 litros para saturar el lisímetro. Estos 112 litros, que expresados en mm son unos 448 mm, representan una porosidad total teórica del orden del 48%.

Durante el período de tiempo de duración de las experiencias, estos lisímetros sólo han recibido como aportes el agua de lluvia.

En el lisímetro cubierto (tipo "B"), contrariamente al funcionamiento de los lisímetros tipo "A", sus entradas de agua no son naturales sino que están controladas, siendo natural la evapotranspiración.

Las experiencias con este lisímetro se iniciaron con su saturación mediante un riego de 315 litros de agua. De este volumen de agua introducido artificialmente, obtuvimos al cabo de 36 horas, como agua de salida del lisímetro, unos 3 litros; es decir, fueron necesarios unos 312 litros para saturar un volumen de terreno de 1m<sup>3</sup>. En consecuencia, se calcula una porosidad total teórica del orden de 38,4% para dicho terreno.

En este lisímetro se realizaron dos tipos de experiencia: el cálculo de la evapotranspiración lisimétrica que controla los parámetros restantes y el ensayo con trazadores radiactivos (tritio) y químicos (cloruro) con objeto de analizar el flujo a través de la zona no saturada, cuyos resultados son objeto de otro trabajo en este mismo volumen.

### **Resultados obtenidos con lisímetros libres**

Las observaciones registradas durante este período se reducen a que se ha recogido una salida del orden de 161 mm por el lisímetro arenoso y 138 por el lisímetro arcilloso; lo que nos permite suponer que al menos la ETR es igual o menor al volumen de agua incidido con la lluvia y prueba de ello es que había exceso de agua en esta región.

Por tanto, nos permitimos enunciar unos valores experimentales de ETR del orden de 270 mm para el año 1984. Valor muy próximo a los calculados anteriormente por el método de Turc, tabla IV.

A continuación se procedió a realizar un balance mensual (tabla VI), suponiendo que todo el lisímetro contiene unas reservas equivalentes a 280 mm del lisímetro AR (arenoso) y 448 mm por el lisímetro AC (arcilloso), reservas iniciales para saturar el lisímetro.

Los resultados mostrados en esta tabla-VI, nos indican claramente que la evapotranspiración es netamente menor a la pluviometría, lo que está de acuerdo con la experiencia de obtener 161 mm como salida para el lisímetro arenoso y 138 para el lisímetro arcilloso.



De todos estos resultados expuestos anteriormente referentes al lisímetro "A", cabe deducirse básicamente una conclusión principal: las condiciones pluviométricas son suficientes para satisfacer las pérdidas por evapotranspiración para los meses de Enero, Febrero, Marzo, Mayo y Noviembre y para el resto de los meses del año la evapotranspiración potencial es bastante superior a la cantidad de lluvia que incide en este período. Tanto las ecuaciones más comunmente utilizadas para tales fines y que han sido presentadas, como los resultados obtenidos directamente, corroboran esta afirmación.

Puede extraerse en consecuencia, que la cantidad de agua que reciben los materiales situados a una profundidad de 1 m (altura del lisímetro) es con toda seguridad del orden de 161 mm de agua bajo las condiciones meteorológicas y de terreno experimentados.

a-Lisímetro arenoso (AR)													
	En	Fe	Mz	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	No	Di	Total
A	26.9	31.2	59	31.5	85.1	32.6	2.2	10.7	6.8	28	142.9	9.5	466.4
R	42	42	42	13.7	42	0	0	0	0	0	42	36.7	—
DR	42.0	0	0	-28.3	+28.3	-42	-42	-42	-42	-42	42	-5.3	+36.7
G	18.9	15.1	42.3	—	11.5	—	—	—	—	—	73.2	—	161.0
E.T.R	8	16.1	16.7	59.8	45.3	32.6	2.2	10.7	6.8	28	27.7	14.8	258.7

b-Lisímetro arcilloso (Ac)													
	En	Fe	Mz	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	No	Di	Total
A	26.9	31.2	59	31.5	85.1	32.6	2.2	10.7	6.8	2.8	142.9	9.5	466.1
R	65	65	65	36.7	65	0	0	0	0	0	65	59.7	—
DR	65	0	0	-28.3	+28.3	-65	-65	-65	-65	-65	65	-8.3	59.7
G	18.9	15.1	42.3	—	11.5	—	—	—	—	—	50.2	—	138
E.T.R	8	16.1	16.7	59.8	45.3	32.6	2.2	10.7	6.8	28	27.7	14.8	268.7

Tabla VI. Se muestran los datos experimentales para los lisímetros libres durante el tiempo transcurrido del experimento. a- Lisímetro arenoso (AR). b- Lisímetro arcilloso (AC)

A = Aportación de agua (mm) R = Reserva de agua utilizable por la planta.

DR = Variación de la reserva de agua utilizable por la planta

ETR = A-G-DR. G = Gasto de agua (no debido a evapotranspiración)

En la tabla VI se ha estimado una reserva utilizable por la planta del orden de 42 mm para el lisímetro AR y 65 mm para el lisímetro AC. Como consecuencia de estos resultados podremos extraer que en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril y Noviembre había un exceso de agua que descendió más abajo de la zona de la raíz como agua de gravitación, de 161 mm para el lisímetro arenoso (AR) y 138 mm para el arcilloso (AC).

No obstante, no sabemos el comportamiento de áreas de granulometría mucho más grosera, como pueden ser fondos de cauces o ápices de conos de deyección (López-Vera 1977), que deben presentar, "a priori", una infiltración vertical mucho mayor que la experimentada.

Aún así, no podemos por menos que volver a resaltar que los resultados obtenidos nos indican una fuerte limitación de uso de agua de la zona. Por tanto, es de esperar que, casi el único medio eficaz de recarga de los acuíferos por el que se obtiene agua potable, debe ser a través de este exceso.

Dado que no disponemos de datos obtenidos con métodos directos para comparar los cálculos con los datos disponibles experimentales, hemos procedido al cálculo de la E.T.R. de los datos de E.T.P. (tabla-VII) asignando una reserva teórica de 42 mm de agua utilizable por las plantas, cálculo directo de la porosidad. Los cálculos han sido obtenidos como media mensual desde el año 1981-1984. Según estas cifras hemos realizado una representación gráfica (fig.-2) para evaluar el balance hídrico.

Los resultados indican que el volumen de agua evapotranspirada era de unos 310 mm, un 85% del volumen total de agua registrada por precipitación sobre la superficie. Resumiendo, podemos decir que el volumen de agua que se evapotranspira en nuestra zona es de 310 mm.

Estas cifras suponen, por tanto, que del total de agua precipitada retorna a la atmósfera el 85% como resultado de la evapotranspiración y transpiración efectuada por las plantas que se desarrollan en su suelo.

Estación de: U.A.M. Nº: 126 L Latitud: 40°12'52" N Altitud: 713 mm Longitud: 3°41'27" W Año: 1981-1984													
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	TOTAL
	OCT.	NOV.	DIC.	ENR.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	
P (m.m)	20.1	70.4	23.9	32.5	29.4	30.0	43.5	57.4	20	5.3	7	14.3	361.8
E.T.P. (m.m)	57.7	31.2	13.0	12.8	13.1	42.4	47.6	69.2	127.3	179.7	128.5	101.4	823.9
Variación de reserva (m.m)	—	42	0	0.6	—	-12.4	-4.1	-11.8	-13.7	—	—	—	0
Reserva de agua utilizable (m.m)	0	42	42	42	42	29.6	25.5	13.7	0	0	0	0	—
E.T.R (m.m)	20.1	31.2	13.0	12.8	13.1	42.4	47.6	69.2	33.7	5.3	7	14.3	309.7
Excedentes (m.m)	—	5.2	10.9	19.7	16.3	—	—	—	—	—	—	—	52.1
Infiltración eficaz (m.m) 15%	—	0.8	1.6	3	2.4	—	—	—	—	—	—	—	7.8
Escorrentía superficial (m.m) 85%	—	4.4	9.3	16.7	13.9	—	—	—	—	—	—	—	44.3
Defictis (m.m)	37.6	—	—	—	—	—	—	—	93.6	174.4	121.5	87.1	514.2

Tabla VII.- Cálculo del balance hídrico de la estación U.A.M.

Estas cifras coinciden más o menos con los cálculos directos de evapotranspiración lisimétrica, y como resultado la evapotranspiración es del orden del 75% debido a la evaporación y transpiración efectuada por las plantas en los lisímetros.

**Resultados obtenidos con el lisímetro cubierto**

Como hemos explicado en el lisímetro cubierto (tipo "B"), contrariamente al funcionamiento de los lisímetros tipo "A", sus entradas de agua no son naturales sino que están controladas, siendo natural la evapotranspiración. Este lisímetro se utiliza para medir experimentalmente la evapotranspiración lisimétrica. Se controló cada semana el volumen de agua de riego (24 litros) cada lunes, así como el de salida.

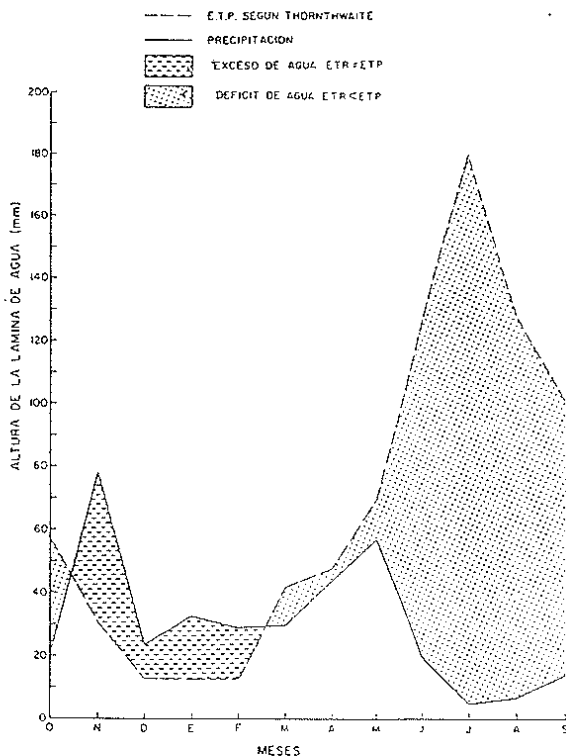


Figura 2.- Balance hídrico en la estación experimental. (1981-1984).

La relación de estas salidas con las de entrada se refleja en la tabla VIII, y su expresión gráfica en la figura 3. En ésta se ha añadido el valor de la temperatura media semanal ponderada indicada en la tabla II. Se aprecia una cierta correlación entre temperaturas medias semanales ponderadas y salidas mediante expresada por la ecuación de regresión: Valor de la X y el valor de la Y (formato libre) con los siguientes parámetros:

Número de valores leídos = 47; determinante = 0.120E+06; término independiente = 7.55; término de primer grado = - 0.204; regresión = - 0.914833. Por lo que:

$$S_s = -0.204.T_s + 7.55$$

S<sub>s</sub> = salidas semanales del lisímetro "B" en l/m<sup>2</sup>  
 T<sub>s</sub> = temperatura media semanal ponderada en °C

De modo análogo, si intentamos buscar una relación entre la temperatura media semanal ponderada y la evapotranspiración lisimétrica

semanal tendremos una relación tal como ésta: para valor de la X y valor de la Y (formato libre):

Número de valores leídos = 47; determinante = 0.120E+06; término independiente = 16.5; término de primer grado = 0.201; regresión = 0.915150. Por lo que:

$$Es = 0.201 \times Ts + 16.5$$

Es = evapotranspiración lisimétrica semanal en l/m<sup>2</sup>

Ts = temperatura media semanal ponderada en °C

1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	24	6.5	17.5	5.8	31	24	5.9	18.1	10.9
2	24	7.4	16.6	2.2	32	24	4.8	19.2	14.3
3	24	5.4	18.6	6.9	33	24	4.6	19.4	14.4
4	24	4.9	19.1	9.5	34	24	4.9	19.1	13.7
5	24	4.1	19.9	11.7	35	24	5.3	18.7	11.3
6	24	3.9	20.1	13.7	36	24	5.9	18.1	9.2
7	24	5.1	18.9	9.6	37	24	6.1	17.9	8.3
8	24	3.6	20.4	15.3	38	24	6.3	17.7	10.2
9	24	4.9	19.1	8.1	39	24	6.8	18.2	8.9
10	24	4.3	19.7	10.6	40	24	5.9	18.1	7.3
11	24	5.1	18.4	7.8	41	24	6.8	17.2	6.2
12	24	4.8	19.2	9.7	42	24	6.2	17.8	5.3
13	24	4.00	20	12.4	43	24	8.9	15.1	5.1
14	24	4.3	19.7	11.9	44	24	8.1	15.9	1.3
15	24	3.1	20.9	19.2	45	24	7.8	16.2	1.1
16	24	3.5	20.8	17.7	46	24	6.4	17.6	3.8
17	24	3.00	21	21.5	47	24	6.3	17.7	5.2
18	24	2.9	21.1	22.4	48	24	6.5	17.5	4.9
19	24	1.8	22.2	27.2	49	24	6.6	17.4	4.5
20	24	1.7	22.3	29.3	50	24	6.9	17.1	3.6
21	24	1.7	22.3	28.6	51	24	7.2	16.8	2.2
22	24	2.8	21.2	24.1	52	24	6.4	17.6	3.8
23	24	3.4	20.6	22.4	53	24	6.3	17.7	5.4
24	24	3.2	10.8	21.7	54	24	6.8	17.2	6.3
25	24	4.2	19.8	21.2	55	24	9.7	14.3	5.8
26	24	3.4	20.6	22.2	56	24	7.8	16.2	7.2
27	24	3.9	20.1	19.3	57	24	2.9	21.1	19.2
28	24	4.2	19.8	18.9	58	24	8.1	15.9	11.5
29	24	4.4	19.6	18.6	59	24	3.8	20.2	13.4
30	24	5.7	18.3	12.7	60	24	4.6	19.4	11.4

Tabla VIII.- Valores entradas, salida, evaporación lisimétrica (E.T.) y temperatura media semanal. 1.- Número de semana 2.- Entradas semanales (l) 3.- Salidas correspondientes en litros .4.- E.T. (mm) = Entrada-salida. (2-3) 5.- Temperatura media semanal en °C.

De modo análogo en la tabla IX y su correspondiente figura 4 se han expresado los mismos parámetros pero en cuantías mensuales. Estas

cuántas son ponderadas, es decir, dado que el control de entradas y salidas era semanal y no siempre los comienzos e inicios de una semana determinada corresponden a límites mensuales, tenía que hacerse una ponderación de las semanas escogidas para el cálculo del mes considerado. Esa misma ponderación se realizó con las temperatura medias semanales.

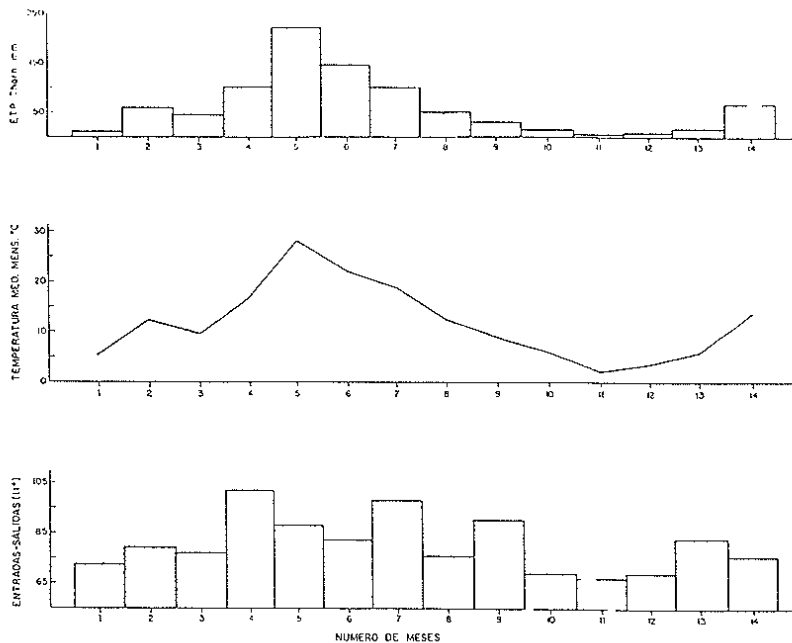


Figura 3.- Variación temporal de los volúmenes de agua de entrada y salida del lisímetro cubierto y de la temperatura ambiental media semanal.

		1	2	3	4	5
1	Marzo 1984	96.00	24.2	71.8	5.6	
2	Abril "	96.00	16.7	79.3	12.7	
3	Mayo "	96.00	19.1	76.9	9.7	
4	Junio "	120.00	17.9	102.1	16.9	
5	Julio "	96.00	18.1	87.9	28.3	
6	Agosto "	96.00	13.6	82.4	22.2	
7	Septiembre "	120.00	21.6	98.4	19	
8	Octubre "	96.00	20.2	75.8	12.7	
9	Noviembre "	120.00	29.4	90.6	9.2	
10	Diciembre "	96.00	27	69.00	6.1	
11	Enero 1985	96.00	28.6	67.4	2.2	
12	Febrero "	96.00	27.2	68.8	3.8	
	<b>Total</b>	<b>1224.00</b>	<b>263.6</b>	<b>960.4</b>	<b>—</b>	
13	Marzo 1985	120.00	36.9	83.1	5.7	
14	Abril "	96.00	19.4	76.7	13.8	

Tabla IX: Valores de entrada, salida, ET mensual y temperatura media mensual.  
 1.- Meses del año .2.- Entrada mensual (lt). 3.- Salida correspondiente (lt)  
 4.- Evapotranspiración lisimétrica (E.T.). 5.- Temperatura media mensual.

Número de valores leídos = 12; determinante = 0.833E+04; término independiente = 28.0; término de primer grado = -0.493; regresión = -0.742925

$$S_m = -0.49 \times T_m + 28 \dots\dots\dots 5.3$$

$S_m$  = salidas mensuales del lisímetro "B" en  $l/m^2$   
 $T_m$  = temperatura media mensual ponderada en  $^{\circ}C$

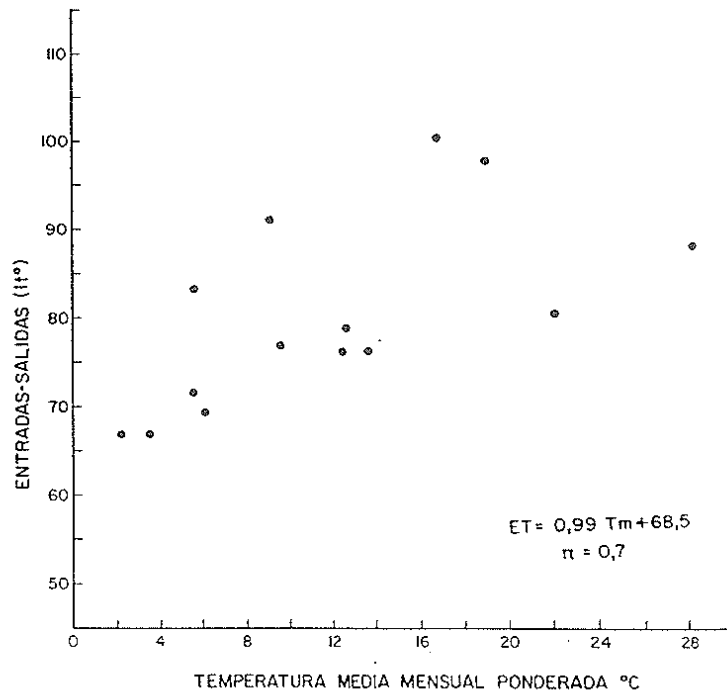


Figura 4.- Volumen de agua de salida (l) mensual vs. temperatura media mensual  $^{\circ}C$ .

De todo esto, queremos resaltar que si suponemos, como era la intención al programar la experimentación de este lisímetro, que el material en él contenido ha estado en condiciones de saturación, hemos de concluir que el déficit de escorrentía que pudiésemos calcular (entradas-salidas), ha de representar aproximadamente el valor de la evapotranspiración lisimétrica (E.T.). Por este motivo, realizando los cálculos pertinentes, basándonos en la tabla X, tendríamos que a nivel mensual (fig. 5):

Número de valores  $l = 12$ ; determinante = 0.833E+04; término independiente = 68.5; término de primer grado = 0.99; regresión = 0.679617. Por lo que:

$$E_m = 0.99 \times T_m + 68.5$$

$E_m$  = evapotranspiración lisimétrica experimentada mensual ( $l/m^2$ ) (entradas - salidas)

$T_m$  = temperatura media mensual ponderada  $^{\circ}C$

1	2	3	4
Enero	26.9	8	18.9
Febrero	31.2	16.1	15.1
Marzo	59	16.7	42.3
Abril	31.5	59.8	-
Mayo	85.1	115.3	11.5
Junio	32.6	32.6	-
Julio	2.2	2.2	-
Agosto	10.7	10.7	-
Septiembre	6.8	6.8	-
Octubre	28	28	-
Noviembre	142.9	27.7	73.2
Diciembre	9.5	14.8	-
Total	466.4	268.7	161.0

*Tabla X: Evapotranspiración lisimétrica mensual en mm y aportaciones del agua en mm.  
1.- Meses .2.- Aportaciones (mm). 3.- Valores evapotranspiración lisimétrica (mm).  
4.- Excesos del agua (mm) (2)-(3).*

De este modo, mensualmente obtendremos:

1.- Para el mes de Marzo de 1984 la evapotranspiración lisimétrica mensual ( $E_m$ ) es del orden de 71.8 mm. Por tanto, del orden de un 74.8% del total del agua de las entradas (96 litros) ha pasado a la atmósfera en forma de vapor. La temperatura media mensual ponderada de este mes ha sido de 5,6 °C.

2.- Para el mes siguiente del mismo año, la evapotranspiración lisimétrica mensual ( $E_m$ ) es del orden de 79,3 mm. Por tanto, del orden de un 82,6 % del total de las entradas ha pasado a la atmósfera.

3.- Para el mes de Mayo de 1984 del orden de 80,1 % de las entradas ha pasado a la atmósfera.

4.- Para el mes de Junio de 1984 del orden de 85,1 % de las entradas (120 litros) han pasado a la atmósfera.

5.- Para el mes de Julio de 1984 del orden de 91,5 % de las entradas han pasado a la atmósfera. La temperatura media mensual ponderada de este mes es de 28,3°C.

6.- Para el mes siguiente de este mismo año ha pasado a la atmósfera del orden de 85,8%.

7.- Para el mes de Septiembre de 1984 ha pasado a la atmósfera del orden de 82% de las entradas (120 litros) y la temperatura es de 19°C.

8.- Para el mes siguiente, ha pasado a la atmósfera del orden del

78,9% de las entradas.

9.- Para el mes de Noviembre de 1984 ha pasado a la atmósfera como evaporación del orden del 75,5% de las entradas.

10.- Para el mes de Diciembre del mismo año ha pasado a la atmósfera como evaporación del orden del 71,8% de las entradas.

11.- Para el mes de Enero de 1985 ha pasado a la atmósfera como evaporación del orden del 70,2% de las entradas (96 litros) y la temperatura media mensual es de 2,2 °C.

12.- Para el mes de Febrero de 1985 ha pasado a la atmósfera como evaporación del orden del 71,6 % de las entradas y con una temperatura media mensual de 3,8 °C.

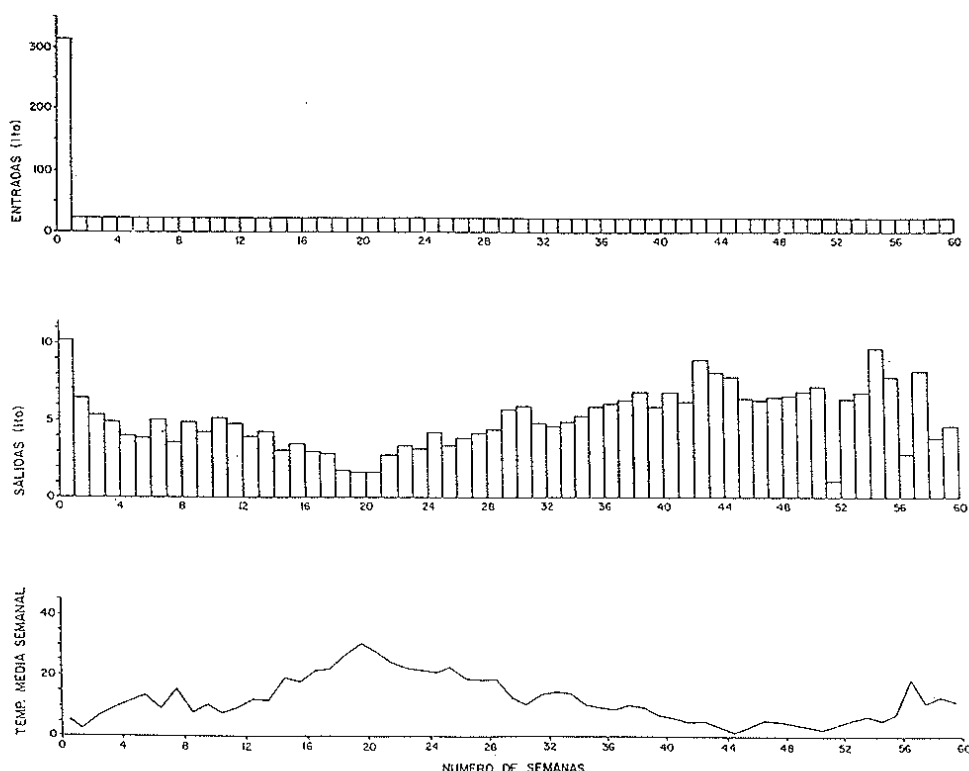


Figura 5.- Valores de entrada-salida semanal (l) con la temperatura media semanal °C.

Como resumen, en la tabla XI se compara la E.T. lisimétrica, la E.T.P. (Thornthwaite) y la temperatura media mensual.

Para este año hidrológico y como hemos visto en el comentario precedente, la evaporación lisimétrica anual (Ea) es del orden de 960.4 mm. Por tanto del orden de un 78,5% del total del agua de las entradas (1224 litros) ha pasado a la atmósfera, pero en forma de vapor. La temperatura media anual ponderada de este año ha sido de 12,4 °C.

Por tanto, estos serían los volúmenes de agua que tendrían que suplirse anualmente de forma artificial o natural para mantener el suelo con reservas suficientes para compensar las pérdidas máximas por



evapotranspiración sin intervención de cultivo alguno.

Meses		(1)	(2)	(3)
Marzo	1984	71.8	16.7	5.6
Abril	"	79.3	59.8	12.7
Mayo	"	76.9	45.3	4.7
Junio	"	102.1	102.7	16.9
Julio	"	87.9	220.8	28.3
Agosto	"	82.4	144.5	22.2
Septiembre	"	98.4	101.0	19
Octubre	"	75.8	51.7	12.7
Noviembre	"	90.6	27.7	9.2
Diciembre	"	69.0	14.8	6.1
Enero	1985	67.4	4.3	2.2
Febrero	"	68.8	7.5	3.8
Total		960.4	796.8	

*Tabla XI.- Valores de la evapotranspiración lisimétrica mensual (ET) en mm, evapotranspiración potencial en mm y temperatura media mensual en °C. (1) Evapotranspiración lisimétrica experimental mensual (mm). (2) Evapotranspiración potencial mensual según Thornthwaite (mm) (3) Temperatura media mensual en °C.*

En otro orden de cosas, nos permitimos comparar estos valores experimentales de  $E$  con los valores de ETP calculados teóricamente a partir de esta tabla V. Los resultados de esta comparación los presentamos en el cuadro siguiente:

AÑO	(1)	(2)
1981	847.5 mm	14.1
1982	812.8 mm	13.0
1983	813.0 mm	13.1
1984	809.1 mm	12.7

- 1) evapotranspiración potencial según Thornthwaite
- 2) temperaturas medias anuales °C

En este cuadro resalta el hecho de E.T.P. según Thornthwaite, con media de unos 820 mm anuales de evapotranspiración teórica y si comparamos estos datos con los del año hidrológico de evapotranspiración lisimétrica de 960 mm, esta diferencia apreciable depende de las condiciones de saturación del lisímetro "B".

A pesar de esta similitud de los valores experimentales y teóricos, una disposición como la presentada en la figura 5, donde se presentan los valores mensuales de evapotranspiración teóricos y calculados, nos indica

que dicha semejanza es únicamente en el valor total anual. Obsérvese que en dicha figura se aprecian unas marcadas diferencias en los valores mensuales pues, mientras que desde un punto de vista experimental la amplitud oscila entre 30-35 mm (de Julio 84 a Febrero 85), en los valores teóricos (de Julio 84 a Febrero 85) la amplitud alcanza los 210 mm.

He aquí que nos permitimos apuntar que la ecuación de Thornthwaite sirve en el área de estudio para tener una idea de la E.T.P. a nivel anual pero no sirve a nivel mensual (tabla XI).

Asimismo se quiere resaltar otra serie de hechos que se derivan de la observación de la figura 5. Se aprecia que los mínimos mensuales (meses de Enero y Febrero de cada año) progresivamente en el tiempo alcanzan valores absolutos cada vez más elevados. Lo mismo podría decirse si consideramos los meses de máxima evaporación, pues hay un aumento en cada período anual de meses de una pequeña cantidad de salida.

Al respecto, se significa, que en los cálculos de los 12 meses experimentales no se han tenido en cuenta los 312 litros necesarios para la saturación inicial del lisímetro, ya que se consideraron a éstos sólo como un medio para partir de unas condiciones de saturación total. Su confirmación la tendremos al exponer las experiencias con isótopos, ya que puede que aquellos 312 litros hayan tenido una participación posterior más alta del objetivo para el que fueron empleados.

## **Conclusiones**

De lo expuesto para las experiencias lisimétricas y la aplicación de formulas empíricas podemos concluir que:

\* De acuerdo con la formula de cálculo de la evapotranspiración de Turc, en los años que no se superen los 312 mm de lluvia, no existen excedentes de agua y por tanto flujo.

\* La evapotranspiración potencial según Thornthwaite es de 820 mm. Del balance mensual de agua calculado en los lisímetros libres, las condiciones pluviométricas son suficientes para satisfacer las perdidas por evapotranspiración en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Mayo y Noviembre y para los restos de los meses del año la evapotranspiración es bastante superior a la cantidad de precipitación.

\* Bajo estas condiciones la cantidad de agua que alcanza la profundidad de un metro anualmente es del orden de 161 mm. Estimando unas reservas utilizables por las plantas de 42 mm para los lisímetros cargados con suelos arenosos y 65 mm para los de suelos arcillosos, se calcula que para los meses de Enero, Febrero, Marzo, Abril y Noviembre, había un exceso de agua que produce un flujo de 161 mm en los suelos arenosos y 138 mm en los arcillosos. Estos resultados no pueden ser extrapolados en la zona próxima al borde de la sierra, donde la

granulometría más grosera hace suponer una infiltración vertical mayor.

\* El volumen de agua evapotranspirada en los lisímetros es de 310 mm (75% de las precipitaciones) valor ligeramente inferior al obtenido por la fórmula de Turc.

\* La medida de la evapotranspiración (potencial) lisimétrica, de los lisímetros abiertos, indica una alta correlación (del 0,92), con la temperatura media semanal. Estableciendo el cálculo mes a mes, el de Enero es el de menor pérdida de ETP con un 70 % de las entradas y Julio el de máxima con 91,5 %.

\* El valor medio de ETP de Thornthwaite es de 820 mm, frente a los 960 de la evapotranspiración lisimétrica. Esta diferencia parece depender de las condiciones de saturación del lisímetro. Sin embargo, en los valores mensuales las diferencias son mucho mayores, lo que nos permite establecer que la ecuación de Thornthwaite sirve para estimar la ETP media anual, pero muestra grandes diferencias en la estimación mensual.

## Referencias

- ELIAS CASTILLO, F y JIMENEZ ORTIZ, R. (1965) "Evapotranspiración potencial y balances de agua en España". *Mapa agronómico nacional*. Ministerio de Agricultura. Madrid.
- KNAPP, B.J. (1978). "Infiltration and Storage of Soil Water. in *Hillslope Hydrology*, Cap 2. Ed. Kirby. Pergamon Press. Londres.
- LOPEZ-VERA, F. y PEDRAZA, J. (1976) "Síntesis geomorfológica de la Cuenca del río Jarama en los alrededores de Madrid". *Estudios Geológicos*, 32, pp 499-508. Madrid.
- LOPEZ-VERA, F y SAIZ GARCIA-CUENCA, J. (1977a). "Capacidad de regulación del Terciario y Cuaternario sobre los caudales del río Jarama en los alrededores de Madrid". *Bol. del I.G.M.E.* Marzo-Abril.
- LOPEZ-VERA, F. (1977b) "Hidrología regional de la cuenca del Río Jarama en los alrededores de Madrid". *Men. Inst. Geol. Min. Esp.* núm. 91 227 pag + planos.
- MAHMOUD EL JAMMAL, M. (1986) "Estudio experimental del flujo y características del agua en la zona no saturada" *Tesis doctoral*. Fac. de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid.
- LLAMAS, J. (1993) "Hidrología general. Principios y aplicaciones" servicio Editorial del País Vasco. Bilbao.

