

DETERMINACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION REAL EN SOYA
Y EVALUACION DE FORMULAS EMPIRICAS DE EVAPOTRANSPIRACION
DE REFERENCIA EN PALMIRA

Fernando A. Montealegre L. *

Carlos A. Gallardo B. **

COMPENDIO

En el Instituto Colombiano Agropecuario - ICA Palmira, durante los semestres B de 1992 y A de 1993 se determinó la evapotranspiración real (ET) de la soya (variedad Valluna-5), en tres porcentajes de agotamiento del agua aprovechable del suelo (30, 50 y 70%) y 50% en suelo compactado "pie de rastrillo", entre 15 y 20 cm de profundidad. También se evaluaron fórmulas empíricas y métodos directos para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (Eto). Se empleó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. Cuando no hubo restricciones edáficas, la evapotranspiración real disminuyó con el incremento en el porcentaje de agotamiento del agua aprovechable. El tratamiento con "pie de rastrillo" y 50% de agotamiento del agua aprovechable del suelo, tuvo una evapotranspiración real 12.5% mayor que la del suelo sin restricciones. La mayor demanda hídrica se presentó durante las fases de prefloración (35 - 39 días) y floración (40 - 59 días), en todos los tratamientos. Con base en el análisis económico se sugiere utilizar el 30% de agotamiento del agua aprovechable del suelo, o en su defecto, el del 70% siempre y cuando la cantidad de agua (riego + lluvia) sea por lo menos de 340 mm para los primeros 100 días del ciclo de cultivo. En circunstancias similares a las del experimento parece recomendable utilizar agotamientos del agua aprovechable entre 50% y 70%, cuando se tiene "pie de rastrillo". Las ecuaciones para el cálculo de Eto que se sugieren utilizar son las de Penman y García-López; así mismo, el método del tanque clase "A".

ABSTRACT

At the Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) in Palmira, an experiment was carried out during the second semester of 1992 and first one of 1993 to determine the soybean (Valluna-5 variety) actual evapotranspiration (ET) under three percentages of soil water depletion (30, 50 and 70%); besides, the 50% for the soil compaction called "rake foot", at about 15 to 20 cm deep. In addition, several empirical formulas and direct methods to calculate the reference evapotranspiration (Eto) were evaluated. The experiment was established under a complete block design with three repetitions. The treatment including "rake foot" and 50% of soil water depletion had an ET 12.5% greater water demand occurred during prebloom (35 - 39 days) and bloom (40 - 59 days) stages, in all studied treatments. In an economic analysis basis, it is suggested to use the 30% of soil water depletion. However, it is possible to use as an alternative the 70% treatment every time that the total amount of water applied (irrigation + rain) is over 340 mm, during the first 100 days of the crop cycle. Under similar conditions at the present experiment, seems reasonable to use soil water depletions between 50% and 70% for soil with "rake foot". The suggested equations to calculate Eto are Penman and García-López and the method of the pan evaporation type "A".

INTRODUCCION

En la zona plana del Valle Geográfico del Río Cauca, el riego en el cultivo de la soya se programa cuando el porcentaje de agotamiento del agua aprovechable (AAA) del suelo es del 50%, sin que exista información que confirme dicha recomendación. Así mismo, se han llevado a cabo evaluaciones y calibraciones de fórmulas empíricas de evapotranspiración de referencia (ETo), sin que se llegue a un acuerdo para

establecer cuál o cuáles se ajustan más a las condiciones medio ambientales de la región. Además, en los estudios de evapotranspiración (ET) poco se ha tenido en cuenta de qué manera se afecta el cultivo debido a la compactación. Todo esto ha incidido negativamente en el uso del recurso hídrico, el cual día a día no solo es más costoso, sino también más escaso.

* Ingeniero Geógrafo, M.Sc. Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. A.A. 237.

** Ingeniero Agrícola M.Sc. Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Civil.

La evapotranspiración es dependiente de la energía disponible en la superficie, la capacidad del aire para el transporte de vapor de agua y la disponibilidad del agua en la superficie. Por lo tanto, la evapotranspiración estará limitada por factores atmosféricos en el caso de los suelos húmedos y por las condiciones del suelo y de las plantas cuando la accesibilidad del agua empieza a disminuir (García y González, 1964).

La ET es el requerimiento hídrico que el cultivo demanda para su desarrollo. Agudelo (1982, 1990) reporta para las condiciones de Palmira unos requerimientos hídricos de 470 mm; Molano (1982) 310 mm, Montealegre y Varón (1986) 351 mm, Chinchilla y Carrillo (1987) 400 mm; Rojas y Gallardo (1993) 390 mm, todos para un porcentaje de AAA del suelo del 50% y utilizando técnicas diferentes a las del lisímetro.

Con respecto a la evaluación de fórmulas empíricas, solamente algunos institutos oficiales y centros experimentales han trabajado al respecto. Ibarra (1972) concluye que la ecuación de Hargreaves es la más acertada para las condiciones medio ambientales de Palmira. Castro y Guzmán (1985) se inclinan por las de Christiansen y Penman; González y Quijano (1987) por la ecuación de García-López. La falta de coincidencia entre los autores, tal vez se debe al uso de técnicas diferentes.

Sobre el efecto de la compactación en la evapotranspiración (ET) del cultivo de la soya, Santamaría (1993) encontró que la ET aumentó con la aplicación del agua total. Además, la ET también aumentó a medida que la compactación del suelo se hizo más superficial.

En este orden de ideas, se ejecutó la investigación para cumplir con los siguientes objetivos:

- determinar la evapotranspiración real del cultivo de soya *Glycine Max* (L.) Merrill, variedad Valluna-5, en tres porcentajes de AAA de suelo y
- en presencia de una limitante edáfica ("pie de rastrillo") producida por el rastrillo,

aproximadamente entre 15 y 20 cm de profundidad.

- Evaluar las fórmulas de evapotranspiración de referencia de Penman, Hargreaves, Christiansen y García-López; además, los métodos del tanque clase "A" y del evapotranspirómetro tipo Thornthwaite.
- Evaluar económicamente de los rendimientos de soya en los tres porcentajes de AAA.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El experimento se desarrolló durante el segundo semestre de 1992 y primero de 1993, en el Instituto Colombiano Agropecuario en Palmira, localizado a los 3°31' Norte y 76°19' W, a 1001 m sobre el nivel del mar. La zona ecológica correspondiente es de piso térmico cálido subhúmedo (Cortés et al, 1985). Durante el experimento la temperatura media fué de 23.7°, la precipitación de 933 mm y la humedad relativa media de 76.67%. Se sembró la variedad de soya Valluna-5, a 60 cm entre surcos y 5 cm entre plantas, a una profundidad entre 3 y 5 cm; también se sembró pasto (*Paspalum notatum*). Se realizaron las prácticas agronómicas normalmente utilizadas en la región.

El diseño experimental fue de bloques completos al azar con cinco tratamientos y tres repeticiones:

- lisímetro sembrado con pasto, con nivel de humedad cerca a capacidad de campo;
- lisímetros sembrados con soya a los cuales se le permitió 30, 50 o 70% de AAA del suelo, y
- 50% de AAA del suelo y compactado entre 15 y 20 cm de profundidad.

Para el cálculo de las láminas de agua para riego, se determinó la capacidad de campo (28.8% en volumen), el punto de marchitez permanente (10% en volumen) y la densidad aparente (1.49 g/cm³); además se tuvieron en

cuenta los porcentajes de AAA del suelo y la profundidad de raíces. Los contenidos de humedad se determinaron con un dispersor de neutrones. Como apoyo se instaló una batería de tensiómetros y bloques porosos previamente calibrados. También a manera de supervisión se efectuaron muestreos gravimétricos del contenido de humedad del suelo por el "método de la estufa".

Para el cálculo de la evapotranspiración se utilizó un balance hídrico mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$\int ET(dt) = LL + R + \Delta H \quad (1)$$

donde:

- ET = Evapotranspiración entre riegos
- LL = Lluvia caída entre riegos
- R = Riego aplicado
- ΔH = Cambio en el contenido de humedad entre riegos

El análisis económico se hizo con base en la metodología del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo CIMMYT (1988) para

la formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos.

Para el análisis de resultados se utilizó el paquete estadístico de computador SAS.

RESULTADOS Y DISCUSION

Evapotranspiración Real

En el Cuadro 1 se presentan los modelos matemáticos que muestran la variación de la evapotranspiración real acumulada, consolidada para los semestres estudiados. Los modelos son de tendencia sigmoideal (Figura 1) e indican alta variación de la evapotranspiración real (ET) en los primeros 25 días, debido sobre todo a la evaporación, ya que durante este período el cultivo tiene escaso desarrollo vegetativo. De los 25 días a los 100 días se muestra un incremento en la ET, causado principalmente por la transpiración, ya que el cultivo utiliza más agua para la formación de estructuras (fases de prefloreción, floración y formación de vainas y granos). Entre los 100 días y cosecha, en todos los tratamientos se observó una variación menor en la ET, debido a la reducción en el consumo de agua.

CUADRO 1. Variación de la ET acumulada en mm, propuesta para dos fechas de siembra. 1/

TRATAMIENTO (AAA DEL SUELO)	MODELO MATEMATICO	
30%	$ET = (-1.625 + 2.227(x) + .0418(x)^2 - .00028(x)^3)$; $R^2 = .998$
50%	$ET = ((.689 + 2.335(x)) / (1 - .0099(x) + 6.68E-05(x)^2))$; $R^2 = .999$
70%	$ET = ((1.199 + .322(x)) / (1 + .0052(x) + 3.52E-05(x)^2))^2$; $R^2 = .994$
50% C	$ET = (-2.371 + 2.922(x) + .032(x)^2 - .00023(x)^3)$; $R^2 = .996$

1/ Las fechas de siembra son: Febrero 1-15 y Agosto 5-25

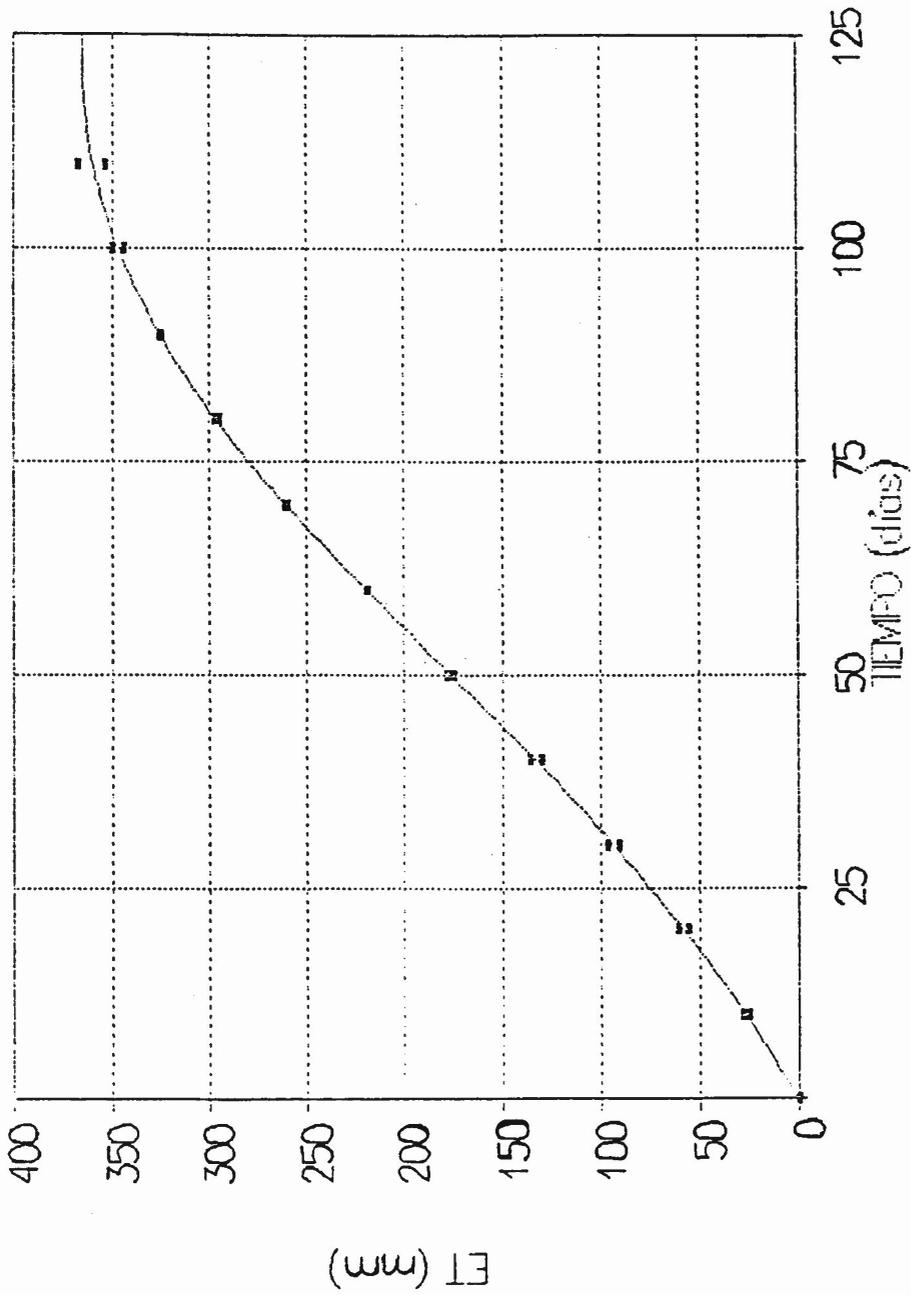


FIGURA 1. Evapotranspiración real acumulada para el 50% de AAA del suelo. Consolidado de los dos semestres.

En condiciones normales, el tratamiento del 30% de AAA del suelo presentó la mayor evapotranspiración acumulada con 375 mm para todo el ciclo de cultivo. La ET para el 30% de AAA del suelo fué 4.5% mayor a la ET correspondiente al 50% de AAA del suelo y 11.6% mayor a la del 70% de AAA del suelo (Cuadro 2). Estas proporciones se presentaron debido a que a medida que el porcentaje de AAA del suelo se hizo menor, la frecuencia de riegos fué mayor, habiendo una cantidad de agua disponible a ser evapotranspirada por la planta (Alba y colaboradores 1965), (Mederiski y Jeffers, 1973), (Martigone y Nakayama 1983), (Castellanos y colaboradores 1984), y (Hill 1986). En condiciones edáficas limitantes (50% de AAA del suelo con compactación entre 15 y 20 cm de profundidad), la cantidad de agua evapotranspirada fue de 404 mm, la cual fue un 12.5% mayor al tratamiento del 50% de AAA del suelo en condiciones normales.

El valor encontrado en el presente estudio (359 mm para el 50% de AAA del suelo) cae dentro de los rangos registrados con anterioridad, teniendo un valor similar al encontrado por Santamaria (1983) quien para las mismas condiciones climáticas y de suelo encontró una evapotranspiración real de 361 mm.

Para el cálculo de la ET diaria (mm/día), para cada tratamiento se derivó un modelo matemático a partir de los modelos consolidados (Cuadro 3). En la Figura 2 se observa la evapotranspiración real diaria (mm/día) y el factor K para el 50 % de AAA del suelo.

El tratamiento del 50% de AAA del suelo bajo compactación, presentó valores más altos de evapotranspiración diaria, pues la compactación a 20 cm actuó como la barrera que obstaculizó el paso del agua, la cual se acumuló en determinados períodos y por lo tanto estuvo más disponible para evaporarse desde el suelo.

La fase de floración presentó mayor velocidad de evapotranspiración, lo cual confirma lo expresado por Rojas y Gallardo (1993) para la misma localidad y en condiciones similares de suelo.

El factor K consolidado para los dos semestres se halló a partir de la relación entre los modelos matemáticos para la ET real diaria y el modelo matemático de la evaporación promedia diaria. Este factor presentó la misma tendencia que la evapotranspiración entre tratamientos (Cuadro 2).

EVAPOTRANSPIRACION DE REFERENCIA

Los modelos matemáticos consolidados que representan la evapotranspiración de referencia (Eto) (Cuadro 4) mostraron una tendencia cúbica.

Las fórmulas de Penman, García-López y el método del tanque clase "A" presentan el mismo comportamiento que el método del lisímetro, mientras que las ecuaciones de Hargreaves y Christiansen no se ajustaron a las condiciones de Palmira. Los resultados respecto a la ecuación de Penman están de acuerdo con los encontrados para la misma localidad por Castro y Guzmán (1985). La evaluación de la fórmula de García-López dió resultados similares a los reportados por González y Quijano (1987). Algunos investigadores (Ibarra, 1971 y 1972; Castro y Guzmán, 1985) afirman que el método de Thorntwaite es el que dá resultados más pobres, lo cual corrobora en parte lo observado en el presente estudio.

ANALISIS MONETARIO

Como el análisis combinado de varianza, del rendimiento el cual no arrojó diferencias significativas al 5% entre semestres para los mismos tratamientos, el análisis económico se hizo con el promedio de los dos semestres.

El tratamiento del 30% de AAA del suelo resultó ser la mejor alternativa, seguido del tratamiento del 70% de AAA del suelo. El tratamiento del 30% presentó altos valores de beneficio neto asociados con menores valores de costos variables (Cuadros 5 y 6).

CUADRO 2. Valores estimados para el factor K y requerimientos de agua (mm/día) para soya variedad Valluna-5 en las condiciones de Palmira (Valle del Cauca).

Fase No.	FASE DE CRECIMIENTO	TRATAMIENTOS DE AAA DEL SUELO															
		30%				50%				70%				50% C			
		K	mm/d	mm/fase Acumulada	ET	K	mm/d	mm/fase Acumul.	ET	K	mm/d	mm/fase Acumul.	ET	K	mm/d	mm/fase Acumul.	
0	Establecimiento (0-20 días)	0.6	2.91	58.38	0.58	2.86	57.22	0.46	2.34	46.84	0.71	3.35	67.18				
1	Vegetativa (21-34 días)	0.83	3.90	112.98	0.78	3.64	108.26	0.82	3.78	99.96	0.88	4.15	125.35				
2	Prefloración (35-39 días)	0.94	4.19	133.93	0.86	4.03	128.42	0.84	4.08	120.28	0.97	4.36	147.16				
3	Floración (40-59 días)	0.98	4.24	219.80	0.89	4.28	214.02	0.90	4.00	200.22	1.00	4.41	235.38				
4	Formación vainas y granos (60-80 días)	0.90	3.79	322.18	0.88	3.70	314.59	0.73	3.21	286.95	0.90	3.93	341.74				
5	Grano completamente lleno a maduración (87-110 días)	0.52	2.20	375	0.45	1.85	359.00	0.50	2.04	336.00	0.62	2.54	404.00				
	TOTAL 110 días			375 mm			359 mm			336 mm			404 mm				

CUADRO 3. Variación de la ET real diaria (mm/d). 1/

TRATAMIENTO (AAA DEL SUELO)	MODELO MATEMATICO
30%	$ET = 2.28 + .8(X) - 8.57 * 10^{-4}(X)^2$
50%	$ET = \frac{[(1-.009(x) + .000067(x)^2) - (.686 + 2.336(x))(-.009 + 2(.000067(x)))]}{[(1-.009(x) + .000067(x)^2)^2]}$
70%	$ET = \frac{[2(1.2 + .323(x))(.323(1 + .0052(x) + 3.53 * 10^{-5}(x)^2)(1.2 + .323(x)(.0052 + 2(.323(x))))]}{[(1 + 0.052(x) + 3.53 * 10^{-5}(x)^2)^3]}$
50% C	$ET = 2.92 + 0.6(x) - 6.9 * 10^{-4}(x)^2$

1/ ET real, consolidada para los semestres B de 1992 y A de 1993
 50% C: 50% de agotamiento del agua aprovechable y suelo compactado
 x: Número del día después de la siembra

CUADRO 4. Modelos matemáticos estimados en promedio para los semestres B de 1992 y A de 1993 para las ecuaciones empíricas y métodos directos de ETo

FORMULA O METODO	MODELO MATEMATICO	ETo (mm/110 días)
Christiansen	$ETo = (1.204 + 3.639(x) - .0108(x)^2 + 3.542E - 05(x)^3) ; R^2 = .992$	317.51
Hargreaves	$ETo = (.643 + 3.275(x) - .0030(x)^2 + 1.55E - 05(x)^3) ; R^2 = .998$	345.11
Penman	$ETo = (-1.472 + 4.555(x) - .010(x)^2 + 3.661E - 05(x)^3) ; R^2 = .995$	421.00
García-López	$ETo = (-.193 + 4.378(x) - .0080(x)^2 + 2.80E - 05(x)^3) ; R^2 = .992$	422.00
Tanque Clase "A"	$ETo = (-.829 + 4.475(x) - .0079(x)^2 + 1.44E - 05(x)^3) ; R^2 = .980$	414.26
Evapotranspirómetro	$ETo = (2.618 + 4.671(x) - .0054(x)^2 + 2.61E - 05(x)^3) ; R^2 = .999$	485.00
Lisímetro	$ETo = (-1.678 + 3.802(x) + .008(x)^2 - 7.89E - 05(x)^3) ; R^2 = .996$	421.20

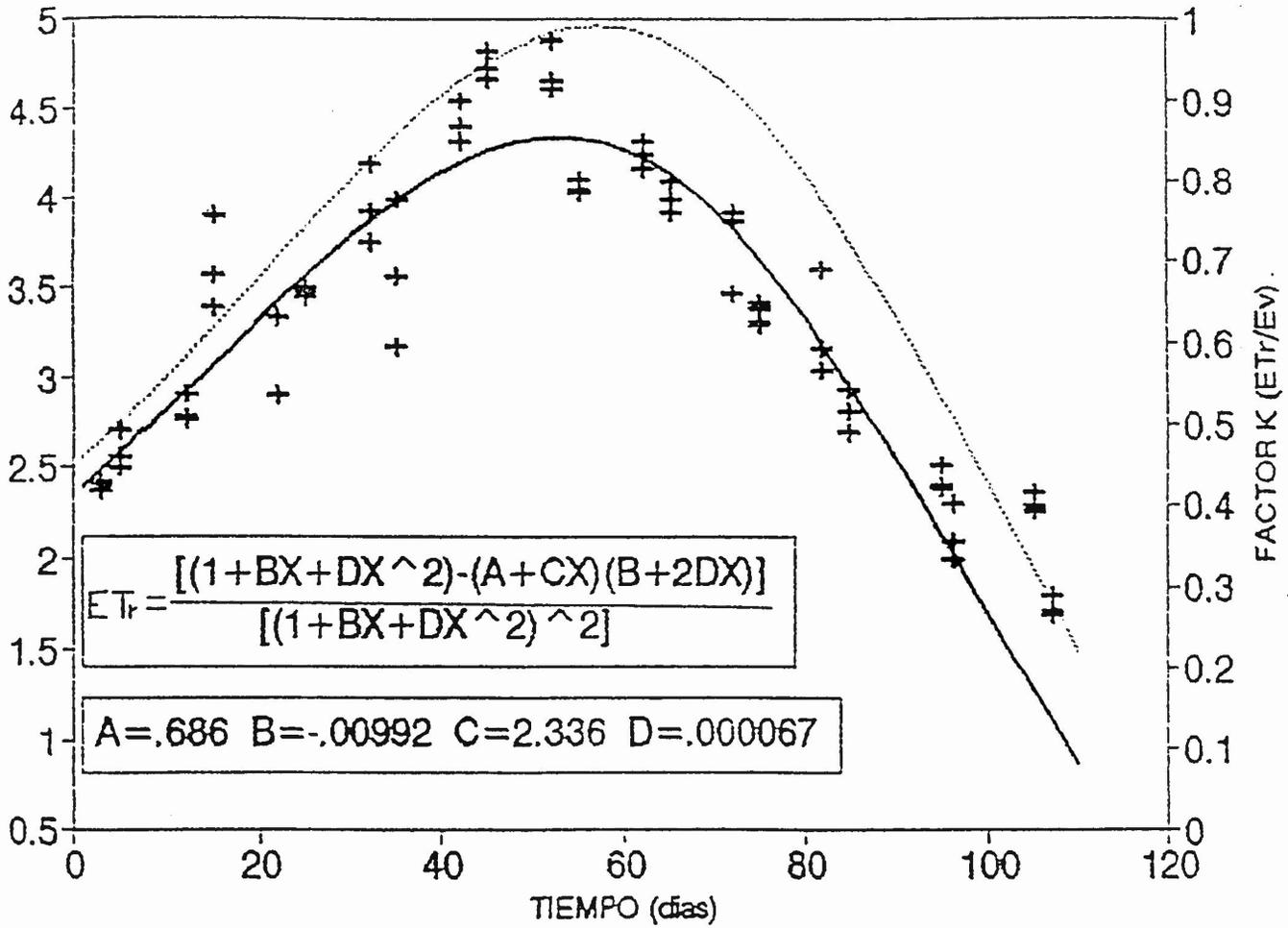


FIGURA 2. Evapotranspiración real diaria (mm/día) y factor K para soya, a un 50% de AAA del suelo.

CUADRO 5. Presupuesto parcial de rendimiento para los tratamientos de porcentaje de agotamiento del agua aprovechable del suelo. Consolidado de los dos semestres.

DESCRIPCION DEL RUBRO	TRATAMIENTO No.			
	1 30%AAA	2 50%AAA	3 70%AAA	4 50%AAA+C
Producción Promedia (kg/ha)	3519	3154	3054	2944
1. Beneficio bruto 1/(\$/ha)	932403	835810	809310	779890
Costos variables del Agua aplicada (m ³ /ha)	2325	1920	1385	1330
Valor del agua (\$) 2/	83700	69120	49860	47880
Valor del riego (\$/ha) 3/	174375	144000	103875	99750
2. Costos variables totales	268075	213120	153735	147630
Beneficio neto (1-2)	674328	622690	655575	632260
Orden de prioridad según beneficio neto	1	4	2	3

- 1/ \$265/kg de soya
 2/ \$ 36/m (1993)
 3/ \$9000/hora (1993)

CUADRO 6. Análisis Marginal. Estimación de la tasa de retorno marginal(TMR) consolidada para los dos semestres.

TRATAMIENTO No.	NOMBRE TRATAMIENTO	BENEFICIO NETO	COSTOS VARIABLES	INCREMENTO MARGINAL		TRM(%)
				BN	CV	
1	30% AAA	674328	258075	18753	104340	1800
2	70% AAA	655575	153735	23315	6105	38190
3	50% AAA	652260	147630			

BIBLIOGRAFIA

- ALBA, A.; CORTES, V y PARRA, L. Descripción de las prácticas adoptadas por los agricultores de algodón, arroz y soya en la zona plana del Valle del Cauca. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional- Palmira. 1965.
- AGUDELO, O. Manejo del cultivo de la soya. En: INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. Curso Internacional de Soya, 3. Palmira, 1982. p. 1-15.
- AGUDELO, O. Manejo del cultivo de la soya en el Valle del Cauca. En: Revista ASIAVA. Cali. 1990. p. 86-92.
- CASTELLANOS, A.; REY, R. y AMORURO, R. Efecto del riego sobre el comportamiento de la soya. Cienc. Tec. Agric. Riego y Drenaje. 7(2): 39-51. 1984.
- CASTRO, M. y GUZMAN, O. Estudio comparativo de fórmulas de evapotranspiración potencial en Colombia. HIMAT, 1988. 78 p.
- CIMMYT. La formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: un manual metodológico de evaluación económica. México, 1988. 78 p.
- CORTES, L. A. et al. Zonificación agroecológica de Colombia. Bogotá : Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 1985. 53 p.
- CHINCHILLA, G. y CARRILLO, P. Evaluación de variedades de soya con diferentes niveles de riego. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 1987. 125 p.
- GARCIA, F. y GONZALEZ, F. Métodos en uso y su empleo para cálculo de la evapotranspiración. En: Centro de Estudios Hidrográficos del Ministerio de Obras Públicas. Madrid, 1964. 38 p.
- GONZALEZ, E. y QUIJANO, C. Determinación de los requerimientos hídricos del algodón (Gospium Hirsutum) variedad Gossica p-11. Tesis (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia, Universidad del Valle. Palmira. 1987.
- IBARRA, A. Comprobación de métodos empíricos para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Bogotá : Universidad Nacional de Colombia, 1972.
- MARTIGONE, R.A.A. and NAKAYAMA, F. Effects of drought and nitrogen availability in two soybean crops. Phytion. V 43(2): 153-165. 1983.
- MEDERSKI, H. J. and JEFFERS, D.L. Yield response of soybean varieties grown at two soil moisture stress levels. Agronomy Journal. 65(3):410-412. 1973.
- MOLANO, M. Manejo del riego en el cultivo de soya. En: INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. Curso Internacional de soya, 3. Palmira, 1982. p. 1-43.
- MONTEALEGRE, F.A. y VARON, F. Estudio agrometeorológico de cultivo de la soya en el Valle del Cauca. Tesis (Ingeniería Geográfica). Universidad Jorge Tadeo Lozano. Bogotá, 1986. 100 p.
- ROJAS, H. y GALLARDO C. Manejo del agua en el cultivo de la soya. En: INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. El cultivo de la soya en Colombia. Palmira, 1983. 11 p.
- SANTAMARIA, H. Efecto del riego y profundidad de compactación en la producción de soya variedad Valluna-5. Tesis (M.Sc.). Universidad Nacional de Colombia. Palmira, 1983.