

UNIVERSIDAD DE SONORA

ESCUELA DE AGRICULTURA Y GANADERIA

"ESTUDIO CLIMATOLOGICO DEL CAMPO EXPERIMENTAL UNISON  
PARA LA DETERMINACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION DEL  
CULTIVO DE TRIGO (*Triticum aestivum*, L.) EMPLEANDO  
"DIFERENTES METODOS"

T E S I S

*Jesús López Elías*

JULIO DE 1987

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

"ESTUDIO CLIMATOLOGICO DEL CAMPO EXPERIMENTAL UNISON PARA  
LA DETERMINACION DE LA EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO DE  
TRIGO (Triticum aestivum, L.) EMPLEANDO DIFERENTES METODOS"

TESIS

sometida a consideración de la  
Escuela de Agricultura y Ganadería

de la

Universidad de Sonora

por

JESUS LOPEZ ELIAS

como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agrónomo con especialidad en Irrigación.

Julio de 1987

PAGINA DEL CONSEJO PARTICULAR

ESTA TESIS FUE REALIZADA BAJO LA DIRECCION DEL CONSEJO PARTICULAR, APROBADA Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA LA OBTENCION DEL GRADO DE:

INGENIERO AGRONOMO EN:

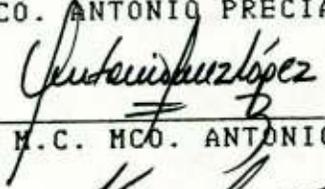
IRRIGACION

CONSEJO PARTICULAR

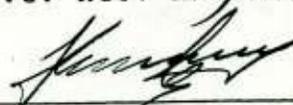
ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
ING. FCO. ANTONIO PRECIADO FLORES

CONSEJERO:

  
\_\_\_\_\_  
ING. M.C. MCO. ANTONIO HUEZ LOPEZ

CONSEJERO:

  
\_\_\_\_\_  
DEA. ING. JOSE CASTILLO GURROLA

## AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi agradecimiento al Ing. Jesús Carlos Arias, por todo el apoyo recibido en la realización de este trabajo.

A) cuerpo revisor integrado por las siguientes personas:

Ing. Fco. Antonio Preciado Flores.

Ing. M.C. Mco. Antonio Huez López.

Ing. D.E.A. José Castillo Gurrola.

por sus valiosas sugerencias que ayudaron a mejorar la presentación de este trabajo.

A todas aquellas personas que ayudaron a la realización de este trabajo.

## DEDICATORIA

### A MIS PADRES:

Olga y Antonio, de quienes siempre he recibido cariño, comprensión y apoyo.

### A MIS HERMANOS:

José Antonio, Olga, Claudio y Alfredo, por la unidad que siempre ha existido entre nosotros.

A LA ESCUELA DE AGRICULTURA Y GANADERIA DE LA UNIVERSIDAD DE SONORA.

A MIS AMIGOS Y COMPANEROS.

## CONTENIDO

### RESUMEN

I. INTRODUCCION		Pg.1
II. LITERATURA REVISADA		Pg.3
Evapotranspiración		Pg.3
Generalidades		Pg.3
Factores que afectan la evapotranspiración		Pg.4
Métodos para estimar la evapotranspiración		Pg.5
Métodos directos		Pg.6
Método gravimétrico		Pg.6
Método lisimétrico		Pg.8
Método del evapotranspirómetro de Thornthwaite		Pg.11
Método de los atmómetros		Pg.16
Método del tanque de evaporación		Pg.18
Métodos indirectos		Pg.25
Método de Hedke		Pg.25
Método de Rohwer		Pg.26
Método de David		Pg.27
Método de Lowry-Johnson		Pg.27
Método de Blaney-Morin		Pg.29
Método de Thornthwaite		Pg.30
Método de Halstead		Pg.32
Método de Turc		Pg.32
Método de Olivier		Pg.33
Método de Jensen-Haise		Pg.35
Método de Tanner		Pg.39
Método de Christiansen		Pg.41
Método de Christiansen-Hargreaves		Pg.42
Método de Hargreaves		Pg.44
Método de Horton		Pg.52
Método de Hanks		Pg.53
Método de Caprio		Pg.58
Método de Doorenbos-Pruitt		Pg.58
Método basado en datos de Pruitt		Pg.75
Método de Grassi		Pg.76
Método de Norero		Pg.80
Método de Brochet-Gerbier		Pg.81
Método de García Benavides		Pg.82
Método de Trenchard-Artley		Pg.84
Método de Blaney-Criddle		Pg.85
Blaney-Criddle sin corregir		Pg.85
Corrección de Phelan		Pg.87
Curva propuesta por Hansen		Pg.88
Grassi-Christiansen		Pg.91
Blaney y Criddle-FAO		Pg.97
Método de Penman		Pg.100

Penman simplificado	Pg.100
Penman modificado	Pg.102
Evapotranspiración Real	Pg.106
Trigo	Pg.114
Importancia	Pg.114
Clasificación botánica	Pg.114
Características botánicas	Pg.115
Condiciones ecológicas	Pg.116
Riegos	Pg.118
III. MATERIALES Y METODOS	Pg.120
IV. RESULTADOS	Pg.126
V. CONCLUSIONES	Pg.129
VI. RECOMENDACIONES	Pg.131
VII. LITERATURA CITADA	Pg.132
APENDICE	Pg.138

## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1 .	Fórmulas para estimar las necesidades de agua de los cultivos _____	Pg.138
Cuadro 2 .	Coeficiente C, en el caso de una cubeta tipo A, para diferentes cubiertas y niveles de humedad relativa media y vientos durante las 24 horas _____	Pg.141
Cuadro 3 .	Valores del factor C _____	Pg.142
Cuadro 4 .	Relaciones de evaporación de cultivo/tanque _____	Pg.143
Cuadro 5 .	Factores de corrección para la velocidad del viento a diferentes alturas _____	Pg.144
Cuadro 6 .	Coeficientes de K de uso consuntivo reportados por Blaney-Criddle _____	Pg.145
Cuadro 7 .	Presión saturante del vapor sobre el agua, ed, en milibares, como función de T en grados Celsius _____	Pg.147
Cuadro 8 .	Porcentaje de horas luz en el día para cada mes del año en relación al número total en un año _____	Pg.148
Cuadro 9 .	Valores de i (índice de calor mensual de Thornthwaite) _____	Pg.149
Cuadro 10.	Duración media posible de la luz en el hemisferio Norte expresada en unidades de 30 días de 12 horas cada uno _____	Pg.150
Cuadro 11.	Radiación incidente extraterrestre. (Cal/cm cuadrado/día) _____	Pg.151
Cuadro 12.	Valores de L y Lo _____	Pg.153
Cuadro 13.	Radiación solar sobre una superficie horizontal, expresada como mm de agua evaporable _____	Pg.155
Cuadro 14.	Duración del día (N) en horas _____	Pg.156
Cuadro 15.	Conversión de estimaciones de la nubosidad en las escalas 0 a 10 y 0 a 8 a valores de n/N _____	Pg.157

Cuadro 16.	Factor de evapotranspiración potencial, MF, para ETP en mm por mes _____	Pg.158
Cuadro 17.	Porcentaje medio diario de horas diurnas anuales (p) a diferentes latitudes _____	Pg.159
Cuadro 18.	Valores del factor de ponderación W para los efectos de la radiación sobre la ETP a diferentes temperaturas y altitudes _____	Pg.160
Cuadro 19.	Presión del vapor $e_d$ en mb calculada a partir de datos de termómetro seco y húmedo en grados Celsius (psicrómetro ventilado) _____	Pg.161
Cuadro 20.	Presión del vapor $e_d$ en mb calculada a partir de datos de termómetro seco y húmedo en grados Celsius (psicrómetro no ventilado) _____	Pg.163
Cuadro 21.	Valores típicos de albedo superficial y emisividad E _____	Pg.165
Cuadro 22.	Coefficientes experimentales para a y b _____	Pg.165
Cuadro 23.	Coefficientes experimentales para $a_1$ y $b_1$ _____	Pg.166
Cuadro 24.	Valores de $R_{nl}$ para diferentes temperaturas _____	Pg.166
Cuadro 25.	Corrección para la temperatura $f(t)$ con respecto a la radiación de onda larga $R_{nl}$ _____	Pg.167
Cuadro 26.	Corrección para la presión del vapor $f(e_d)$ $R_{nl}$ con respecto a la radiación de onda larga _____	Pg.167
Cuadro 27.	Corrección para la relación entre las horas reales de fuerte insolación y las máximas posibles $f(n/N)$ con respecto a la radiación de onda larga $R_{nl}$ _____	Pg.167
Cuadro 28.	Coefficientes de regresión de radiación neta _____	Pg.168
Cuadro 29.	Modelos para estimar a y b en función de la precipitación anual (P) y la altitud (h) _____	Pg.170
Cuadro 30.	Coefficiente de desarrollo $K_c$ para el uso el cálculo de usos consuntivos _____	Pg.171

- Cuadro 31. Coeficiente de desarrollo  $K_c$  para el uso en el cálculo de usos consuntivos \_\_\_\_\_ Pg.173
- Cuadro 32. Coeficientes periódicos de uso consuntivo en función del ciclo vegetativo de acuerdo con Grassi-Christiansen \_\_\_\_\_ Pg.174
- Cuadro 33. Radiación del cuerpo negro ( $\sigma T_k^4$ ) expresada en mm de agua, en función de la temperatura \_\_\_\_\_ Pg.175
- Cuadro 34. Cuadro que expresa  $((A/r)(P1/P2))$  en función de la temperatura (grados Celsius) y la altura (m) \_\_\_\_\_ Pg.176
- Cuadro 35. Valores del coeficiente C \_\_\_\_\_ Pg.177
- Cuadro 36. Valores experimentales de  $K_{co}$  \_\_\_\_\_ Pg.178
- Cuadro 37. Constantes de  $K_{co}$  para varios cultivos \_\_\_\_\_ Pg.179
- Cuadro 38.a. Coeficientes de cultivo  $K_c$  correspondientes a cultivos extensivos y de hortalizas en diferentes fases de su crecimiento y según las condiciones climáticas predominantes \_\_\_\_\_ Pg.180
- Cuadro 38.b. Valores de  $K_c$  correspondientes a la caña de azúcar \_\_\_\_\_ Pg.183
- Cuadro 38.c. Valores de  $K_c$  correspondientes al arroz \_\_\_\_\_ Pg.184
- Cuadro 38.d. Coeficientes de cultivo  $K_c$  (medio) de la alfalfa, las gramíneas para heno, la mezcla de trébol y leguminosas herbáceas y los pastos, y  $K_c$  (máximo) justo antes de la recolección y  $K_c$  (mínimo) inmediatamente después de ella \_\_\_\_\_ Pg.185
- Cuadro 38.e. Valores de  $K_c$  correspondientes a árboles caducifolios frutales y de nuez, de pleno crecimiento \_\_\_\_\_ Pg.186
- Cuadro 38.f. Valores de  $K_c$  correspondientes a los cítricos (cultivados en zonas predominantemente secas, con vientos de débiles a moderados) \_\_\_\_\_ Pg.188
- Cuadro 38.g. Valores de  $K_c$  en el caso de la vid (riego infrecuente, suelo seco) \_\_\_\_\_ Pg.189

Cuadro 38.h.	Valores de Kc en el caso de la banana	Pg.190
Cuadro 38.i.	Valores de Kc de las hierbas acuáticas y coeficientes correspondientes a la superficie de agua libre	Pg.191
Cuadro 39.	Valores de Kc en base a las características de desarrollo del cultivo	Pg.192
Cuadro 40.	Temperatura media mensual y media mensual anual en grados Celsius	Pg.193
Cuadro 41.	Evaporación media mensual y media mensual anual en mm	Pg.193
Cuadro 42.	Precipitación mensual y media mensual anual en mm	Pg.194
Cuadro 43.	Radiación solar media mensual y media mensual anual en Cal/cm cuadrado/día	Pg.194
Cuadro 44.	Horas-luz (n) promedio mensual y promedio mensual anual (hr)	Pg.195
Cuadro 45.	Temperatura media máxima mensual y su promedio mensual anual en grados Celsius	Pg.195
Cuadro 46.	Total de temperaturas máximas mensuales y su promedio mensual anual >0 grados Celsius	Pg.196
Cuadro 47.	Análisis del método del tanque de evaporación según Palacios	Pg.197
Cuadro 48.	Análisis del método del tanque de evaporación según Hargreaves	Pg.197
Cuadro 49.	Análisis del método del tanque de evaporación según Van Der Molen	Pg.198
Cuadro 50.	Análisis del método de Lowry-Johnson	Pg.198
Cuadro 51.	Análisis del método de Lowry-Johnson modificado	Pg.198
Cuadro 52.	Análisis de método de Thornthwaite	Pg.199
Cuadro 53.	Análisis de método de Jensen-Haise	Pg.199
Cuadro 54.	Análisis del método de Hargreaves	Pg.200

Cuadro 55.	Análisis del método de Caprio _____	Pg.200
Cuadro 56.	Análisis del método de García Benavides _	Pg.201
Cuadro 57.	Análisis del método de García Benavides estimando la evaporación _____	Pg.201
Cuadro 58.	Análisis del método de Blaney-Criddle sin corregir _____	Pg.202
Cuadro 59.	Análisis del método de Blaney-Criddle con la corrección de Phelan _____	Pg.202
Cuadro 60.	Análisis del método de la curva de Hansen _____	Pg.203
Cuadro 61.	Análisis del método de Grassi-Christiansen _____	Pg.203
Cuadro 62.	Análisis del método de Penman simplificado _____	Pg.204
Cuadro 63.	Comparación de los métodos utilizados en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo de trigo _____	Pg.205
Cuadro 64.	Valores de Kc para obtener la evapotranspiración real _____	Pg.206
Cuadro 65.	ETr para el método del tanque de evaporación propuesto por palacios, utilizando los coeficientes Kc propuestos por Hargreaves _____	Pg.207
Cuadro 66.	ETr para el método del tanque de evaporación propuesto por Palacios, utilizando los coeficientes Kc propuestos por el mismo _____	Pg.207
Cuadro 67.	ETr para el método del tanque de evaporación propuesto por palacios, utilizando los coeficientes Kc propuestos por Grassi _____	Pg.208
Cuadro 68.	ETr para el método del tanque de evaporación propuesto por Palacios, utilizando los coeficientes Kc propuestos por Demmead-Shaw _____	Pg.208
Cuadro 69.	ETr para el método de Caprio, utilizando los coeficientes Kc propuestos por Hargreaves _____	Pg.209

- Cuadro 70. ETr para el método de Caprio, utilizando los coeficientes Kc propuestos por Palacios \_\_\_\_\_ Pg.209
- Cuadro 71. ETr para el método de Caprio, utilizando los coeficientes Kc propuestos por Grassi \_\_\_\_\_ Pg.210
- Cuadro 72. ETr para el método de Caprio, utilizando los coeficientes Kc propuestos por Demmead-Shaw \_\_\_\_\_ Pg.210

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Evapotranspirómetro de Thornthwaite _____	Pg.14
Figura 2.	Detalle del tanque evapotranspirómetro modificado _____	Pg.15
Figura 3.	Detalle de los atmómetros _____	Pg.17
Figura 4.	Descripción de los casos A y B del cuadro 3 _____	Pg.22
Figura 5.	Predicción de la ET a partir del factor $f$ de Blaney-Criddle, para diferentes condiciones de humedad relativa mínima, horas de insolación diarias y vientos diurnos _____	Pg.59
Figura 6.	Relación para obtener la ET a partir de valores calculados de $WxRs$ y un conocimiento general de la humedad relativa media y de los vientos diurnos _____	Pg.63
Figura 7.	Corrección de la ET (Penman) bajo diferentes condiciones de viento y humedad durante el día y la noche _____	Pg.66
Figura 8.	Abaco psicrométrico _____	Pg.70
Figura 9.	Curva única de Hansen _____	Pg.90
Figura 10.	Coefficientes periódicos (Grassi-Christiansen) _____	Pg.95
Figura 11.	Coefficientes periódicos de Uso Consuntivo en función del ciclo vegetativo (Grassi-Christiansen) _____	Pg.96
Figura 12.	Nomograma que resuelve la fórmula de Penman _____	Pg.101
Figura 13.	Coefficiente de cultivo para papa, maíz y frijol _____	Pg.111
Figura 14.	Coefficientes de cultivo para granos pequeños de invierno y primavera _____	Pg.111
Figura 15.	Coefficientes de cultivo para vid _____	Pg.112
Figura 16.	Coefficientes de cultivo para algodón, sorgo para grano y remolacha azucarera _____	Pg.112

Figura 17.  $K_c$  medio en la fase inicial, en función del nivel medio de la ET (durante la fase inicial) y la frecuencia de riego o de unas lluvias apreciables \_\_\_\_\_ Pg.113

Figura 18. Gráfica que muestra los resultados de los métodos utilizados en el cálculo de la Evapotranspiración del cultivo de trigo \_\_\_\_\_ Pg.127

## RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad realizar un análisis de información climatológica, y su aplicación en los diferentes métodos empleados para el cálculo de la Evapotranspiración, utilizando como cultivo de referencia el trigo. Este estudio se realizó en el Campo Experimental de la Escuela de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora el cual se encuentra dentro del Distrito de Desarrollo Rural #144 "Costa de Hermosillo".

La información climatológica se obtuvo de la Estación Agroclimatológica "Campo Experimental UNISON", de la cual se tomaron en consideración los valores de temperatura, evaporación, precipitación, radiación solar y horas-luz.

Los métodos utilizados en la determinación de la Evapotranspiración fueron: Tanque de evaporación (Palacios), Tanque de evaporación (Hargreaves), Tanque de evaporación (Van Der Molen), Lowry-Johnson, Lowry-Johnson modificado, Thornthwaite, Jensen-Haise, Hargreaves, Caprio, García Benavides, García Benavides estimando el valor de la evaporación, Blaney-Cridde sin corregir, Corrección de Phelan, Curva de Hansen, Grassi-Christiansen y Penman simplificado.

Se encontró que en base a la información climatológica existente en el lugar donde se realizó el presente trabajo, y de acuerdo a los resultados obtenidos en trabajos

realizados en la Costa de Hermosillo utilizando el método gravimétrico, en nuestra región sólo podemos emplear los siguientes métodos: Caprio, Blaney-Criddle con la corrección de Phelan, la curva de Hansen, Grassi-Christiansen, Lowry-Johnson modificado y García Benavides (Ev del tanque de evaporación)

Se recomienda seguir con este tipo de estudios tomando en cuenta un mayor número de variables climáticas. Además, se considera conveniente recalibrar estas fórmulas, para la región en que se emplee, mediante los métodos directos.

Por otra parte, los resultados obtenidos deberán ser ajustados mediante el uso de coeficientes  $K_c$  para con ello obtener la Evapotranspiración Real del cultivo.

## I. INTRODUCCION

Actualmente, en nuestro país, una de las principales limitantes en la producción de cultivos lo constituye la disponibilidad de agua. En todos los Distritos de Riego existe una constante preocupación por mejorar la operación del mismo mediante un aumento de la eficiencia tanto en la distribución como en la aplicación del agua de riego.

Para poder diseñar un método o sistema de riego, el cual funcione con la máxima eficiencia posible, es necesario conocer la cantidad de agua que consume la planta, así como el periodo de tiempo en el cual se consume dicha cantidad y en que magnitud varía a través del mismo, para con ello podernos dar una idea de cuales son los periodos críticos de demanda de agua de dicho cultivo.

Puesto que el clima es uno de los factores más importantes en la demanda de agua de los cultivos, el objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis de información climatológica y su aplicación en los diferentes métodos empleados para el cálculo de la Evapotranspiración, utilizando como cultivo de referencia el trigo.

Como objetivos mediatos tenemos los siguientes:

- \* Comparar los métodos propuestos, con el método gravimétrico y/o lisimétrico.

- \* Encontrar un ajuste para los métodos aquí determinados, a partir de los métodos directos.

## II. LITERATURA REVISADA

### EVAPOTRANSPIRACION

#### Generalidades

México tiene una superficie agrícola aproximada de 25 millones de hectáreas, de las cuales, un 20% cuenta con riego y el 80% restante produce bajo condiciones de secano o temporal. A partir de estos datos podemos entender que uno de los factores limitantes de la producción agrícola en nuestro país es el agua. (40)

Para poder proyectar, planear o diseñar un método o un sistema de riego, que funcione con la máxima eficiencia posible, es indispensable conocer la cantidad de agua que necesitan las plantas que se cultivan (30,59), puesto que el conocimiento del proceso evapotranspirativo de los cultivos es muy importante para la estimación de sus requerimientos de agua de riego, así como para el diseño y operación de obras de infraestructura de riego y drenaje. (35)

Existen dos conceptos que muchas veces se usan indistintamente: Evapotranspiración y Uso Consuntivo (1). La Evapotranspiración es la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar sus funciones de transpiración, más el agua que se evapora de la superficie del suelo en el cual se desarrolla

(1,5,6,9,10,19,22,23,24,25,32,35,40,41,49,52,54,57,59,61). El llamado Uso Consuntivo está formado por la evapotranspiración más el agua que utilizan las plantas en la formación de sus tejidos durante todo el ciclo vegetativo de los cultivos, 1% del contenido de humedad aproximadamente (1,9,22,41). La diferencia de los dos términos es más bien del tipo académico porque el error que se comete cae dentro del rango normal de mediciones (error de medición); actualmente se utiliza más el concepto de Evapotranspiración que el de Uso Consuntivo, por lo que en este trabajo se utilizará el primero (1). De aquí tenemos que la Evapotranspiración Potencial (ETp) es la cantidad de agua evapotranspirada en la unidad de tiempo por un cultivo verde y de porte pequeño, con el óptimo de cobertura vegetal, de altura uniforme y nunca con déficit de agua (5,16,17,33,35,38,40,48,49,51,52,57,58,59,61,62); mientras que la Evapotranspiración Real (ETr) es la cantidad de agua evapotranspirada en una unidad de tiempo bajo condiciones reales de un cultivo. (24,40,48,61)

#### Factores que afectan la Evapotranspiración

En general la Evapotranspiración depende de factores hidricos, edáficos, vegetales y climáticos.

Factores hidricos: Calidad y disponibilidad del agua de riego (1,23,30,62), método de riego (1,7,23,62), eficiencia en el riego, drenaje. (1)

Factores edáficos: Propiedades físicas y químicas del suelo como textura, estructura, materia orgánica (1), salinidad (1,22,62), fertilidad (1,7), profundidad (1,62), estratificación (1), temperatura del suelo (22), capacidad de retención de agua (62), etc.

Factores vegetales: Variedad (1), especie (1,6,41,62), ciclo vegetativo, edad (1,15,22,23,30,32,43,62), características morfológicas de los estomas. (1,23,43)

Factores climáticos: Temperatura, humedad relativa, viento, precipitación, radiación solar. (1,5,6,7,22,23,32,41,53,62)

#### Métodos para estimar la Evapotranspiración

Los procedimientos para estimar la Evapotranspiración, pueden clasificarse en métodos directos y métodos indirectos. (1)

Los primeros proporcionan directamente el consumo total de agua requerida, utilizando para ello aparatos e instrumentos para la determinación. Estos métodos son aplicables para zonas donde se tiene una agricultura establecida, proporcionan valores muy apegados a la realidad y sirven a la vez para ajustar los parámetros de los métodos indirectos (1). Entre estos métodos tenemos: El gravimétrico, lisimétrico, evapotranspirómetro de Thornthwaite y el de los atmómetros. (1,42)

Los segundos en forma indirecta obtienen una

estimación del consumo de agua a través de todo el ciclo vegetativo, mediante la utilización de fórmulas empíricas. Varios investigadores han tratado de relacionar los diferentes datos climatológicos con la Evapotranspiración logrando fórmulas que permiten estimarla con diferentes aproximaciones (1). En el cuadro 1 se presentan, en orden cronológico, los diferentes autores y factores usados para la estimación de la Evapotranspiración o Evapotranspiración Potencial.

### Métodos directos

#### Metodo gravimétrico

Este método se basa en la obtención del contenido de humedad de muestras de suelo tomadas a una profundidad semejante a la que tienen las raíces (1,23,24,41). Dichas muestras se obtienen a lo largo del ciclo vegetativo; la cantidad de agua consumida por la planta en un tiempo fijado se determina en función de la variación de estos y de las características climáticas. (1,24)

Descripción del método.- Se toman muestras de suelo con una barrena tipo veihmeyer (1,41) en espesores de suelos de 30 cm hasta 1.50 m de profundidad dependiendo de la profundidad radicular de las plantas de cultivo. Las muestras se guardan en botes herméticos previamente tarados (1). Se llevan al laboratorio y por diferencia de peso se determina el contenido de humedad expresado en porcentaje

(1,41). El muestreo se realiza antes de cada uno de los riegos (1,9,51,52) y dos, tres o cuatro días después de las aplicaciones de agua así como dos o tres muestreos entre riegos (1). La Evapotranspiración se obtiene por diferencia de porcentajes utilizando la siguiente ecuación:

$$L_i = P_{si} \times D_a \times P_r$$

donde:  $L_i$  es la lámina consumida durante el lapso considerado, en cm;  $P_r$  es el espesor de la capa de muestreo;  $D_a$  es la densidad aparente del suelo, adimensional;  $P_{si}$  es la variación del porcentaje de humedad respecto al peso del suelo seco, antes y después del riego, en %;  $i=1,2,3,\dots,n$  = número de orden del estrato muestreado y  $n$  es el número de capas de 30 cm en que se dividió la posible profundidad radicular. (1,41,48,52)

El contenido de humedad lo obtenemos de la siguiente manera:

$$\%HUM = ((PSH - PSS) / PSS) \times 100$$

donde,  $PSH$  es el peso del suelo húmedo y  $PSS$  el peso del suelo seco. (52)

La Evapotranspiración total se calcula con la siguiente ecuación:

$$ET = \sum_{i=1}^n L_i$$

Este método tiene las siguientes ventajas: Es de fácil

aplicación, requiere de aparatos sencillos, se ajusta bastante a la realidad. Entre sus desventajas tenemos las siguientes: Es un método laborioso, requiere una gran cantidad de muestras, no es aplicable para zonas lluviosas debido a que hay muchos errores en el cálculo del suministro de agua. (1)

Este método ha sido amplia y exitosamente utilizado en zonas áridas, mientras que en zonas húmedas es difícil obtener resultados satisfactorios. (49)

#### Método lisimétrico

Consiste en estimar la Evapotranspiración Potencial mediante procedimientos de medición de pérdida de agua en recipientes que se llenan de suelo y se siembran con el cultivo en cuestión (1,24). Trava (1972) define el lisímetro como una estructura que contiene una masa de suelo y está diseñado de tal forma que permite la medida del agua que drena a través del perfil del suelo.

Clasificación de los lisímetros.- Existen criterios diferentes para clasificar lisímetros, entre los cuales pueden mencionarse los siguientes:

- De acuerdo a su finalidad son: Agronómicos, Hidrológicos e hidrogeológicos.
- Según el estado del suelo dentro del recipiente, son: de estructura alterada o de estructura inalterada. Conocidos

como monolíticos. (1)

- En relación al sistema de medición se clasifican en dos tipos:

i. Lisímetros de drenaje. Al medir diariamente los volúmenes agregados y los recogidos en el drenaje, por diferencia se obtiene el evapotranspirado, que dividido por la superficie dá la evapotranspiración en lámina por unidad de tiempo.

ii. Lisímetros de pesada. El consumo de agua por evapotranspiración se determina pesando diariamente el conjunto del suelo, planta, agua y aparato, y por diferencia de pesadas se obtiene el valor consumido. Estos lisímetros pueden ser: mecánicos, hidráulicos, electrónicos y combinados. (1,22,49,57)

- Por su colocación en el campo pueden ser superficiales (agrícolas o hidrológicos) y subterráneos (hidrogeológicos).

- Por su localización pueden ser lisímetros de campo o de invernadero.

- Por otra parte los lisímetros pueden clasificarse por los materiales de construcción, sin embargo no es conveniente por la diversidad de materiales. Pueden construirse con grava y un aplanado de cemento hasta de concreto, fierro y fibra de vidrio.

Unos lisímetros son tan simples como una caja enterrada con un dispositivo para medir el contenido de humedad y otros tan complicados como los de flotación en líquidos pesados o los de sistemas de pesada electrónicos con registro automático. (1)

Algunas de las ventajas del método lisimétrico son: Las mediciones son directas, por lo que con aparatos más adecuados permiten un alto nivel de exactitud. (1,10); permite hacer mediciones de Evapotranspiración en intervalos cortos; permite comparar el grado de exactitud de otros métodos y estudiar la influencia de los fenómenos meteorológicos en el proceso (1). Entre las desventajas tenemos: Dificultad de simular las condiciones naturales (suelo, cobertura, desarrollo radicular, etc.) dentro del tanque (1,26); el alto costo; dedicación de personal de un alto nivel técnico que requieren los mejores lisímetros, por lo que las posibilidades de generalización con fines prácticos están limitados. (1)

#### Lisímetros volumétricos

Son los propuestos para ser usados en las Estaciones Agrometeorológicas. Las determinaciones de la Evapotranspiración Potencial decenal encontradas por este método han sido satisfactorias utilizando lisímetros enterrados y cultivados con pasto Rye Grass perenne.

La Evapotranspiración Potencial se obtiene con la

siguiente fórmula:

$$ETp = LR + LP - LD$$

donde: ETp es la Evapotranspiración Potencial decenal en mm, LR es la lámina de riego (mm) aplicada cada 10 días para recargar el perfil y en la fecha conveniente para que la capacidad de campo se presente el primer día de la decena correspondiente, LP es la lámina precipitada (mm) en la decena y LD es la lámina drenada (mm) y que es igual a:

$$LD = LDAP - LDAa$$

donde: LDAP es la lámina drenada acumulada en el fondo del tanque después del riego y LDAa es la lámina acumulada en el fondo del tanque antes del riego.

Sustituyendo LD en la fórmula de Evapotranspiración Potencial tenemos:

$$ETp = LR + LP - (LDAP - LDAa)$$

y finalmente:

$$ETp = LDAa + LR + LP - LDAP$$

Cuando la lámina drenada acumulada llega a cierto nivel (200 mm), cercano a la parrilla que sostiene el suelo, se drena con bomba de mano y se toma la nueva lectura de LDA. (52)

Método del evapotranspirómetro de Thornthwaite

Con el evapotranspirómetro de Thornthwaite se determina en forma directa la Evapotranspiración Potencial de los cultivos. Fue ideado por Thornthwaite (figura 1) y consta de lo siguiente: 1) Tanque evapotranspirador de fierro galvanizado, con área rectangular de 4 metros cuadrados y 40 cm de profundidad. Este tanque va hundido hasta el nivel del suelo, el cual se llena de tierra donde posteriormente se siembran las plantas. En el fondo tiene un lecho de grava que ayuda a eliminar el exceso de agua. 2) Tanque alimentador en donde se mide y agrega diariamente el agua consumida. 3) Tanque regulador situado entre el alimentador y el evapotranspirador y 4) Tubería que conecta a todo el sistema.

El principio de funcionamiento se basa en un sistema de flotador ubicado en el tanque regulador, el cual proporciona la demanda de agua provocada por la acción evapotranspirativa del cultivo; esta demanda de agua se mide en dicho tanque y se proporciona mediante un sistema de subirrigación.

Entre las desventajas principales que tiene este método se pueden mencionar: La dificultad para simular las condiciones naturales (suelo, cobertura, etc.) dentro del tanque, solamente puede aplicarse a un cultivo por ciclo y además que el método de subirrigación funciona para ciertas texturas y limita grandemente la profundidad del suelo.

Debido a las dificultades ya señaladas y de la consideración indiscutible de que el sistema de aplicación del agua condiciona los resultados y su adaptación, Pallares (1974) y López (1974) presentaron un evapotranspirómetro modificado. La modificación señalada requiere de un medidor volumétrico pero a cambio de eso desaparece el tanque alimentados y el flotador, con lo cual la unidad se compone de dos partes; un tanque de cultivo y un tanque colector o de drenaje, como puede observarse en la figura 2.

Para determinar esta (vet1-2) en el caso de los evapotranspirómetros se toma una lectura inicial (L1) en un totalizador en el tiempo (t2) y una lectura final (L2) cuando el tanque manifiesta el momento en que inicia el drenaje. La diferencia de L1 y L2 corresponde al volumen agregado en t2, va2; se contabiliza el volumen drenado (vd2) y se establece la diferencia:

$$VET1-2 = va2 - vd2$$

Para pasar de VET1-2 a LET1-2, puesto que se cuenta con el área de los tanques (At) se utiliza la siguiente fórmula:

$$LET1-2 = VET1-2 / At$$

donde: VET1-2 es el volumen evapotranspirado de t1 a t2 en centímetros cúbicos y LET1-2 es la lámina

evapotranspirativa en cm. (1)

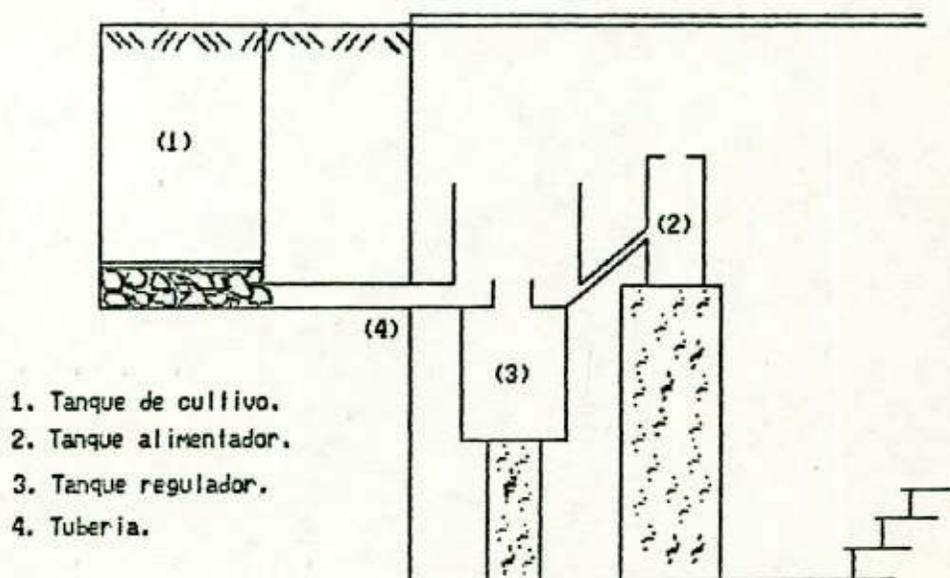
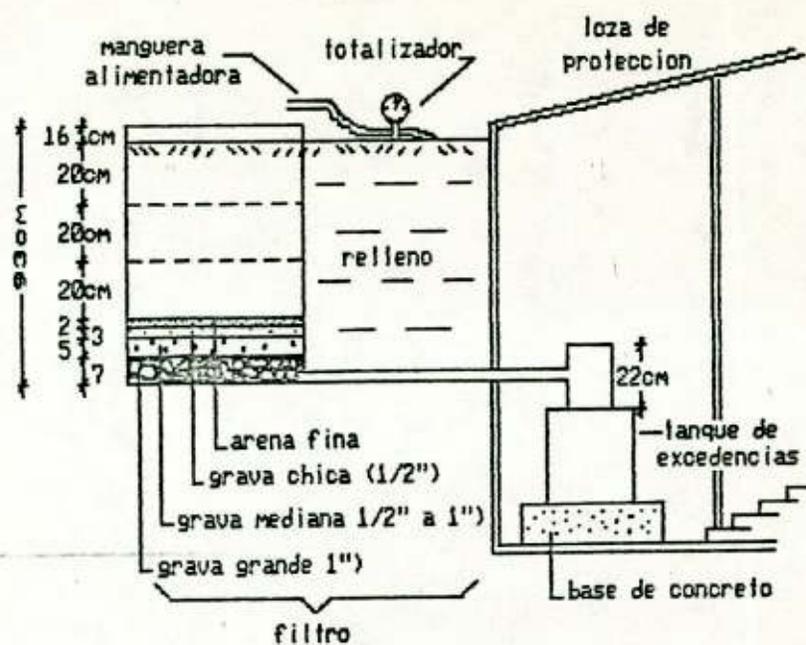


Figura 1. Evapotranspirómetro de Thornthwaite

e) perfil



b) planta

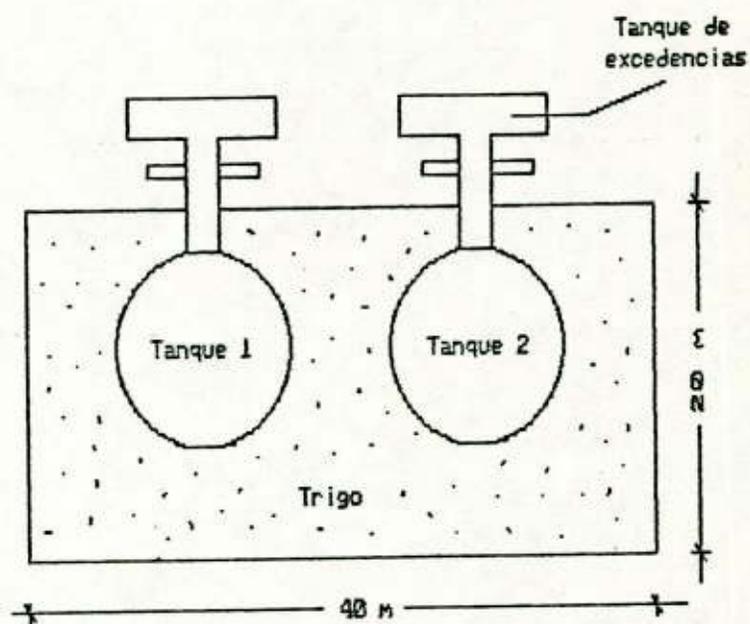


Figura 2. Detalle del tanque evapotranspirómetro modificado.

### Método de los atmómetros

Los atmómetros están formados por una esfera de cerámica porosa, barnizada y que tiene un vástago de vidrio que se introduce dentro de un recipiente graduado que contiene agua (1,6,41,57). la esfera se encuentra pintada de blanco o de negro (figura 3). Al recibir energía de la atmósfera se produce una evaporación en la superficie de la esfera que se traduce en una succión en el depósito graduado el cual mide la cantidad de agua evaporada. (1,41)

Se ha visto que existe mayor correlación entre la Evapotranspiración y las lecturas de los atmómetros, si se utilizan dos, uno negro y el otro blanco. (1,10,23,24,41,-57)

El valor se obtiene con la diferencia de lecturas, utilizando la siguiente ecuación:

$$ET = C_m (L_n - L_b)$$

donde: ET es la evapotranspiración en cm,  $L_n$  la lectura en el atmómetro negro en cm,  $L_b$  la lectura en el atmómetro blanco en cm y  $C_m$  es un coeficiente medio, alrededor de 0.87, el cual varía con el clima, la estación y la exposición. (1,41)

Los atmómetros son muy útiles en trabajos experimentales donde se trata de estimar variaciones en el tiempo y en el espacio de la Evapotranspiración (1) pero

presentan el inconveniente de que su superficie está sujeta a contaminación por polvo, grasa y otros materiales extraños y como son relativamente caros, no pueden ser substituidos de inmediato cuando se dañan. Una vez limpiados los atmómetros hay que volver a calibrarlos. No hay que olvidar que estos aparatos actúan con independencia de la fisiología de la planta, indicando la Evapotranspiración Potencial. Cuando se tiene en cuenta el cultivo hay que introducir ciertas correcciones. (1,23)

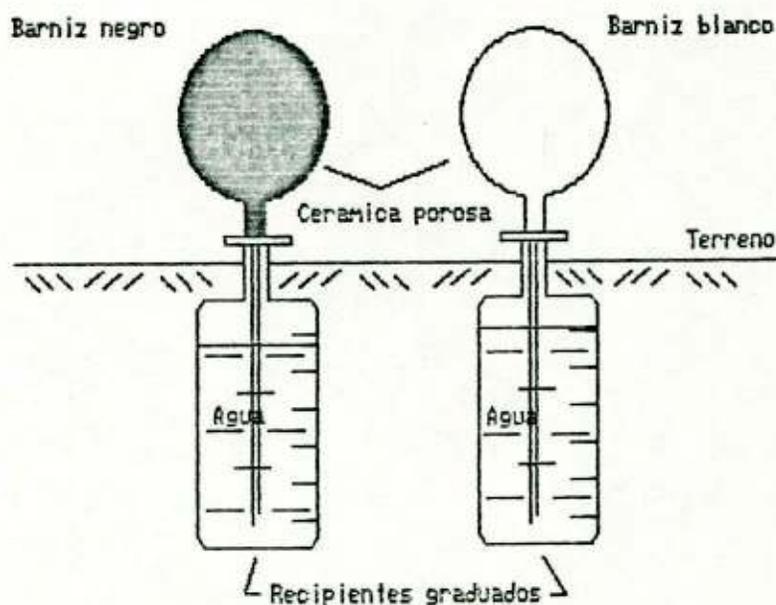


Figura 3. Detalle de los atmómetros.

## Método del tanque de evaporación

Varios autores han pretendido correlacionar la Evapotranspiración con la evaporación en función de las lecturas de evaporímetros (1,15,38,43). Estos son instrumentos de muy diversas formas, tamaños y modo de operar en los cuales se mide la lámina de agua evaporada. Esta puede ser convertida en valor de evapotranspiración mediante un factor de corrección. (1)

Grassi (1967) dice: "Las medidas de evaporación de una superficie libre de agua en el tanque evaporímetro, integra los efectos de los diferentes factores meteorológicos que influyen en la Evapotranspiración", por lo tanto parece que la Evapotranspiración Potencial puede ser estimada con más precisión por los métodos que consideran la evaporación medida en el tanque. (1,42)

Chavez (1973), menciona que frecuentemente se encuentra una estrecha proporcionalidad entre la evaporación, medida por ejemplo en un evaporímetro estándar, y la evaporación de un cultivo bien provisto de agua. Esto se debe a que los fenómenos de evaporación y Evapotranspiración son originados por las mismas causas y factores. Son fenómenos cualitativamente semejantes, pero no se comportan de ese modo en forma cuantitativa. Los efectos del clima en la vegetación son cuantitativamente diferentes que en un evaporímetro y el factor de

proporcionalidad entre ambos varía al cambiar el tipo de evaporómetro. (1)

Según Palacios (1977), este tipo de tanque ha resuelto parte de las variaciones o inconsistencias del coeficiente  $C$ , sin embargo, uno de los mayores problemas en la estimación de  $C$ , es la ubicación del tanque y el medio que lo rodea. (1.42)

Para estaciones donde el evaporómetro no se encuentra rodeado de pasto y los vientos no son muy intensos, puede ser utilizado un coeficiente de 0.75 (Palacios). (1)

Basados en lo anterior, la Evapotranspiración de un cultivo se puede estimar con cierta precisión utilizando la siguiente expresión:

$$ETP = E_v \times C$$

donde:  $E_v$  es la evaporación medida en el tanque tipo A de los Estados Unidos y  $C$  es el coeficiente de ajuste (cuadro 2). (1,7,9,10,20,22,24,29,42,43,44,57,59)

Para seleccionar los valores apropiados de  $C$ , para relacionar los datos de tanques tipo A, debemos hacer las siguientes consideraciones adicionales:

a. En el caso de tanques localizados en sitios con cubierta de pasto en malas condiciones ó sobre suelos sin vegetación ó (caso no aconsejable) sobre concreto o asfalto, debe

tomarse en cuenta que las temperaturas del aire a nivel del tanque serán al menos entre 2 a 5 grados Celsius más altas y las humedades relativas de 20 a 30% más bajas que en el resto del área. En estas condiciones se verá que  $C$  resulta mayor que la Evapotranspiración Potencial. Sin embargo, en aquellos casos donde no existe propiamente una área agrícola y por el contrario, hay grandes extensiones de suelo sin vegetación (por ejemplo, en regiones desérticas o semidesérticas),  $C$ , como aparece en la segunda columna del cuadro 2, puede necesitar una reducción hasta del 20%. En áreas con condiciones de viento, temperatura y humedad relativa moderadas, la reducción deberá ser del orden de un 5 a 10%.

b. En tanques colocados en sitios rodeados por cultivos altos (como maíz de 2.5 m), los coeficientes del cuadro 2 deberán ser aumentados hasta un 30% para climas secos y con vientos. El aumento deberá ser solo entre un 5 a 10% para regiones húmedas sin viento.

La evaporación del tanque,  $E_v$ , tenderá a disminuir conforme el área agrícola donde se encuentre ubicado tienda a aumentar. Esto se nota en los casos A y B del cuadro 2 que se ilustran en la figura 4.

c. Puesto que los tanques pierden una porción bastante significativa de su agua durante la noche, la inclusión de la humedad relativa durante el día y la noche parece

deseable en las estimaciones. los datos de humedad relativa (HR) que aparecen en el cuadro 2 se refiere a  $(HR_{\text{máx}} + HR_{\text{mín}})$  dividida entre dos. El rango de 40% se relaciona por ejemplo, a condiciones bastante secas tanto de día como de noche.

d. Los coeficientes que se muestran en el cuadro se aplican a tanques de lámina galvanizada que se cubren anualmente con pintura de aluminio. Si el tanque se pinta de blanco tanto por dentro como por fuera, habrá ligeras variaciones en los valores de C. En general, el material del que está hecho el tanque afecta las mediciones pero en menor grado. La turbiedad del agua dentro del tanque tiene un efecto no mayor del 5%.

El nivel del agua en el tanque es muy importante; los errores pueden ser hasta del 15% si el nivel se deja bajar 10 cm, más que la distancia especificada (entre 5 y 7.5 cm abajo del borde superior) (7,29). Cualquier pantalla protectora del tanque puede reducir la evaporación hasta en un 10% (7,15,29). En un esfuerzo por evitar que los pájaros tomen agua del tanque donde se están haciendo las mediciones, se puede colocar otro tanque totalmente lleno de agua a un lado; posiblemente, los pájaros prefieran tomar agua del tanque lleno hasta el borde (seguramente les resulta más cómodo). (7,29)

En general, cuando se instala el tanque y se cuida que

el sitio de instalación permanezca dentro de las condiciones estándar anteriormente especificadas y cuando vientos fuertes y secos ocurren solo ocasionalmente, la utilización de evaporímetros para estimar la Evapotranspiración Potencial puede ser tan confiable como los otros métodos utilizados. (29)

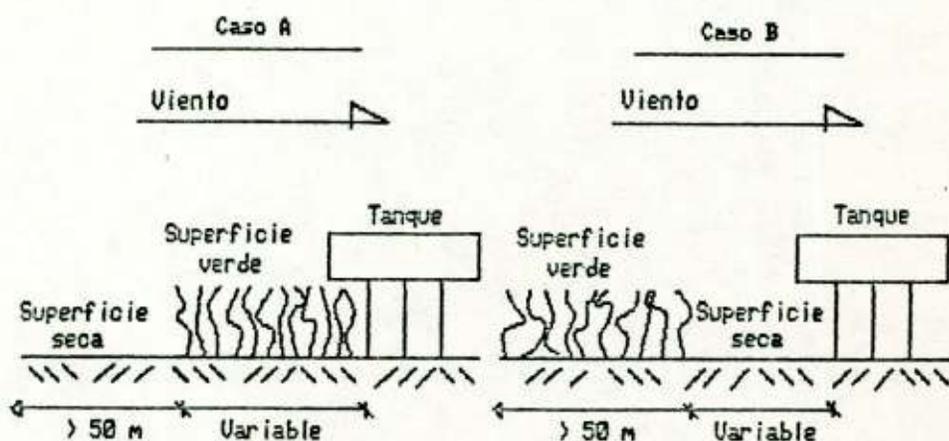


Figura 4. Descripción de los casos A y B del cuadro 3.

Penman propuso los siguientes valores de  $C$ , cuando la Evapotranspiración es determinada para pastos:

- 0.8 para los meses de estiaje, en forma general las relaciones son:
- 0.7 en Marzo, Abril, Septiembre, Octubre.
- 0.8 en Mayo, Junio, Julio, Agosto.

Pruitt en Davis, California propuso emplear un valor de  $C=0.8$  en los meses de estiaje. En forma general la relación es menor para los cultivos jóvenes que para los

cultivos maduros e incrementa de 0.8 para cultivos bajos a 1.0 para cultivos altos. (57)

Van Der Molen (1971) propuso los valores de C presentados en el cuadro 3, para una primera aproximación. (24)

En el cuadro 4, publicado por Hargreaves a partir de mediciones tomadas en tanques tipo A, dá valores de C para toda una gama de cultivos en varias etapas de crecimiento, cultivados en "... las condiciones normales de humedad que se requieren para el crecimiento máximo y altos rendimientos, de acuerdo con las prácticas agrícolas comerciales". En las cifras se toma en cuenta el sombreado incompleto del terreno y cierta resistencia fisiológica a la evaporación, debida a las condiciones de humedad del suelo. Como estimación inicial, con reservas, estos valores se pueden utilizar para cualquier clima. (59)

En lo referente al tanque de evaporación tipo A, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) nos proporciona información más detallada. (60)

La velocidad del viento varía con la altura. Para propósitos agrícolas, las mediciones deberán ser efectuadas a 2 m de altura ( $V_2$ ) y expresadas en Km/Hr o Km/Día. En caso de que las mediciones sean efectuadas a una altura diferente, estas deberán ser corregidas convirtiéndolas a la velocidad equivalente a los 2 m. En el cuadro 5 se dan

factores de corrección para velocidad del viento tomada a diferentes alturas, de donde tenemos que:

$$VC = V_i \times F_i$$

donde: VC es la velocidad del viento corregida,  $V_i$  es la velocidad del viento a  $i$  altura,  $F_i$  es el factor de corrección a  $i$  altura e  $i=0.5, 1.0, 1.5, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0, 10.0$  m. (7.44)

Mediciones a otras alturas también pueden ser corregidas mediante:

$$V_2 = V_h (\text{Log } 6.6 / \text{Log } h)$$

donde  $V_h$  es la velocidad del viento a una altura  $h$ . (23)

Otra fórmula para la corrección de  $V_2$  es:

$$V_2 = V_h (2/h)^x$$

donde  $x$  es un exponente que varía entre 0.07 y 0.6 (22.37). Para alfalfa, Jensen (1973) recomienda un valor de  $x=0.2$  (27)

También puede emplearse:

$$V_2 = V_h (\text{Log}(200/2) / \text{Log}(100h/2)) \quad (24)$$

Otra fórmula que puede emplearse es:

$$V_2/V_h = (2/h)^{1/n}$$

donde,  $n$  es un ajuste (7 para vientos adiabáticos-secos y

vientos fuertes; 3 para vientos de estabilidad intermedia y normales; 2 para vientos leves y condiciones estables.

El error en esta última estimación puede ser igual o mayor a un 20%, pero el error en la Evapotranspiración Potencial no es mucho. (45,46)

### Métodos indirectos

#### Método de Hedke

Charles R. Hedke (1928) obtuvo una de las primeras fórmulas prácticas para el cálculo de la Evapotranspiración y es la siguiente:

$$UC = K \times H$$

donde: UC es el uso consuntivo en cm, K es una constante que depende del cultivo y H es el calor disponible en grados-día.

El grado-día es una diferencia de un grado en un día entre la temperatura media diaria y otra de referencia (T-To). (1,41)

La formula desarrollada sería:

$$UC = k (T-To) \quad (55)$$

Sin embargo, este método está basado en varias hipótesis en relación con la humedad que debe tener el suelo y las prácticas que se sigan al nacer el cultivo.

Los valores de k los encontramos en el cuadro 6.  
(1.41)

#### Método de Rohwer

Rohwer (1931) establece la siguiente fórmula para el cálculo de la Evaporación:

$$E_v = 0.40 \left( \frac{e_o - e_a}{a} \right) (1 + 0.17 V_2)$$

donde:

$E_v$  es la evaporación diaria en mm.

$e_o$  es la presión de vapor en la superficie de evaporación en mm de mercurio.

$e_a$  es la presión de vapor del aire a cierta altura en mm de mercurio y

$V_2$  es la velocidad del viento a una altura de 2 m en millas por hora (10).

Para la estimación de la evaporación potencial del tanque y las pérdidas de agua por los cultivos se necesita de un factor de corrección. (10.15)

Cuando el valor de velocidad del viento no corresponde a una altura de 2 m, deberá corregirse como se vió en el método del tanque de evaporación.

El valor de  $e$  lo podemos obtener del cuadro 7,

multiplicando por 0.75 para transformar los milibares a mm de mercurio.

#### Método de David

Vitkevich (1958) reportó que David (1936) propuso un método para estimar la Evapotranspiración Potencial utilizando el llamado "déficit de saturación" el cual se expresa de la siguiente forma:

$$ET_p = (e^o - e_z) / 2$$

donde:

$ET_p$  es la Evapotranspiración Potencial diaria expresada en mm.

$e^o$  es la presión de saturación del vapor a la temperatura media del aire, y

$e_z$  es la presión de vapor. (29)

El valor de  $e_z$  lo podemos obtener del cuadro 7, multiplicando por 0.75 para convertir los milibares a mm de mercurio.

#### Método de Lowry-Johnson

Lowry y Johnson (1942) siguiendo los pasos del Dr. Hedke, encontraron una relación lineal entre la Evapotranspiración y el "calor efectivo".

Se define el calor efectivo como la acumulación de las temperaturas máximas diarias, por arriba de cero grados Celsius durante el periodo de desarrollo del cultivo, medidas en grados-día. (1,23,41,48,49,50,56)

La relación que encontraron, en función del clima del lugar y del cultivo, tiene 2 límites, uno superior que vale:

$$ET = 0.000095 H + 0.335$$

y el inferior de:

$$ET = 0.000069 H + 0.21$$

donde ET es la Evapotranspiración en m y H es el calor efectivo en grados- día. (41)

con un valor medio de :

$$ET = 0.00008 H + 0.28 \quad (1,41)$$

Este método se aplica a todo un valle y no a pequeñas parcelas, y ha sido empleado con éxito en la parte árida del Oeste de los Estados Unidos. (1,23)

Por otra parte, estas fórmulas solo dan valores ligeramente aproximados a los reales, pues las relaciones se obtuvieron en zonas con características climatológicas que no pueden considerarse representativas de toda una región y mucho menos de un país. El hecho de que exista un

margen tan fuerte en los valores calculados en la ecuación que da valores máximos y la que da valores mínimos, viene a dar una idea de la exactitud que se puede obtener con esta medida. (1.41)

Otros investigadores, para obtener el valor de la Evapotranspiración a partir de la fórmula de Lowry-Johnson, utilizan la siguiente ecuación:

$$ET = 0.000085 H + 0.244 \quad (23,48,50,56)$$

#### Método de Blaney-Morin

Blaney y Morin (1942) desarrollaron una fórmula empírica que relaciona la evaporación con la temperatura, humedad relativa y duración del día, la cual se expresa como sigue:

$$UC = k \times t \times p(114-HR)$$

donde, UC es el Uso Consuntivo mensual en pulgadas, k es el coeficiente del cultivo (cuadro 6), t es la temperatura media mensual del aire en grados Fahrenheit, p es el porcentaje mensual de horas luz en un año (cuadro 8) y HR es la humedad relativa media mensual. (49)

Esta relación posteriormente fué modificada por Blaney y Criddle excluyendo el término humedad relativa (22.54), debido a que los registros de humedad no son fácilmente accesibles. (54)

### Método de Thornthwaite

Thornthwaite (1948) correlacionó temperaturas medias mensuales con valores de Evapotranspiración determinada en estudios de balance hidrológico en valles de la parte central-este de los Estados Unidos (1,22,23,29,49,53,59). La ecuación resultante tenía los siguientes requisitos para su aplicación: "Primero, el albedo de la superficie evaporante debe ser estándar. Segundo, la Evapotranspiración no debe estar influenciada por advección proveniente de masas de aire más calientes o más húmedas. Y finalmente, la relación entre la energía utilizada en el proceso de evaporación y la utilizada para calentar el aire debe de permanecer sensiblemente constante" (1,29). Puesto que estas condiciones no existen en regiones áridas y semiáridas la ecuación de Thornthwaite no dará buenos resultados en ellas. Es más, se recomienda que sea utilizada únicamente en regiones similares a las centrales del Este de los Estados Unidos. (1,22,23,29,42,45,46)

Su expresión general es:

$$ETp = 1.6 (10 t / I)^a$$

donde:

ETp es la Evapotranspiración Potencial no ajustada en cm por mes (para meses de 30 días de 12 horas luz).

t es la temperatura media mensual en grados Celsius.

a es una constante que depende del lugar y que es función del índice de eficiencia anual de temperatura (I) cuyo valor es:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} (I)^3 - 7.71 \times 10^{-5} (I)^2 + 0.017925(I) + 0.49239$$

I es el índice de eficiencia anual de temperatura y es igual a la sumatoria de "i" para todos los meses del año.

i es la eficiencia de temperatura la cual se obtiene a partir del cuadro 9 o con:

$$i = (t / 5)^{1.514} \quad (1, 9, -$$

10, 14, 22, 24, 28, 33, 34, 40, 41, 42, 49, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 59)

La Evapotranspiración Potencial (ETp) no ajustada se corrige por la duración real del día en horas y los días del mes de acuerdo con el cuadro 10 para obtener la Evapotranspiración Potencial ajustada (ETo). Thornthwaite aplica el ajuste para la duración del día por estación y latitud, en donde  $ETo = ETp \times \text{Factor de corrección}$ . (1, 22, 23, 24, 33, 40, 42, 50, 52, 53, 57, 59, 62)

Según De la Peña (1977), las desventajas que tiene este método son: a. La temperatura no es buena indicadora de la energía disponible para la Evapotranspiración, b. la temperatura del aire respecto a la temperatura de la radiación puede ser diferente y c. La fórmula no toma en

cuenta el viento, ni el efecto de calentamiento o enfriamiento del aire por advección. (1,42,53,57). Otra desventaja sería el que la Evapotranspiración puede cesar cuando la temperatura promedio desciende de cero grados Celsius, lo cual es falso. (42,57)

#### Método de Halstead

Halstead (1951) reportado por Vitkevich (1958) propuso que:

$$ETp = C \times D1 (Q_{\text{máx}} - Q_{\text{mín}})$$

donde,  $Q_{\text{máx}}$  y  $Q_{\text{mín}}$  son las humedades absolutas a saturación que corresponden a las temperaturas máximas y mínimas respectivamente,  $D1$  es la fracción de horas luz anuales y  $C=1$  cuando la Evapotranspiración Potencial ( $ETp$ ) está dada en mm por mes. (9,29)

#### Método de Turc

La fórmula original de Turc (1953) es la siguiente:

$$ETp = (p+80) / [1 + [(p+45) / L]^{Tc 2 0.5}]$$

donde:

$ETp$  es la Evapotranspiración Potencial en mm para un periodo de 10 días.

$p$  es la precipitación en mm para un periodo de 10 días. (24)

$L^{Tc}$  es el poder evaporante de la atmósfera, calculado según:

$$L^{Tc} = ((T+2) (R)^{0.5}) / 16$$

T es la temperatura media del aire a 2 m en grados Celsius.

R es la radiación incidente de onda corta,  $\text{Cal/cm}^2 / \text{dia}$  (cuadro 11). (24,34)

Posteriormente Turc simplificó la ecuación anterior reduciéndola a:

$$ETp = K(T/(T+15))(R+50) \quad \text{en mm/mes}$$

en el caso de que la humedad relativa del aire, HR, sea mayor del 50%, y

$$ETp = K(T/(T+15))(R+50)(1+((50-HR)/70)) \quad \text{en mm/mes}$$

en el caso de que HR sea menor del 50%. (24,40)

$K=0.40$  es válido para meses de 30 y 31 días y  $K=0.37$  se utiliza para el mes de Febrero. (40)

#### Método de Olivier

Olivier (1961) declaró que la evaporación se podía describir como la "integración de variaciones periódicas del clima ambiental" y que está influida por la temperatura, la humedad y el viento (59). La ecuación de Dalton se expresa como:

$$E = f(u) (T_d - T_w)$$

donde,  $T_d$ ,  $T_w$  son la temperatura del bulbo seco y del bulbo húmedo, respectivamente, en grados Celsius y  $f(u)$  es la función del viento. (10.59)

A partir de resultados medidos, Olivier descubrió que  $E/(T_d - T_w)$  es aproximadamente la unidad cuando se toma a lo largo de todo un año, o sea, la depresión media anual del bulbo húmedo en grados Celsius es igual a la evaporación media diaria para el año, en mm (medido en un instrumento casi igual al tanque de evaporación tipo A). Para periodos mensuales, se supone que:

$$E_o = a \times E_y$$

donde,  $E_o$  es la evaporación media mensual en mm/día,  $E_y$  es la evaporación media anual en mm/día y  $a$  es una constante, igual a la unidad para el año completo; pero que varía de acuerdo con los meses y las latitudes.

A continuación, Olivier declaró: "la evaporación en una gran extensión de agua responde principalmente a los componentes verticales de la radiación. El bulbo húmedo reacciona a la radiación total; por ende, es lógico corregir la depresión del bulbo húmedo de acuerdo con la razón de la radiación vertical a la total". Se determinan valores para la razón de la radiación total a la vertical (1.), a partir del descenso del sol y los ángulos horarios.

El promedio para el año y la latitud se dá como (Lo).

El método de Olivier se utiliza como sigue:

a). Estimación de la evaporación de un tanque tipo A.

La evaporación de un tanque tipo A la proporciona:

$$E_o = (T_d - T_w) / (L / L_o)$$

donde,  $E_o$  es la evaporación en mm/día para el mes en cuestión,  $T_d - T_w$  es la depresión promedio del bulbo húmedo para el mes en grados Celsius y  $L / L_o$  se toma del cuadro 12.

b). Estimación de la evaporación de las plantas de cultivo.

$$E_c = (T_d - T_w) / (L^2 / L_o)$$

o bien,

$$E_c = E_o / L$$

donde,  $E_c$  es la evaporación en mm/mes para el mes.

Según el autor, el método a es válido para grandes zonas, en todas las regiones que tienen condiciones de cielos despejados. Los valores de  $L$  y  $L_o$  se dan en el cuadro 12. El método b se ha demostrado que no es confiable. (59)

Método de Jensen-Haise

Jensen y Haise (1963) evaluaron 3 000 observaciones de

la Evapotranspiración obtenida a través de muestreos de suelos durante más de 35 años, principalmente en la parte Oeste de los Estados Unidos (1,22,53), encontraron una alta correlación entre la relación Evapotranspiración Potencial y radiación solar neta recibida por el cultivo y la representaron de la siguiente manera:

$$ETp = (0.0252 T + 0.078) R_s$$

donde, ETp es la Evapotranspiración Potencial en mm/día, T es la temperatura en grados Celsius y R<sub>s</sub> es la radiación solar neta en mm/día. (1,4,22,24,37,53)

Este procedimiento proporciona estimaciones precisas de ETp para periodos de corto tiempo. (4)

Posteriormente Jensen (1966), mencionado por Trava (1977), generalizó la ecuación y la expresó de la siguiente manera:

$$ETp = Ct (T - T_x) R_s$$

donde, Ct es un coeficiente de temperatura que es constante para un área dada y se deriva a partir de datos a largo plazo de temperaturas máximas y mínimas del mes con la temperatura promedio más alta, T es la temperatura media diaria en grados Celsius y T<sub>x</sub> es una constante que depende del área en estudio y que no es más que la ordenada al origen sobre el eje de las temperaturas en grados Celsius (1,22,29,35,45,46,53,57)

Jensen definió la  $C_t$  como:

$$C_t = 1 / (C_1 + C_2 \times Ch)$$

y

$$Ch = 37.5 \text{ mm.Hg} / (e_2 - e_1) = 50 \text{ mb} / (e_2 - e_1)$$

donde :

$Ch$  es el índice de humedad.

$e_2$  y  $e_1$  son las presiones del vapor a saturación a las

temperaturas promedio máximas y mínimas respectivamente del mes más caliente del año en la región considerada en mb (cuadro 7), y

$$C_2 = 7.6 \text{ grados Celsius.}$$

Jensen y Haise (1970) definieron :

$$C_1 = 38 - ((2 \text{ EL})/305)$$

$$T_x = -2.5 - 0.14(e_2 - e_1) - (EL/305)$$

donde,  $e$  es la presión del vapor a saturación, en mb y  $EL$  es la elevación del lugar sobre el nivel del mar, en m.

Cabe aclarar que para obtener estimaciones de evapotranspiración reales, debe verificarse la ecuación de Jensen-Haise para la localidad en estudio y calcular los coeficientes del cultivo ( $K_c$ ). (1,22,29,35)

$$E_{Tr} = K_c \times E_{Tp}$$

donde,  $E_{Tr}$  es la Evapotranspiración real del cultivo.  
(22,35)

Para el cálculo de  $K_c$ , se puede emplear la siguiente fórmula:

$$K_c = E_{PL} / E_v$$

donde,  $E_{PL}$  es la Evapotranspiración diaria medida en el lisímetro y  $E_v$  es la evaporación diaria en el tanque.

También se pueden emplear las fórmulas de  $K_c$  de Horton (1970) y la de Norero (1976) (35), las cuales serán tratadas más adelante en los métodos respectivos.

Cuando  $R_s$  no es medida puede ser estimada. Aquí es necesario aclarar que para el Norte de México hasta el Eje Neovolcánico la fórmula que debe usarse es:

$$R_s = R_a (0.25 + (0.45n/N))$$

y para el resto, incluyendo la península de Yucatán:

$$R_s = R_a (0.29 + (0.42n/N))$$

donde  $R_a$  es la radiación extraterrestre (recivida en el límite superior de la atmósfera), la cual se presenta en el cuadro 13;  $n$  son las horas-sol reales y  $N$  las horas-sol posibles (cuadro 14). (40)

En algunas regiones se carece de datos de  $n/N$  y solamente se tienen estimaciones de la nubosidad durante el día. La nubosidad se mide generalmente en décimos o en octavos (en este caso, un valor de 8.0 representa que el cielo está totalmente cubierto de nubes). La conversión de estas observaciones de nubosidad a valores equivalentes de  $n/N$  puede ser efectuada por medio del cuadro 15. (29)

Para convertir  $R_s$  de Langley/día se utiliza la expresión:

$$R_s = R \text{ (Langley)} / L$$

donde,  $L$  es el calor latente de vaporización = 584.8 Cal/gr a 20 grados Celsius (1 Langley = 1 Cal/cm cuadrado)

Para temperaturas diferentes a 20 grados podemos calcular  $L$  con la ecuación:

$$L = 595.9 - 0.55 T \quad (29.53)$$

Para obtener  $R_s$  para un solo mes deberá multiplicarse el valor medio diario de  $R_s$  por el número de días del mes, o utilizar el total de Langleys por mes. (53)

#### Método de Tanner

Tanner (1960) sugirió para el cálculo de la Evapotranspiración la siguiente ecuación del trabajo original de Bowen:

$$ET = H / (1+\beta)$$

donde, H es la suma algebraica de toda la energia recibida en la superficie de evaporación, con excepcion del intercambio de calor con el aire por encima y de la evaporación. H está expresada por el balance de radiación (radiación neta), flujo de calor del suelo y por algunos componentes menores (10). El factor  $\beta$  (relación de Bowen) es un número dimensional igual a  $\gamma(dT/dz)/(de/dz)$ , o la relación del gradiente de temperatura con el gradiente de presión del vapor (10,24,57), ambos medidos a la misma altura sobre la superficie, multiplicado por la constante psicrométrica  $\gamma$ .

Entre las desventajas que presenta este método es el que requiere de equipo bastante especializado. Por otra parte, como la obtención de los gradientes de temperatura y presión de vapor no es fácil, dicha ecuación no es la adecuada para pronosticar la Evapotranspiración ni para dilucidar el rol de las propiedades atmosféricas aun cuando hace énfasis la significancia del término radiación neta.

(10)

Tanner (1967), describió la ecuación general para el balance de agua de la siguiente manera:

$$ET = P - (Dr + De + Di + \Delta D_w + \Delta D_s) / A$$

en la cual todas las variables pueden expresarse como

lámina por unidad de tiempo y donde: ET es la evapotranspiración, P la precipitación o riego, Dr el desague superficial o subsuperficial, De la profundidad de percolación, Di la precipitación interceptada,  $\Delta D_w$  la variación en el almacenamiento del agua subterránea y  $\Delta D_s$  la variación en el agua almacenada con respecto al retallo de derrame (humedad del suelo).

Este método es utilizado comúnmente en áreas amplias. Para tales casos el valor de De, es considerado como cero. Para obtener resultados satisfactorios, las variables restantes deben ser medidas con precisión. Debido a los problemas implicados en la obtención exacta de las mediciones de estas variables, en donde sea posible deberán utilizarse métodos meteorológicos independientes para checar los resultados obtenidos de las mediciones hidrológicas. (53)

#### Método de Christiansen

Christiansen(1968), elaboró una fórmula para estimar la evaporación, EV, en un tanque tipo A utilizando como una base la radiación extraterrestre Rt.

La fórmula puede escribirse como:

$$E_v = 0.459 R_t \times C_t \times C_v \times C_h \times C_s \times C_e \times C_m$$

donde:

Rt es la radiación extraterrestre recibida en la

atmósfera terrestre, obtenida a partir de la constante solar de 2 Cal/cm cuadrado/ min, expresada en evaporación equivalente en las mismas unidades de Ev. Cuadro 13.

$$C_t = 0.393 + 0.559(T/20) + 0.048(T/20)^2 \quad \text{Para la temperatura media, T, en grados Celsius.}$$

$$C_v = 0.708 + 0.328(V/96.56) - 0.036(V/96.56)^2 \quad \text{Para una velocidad media del viento, V, por arriba del tanque de evaporación o a 2 pies de altura, en Km/día.}$$

$$C_h = 1.25 - 0.348(HR/40) + 0.120(HR/40)^2 - 0.022(HR/40)^4 \quad \text{Para una humedad relativa promedio diaria, HR, en por ciento.}$$

$$C_s = 0.542 + 0.640(S/80) - 0.499(S/80)^2 + 0.317(S/80)^3 \quad \text{Para un porcentaje de horas-sol posible, S.}$$

$$C_e = 0.970 + 0.030(EL/305) \quad \text{Para una altura, EL, en m.}$$

$C_m$  es un coeficiente mensual con un valor medio de 1.0; generalmente  $C_m$  se omite, especialmente en los trópicos. (14,49,53)

#### Método de Christiansen-Hargreaves

Christiansen y Hargreaves (1969) presentaron 3 fórmulas para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial utilizando datos de Pruitt (1966) para Rye Grass en un lisímetro de 6.1 m de diámetro.

La primer fórmula utiliza mediciones en el tanque de evaporación,  $E_v$ , y está representada de la siguiente manera:

$$ETp = 0.755 E_v \times Ct \times Cv \times Ch \times Cs$$

donde:

$E_v$  es la evaporación medida en el tanque tipo A.

$Ct = 0.862 + 0.179(T/20) - 0.041(T/20)^2$ . coeficiente de temperatura donde  $T$  es la temperatura media, en grados Celsius.

$Cv = 1.189 - 0.240(V/6.7) - 0.051(V/6.7)^2$ . Coeficiente de velocidad del viento donde  $V$  es la velocidad media del viento a los 2 m de altura, en Km/hr.

$Ch = 0.499 + 0.620(HR/60) - 0.119(HR/60)^2$ . Coeficiente de humedad relativa donde  $HR$  es la humedad relativa media diaria, en porcentaje.

$Cs = 0.904 + 0.008(S/80) + 0.088(S/80)^2$ . Coeficiente de duración del día donde  $S$  es el porcentaje de duración de horas- sol posible.

La segunda fórmula utiliza la radiación extraterrestre,  $R_t$  (cuadro 13), y puede escribirse de la siguiente manera:

$$ETp = 0.324 R_t \times Ctt \times Cvt \times Cht \times Cst \times Ce$$

donde:

$$C_{tt} = 0.463 + 0.425(T/20) + 0.112(T/20)^2$$

$$C_{vt} = 0.672 + 0.406(V/6.7) - 0.078(V/6.7)^2$$

$$C_{ht} = 1.035 + 0.240(HR/60)^2 - 0.275(HR/60)^3$$

$$C_{st} = 0.340 + 0.856(S/80) - 0.196(S/80)^2$$

Los símbolos para los parámetros climáticos son los mismos de la fórmula anterior.

$C_c = 0.970 + 0.030(EL/305)$ . Coeficiente de altura donde EL es la altura en metros.

La tercer fórmula utiliza mediciones de radiación de entrada,  $R_s$ , y se expresa como:

$$ET_p = 0.492 R_s \times C_{tt} \times C_{vt} \times C_{ht}$$

donde,  $R_s$  se expresa como lámina equivalente de evaporación y los coeficientes  $C_{tt}$ ,  $C_{vt}$  y  $C_{ht}$  son iguales a los definidos en la segunda fórmula. (29,49,53)

Las mediciones de velocidad del viento realizadas a otras alturas diferentes a 2 m de altura deben ser corregidas como se vió en el método del tanque de evaporación.

#### Método de Hargreaves

1). Hargreaves (1965), estableció una fórmula para estimar

la evaporación de un tanque, en base a un estudio de relaciones de temperatura y humedad relativa.

Propuso el uso de un tanque evaporómetro tipo A, para determinar el índice climático. Debido a la carencia y a la variación de la evaporación registrada en el tanque abierto, buscó una ecuación para el cálculo de un factor climático semejante al proporcionado por el tanque tipo A, partiendo de los datos de un tanque localizado en un área específica.

La fórmula obtenida por Hargreaves es:

$$E_v = 17.4 D \times T(1.0 - 0.01HR)$$

donde,  $E_v$  es la evaporación mensual en el tanque tipo A en mm;  $D$  es el coeficiente mensual de la duración del fotoperiodo, para días de 12 horas (cuadro 10);  $T$  es la temperatura media mensual en grados Celsius y  $HR$  es la humedad relativa media mensual, al mediodía, en %.

Esta fórmula se utiliza para el cálculo de la evapotranspiración,  $ET$ , mediante la relación:

$$ET = E_v \times K$$

en la que  $K$  es un factor que depende del cultivo (cuadro 4).

Según Hargreaves citado por González (1974), los resultados pueden mejorarse introduciendo factores como

velocidad del viento, duración del día y la altitud. (1.49)

Recientemente Hargreaves sugirió una modificación a esta fórmula basándose en un análisis de valores obtenidos durante 529 meses en el Ecuador. La fórmula modificada es la siguiente:

$$ETp = 7.20 D \times T \times Ch \times Cv \times Ce$$

donde:

ETp es la Evapotranspiración Potencial en mm/ mes.

$Ch = 0.05 + 1.58(1.0 - 0.01HR)^{0.5}$ . Coeficiente de humedad  
donde HR es la humedad relativa media expresada en %.

$Cv = 0.64 + 0.45 V10$ . Coeficiente de viento donde V10 es la velocidad media del viento proporcionada por un instrumento colocado a una altura de 10 m y obtenida a las 7:00 A.M., 10:00 P.M. y 7:00 P.M.

$Ce = 1.0 + 0.23(EL/1000)$ . Coeficiente de elevación  
donde El es la altura del lugar en metros. (49)

2). Hargreaves (1972), propuso una ecuación para el cálculo de la evaporación a partir de un tanque de evaporación tipo A localizado en un área de pasto bajo riego. La ecuación puede escribirse:

$$Ev = 0.43 Rt \times Ct \times Ch \times Cv \times Ce \times Ctd$$

donde:

$E_v$  es la evaporación en el tanque tipo A.

$R_l$  es la radiación extraterrestre recibida en la atmósfera terrestre calculada de la constante solar considerada como 2 Cal/cm cuadrado, expresada en equivalente de lámina evaporada (cuadro 13).

$C_l = 0.40 + 0.024T$  donde  $T$  es la temperatura media mensual en grados Celsius.

$C_h = 0.05 + 1.58(1.0 - 0.01HR)^{0.5}$  donde  $HR$  es la humedad relativa media expresada en %.

$C_v = 0.68 + 0.04V_{10}$  donde  $V_{10}$  es la velocidad del viento a una altura de 10 m, en Km/hr.

$C_v = 0.47 + 0.04VP$  donde  $VP$  es la velocidad del viento en el tanque, en Km/hr.

$C_e = 1.0 + (0.07 EL / 1000)$  donde  $EL$  es la altura del lugar en metros.

$C_{td} = 0.76 + 0.0375T_d$  donde  $T_d$  es la diferencia entre la temperatura media máxima y la temperatura media mínima.

El coeficiente 0.43 puede variar si las condiciones de temperatura, humedad y viento no corresponden al valor medio en 24 horas, o si el tanque de evaporación no se encuentra colocado en un área típica de la vegetación.

La Evapotranspiración Potencial,  $ET_p$ , representativa para un pasto corto, verde y de rápido desarrollo el cual cuente con un continuo suministro de humedad adecuada, es

dada por la ecuación:

$$ETp = 0.82 ChTV \times CvTV \times CeTV \times Ev$$

donde:

ETp es la Evapotranspiración Potencial.

ChTV=  $0.55+0.75HR$ , pero con un valor máximo de 1.03

CvTV=  $1.08-0.01V10$

CeTV=  $1.0-(0.04 EL/1000)$

Ev es la evaporación en el tanque tipo A en el área de riego donde se encuentra colocado. (49,53)

Estas ecuaciones han sido utilizadas con buenos resultados en California (E.U.A.), Arizona (E.U.A.), Nicaragua, Venezuela, Ecuador e Irán. (53)

Valores observados, de velocidad del viento, a una altura diferente a los 10 metros pueden ajustarse con la siguiente fórmula:

$$V10 = Vh / (0.233 + 0.656 \log \frac{(h+4.75)}{10})$$

donde Vh es la velocidad del viento a una altura h. (60)

3). La Evapotranspiración Potencial puede ser estimada a partir de la temperatura media y un factor basado en la latitud. Para humedades relativas medias mayores del 64% será necesaria una corrección para dicho valor de humedad. Existe también cierto incremento con el aumento de advección, mezcla turbulenta y con el aumento en la

velocidad de vientos secos cálidos. Sin embargo estos efectos son difíciles de cuantificar. Con el valor utilizado por Hargreaves(1973), en la ecuación, este efecto tiende a compensarse. De esta manera resulta un alto grado de correlación entre la Evapotranspiración medida y la estimada utilizando solo valores de temperatura y humedad relativa en el cálculo de la Evapotranspiración Potencial.

La fórmula para la Evapotranspiración Potencial puede escribirse:

$$ETp = MF \times T \times Ch$$

donde, ETp es la Evapotranspiración Potencial para un mes dado, en mm; MF es un factor mensual que depende de la latitud (cuadro 16); T es la temperatura media en grados Fahrenheit y Ch es una corrección para humedad relativa, el cual se expresa como:

$$Ch = 0.166 (100 - HR)^{0.5} \quad \text{en } \%$$

en donde HR es la humedad relativa promedio en 24 horas. (17,29)

La fórmula anterior es para valores de HR mayores del 64%, mientras que para valores de HR iguales o menores del 64% el valor de Ch = 1.00.

Para la obtención de datos diarios de Evapotranspiración Potencial, en lugar de datos mensuales,

Heart (1975), ha convertido la ecuación anterior de ETp en:

$$ETp = DF \times T \times Ch$$

donde, ETp es la Evapotranspiración Potencial en mm/día, DF es un factor diario que depende de la fecha y de la latitud, T es la temperatura media diaria en grados Fahrenheit y Ch es un factor de humedad relativa.

El valor de DF se obtiene de la siguiente manera:

$$MF_i = \sum_{j=1}^{n_i} DF_{ij}$$

donde,  $DF_{ij}$  ( $j=1, n_i$ ) representa los factores diarios para el  $i$ -ésimo mes cuyo factor mensual es  $MF_j$ , con  $n_i$  días.

además,

$$DF_{ip} = DF_{i+1,1} = (MF_i / (2n_i)) + (MF_{i+1} / (2n_{i+1}))$$

donde,  $DF_{ip}$  es el factor diario para el último día del mes

" $i$ " y  $DF_{i+1,1}$  es el factor diario para el primer día del

mes  $i+1$ . Finalmente,

$$DF_{im} = ((4MF_i) / (n_i - DF_{i,1} - DF_{ip})) / 2$$

donde,  $DF_{im}$  es el valor de DF en el día que representa la

mitad del mes "i",  $DF_{i,1}$  es el valor de DF en el primer día del mes "i" y  $DF_{ip}$  es el valor de DF en el último día del mes "i".

Valores intermedios de  $DF_{ij}$  se obtienen por

interpolación lineal entre los valores de  $DF_{i,1}$  y  $DF_{ip}$

$$DF_{ij} = (29) \frac{j-1}{ip-1} (DF_{ip} - DF_{i,1}) + DF_{i,1}$$

4). Hargreaves (1977), elaboró una fórmula para la determinación de la Evapotranspiración tomando en cuenta los valores de radiación solar y temperatura media mensual.

La fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$ETp = 0.0075 R_s \times T$$

donde, ETp es la Evapotranspiración Potencial en mm,  $R_s$  es la radiación solar en equivalente de agua evaporada y T es la temperatura media mensual en grados Fahrenheit. (45,46)

Cuando  $R_s$  no es medida, puede ser obtenida como se vio en el método de Jensen-Haise.

5). Hargreaves utiliza la siguiente fórmula para la estimación de la Evapotranspiración Potencial:

$$ETp = 0.34 R_t (0.40 + 0.024 T) (1.35 (1.0 - 0.01 HR)^{0.5} (1.0 + (0.04 EL / 1000)))$$

en donde: ETp es la Evapotranspiración Potencial en cm,  $R_t$

es la radiación extraterrestre en mm (cuadro 13), T la temperatura media en grados Celsius, HR la humedad relativa en % y EL la altura del lugar en metros.

Existe una restricción respecto al factor  $1.35 (1.0 - 0.01HR)^{0.5}$  cuyo valor máximo admitido es 1.0, es decir, cuando este factor tenga un valor superior a la unidad, se le considera como 1.0 (40)

#### Método de Horton

Horton (1970), presenta un método para estimar la Evapotranspiración máxima de los cultivos, corrigiendo la evaporación medida en el tanque o bien la Evapotranspiración Potencial, mediante un coeficiente de desarrollo que se puede estimar como una función del índice del área foliar del cultivo:

$$K_c = ET / ETP = 0.55 IAF$$

donde,  $K_c$  es el coeficiente de ajuste de la ET, ET es la Evapotranspiración del cultivo, ETP es la Evapotranspiración Potencial e IAF es el índice del área foliar diario.

$$ET_{\text{máx}} = K_c \times E_v$$

donde,  $ET_{\text{máx}}$  es la Evapotranspiración máxima en mm/día y  $E_v$  es la evaporación diaria del tanque en mm. (35)

El valor de  $K_c$  se puede obtener por cualquiera de las formas presentadas más adelante en el cálculo de la Evapotranspiración Real.

#### Método de Hanks

Hanks (1971), utiliza métodos aerodinámicos, de balance de energía y de la combinación de ambos en la determinación de la Evapotranspiración.

El método aerodinámico no ha sido satisfactorio en todas sus instancias. Pero bajo ciertas condiciones ha dado resultados razonables. (53)

Los métodos de balance de energía inician a partir de la siguiente ecuación:

$$ET = R_n - G - H$$

donde  $ET$  es la evapotranspiración,  $R_n$  es la radiación neta,  $G$  es la densidad del flujo del calor en el terreno y  $H$  es el flujo de calor sensible (no latente) en la atmósfera.

$R_n$  y  $G$  son medidos en el campo con instrumentos de precisión.  $H$  no se puede medir fácilmente, así que este valor es obtenido mediante la relación de Bowen y en consecuencia la ecuación es modificada a la siguiente forma:

$$ET = (R_n - G) / (1 + \beta)$$

donde  $\beta$  es la relación de Bowen. El valor de  $\beta$  no genera mucha diferencia en la Evapotranspiración si  $\beta = \pm 0.1$  (53.57), situación que se presenta normalmente en regiones húmedas. (53)

Cuando  $G$  no es medido puede ser estimado mediante la siguiente ecuación propuesta por Sellers (1965):

$$G = C(\Delta T/\Delta t)h$$

donde,  $\Delta T/\Delta t$  es la relación del tiempo ( $t$ ) con el cambio de temperatura ( $T$ ) para el perfil de suelo que va desde la superficie hasta una profundidad  $h$  de 5 a 10 cm, y  $C$  es la capacidad de calor del suelo.

El valor de  $C$  puede obtenerse en forma aproximada con la ecuación de Vries (1963):

$$C = 0.50 X_s + 1.0 X_a$$

donde,  $X_s$  y  $X_a$  son, respectivamente, las fracciones de volumen de materia sólida y agua en el suelo, y las constantes 0.5 y 1.0 son las correspondientes capacidades de calor en Cal/cm cúbicos/ grados Celsius.

Considerando que la capa de 6 cm del perfil del suelo bajo el cultivo tiene una  $X_s=0.50$  y una  $X_a=0.25$  (50% de agua disponible en el suelo), la ecuación de  $G$  será:

$$G = 3.0 \Delta T/\Delta t$$

En el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos se elaboró un programa para computadora (Jensen-Heermann, 1970) donde  $\Delta t$  es un día y  $\Delta T$  es la temperatura promedio del aire para el día en cuestión menos la media del promedio de temperaturas del aire para tres días previos en grados Celsius, y el coeficiente determinado para la calibración es 2.8 Cal/cm cúbicos/grados Celsius.

(37)

Wright sugirió estimar el flujo de calor diario del suelo como:

$$G = (T_a - T_p) C_s$$

donde, G es el flujo de calor del suelo en mm/día de agua equivalente;  $T_a$  es la temperatura media diaria del aire, en grados Kelvin y  $T_p$  es la temperatura media del aire para los 3 días precedentes. El término  $C_s$  es un coeficiente empírico de calor específico para la superficie del suelo.

(2)

El valor de G también puede ser obtenido en la forma propuesta en el método de Doorenbos-Pruitt.

El valor de H puede ser estimado como:

$$H = \rho \times C_p \times D_h \times (T_z - T_o)$$

donde, el subscripto "o" está referido a valores superficiales; z es la altura por arriba del terreno la

cual generalmente es 1 o 2 m;  $C_p$  es el calor específico del aire a presión constante, Cal/gr/grado Celsius;  $\rho$  es la densidad del aire, gr.cm y  $D_h$  es el coeficiente de calor turbulento el cual se representa como:

$$D_h = D_w = \frac{k^2 u_z^2}{\ln^2((z-d)/z_0)}$$

donde,  $D_w$  es el coeficiente de vapor;  $k$  es la constante de Von Karman, la cual es aproximadamente 0.41;  $u_z$  es la velocidad del viento a la altura  $z$ ;  $d$  es el parámetro de desplazamiento, cm y  $z_0$  es la altura de agitación donde existe un perfil de viento adiabático y el viento sigue el recorrido de dicho perfil.

$D_h$  y  $D_w$  varían muy poco por arriba de 1 m, de ahí su igualdad en la ecuación anterior. (37)

El valor de  $\beta$  se puede determinar, de acuerdo a  $D_h=D_w$ , mediante:

$$\beta = \gamma ((T_2-T_1)/(e_2-e_1))$$

donde  $T_1$  y  $T_2$  representan la temperatura (grados Celsius) a 2 niveles,  $e_1$  y  $e_2$  representan la presión del vapor (cuadro 7) a 2 niveles y  $\gamma$  es la constante psicrométrica. (10,24,57)

La constante psicrométrica se obtiene de la ecuación de Brunt (1952)

$$r = (C_p \times P) / (0.622\lambda) \quad \text{en mb/grados Celsius}$$

donde,  $C_p$  es el calor específico del aire a presión constante en Cal/gr/grado Celsius,  $P$  es la presión atmosférica en mb,  $\lambda$  es el calor latente de vaporización en Cal/gr (1,2,29,37,57) y 0.622 es la razón del peso molecular del vapor de agua del aire. (2)

El valor de  $C_p$  varía entre 0.2397 y 0.260 pero un valor de 0.242 se puede emplear en los cálculos para condiciones normales de crecimiento de las plantas.

$P$  se obtiene con la expresión:  $P = 1013 - 0.1055 EL$ , en donde  $EL$  es la altura del lugar en metros. (1,29)

El valor de  $\lambda$  se obtiene también por una ecuación propuesta por Brunt (1952):  $\lambda = 595 - 0.51 t$ , en donde  $t$  es la temperatura en grados Celsius. (1,2,29)

Si  $P$  está expresado en mm.Hg y la temperatura en grados Celsius el valor de  $r$  es de 0.49 mm.Hg/grado Celsius (24,57), mientras que si  $P$  está en mb el valor de  $r$  será 0.66 mb/grado Celsius. Estos valores corresponden a un psicrómetro ventilado. (24,40,52)

En general, la constante psicrométrica depende del modelo de psicrómetro, el tipo de ventilación, así como de la temperatura y humedad. Con lo cual podemos ver que el término constante psicrométrica es inapropiado, debiendo ser coeficiente psicrométrico. (60)

### Método de Caprio

Caprio (1971), estableció las unidades termo-solares (STU) como un sustituto para la Evapotranspiración Potencial, haciendo uso de la radiación solar ( $R_s$ ) y de la temperatura media (grados Fahrenheit).

La ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$ET_p = STU \times 10^{-5}$$

donde,  $STU = ((R_s \times (T_x + T_n)/2) - 31.0)$ .  $T_x$  y  $T_n$  son la temperatura máxima y mínima respectivamente. Se utiliza un valor umbral de 32 grados Fahrenheit y todo efecto de temperatura por abajo de este nivel es ignorado. (37,45,46)

### Método de Doorenbos-Pruitt

#### 1. Método basado en la medición de temperatura.

Doorenbos y Pruitt (1975), calibraron el procedimiento de Blaney-Criddle para diferentes condiciones de humedad, duración del día y viento en localidades donde había disponibles datos sobre Evapotranspiración. Los resultados se muestran en la figura 5.

El procedimiento a seguir para obtener la Evapotranspiración Potencial mediante el método de Blaney-Criddle modificado es el siguiente:

Se calcula  $f$  mediante:  $f = p (0.46t + 8.13)$

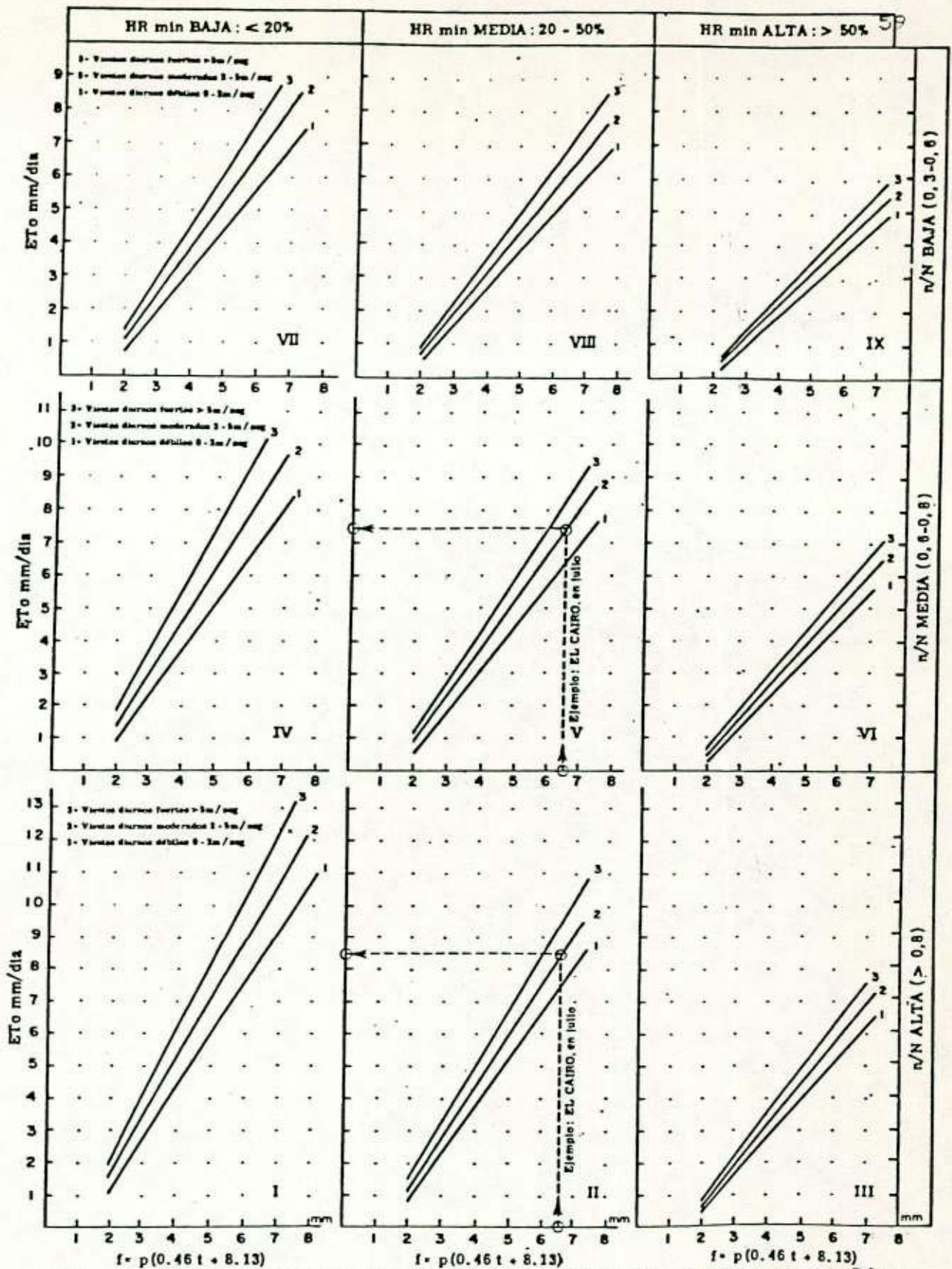


Figura 5. Predicción de la ET a partir del factor f de Blaney-Criddle, para diferentes condiciones de humedad relativa mínima, horas de insolación diarias y vientos diurnos.

donde,  $t$  está dado en grados Celsius. El valor de  $p$  se obtiene del cuadro 17 para un mes dado en una determinada latitud. El valor de  $f$  se expresa en mm/día y representa el valor medio para el mes correspondiente.

Una vez calculado el factor  $f$  la estimación de la Evapotranspiración Potencial se hace a través de la figura 5. Las relaciones presentadas en esta figura son para tres diferentes niveles de humedad relativa mínima durante el día y tres diferentes niveles de la relación de horas-sol reales contra horas-sol posibles ( $n/N$ ). Además, se dan relaciones para tres diferentes condiciones de viento durante el día a 2 m de altura sobre el nivel del suelo.

Para una localidad determinada generalmente se requerirán usar diferentes relaciones puesto que seguramente habrán cambios en los diferentes parámetros durante las estaciones del año.

La Evapotranspiración Potencial estará expresada también en mm/día y representará el valor promedio diario en el periodo considerado que es generalmente un mes. Para encontrar los valores mensuales de la Evapotranspiración Potencial este valor necesita ser multiplicado por el número de días de cada mes.

La utilización de este método para calcular valores de la Evapotranspiración Potencial debe ser por periodos no menores de un mes. Las condiciones de humedad relativa,

porcentaje de horas luz y viento deben ser obtenidas - pues de otra forma las predicciones serán muy dudosas. Se sugiere por lo tanto que los valores de la Evapotranspiración Potencial sean calculados para cada mes en cada año de registro en lugar de usar valores de temperatura promedio basados en registros de varios años.

En regiones ecuatoriales el método no debe ser utilizado puesto que en ellas las temperaturas permanecen sensiblemente constantes aunque los otros parámetros climáticos varíen enormemente. Tampoco debe de ser utilizada en regiones altas debido a las bajas temperaturas que se presentan durante la noche aunque la radiación durante el día tenga valores relativamente altos. En climas donde exista una gran variabilidad en lo referente al porcentaje de horas luz el método puede arrojar valores falsos. (29)

## 2. Método basado en la medición de la radiación

Los valores de Evapotranspiración obtenidos con este método son más confiables que los obtenidos con el método de Blaney-Criddle especialmente en las zonas ecuatoriales, en islas pequeñas y en regiones situadas a grandes latitudes.

Doorenbos-Pruitt (1975) recomendaron la siguiente relación:

$$ETP = a + b W R_s$$

donde ETP es la evapotranspiración Potencial en mm/día y representa el valor medio en el periodo considerado que es generalmente de 10 ó 30 días;  $R_s$  es la radiación solar (o radiación de onda corta) en mm/día; a y b son coeficientes cuyos valores están dados en la figura 6, y W es un índice de ponderación que depende de la temperatura y de la altitud y cuyos valores están dados en el cuadro 18.

W también se puede calcular mediante la relación de  $W = \Delta / (\Delta + r)$ , donde  $\Delta$  es la pendiente de la curva presión del vapor a saturación vs. temperatura y r es una constante psicrométrica. (7,29)

$$\Delta = \frac{(e_s - e_a)}{(T_s - T_a)}$$

donde:

$e_s$  es la presión del vapor a saturación a la

temperatura  $T_s$  de la superficie de evaporación.

$e_a$  es la presión del vapor a saturación a la

temperatura media del aire  $T_a$  (cuadro 7).

(24,27,37,58)

El valor de  $\Delta$  también puede ser obtenido, en forma aproximada, con la ecuación de Bosen (1960):

$$\Delta \approx 33.8639(0.0594(0.00730T + 0.8072)^7 - 0.0000342$$

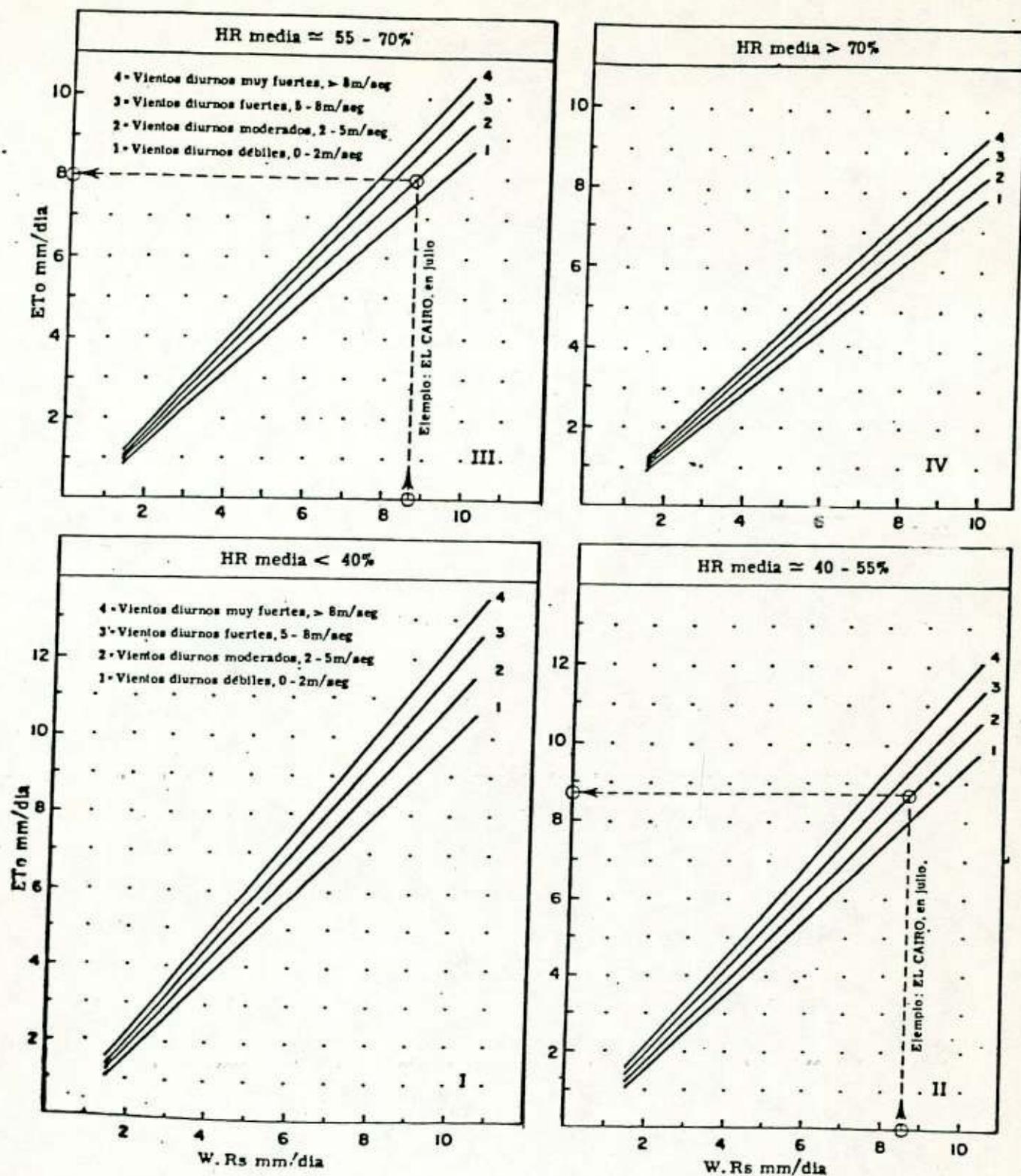


Figura 6. Relación para obtener la ET a partir de valores calculados de  $W \times R_s$  y un conocimiento general de la humedad relativa media y de los vientos diurnos.

donde  $\Delta$  está en mb/grado Celsius y para una  $T > -23$  grados Celsius. (1,29)

La constante psicrométrica,  $r$ , puede ser obtenida de la forma como se vió en el método de Hanks.

Las relaciones que se presentan en la figura 6 entre el término de radiación  $W \times R_s$  y  $ET_p$  toman en cuenta condiciones generales del clima especialmente las que se refieren a la humedad relativa promedio y la velocidad del viento durante el día. (29)

Cuando  $R_s$  no es medida puede ser obtenida como se vió en el método de Jensen-Haise.

### 3. Método combinado.

Según Doorenbos y Pruitt (1975) la ecuación de Penman necesita todavía ser ajustada debido al término aerodinámico. (29)

La ecuación de Penman es la siguiente:

$$ET_p = 0.00171 [W(R_n - G) + 15.36(1 - W)(1.0 + 0.0062u) (e_a - e_d)]$$

donde:

0.0171 es un factor de conversión para transformar Cal/cm cuadrado/día a mm/día.

$W = \Delta / (\Delta + r)$ ; definido anteriormente.

$15.36 = 0.35 / (0.0171 \times 1.33)$ , donde 0.35 es el

coeficiente aerodinámico original de la ecuación de Penman y 1.33 es el factor de conversión para transformar mm.Hg a mb.

$u$  es el recorrido del viento a 2 m de altura en <sup>2</sup>

Km/día.

$e$  es la presión del vapor a saturación promedio <sub>a</sub>

en mb (a temperatura Máxima y Mínima durante el día). (cuadro 7)

$e$  es la presión del vapor a saturación a la <sub>d</sub>

temperatura de rocío promedio durante 24 horas en mb. (cuadros 19 y 20)

$R_n$  es la radiación neta diaria en Cal/cm cuadrado

$G$  es el flujo termal del suelo en Cal/cm cuadrado (1.29)

Según Doorenbos-Pruitt el uso del recorrido del viento por 24 horas tenderá a producir resultados mas altos que los reales bajo condiciones de vientos fuertes de día y de noche acompañados por humedades relativas bajas. Inversamente, en un área con vientos de moderados a fuertes durante el día pero en noches en calma, la ecuación tenderá a producir resultados más bajos que los reales especialmente en climas secos con humedades relativas máximas de cerca del 100%. Recomiendan, por lo tanto, hacer el ajuste que se presenta en la figura 7. (29)

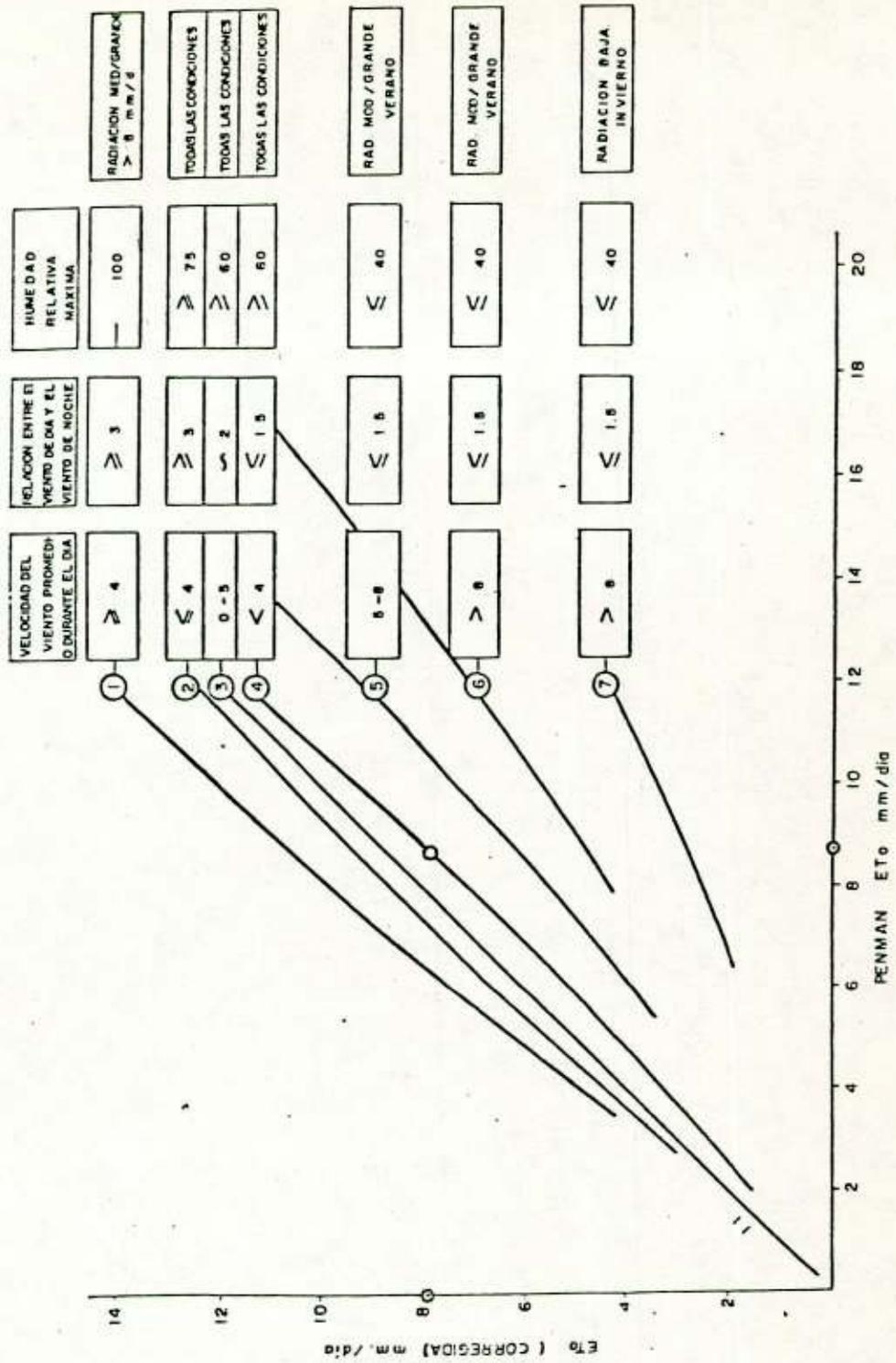


Figura 7. Corrección en la ET calculada (Penman) por velocidad de viento en el día y la noche y por condición de humedad.

La radiación neta,  $R_n$ , que es la diferencia entre la radiación que llega a la superficie del suelo y la que es devuelta, tiene que ser medida por medio de radiómetros netos. La ecuación de  $R_n$  es la siguiente:

$$R_n = (1-\alpha) R_s - R_{nl}$$

donde,  $R_s$  es la radiación solar de onda corta,  $\alpha$  es el albedo (cuadro 21) (varía entre 0.20 y 0.25 para los cultivos y un valor de 0.23 en promedio parece razonable) y  $R$  es la radiación termal (de onda larga) de regreso a la atmósfera. (29,37)

Para su uso en una región determinada las dos ecuaciones anteriores deberán ser calibradas cuidadosamente si es que se quieren obtener resultados precisos de Evapotranspiración Potencial diaria. El procedimiento general de calibración es el siguiente:

a. El valor de  $r/(\Delta+r)$  se calcula como ya se vió en el segundo método de Doorenbos-Pruitt ó bien con la ecuación empírica:

$$r/(\Delta+r) = 0.959 - 0.0125t + 0.00004534t^2$$

y

$$\Delta/(\Delta+r) = 1 - (r/(\Delta+r))$$

donde,  $t$  es la temperatura media diaria en grados

Fahrenheit.

b. El valor de  $G$  representa el flujo termal del suelo y se expresa como:

$$G = -\lambda_s (dT_s/dZ)$$

donde,  $\lambda_s$  es la conductividad termal del suelo en Cal/cm/t/grado Celsius.  $T_s$  es la temperatura del suelo y  $Z$  es la profundidad del suelo. (29)

A falta de información, el valor de  $G$  (que generalmente es pequeño día con día ya que el calor almacenado durante el día generalmente se pierde durante la noche), puede ser calculado mediante la expresión empírica:

$$G = 9(t - ((t_{-1} + t_{-2} + t_{-3})/3))$$

donde:

$t$  es la temperatura media diaria en grados Celsius, y  $t_{-i}$  es la temperatura promedio del  $i$ -ésimo día previo en grados Celsius. (1,29)

c. La presión del vapor a saturación puede ser obtenida mediante la fórmula de Goff-Gratch (List, 1958):

$$\begin{aligned} \log_{10} e_a = & -7.90298 ((T_s/T) - 1) + 5.02808 \log_{10} (T_s/T) - \\ & 1.3816 \times 10^{-7} (10^{11.344(1 - (T_s/T)) - 1}) + \\ & 8.1328 \times 10^{-3} (10^{-3.49149((T_s/T) - 1)} - 1) + \end{aligned}$$

$$\text{Log } \frac{e}{10 w^2}$$

donde:

$T_s$  es la temperatura de ebullición ( $T_s=373.16$  grados Kelvin).

$T$  es la temperatura absoluta en grados Kelvin.

$e_w$  es la presión del vapor a saturación a la

temperatura de ebullición ( $e_w = 1013.246$  mb). (29)

Una ecuación aproximada, menos complicada que la anterior, es la propuesta por Bosen (1960):

$$e_w = 33.8639 \left[ (0.00738t + 0.8072) - 0.000019(1.8t + 48) + 0.001316 \right]^8$$

para una temperatura  $-51$  grados  $< t > 54$  grados (grados Celsius),  $e_w$  en mb. (1,26,29)

Y todavía una ecuación más, propuesta por Kincard y Heermann (1974) es, para las condiciones de Mitchell, Nebraska:

$$e(t) = -0.6959 + 0.2946t - 0.005195t^2 + 89 \times 10^{-6} t^3$$

donde,  $t$  está en grados Fahrenheit y  $e$  en mb. (1,29)

Finalmente, el abaco psicrométrico de la figura 8 también puede ser utilizado para obtener  $e(t)$  en función de lecturas efectuadas en el termómetro de bulbo seco ó en el

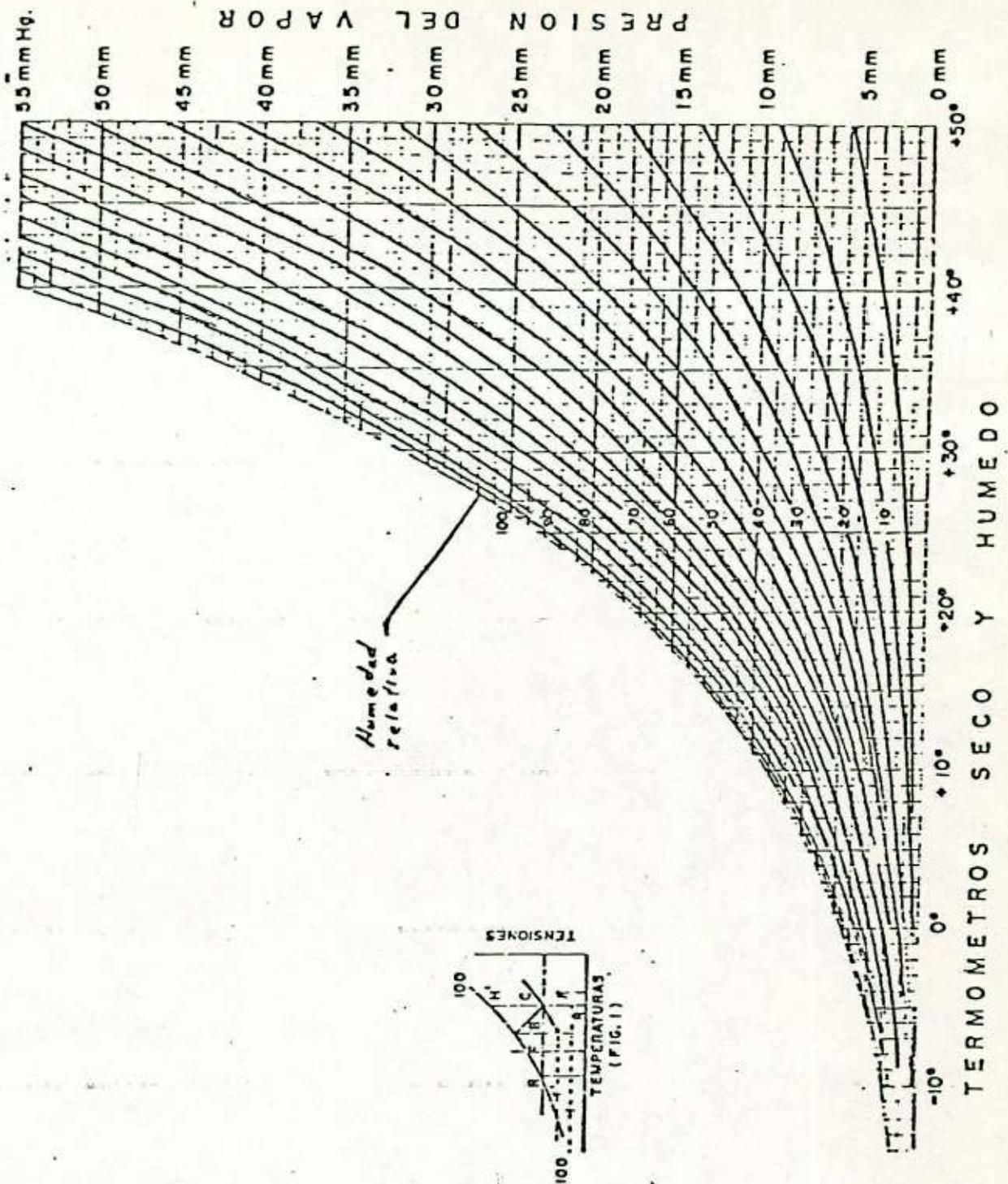


Figura 8. Abaco psicrometrico.

bulbo húmedo. (29)

Los valores de  $e_d$  se obtienen utilizando la siguiente ecuación:

$$e_d = e_a \times (HR/100)$$

donde, HR es la humedad relativa media en %. (1,40,45,46,52)

Otra aproximación del valor de  $e_d$  se obtiene con:

$$e_d = 6.11 \times \exp(-)$$

$$\frac{((176204.2621 + 5597.607915 \times T - 2.850772636 \times T^2) / (125416.2 + 273 + T))}{10}$$

donde  $e_d$  está en mb y T es la temperatura en grados Fahrenheit. (45,46)

d. De la ecuación para  $R_n$  vista anteriormente, conociendo  $R_s$  y  $R_n$  (29) (medidos con un piranómetro y con un radiómetro neto respectivamente) (29,60), despejamos  $R_{nl}$  obteniendo valores para  $R_{nlo}$  de los valores de  $R_{nl}$  obtenidos en días sin nubes ( $n/N = 0.90$  ó más). Calibramos entonces:

$$R_{nl} / R_{nlo} = a(R_s / R_{so}) + b$$

donde, a y b son coeficientes de regresión y  $R_{so}$  son valores de  $R_s$  para días sin nubes.

Algunos valores de a y b obtenidos en diferentes regiones se dan en el cuadro 22.

Los valores de  $R_{so}$  son predecibles de manera que se puede obtener una curva de ajuste sobre datos de varios años en el área en cuestión. Para Mitchell, Nebr., Kincaid y Heermann (1974), reportaron la ecuación:

$$R_{so} = 760 \exp -((\text{día}-107)/157)^2$$

donde, día es el día del calendario Juliano (Día 1 = Marzo 1 en el caso de Mitchell).

Los valores de  $R_{nlo}$  pueden ser obtenidos mediante una ecuación propuesta por Brunt (1952):

$$R_{nlo} = (a_1 + b_1 (e_d)^{0.5})^2 \sigma ((T_a + T_b)/2)^4$$

ó

$$R_{nlo} / \sigma ((T_a + T_b)/2)^4 = a_1 + b_1 (e_d)^{0.5}$$

donde,  $R_{nlo}$  son los valores de  $R_{nl}$  obtenidos de la fórmula para  $R_n$  en días claros;  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann =  $11.71 \times (10 \exp -8)$  Cal/cm cuadrado. día. por grados Kelvin a la cuarta potencia;  $T_a$  y  $T_b$  son las temperaturas máximas y mínimas en el día, en grados Kelvin;  $a_1$  y  $b_1$  son coeficientes de regresión y  $e_d$  es la presión del vapor a saturación a la temperatura de punto de rocío promedio en 24 horas (cuadros 19 y 20).

Algunos valores de  $a_1$  y  $b_1$  obtenidos en diferentes partes del mundo se dan en el cuadro 23.

e. Cuando no se cuenta con el dato de la radiación neta,  $R_n$ , un procedimiento alternativo es calcular  $R_{nlo}$  mediante:

$$R_{nlo} = E' \sigma \bar{T}^4$$

donde,  $E'$  es la emisividad neta dada por  $E' = -0.02 + 0.261 \exp(-7.77 \times 10^{-4} (273T)^2)$  y  $\bar{T}$  es el promedio de  $T_a$  y  $T_b$  según se anotó anteriormente.

Algunos valores de  $R_{nlo}$  para diferentes temperaturas se anotan en el cuadro 24.

Teniendo  $R_{nlo}$ ,  $R_s$  y  $R_{so}$ , utilizamos la ecuación de  $R_{nl}/R_{nlo}$ , vista anteriormente, con los coeficientes apropiados para obtener  $R_{nl}$ .  $R_n$  se obtiene finalmente utilizando la ecuación ya vista.

f. La función de viento de la ecuación de Evapotranspiración Potencial (ETp) vista al principio de este tercer método, también se calibra a partir de datos medidos de ETp (para el cultivo de referencia),  $R_n$ ,  $e_a$ ,  $e_d$ ,  $G$  y  $W$ . Podemos escribir la ecuación mencionada como:

$$\frac{ETp - 0.0171(W(R_n - G))}{(0.0171 \times 15.36(1 - W)(e_a - e_d))} = a_2 + b_2(u^2)$$

donde  $u_2$  son los Km de recorrido diarios del viento a 2m de la superficie del suelo.

Los valores de  $a_2$  y  $b_2$  recomendados son de 1.0 y 0.0062 respectivamente. (NOTA:  $a_2=1.10$  y  $b_2=0.017$  cuando  $u_2$  está en millas por día (Kincald y Heermann, 1974)). (29)

Doorenbos y Pruitt (1975) proponen una variante del método descrito anteriormente, que desde luego, dará una menor aproximación a los datos de Evapotranspiración Potencial reales. En lugar de la ecuación de ETP vista al principio de este tercer método proponen:

$$ETp = W \times Rn + (1-W) f(u_2) \left( \frac{e - e_d}{a} \right)$$

Los valores de  $e(t)$  se obtienen directamente de los cuadros psicrométricos como los cuadros 7, 19 y 20).

Los valores de  $W$  se obtienen como se explicó en el inciso anterior (e), del cuadro 18.

La ecuación de la radiación neta se escribe como:

$$Rn = Rns - Rnl$$

donde,  $Rns = (1 - \rho)Rs$ ,  $Rs$  se calcula a partir de  $Ra$  utilizando el cuadro 13 y la ecuación de  $Rs$  vista en el segundo método. Mientras que la radiación neta de onda larga se calcula por medio de  $Rnl = f(t) \times f(e_d) \times f(n/N)$  en donde,

$$f(t) = \sigma T K^4, \quad f(e_d) = 0.56 - 0.79 \left( \frac{e_d}{d} \right)^{0.5}$$

ó  $f_d(e) = 0.35 - 0.044 \left(\frac{e}{d}\right)^{0.5}$  para climas húmedos y secos respectivamente y  $f(n/N) = 0.1 + 0.9(n/N)$ .

Valores de  $f(t)$ ,  $f(e)$  y  $f(n/N)$  están dados en los cuadros 25, 26 y 27 respectivamente.

Una variante para la obtención de  $R_n$  la presenta Jensen (1973) que sugiere se obtenga directamente con una simple regresión lineal de  $R_s$ :

$$R_n = (a_3 \times R_s) + b_3$$

Valores de  $a_3$  y de  $b_3$  obtenidos en algunas regiones se presentan en el cuadro 28.

La función de viento se define como:

$$f(u) = 0.27 + 0.0027 u^2$$

donde,  $u^2$  es el recorrido del viento a 2 m de la superficie del suelo en Km/día. (1,29)

Las mediciones de velocidad del viento a una altura diferente a 2 m deben corregirse de acuerdo a las fórmulas vistas en el método del tanque de evaporación.

Cuando  $R_s$  no es medido, deberá ser obtenida como se vió en el método de Jensen-Haise.

Método basado en datos obtenidos por Pruitt

A partir del análisis de datos obtenidos por Pruitt en Davis, California (E.U.A.), se desarrolló la siguiente fórmula para la determinación de la Evapotranspiración Potencial:

$$ETp = 0.81 Ev \times Ch \times Ct \times Cv$$

en donde:

ETp es la Evapotranspiración Potencial.

Ev es la evaporación tomada en el tanque tipo A.

$Ch = 2.0 (HR/80) - 1.0 (HR/80)^2$ , donde HR es la humedad relativa en el día expresada en %. Si  $HR > 80\%$ ,  $Ch = 1.0$ .

$Ct = 0.91 + 0.09(T/15)$ , donde T es la temperatura media en grados Celsius.

$Cv = 1.12 - 0.12(V10/10)$ , donde V10 es la velocidad del viento en Km/hr a 10 m de altura. (53)

Las mediciones de velocidad del viento realizadas a otras alturas diferentes a los 10 m, deberán ser corregidas mediante la fórmula vista en el método de Hargreaves.

#### Método de Grassi

Grassi (1964), desarrolló diversas fórmulas para la estimación de la Evapotranspiración Real de cultivos en estudios hidrológicos utilizando valores climáticos y de

cultivo.

Desarrolló 3 ecuaciones para la Evapotranspiración del cultivo basadas en la radiación extraterrestre y la evaporación en el tanque respectivamente.

1. La primer fórmula utiliza la radiación extraterrestre,  $R_t$ , y se expresa de la siguiente manera:

$$E_t = 5.46 C_r \times C_{clc} \times C_t \times C_{td} \times C_{crc} \times K$$

donde:

$E_t$  es la Evapotranspiración en mm/día.

$C_r = 0.18 + 1.46 R_t$ . Coeficiente de radiación, donde

$R_t$  es la radiación teórica expresada en mm/día.

(cuadro 13)

$C_{clc} = 1.15 - 0.05 CLC$ . Coeficiente de nubosidad, donde CLC representa la presencia de nubes en una escala de 0 a 10.

$$C_t = 0.036 + 0.0219T_f - 0.0001136T_f^2, \text{ o}$$

$$C_t = 0.630 + 0.0202T_c - 0.000336T_c^2. \text{ Coeficientes de temperatura.}$$

$$C_{td} = 0.936 + 0.00426 T_{d_f}, \text{ o}$$

$$C_{td} = 0.936 + 0.00767 T_{d_c}, \text{ donde } T_{d_c} \text{ es la diferencia}$$

entre la temperatura máxima media diaria y la temperatura media para el período.

$$C_{crc} = 0.11f + 0.0141 CRC - 0.0000521 CRC^2$$
 , donde CRC es el porcentaje de desarrollo del cultivo, desde la plantación hasta el 100% de cobertura.

K es el coeficiente del cultivo.

Algunos valores del coeficiente K son:

Alfalfa _____	1.088	Papa _____	1.162
Algodón _____	1.082	Remolacha	
Avena _____	0.890	azucarera _	1.017
Frijol _____	0.983	Sorgo _____	1.004
Maíz _____	1.003	Trigo de	
		invierno _	1.100

La ecuación de Grassi para el coeficiente del ciclo vegetativo es :

$$C_{cv} = 0.0895 + 0.02738 CV - 0.0002058 CV^2$$

2. La segunda fórmula utiliza mediciones o estimaciones de  $R_s$  en lugar de radiación teórica,  $R_t$ , y temperatura y cobertura vegetal, CRC, pudiéndose escribir de la siguiente manera:

$$ET = 13.0 R_s \times C_t \times C_{crc} \times K$$

donde:

ET es la Evapotranspiración en mm/día, y

$$C_{crc} = 0.099 + 0.1347 CRC - 0.0000446 CRC^2$$

3. La tercer fórmula utiliza la medición o cálculo de la evaporación,  $E_v$ , tomada a partir del tanque de evaporación.

en lugar de  $R$  o  $R_s$  y puede escribirse de la siguiente manera:

$$ET = 0.968 E_v \times C_t \times C_{crc}$$

donde:

$$C_t = 1.754 - 0.0111 T_f \quad \circ$$

$$C_t = 1.40 - 0.200 T_c$$

$$C_{crc} = 0.121 + 0.0148 CRC - 0.0000592 CRC^2 \quad (49)$$

Posteriormente, Grassi (1975), dice que la variación del coeficiente  $K$ , a lo largo del ciclo, depende de las características morfológicas y fisiológicas del cultivo, de las características edáficas, del volumen explorado de suelo por las raíces y la disponibilidad de agua, aire y nutrientes.

Entre los factores que afectan a  $K$ , Grassi los agrupa en tres sub-coeficientes:

$$K = K_c \times K_s \times K_h$$

en donde,  $K_c$  es el sub-coeficiente del cultivo,  $K_s$  es el sub-coeficiente del suelo y  $K_h$  es el sub-coeficiente del nivel de humedad.

El sub-coeficiente del cultivo,  $K_c$ , depende exclusivamente de las características morfológicas, anatómicas y fisiológicas del cultivo y además expresa la

capacidad de extracción del agua del suelo.

El sub-coeficiente del suelo,  $K_s$ , toma en cuenta todo tipo de limitaciones edáficas: Las capas impermeables, los mantos elevados, etc. Según el autor,  $K_s=1$  cuando no existen limitaciones.

El sub-coeficiente del nivel de humedad,  $K_h$ , relaciona el esfuerzo o succión que necesita realizar el cultivo para extraer agua del suelo a medida que disminuye la humedad disponible. (29)

Si  $R_s$  no es medida, puede ser estimada como se vió en el método de Jensen-Haise.

#### Método de Norero

Norero (1969), desarrolló una ecuación la cual considera el estado del agua en el suelo y los factores climáticos en relación. Esta ecuación puede escribirse de la siguiente manera:

$$ET_a = ETP / (1 + (\theta' / \theta)^m)$$

donde,  $ET_a$  es la Evapotranspiración Real en mm,  $ETP$  es la Evapotranspiración Potencial en mm,  $\theta$  es la tasa real de agua contenida en la zona radicular y  $\theta'$ ,  $m$  son variables que dependen del suelo y la planta así como de la  $ETP$  (en mm) en la cual, para el maíz, Hanks (1971) estableció:

$$0' = (20.4 + 1.1 ET_p)/100$$

$$m_i = 27.3 - 2.06ET_p \quad (49)$$

Posteriormente Norero (1976) propone una función para estimar el coeficiente de ajuste ( $K_c$ ) para la Evapotranspiración Potencial, con base en el índice foliar medio observado de los cultivos:

$$K_c = (0.3 + IAF(T/T_c)^2 (1 - (T/T_c)))$$

y

$$ET_{m\acute{a}x} = K_c \times E_v$$

donde,  $ET_{m\acute{a}x}$  es la Evapotranspiración máxima en mm/día,  $IAF$  es el índice del área foliar promedio del ciclo del cultivo,  $T$  es el tiempo en días (acumulado hasta la fecha) que lleva en desarrollo el cultivo,  $T_c$  es la duración en días del periodo vegetativo,  $E_v$  es la evaporación diaria del tanque en mm y 0.3 es una constante que puede variar con el cultivo. (35)

#### Método de Brochet-Gerbier

Brochet y Gerbier (1977) propusieron 2 expresiones para el cálculo de la Evapotranspiración Potencial utilizando la radiación global recibida en una extensa área y las mediciones locales de evaporaciones mediante evaporímetros Piché o temperatura máxima y mínima, para una

década (10 años).

Primer expresión:

$$ETp_1 = m \times Rg + n \times Ep$$

Segunda expresión:

$$ETp_2 = m \times Rg + p \times k (\bar{T}, \bar{T}_n + \bar{E})$$

donde,  $ETp$  es la Evapotranspiración Potencial en mm;  $Rg$  es la radiación solar global;  $T$  es la temperatura media:  $(\text{máx} + \text{min})/2$ .  $T_n$  es la temperatura mínima;  $m, n, p$  son coeficientes de ajuste que dependen del lugar;  $Ep$  es la evaporación en el evaporómetro Piché;  $K$  es una función cuyos valores están dados en cuadros y  $E$  es un coeficiente dado en planos. (45,46)

#### Método de García Benavides

García Benavides (1979) considera que a partir de la evaporación se puede estimar la Evapotranspiración mediante:

$$ETp = 0.8 Ev$$

donde,  $ETp$  es la Evapotranspiración Potencial y  $Ev$  es la evaporación a partir de una superficie libre de agua.

El valor de  $Ev$  puede ser estimado de la siguiente manera:

$$E_v = 1.606 (D_s)^{0.652}$$

donde,  $D_s$  es el déficit de saturación. Sin embargo este dato no se reporta comúnmente por lo que fue necesaria su estimación, quedando:

$$D_s = 4.72 (1.065)^{\frac{T_x}{T_i}} - 10.805 (1.047)^{\frac{T_i}{T_x}}$$

donde,  $T_x$  es la temperatura máxima media del mes y  $T_i$  es la temperatura mínima media del mes.

García Benavides trató además de utilizar otras variables simples como la duración de la insolación astronómica ( $N$ ) que se obtiene directamente del cuadro 14. El mejor modelo combinando estas 2 variables fue:

$$E_v = 0.115 (N)^{1.123} (D_s)^{0.566}$$

En trabajos más recientes sobre la estimación de la  $E_v$  destaca el elaborado por Luis Mejía (1983) quien establece un modelo aplicable a la República Mexicana como sigue:

$$E_v = 221.9310 + 7.9769 (T) - 3.3553 (HR)$$

donde,  $E_v$  es la evaporación mensual en mm,  $T$  es la temperatura media mensual en grados Celsius y  $HR$  es la humedad relativa mensual en %.

Otro trabajo igualmente importante es el desarrollado por David Pájaro (1983), relacionando la evaporación como

una función de la temperatura media máxima mensual:

$$E_v = a + b T_m$$

donde a y b son constantes (cuadro 29)

Si no se dispone del dato de humedad relativa, puede ser estimado a partir de :

$$\begin{aligned} HR = & 185.73 - 1.75L - 0.017EL - 0.104(N_e)(T) - 0.00055(PT)(T) + \\ & 0.00015(EL)(T) - 0.000027(PT)(P) + 0.0055(L)(P) + \\ & 0.000011(EL)(P) \end{aligned}$$

donde, HR es la humedad relativa en %, L la latitud, EL la altura del lugar, Ne el número de meses ecosecos (meses donde  $P < 2T$ ), T la temperatura media mensual, PT la precipitación total anual y P la precipitación mensual.  
(40)

#### Método de Trenchard-Artley

Trenchard y Artley (1981) utilizaron las temperaturas máxima (Tx) y mínima (Tn) para estimar la evaporación en un tanque convirtiendo la temperatura a equivalentes de presión de vapor y utilizando un modelo de regresión Lineal Simple.

$$E_v = 0.2163 + 0.3473 \text{ Vapor}(T_x) - 0.2644 \text{ Vapor}(T_n)$$

donde Ev es la evaporación del tanque en pulgadas.

Ellos también usaron dicha ecuación para estimar la

humedad diaria del suelo.

El contenido diario de humedad del suelo para un perfil que presente una capacidad de retención de 200 mm (8 pulgadas) de agua puede ser manejado de la siguiente manera:

$$S_i = S_{i-1} + P_i - (E_{vi} \times S_{i-1} / CAP)$$

donde:

$S_i$  es el contenido de humedad en el día  $i$ .

$P_i$  es la precipitación en el día  $i$ .

$E_{vi}$  es la evaporación en el tanque en el día  $i$ .

CAP es la capacidad de humedecimiento del perfil del suelo y  $0 < S_i < CAP$ . (45,46)

#### Método de Blaney-Criddle

1). Blaney y Criddle(1950), desarrollaron una fórmula en el Oeste de los Estados Unidos, en la que hacen intervenir la temperatura media mensual y el porcentaje de horas luz del mes con respecto al total anual (1,4,8,9,23,24,29,42,48,49, 53,59). Originalmente los autores diseñaron el método para estimar la Evapotranspiración Real de los cultivos y su fórmula es :

$$ET = K \times F$$

donde, ET es la Evapotranspiración Real total del cultivo expresada como lámina en cm, K es un coeficiente global de ajuste que depende del cultivo y de la ubicación de la zona de estudio, F es la suma de los factores de la Evapotranspiración para un periodo determinado, dada como:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i$$

(1,4,8,9,10,12,14,19,21,22,23,24,29,30,34,41,42,45,46,48, - 49,51,52,54,56,59), donde f es un factor de temperatura y luminosidad que se obtiene de la siguiente manera:

$$f = ((t+17.8)/21.8)^p$$

donde, t es la temperatura media mensual en grados Celsius y p es el porcentaje de horas luz del mes con respecto al total anual en % (cuadro 8). (1,7,8,9,12,14,22,23,24, - 29,34,41,42,45,46,48,51,52,56)

Cuando en el periodo considerado se tienen lapsos menores de 30 días, se ajusta el valor de la temperatura media y el porcentaje de horas luz se calcula sólo para el número de días considerados. (9)

Blaney-Criddle mencionados por Castilla (1965) fijaron límites probables de variación del coeficiente de uso consuntivo (K) para las especies más importantes, para dicho coeficiente global (cuadro 6) (1,9,12,22,23,41,42,48, 50,51,52,56,57).

- Coeficiente de desarrollo. Experimentos realizados posteriormente, han conducido a la formulación de gráficas que permiten conocer el coeficiente de uso consuntivo en función del desarrollo de las plantas, ya sea en porcentaje del ciclo total, o bien en tiempo después del nacimiento de los mismos, dentro de estas gráficas se pueden mencionar las propuestas por: (a) El Departamento de Conservación de Suelos de los Estados Unidos, (b) El de Grassi-Christiansen y (c) El propuesto por Hansen. (1)

a). Curvas propuestas por el Departamento de Conservación de suelos de los Estados Unidos. Este Departamento, realizando experimentos en el centro de California, obtuvo gráficas para cada cultivo, las que presentan en el eje de las abscisas el porciento del ciclo vegetativo para cada cultivo y en las ordenadas el coeficiente de desarrollo,  $K_c$ . Partiendo de dichas curvas, se han obtenido los valores mostrados en los cuadros 30 y 31. (1,9,22,42)

Los coeficientes de desarrollo no se aplican directamente a valores correspondientes de  $f$  sino a los productos,  $f \times K_t$ , en el que este último representa una corrección propuesta por J.T.Phelan, después de intentar correlacionar valores de los coeficientes de desarrollo con los valores de  $f$ , obtenidos de la fórmula vista anteriormente, propuesta por Blaney-Criddle. (1,9,22,31,42)

El valor de  $K_t$  se obtiene con la siguiente ecuación:

$$K_t = 0.031144 t + 0.2396$$

donde,  $t$  es la temperatura media mensual en grados Celsius.  
(1,9,22,24,29,31,41,42,48)

La fórmula general para el cálculo de la Evapotranspiración queda como:

$$ET = f \times K_t \times K_c \quad (1,9,29,31,41,42)$$

Posteriormente se obtiene un coeficiente global  $K'$  utilizando la siguiente ecuación:

$$K' = \frac{\sum ET}{\sum f}$$

Con este valor y con el coeficiente global  $K$  obtenido en el cuadro 6 se determina el factor de ajuste  $C$ :

$$C = K / K'$$

Después se hace el ajuste a la Evapotranspiración:

$$E_{To} = ET \times C$$

donde  $E_{To}$  es la Evapotranspiración ajustada, en cm (1,9,29,31,42,48)

b). Curva propuesta por Hansen (1962)

Este método es denominado como el método de la curva única de Hansen ó método racional (1,42,51,52). Este investigador propuso una curva que relaciona la Evapotranspiración relativa  $K$ , con el crecimiento y

maduración relativa (figura 9) (1,9,42,51,52). Evapotranspiración relativa, significa que en el denominador puede emplearse indistintamente la evaporación del tanque tipo A, así como estimaciones con la fórmula de Penmann o Blaney-Criddle, Hansen (1963).

Esta curva de Evapotranspiración tiene forma parabólica, el factor climático  $f$  puede ser sustituido por datos de evaporación en tanque. (1,42,51,52)

Las demandas de agua a través del ciclo vegetativo se pueden controlar afinando los coeficientes con determinaciones gravimétricas de la humedad de los suelos.

Para el cálculo del coeficiente de la etapa de desarrollo del cultivo,  $K_c$  se tiene que precisar en décimas, sobre el eje de las abscisas, el tramo de curva correspondiente al período vegetativo real del cultivo y luego dividirlo entre el número de meses que dura en el campo, para así obtener el dato del período vegetativo correspondiente a cada mes. Para cada mes se calcula sobre la curva una ordenada media (promedio de 3 ó 4 ordenadas del intervalo) la cual representa el valor mensual  $K_c$ . (1)

La Evapotranspiración mensual será el producto de  $UC = f \times K_c$  y los valores obtenidos serán ajustados de la misma manera que en el inciso a. (1,42,51,52)

Este método tiene la desventaja de que sólo se puede

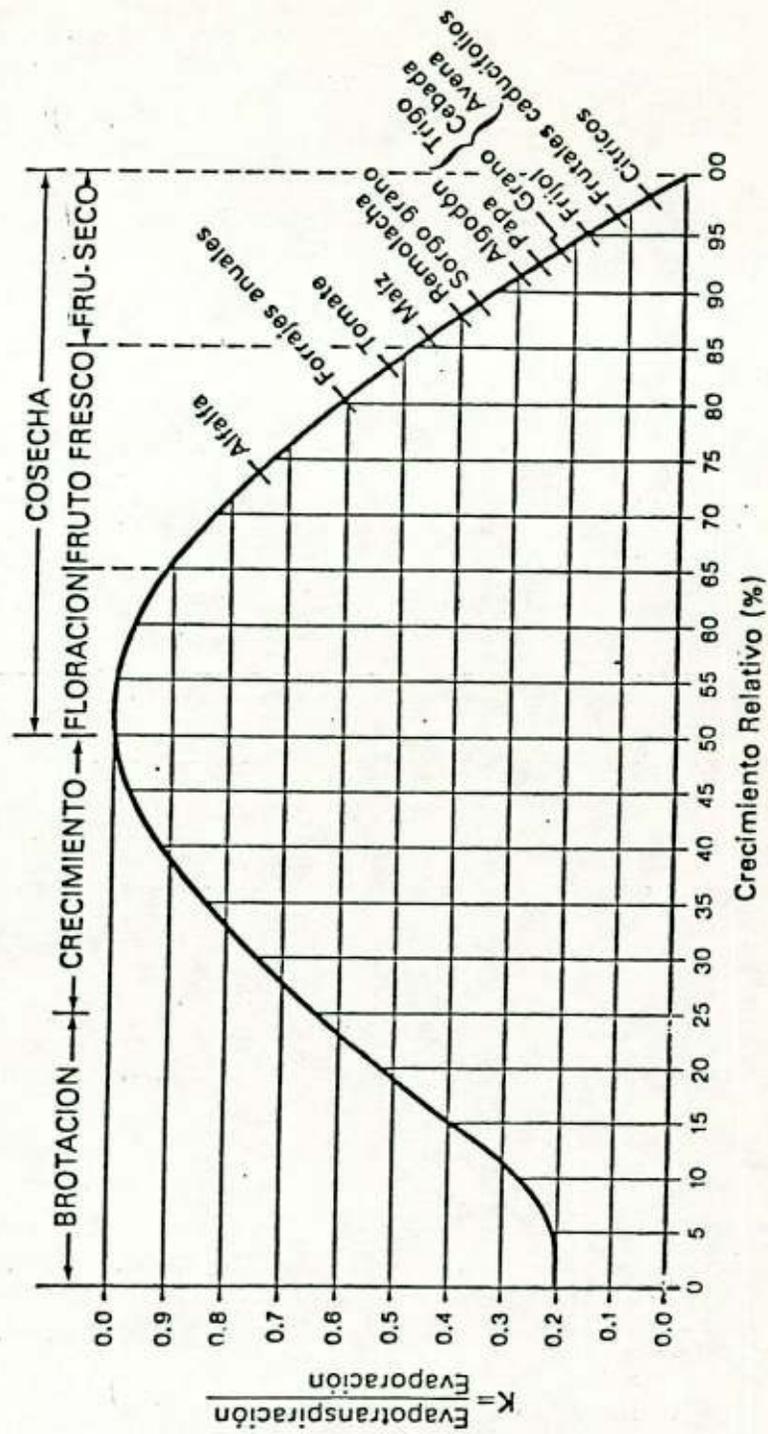


Figura 9. Curva única de Hansen.

aplicar a los cultivos que se encuentran en la curva.

Se recomienda utilizar en zona húmeda y semi-húmeda el dato de evaporación en tanque en lugar del coeficiente  $f$ , por ser muy parecido al valor de evaporación calculado por el método de Thornthwaite para esos climas (De Los Santos, 1970). (1)

c). Curva propuesta por Grassi-Christiansen (1964)

Grassi y Christiansen propusieron los coeficientes mensuales de Evapotranspiración,  $K_m$ , empleados para la distribución del Uso Consuntivo mensual a través de las diversas etapas de desarrollo del cultivo. (1,9,42,51,52)

De donde tenemos que:

$$ET = F \times K_m$$

Dichos investigadores se basaron en 3 ecuaciones obtenidas al estudiar las variantes de la Evapotranspiración relativa en función de la duración, también relativa, del ciclo vegetativo de los cultivos anuales (De Los Santos, 1970):

$$K_g = E_{Tr}/E_{Tp}$$

$$K_g = E_{Tr}/R_g$$

$$K_g = E_{Tr}/E_v \quad (1)$$

donde,  $K_g$  es el coeficiente global de evapotranspiración

del cultivo;  $E_{Tr}$  es la Evapotranspiración Real, en mm/día por el método lisimétrico o gravimétrico;  $E_{Tp}$  es la Evapotranspiración Potencial, calculada para total cobertura del terreno por el cultivo, en mm/día (puede usarse el método de Penman);  $E_v$  es la evaporación de una superficie libre de agua, tanque tipo A de los Estados Unidos, en mm/día y  $R_g$  es la radiación global, expresada en lámina equivalente de agua evaporada por día ( $R_g/59$ ). (1,51,52)

Posteriormente, Grassi (1966), propone la generalización de las tres ecuaciones anteriores para ser aplicadas a la obtención de los valores periódicos de  $K$ . Para esto, Grassi utilizó valores diarios de Evapotranspiración, correspondiente a promedios de periodos variables entre una y dos semanas de observación; estos valores los analizó en relación con diferentes factores meteorológicos y en relación con medidas de la evaporación del tanque y de la radiación. Dicho análisis se realizó en función del porcentaje de cubrimiento del terreno por el cultivo, y el porcentaje de la duración del ciclo vegetativo.

Grassi trabajó con datos de Evapotranspiración correspondientes a diferentes cultivos anuales, como lo son: Algodón, avena, maíz, papa, remolacha azucarera, sorgo y trigo de invierno. La relación adimensional entre la Evapotranspiración Real,  $E_{Tr}$ , y la radiación global,  $R_g$ , la

representó gráficamente en función del largo relativo del ciclo vegetativo, expresado en %.

Las curvas representadas con la doble relación adimensional para diferentes cultivos resultaron ser del mismo tipo, lo que permitió un análisis conjunto de todos los datos para obtener una curva única aplicable a todos los cultivos anuales.

El análisis de dichas relaciones adimensionales, se planteó con una ecuación cuadrática, del tipo siguiente (Grassi, 1960):

$$Y = b_0 + b_1 X + b_2 X^2$$

donde: X es la duración relativa del ciclo vegetativo, (%); Y es el valor de K a un tiempo t en % y b<sub>0</sub>, b<sub>1</sub> y b<sub>2</sub> son parámetros correspondientes a las tres relaciones de Kg vistas al principio de este inciso (c), respectivamente.

Posteriormente, dichas relaciones fueron ajustadas, introduciendo un coeficiente C, en las respectivas ecuaciones de la fórmula anterior, por lo tanto:

$$Y = C (b_0 + b_1 X + b_2 X^2)$$

La constante C, tiene en los tres casos de Kg vistas al principio de este inciso valores crecientes en el mismo orden, que son: C=0.211; C=0.512 y C=0.0927

respectivamente.

Las ecuaciones resultantes se representaron gráficamente (figura 10). Como dicha figura mostró prácticamente coincidencia, se promediaron los parámetros de las mismas y se obtuvo una ecuación única para  $K_g$ , en función de  $t$  (Grassi, 1966):

$$K = 0.0942 + 0.02774 t + 0.0002126 t^2$$

donde,  $t$  es el porciento del ciclo vegetativo, adimensional. (1)

En el cuadro 32 se incluyen los datos de los coeficientes periódicos  $K$ , calculados en función de  $t$  para diferentes valores de  $K_g$  (1,9,42,51,52), y en la figura 11 se presentan algunas de las curvas respectivas. (1,9)

Para la obtención de los coeficientes mencionados de Evapotranspiración que dependen de la duración del ciclo vegetativo de cada cultivo, se elaboran cada una de las curvas en función del coeficiente global relacionado y se divide el total del ciclo vegetativo del cultivo (0 - 100%) en los meses que lo integran y se obtienen dichos coeficientes mensuales  $K_i$ . (1,9,42,51,52)

La Evapotranspiración mensual será el producto de  $UC = f \times K_m$  y los valores obtenidos serán ajustados de la misma manera que en el inciso (a). (1,42,51,52)

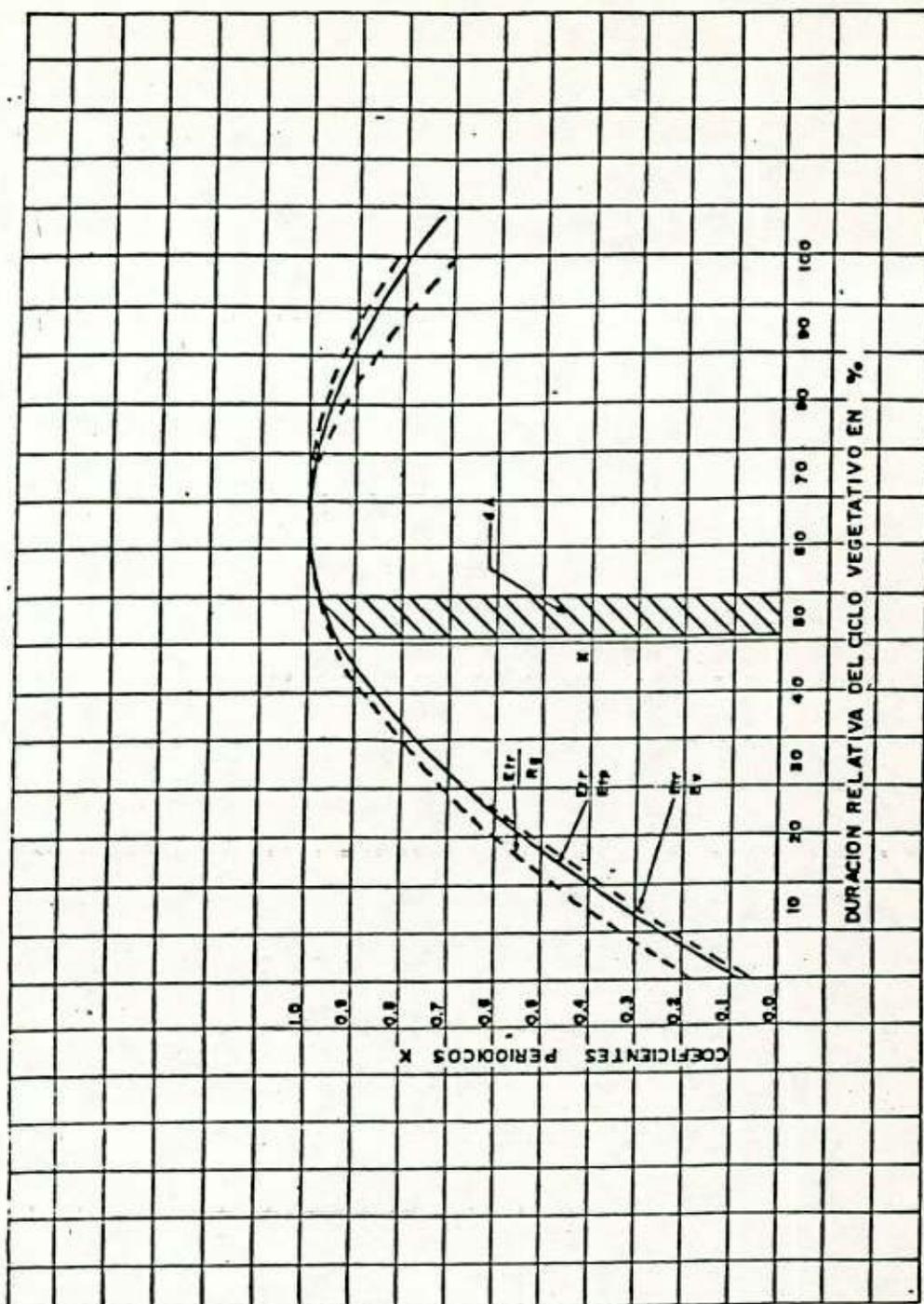


Figura 10. Coeficientes periodicos. (Grassi-Christiansen)

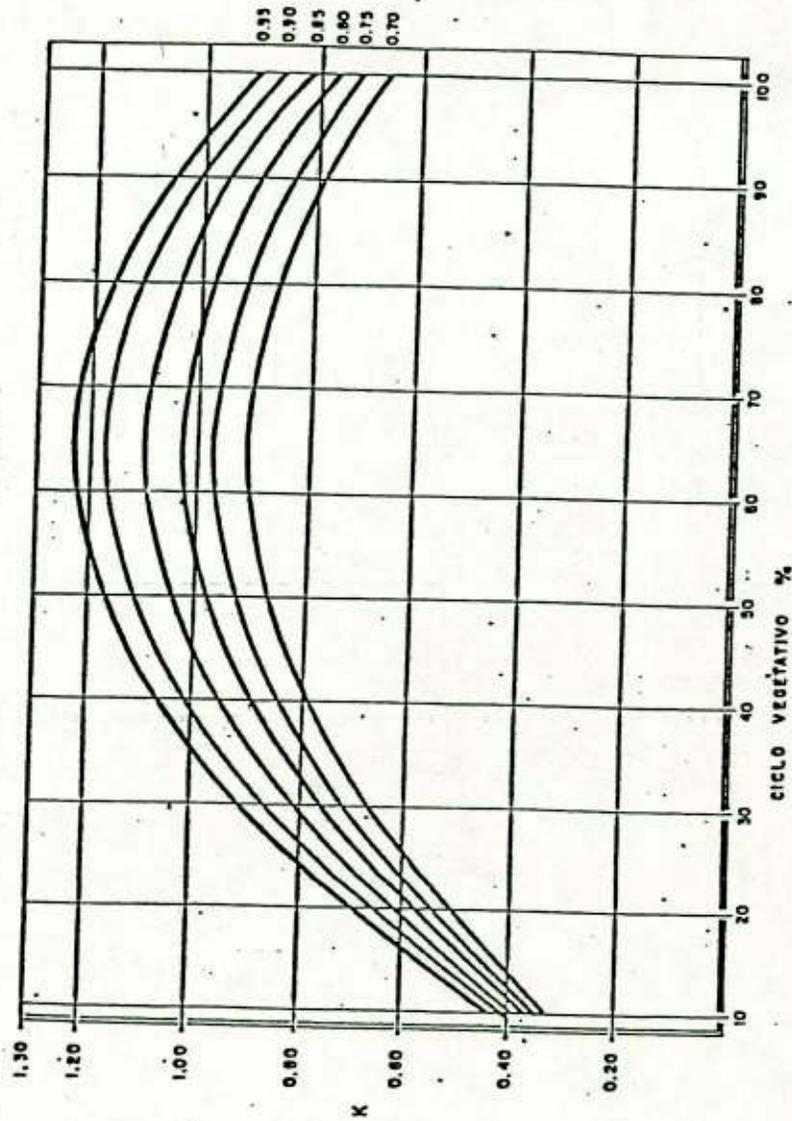


Figura 11. Coeficientes periódicos de Uso Consuntivo en función del ciclo vegetativo (Grassi-Christiansen).

2). Otro método para el cálculo de la Evapotranspiración lo constituye la fórmula de Blaney-Criddle modificada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).

La forma general de la fórmula Blaney y Criddle - FAO es:

$$ET_o = (a+b(P(0.46t+8.13))) (1+0.1(EL/1000))$$

en donde:  $ET_o$  es la Evapotranspiración estimada a partir de un pasto de referencia en mm/día para el periodo considerado;  $t$  es la temperatura media diaria en grados Celsius a lo largo del periodo considerado y  $P$  es el porcentaje medio diario del total de horas luz anuales para una latitud y periodo de tiempo dado. Los valores  $a$  y  $b$  son factores de corrección los cuales dan un ajuste de la Evapotranspiración estimada y están basadas en mediciones o estimaciones de humedad relativa mínima media diaria en porcentaje ( $HR_{min}$ ), relación media de horas luz reales y probables ( $N_{rel}$ ), y velocidad media del viento durante el día en m/seg tomada a una altura de 20 m ( $U_d$ ). El factor "a" se calcula por:

$$a = 0.0043 (HR_{min}) - N_{rel} - 1.41$$

El factor "b" puede ser interpolado a partir de cuadros publicados de acuerdo a los valores medios de  $HR_{min}$ ,  $N_{rel}$  y  $U_d$ , o puede ser calculado utilizando la siguiente

ecuación de regresión reportada por Frevert:

$$b = 0.81917 - 0.0040922(\text{HRmin}) + 1.0705(\text{Nrel}) + \\ 0.065649(\text{Ud}) - 0.0059684(\text{HRmin})(\text{Nrel}) - \\ 0.0005967(\text{HRmin})(\text{Ud})$$

Esta ecuación proporciona buenas estimaciones de "b" para velocidades de viento mayores a poco más o menos 1m/seg.

En lugares donde solo se dispone de mediciones del viento cada 24 horas, la velocidad del viento en el día puede estimarse como:

$$\text{Ud} = (\text{U24}(\text{Urel})) / (43.2(1 + \text{Urel}))$$

donde: U24 es la velocidad del viento en 24 horas, en Km/día y Urel es la relación de las velocidades del viento durante el día y la noche. Doorenbos y Pruitt propusieron emplear un valor de 2.0 para Urel en lugares donde no se encuentran disponibles las determinaciones de viento día/noche.

La relación media de la relación de horas luz reales y probables puede ser obtenida a partir de estimaciones de radiación solar, de la siguiente manera:

$$\text{Nrel} = 2.0 (\text{Rs}/\text{Ra}) - 0.5$$

donde, Rs es la medida o estimación de la radiación solar global en mm/día de equivalente en agua, y Ra es la

radiación solar extraterrestre de onda corta en mm/día de equivalente en agua. Los valores de P y Ra se incluyen en los cuadros 17 y 13 respectivamente.

La "EL" corresponde a la altura del lugar en metros por arriba del nivel medio del mar. Pruitt y Doorenbos propusieron una corrección a la altura para los meses de primavera y verano en climas semiáridos y áridos. Esta corrección es necesaria debido al sesgo descendente de las temperaturas medias diarias a mayores alturas debido a las bajas temperaturas mínimas diarias resultantes de una atmósfera enrarecida y al bajo contenido de calor del aire seco. La necesidad de una corrección a la altura en los alrededores del 10% / 1 000m por arriba del nivel del mar, ha sido documentada por Allen y Brockway, y Pochop para los métodos de Blaney y Criddle - FAO, y Blaney y Criddle - Servicio de Conservación de Suelos, respectivamente.

El pasto de referencia se define como una superficie extensa cubierta de pasto verde con una altura uniforme de 80 a 150 mm, en crecimiento activo, sombreando completamente el terreno y sin deficiencia de agua.

La fórmula de Blaney y Criddle - FAO ha sido aplicada en los estados del Oeste de los Estados Unidos, en Nevada, Washington, Idaho, Oregon y California.

Doorenbos y Pruitt propusieron utilizar la fórmula de Blaney y Criddle - FAO para estimar la Evapotranspiración

en periodos no menores de 30 días debido a las limitantes de los métodos de temperatura. Sin embargo, cuando la fórmula se aplica en mediciones diarias de temperatura del aire, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa mínima, pueden obtenerse buenos resultados. (3)

## Método de Penman

### I. Método de Penman simplificado

Mediante el uso de un nomograma (Figura 12) y cuadros formados en función de la radiación extraterrestre, la temperatura media del aire y el porcentaje de horas luz, calculado con las horas luz esperadas en la zona y con las determinadas por medio del Piroheliógrafo (quemador de papel), puede obtenerse fácilmente la Evapotranspiración Potencial diaria en mm/día.

#### Metodología:

- Se obtiene el valor de la radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente en mm/día de cada mes, de acuerdo a la latitud del lugar en el cuadro 13.
- Se calcula el porcentaje de horas luz del lugar mediante la relación del valor de horas luz, según el reporte medio mensual obtenido en el Piroheliógrafo, con el valor esperado de horas luz en cada uno de los meses dado en el cuadro 14.

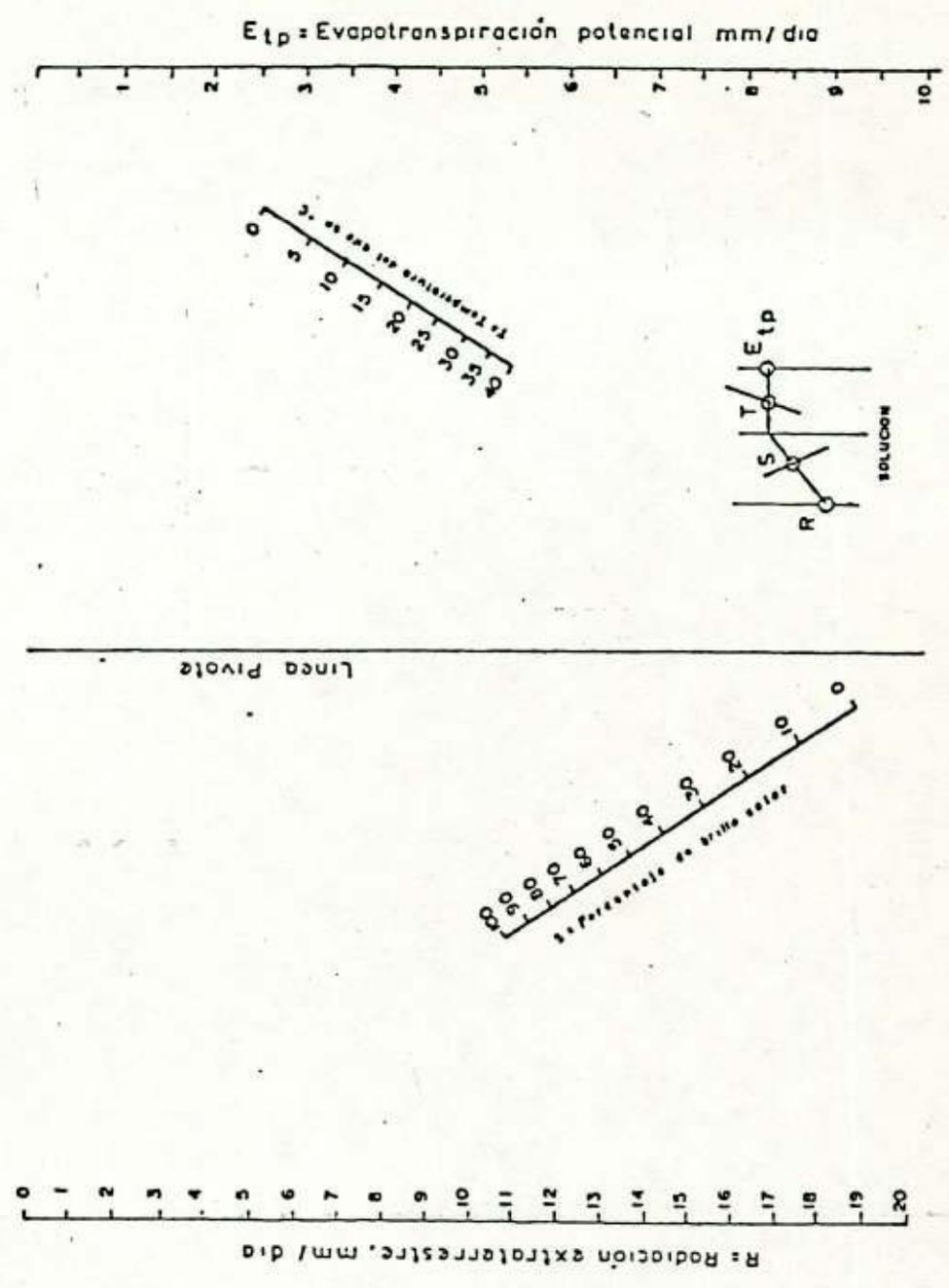


Figura 12. Nomograma que resuelve la fórmula de Penman.

- Para encontrar el valor de la Evapotranspiración Potencial en el nomograma, se traza una línea que una el punto que representa el valor de la radiación extraterrestre expresada en evaporación equivalente, en mm/día con el punto de la escala donde está el valor del porcentaje de horas luz y prolongarla hasta la escala pivote, cuyo cruce determinará el siguiente trazo.

- Del punto base de la escala pivote, se traza una línea que una al valor obtenido en la línea pivote con el valor de la temperatura media mensual expresada en grados Celsius, la cual deberá prolongarse hasta encontrar la escala en que están los valores de la Evapotranspiración Potencial dada en mm/día. El cruce de dicha línea y la escala encontrada fija el valor de la Evapotranspiración Potencial diaria en mm/día.

- El valor de la Evapotranspiración Potencial se multiplica por el número de días que tiene el mes y/o por los días que cubre el cultivo y se tiene el valor de la Evapotranspiración mensual en mm/día y/o, de los días que cubre el ciclo. (42)

## 2. Método de Penman modificado

Penman (1948), efectuó una serie de experimentos en Rothamsted, Inglaterra y dedujo una fórmula para calcular la Evapotranspiración Potencial (1,7,9,27,29,41,49) a partir de una cubierta vegetal baja, tupida y uniforme (9,

22,27,41,49), la cual en términos generales proporciona resultados satisfactorios, sobre todo en zonas húmedas.

En un gran número de estudios comparativos en zonas áridas y semiáridas, los valores obtenidos con la ecuación de Penman han estado por debajo de los valores reales obtenidos. Actualmente la ecuación de Penman puede proporcionar buenas aproximaciones de Evapotranspiración Potencial para zonas áridas ya que se ha adaptado para condiciones de regiones secas donde la oscilación diaria de la temperatura es mayor que la considerada originalmente en zonas húmedas donde se desarrolló este método.

La ecuación de Penman se presenta de acuerdo al estado real de la misma según las sugerencias y experiencias del personal técnico de la FAO que durante los últimos 10 años ha estado utilizando esta ecuación en el método de pronóstico de cosechas basado en datos agrometeorológicos, método que ha sido formulado por la División de Producción y Protección Vegetal de la FAO. (52)

La ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$ETp = (P1 \Delta Rn + P2 \gamma Ea) / (P1 \Delta + P2 \gamma)$$

donde, ETp es la Evapotranspiración Potencial en mm/día,  $\Delta$  es la pendiente de la curva de saturación para una determinada temperatura en mb/grado Celsius, P1 es la presión media al nivel del mar (1013 mb), Rn es la

radiación neta en mm/día,  $P_2$  es la presión media del lugar de interés en mb,  $\gamma$  es una constante psicrométrica y  $E_a$  es el poder evaporante del aire en mm/día. (11,40,52)

El valor de  $R_n$  (calorías/día) se obtiene de la siguiente manera:

$$R_n = (1-\alpha)R_s - \sigma T^4 (0.56 - 0.079 \frac{e}{d}^{0.5}) (0.1 + 0.9n/N)$$

donde,  $\alpha$  es el albedo o coeficiente de reflexión de la superficie (cuadro 21), algunos autores utilizan para cultivos agrícolas  $\alpha = 0.23$  y otros  $\alpha = 0.25$ .  $R_s = Q + q$ , es la radiación global, es decir, la suma de la radiación directa y la difusa (de onda corta) medida con el actinógrafo.  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $1.171 \times 10^{-7}$  cal/cm cuadrado/día).  $T$  es la temperatura del aire en grados Kelvin.  $e$  es la presión real del vapor (es decir, presión de saturación del vapor en el punto medio de rocío), en mb (cuadros 19 y 20).  $n$  es la duración real de la insolación y  $N$  es la duración máxima posible de la insolación (cuadro 14). (2,23,27,37,40,49,52)

Wright sugirió utilizar un albedo cambiante debido a efectos del ángulo solar. Su ecuación para albedo en un cultivo de alfalfa en Kimberly, Idaho es :

$$\alpha = 0.29 + 0.26 \text{Sen}(30(M + 0.0333N + 2.25))$$

donde,  $\text{Sen}$  es la función seno en grados,  $M$  es el mes y  $N$  el

día del mes. Esta ecuación proporciona valores de  $e$  igual a 0.23 y 0.29 para Junio 21 y Septiembre 21, respectivamente.  
(7)

Cuando  $R_s$  no es medida puede ser estimada como se vió en el método de Jensen-Haise.

Los valores de  $e$  también pueden ser obtenidos empleando las fórmulas vistas en el método de Doorenbos-Pruitt.

$\sigma T^4$ , la radiación del cuerpo negro, también está tabulado como una función de la temperatura, ver cuadro 33.  
(10)

Para representar  $R_n$  en equivalente de agua (mm/día) se hace la siguiente operación:

$$R_n \text{ (mm/día)} = R_n \text{ (Cal/día)}/59 \quad (52)$$

El valor de  $(P_1 \Delta)/(P_2 \gamma)$  fue tabulado por Frere y Popov (1980) como una función de la temperatura media y la altura sobre el nivel del mar como se reporta en el cuadro 34. (40)

Penman utilizó la pendiente  $\Delta$  de la relación de presión de vapor/temperatura, para eliminar de esas ecuaciones los parámetros difíciles de medir, dejando solo los que se pueden observar con facilidad, utilizando aparatos meteorológicos simples. (27,58)

El valor de  $\Delta$  puede ser obtenido como se vió en el método de Doorenbos-Pruitt.

El valor de  $E_a$  se obtiene de la siguiente manera:

$$E_a = 0.263(e_a - e_d)(1 + C U_2)$$

donde,  $E_a$  y  $e_d$  son parámetros ya mencionados anteriormente,  $e_a$  es la presión de saturación del vapor a la temperatura media del aire en mb,  $C$  es un coeficiente que depende de la oscilación diaria de la temperatura según el cuadro 35 y  $U_2$  es la velocidad media del viento a 2 m sobre el terreno en m/seg. (2, 11, 14, 16, 18, 22, 23, 24, 27, 40, 49, 52, 57, 58)

Las mediciones de velocidad del viento efectuadas a una altura diferente a los 2 m pueden corregirse como se vió en el método del tanque de evaporación.

La constante psicrométrica,  $\gamma$ , se maneja como se vió en el método de Hanks.

#### Evapotranspiración Real

La Evapotranspiración Real (ET<sub>r</sub>) para un cultivo agrícola dado bajo condiciones reales de suelo y clima se relaciona con la Evapotranspiración Potencial (ET<sub>p</sub>) diaria de la siguiente manera:

$$E_{Tr} = K_c \times E_{Tp} \quad (1,22,24,29,37,42)$$

donde,  $K_c$  es un coeficiente dimensional el cual presenta los efectos combinados de la resistencia del suelo al movimiento del agua en las diversas superficies de evaporación y la resistencia del agua a la difusión desde la superficie a la atmósfera, así como la cantidad de energía radiante disponible relacionada con el cultivo de referencia. Jensen define  $K_c$  como:

$$K_c = (R_n - G - H) / (R_{n0} - G_0 - H_0)$$

donde el subscripto "o" designa valores acordes al cultivo de referencia en los alrededores del cultivo en cuestión;  $G$  es la densidad del flujo de calor en el suelo y  $H$  es el flujo de calor sensible en el aire, vistos en el método de Hanks. (37)

En el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos se desarrolló un programa para computadora (Jensen-Heermann, 1970 y Jensen et. al. 1971). El coeficiente de cultivo es ajustado por disponibilidad de agua en el suelo y superficie húmeda de suelo de la siguiente manera:

$$K_c = K_a K_{co} + K_s \quad (29)$$

donde,  $K_a$  es el coeficiente relacionado con el porcentaje de agua disponible en el suelo,  $AM$ , y se expresa como:

$$K_a = \ln (AM+1) / \ln 101 \quad (37)$$

La expresión experimental de  $K_a$  propuesta por Kincaid y Heermann (1974) es :

$$K_a = (\text{Log}(1+100(1-(D_p/D_t))))/\text{Log}(101))$$

donde,  $D_p$  es el déficit de la humedad del suelo y  $D_t$  el volumen de agua total disponible en la zona radicular para capacidad de campo.

Obsérvese que si el suelo está a capacidad de campo, entonces:

$$K_a = (\text{Log}(1+100(1)))/(\text{Log}(101)) = 1.0 \quad (29)$$

donde,  $K_s$  es el incremento en el coeficiente cuando la superficie del suelo está húmeda debido a un riego o una lluvia y se expresa como:

$$K_s = (0.90 - K_c) m$$

en donde  $m=0.8$ ,  $0.5$  o  $0.3$  para el primer, segundo o tercer día después de un riego o lluvia fuerte, respectivamente. (29,37)

El coeficiente medio del cultivo,  $K_{co}$ , donde la humedad del suelo no es limitante y son empleados métodos de riego normal, varía con el tipo de cultivo. Para granos pequeños,  $K_{co}$ , está dada por:

$$K_{co} = 0.23 - 1.140P + 4.843P^2 - 2.893P^3$$

donde,  $P$  es la fracción de días desde la siembra hasta la formación de grano, después de formación de grano,  $K_{co}$  está dado por:

$$K_{co} = 1.02 + 8.532D - 7.260D^2 + 4.440D^3$$

en donde,  $D$  es el número de días posterior a formación de grano dividido entre 100. (37)

También, los valores de  $K_{co}$  se pueden tomar de datos publicados por Jensen (1973) ó bien se calibran en la región para obtener el coeficiente expresado como función polinomial de la fecha. En el primer caso, el cuadro 36 proporciona valores experimentales de  $K_{co}$  para algunos cultivos.

En el segundo caso,  $K_{co}$  puede ser expresado como:

$$K_{co} = Ar^3 + Br^2 + Cr + D$$

donde,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  son constantes. Antes de la cobertura efectiva,  $r$  es la fracción de tiempo desde la siembra hasta la fecha. Después de cobertura efectiva,  $r$  es el número de días después de que ocurrió.

Valores experimentales de los coeficientes están dados en el cuadro 37, tomado de Kincaid y Heermann (1974). (29)

Existen otros métodos para determinar  $K_c$  como lo son:

- a). Hargreaves.  $K_c = -0.01335 + 0.04099C - 0.000402C^2$
- b). Palacios.  $K_c = 0.1303 + 0.01092C + 0.0000168C^2 - 3.55 \times 10^{-7} C^2$
- c). Grassi.  $K_c = 0.04053 + 0.03089C - 0.000237C^2$
- d). Demmead y Shaw.  $K_c = 0.3469 - 0.00298C + 0.00038C^2 - 0.00000355C^3$

donde C nos representa la edad del cultivo expresada en por ciento. (40)

En los cuadros 38.a. a 38.i. se presentan valores de  $K_c$  en los que se tienen en cuenta las características del cultivo, el momento de la plantación o de la siembra y las fases del desarrollo vegetativo. También hay que tomar en consideración las condiciones climáticas generales, en especial el viento y la humedad, sobre todo porque, después de la temperatura, el viento es lo que más repercutirá en la tasa de transpiración debido al grado de turbulencia del aire sobre la superficie sombreada por el cultivo. Por otra parte, la tasa de transpiración es más alta cuando los vientos son secos, en comparación con los húmedos. (7)

En las curvas presentadas en las figuras 13 a 16 se proporcionan valores de  $K_c$  dados por Jensen y Haise (1963). Los valores para las etapas tempranas de desarrollo del cultivo, cuando existe solo una pequeña cantidad de

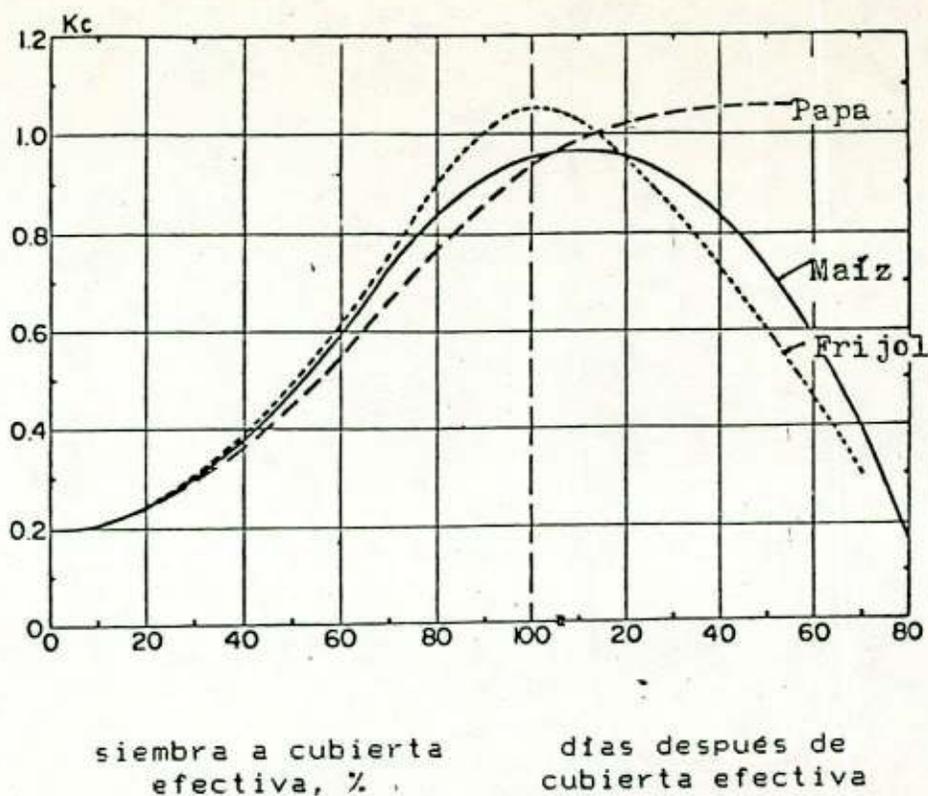


Figura 13. Coeficiente de cultivo para papa, maíz y frijol.

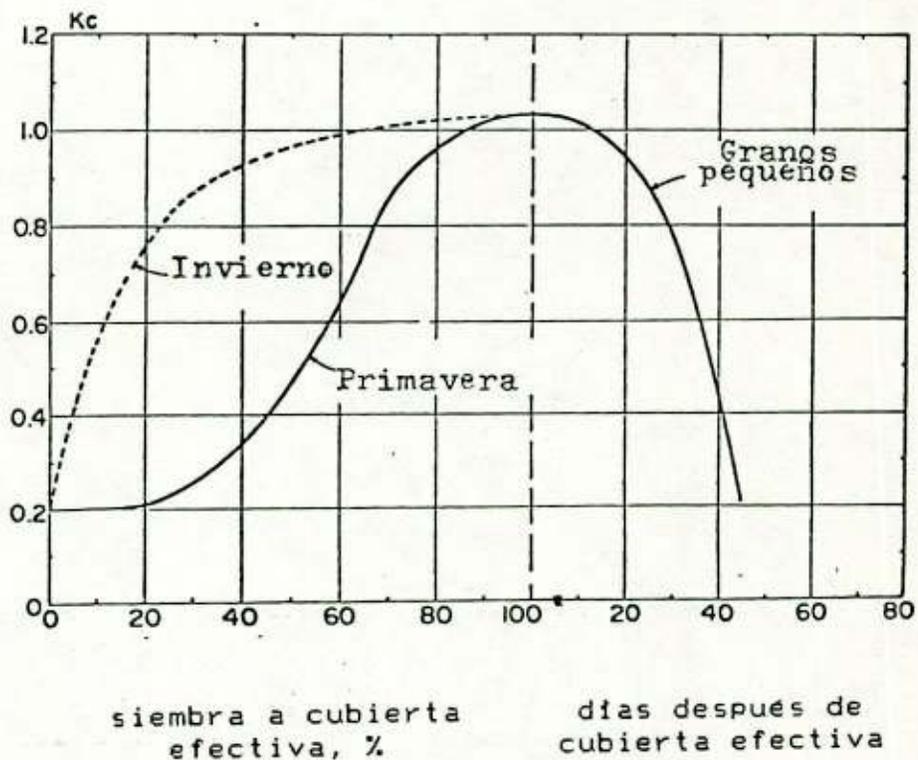


Figura 14. Coeficientes de cultivos para granos pequeños de invierno y primavera.

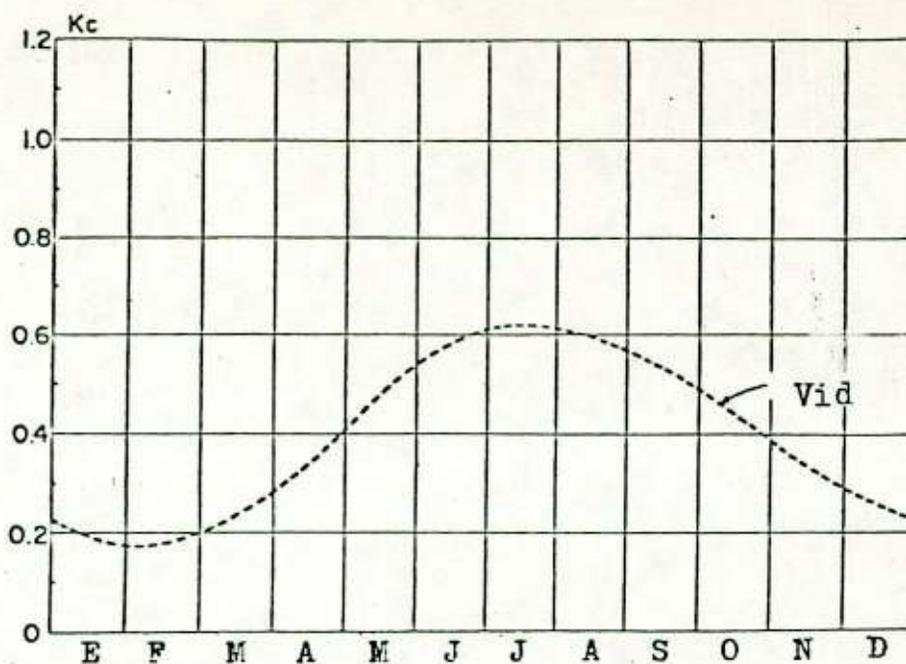


Figura 15. Coeficientes de cultivo para vid.

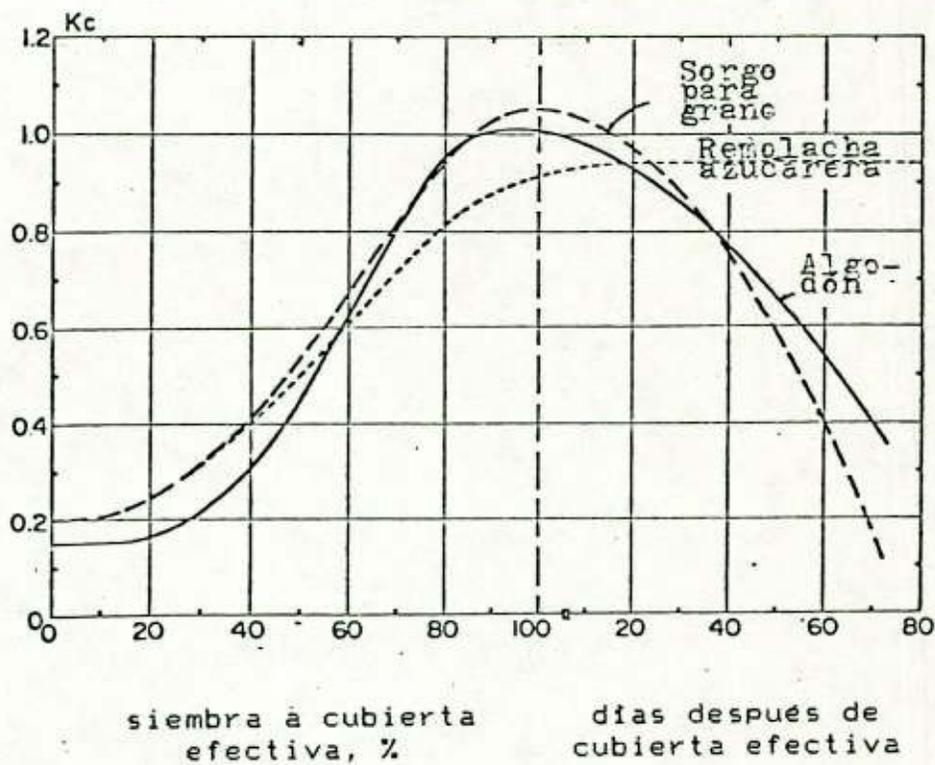


Figura 16. Coeficientes de cultivo para algodón, sorgo para grano y remolacha azucarera.

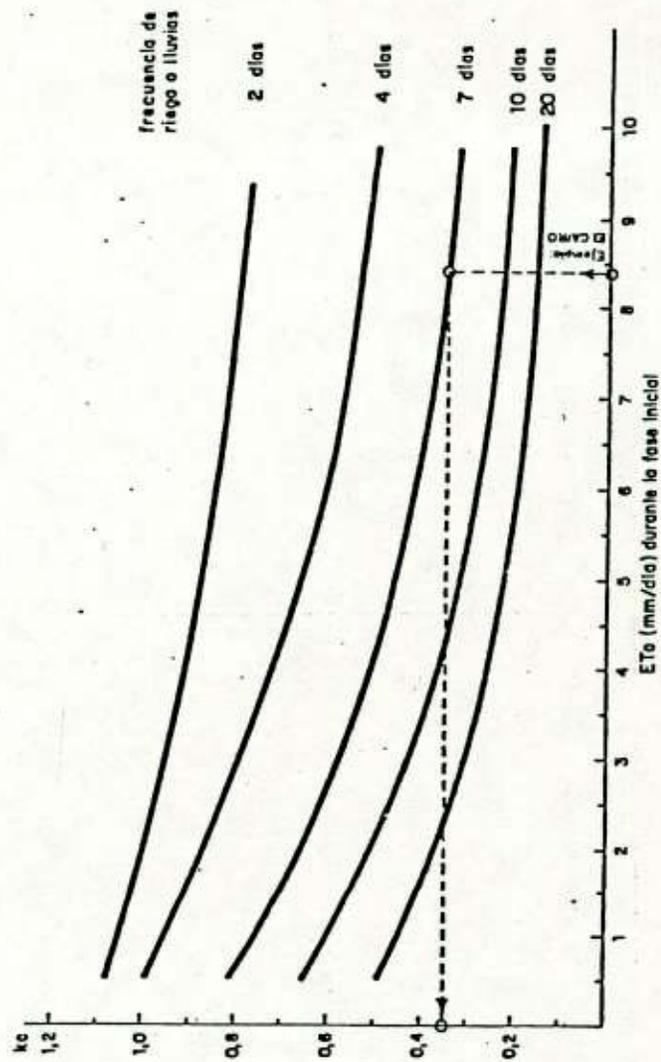


Figura 17.  $K_c$  medio en la fase inicial, en función del nivel medio de la ET (durante la fase inicial) y la frecuencia de riego o de unas lluvias apreciables.

de cubierta vegetal, puede ser mayor en áreas semihúmedas donde las lluvias frecuentes proporcionan un mayor contenido de humedad en el suelo y mayor evaporación. Las diferencias entre las curvas durante el periodo de desarrollo del área foliar no es grande y una simple curva puede ser adecuada si se hacen algunos ajustes en el rango completo de crecimiento. El cuadro 39 nos proporciona una lista de estos valores de Kc. (22)

#### TRIGO (Triticum aestivum, L.)

##### Importancia

El cultivo del trigo se extiende ampliamente en muchas partes del mundo, por su amplio rango de adaptación y por su gran consumo en muchos países de tal manera que en la actualidad ocupa el primer lugar entre los cereales de invierno de mayor producción mundial.

En las dos últimas décadas su distribución ha seguido extendiéndose debido a que se están generando nuevas variedades con alto potencial de rendimiento y principalmente a la mayor demanda de alimentos; por el aumento de la población mundial. (13,47)

##### Clasificación botánica

Reino ----- Vegetal  
 División ----- Tracheophyta  
 Subdivisión ----- Pteropsidae

Clase -----	Angiospermae	
Subclase -----	Monocotyledonae	
Grupo -----	Glumiflora	
Orden -----	Graminales	
Familia -----	Gramineae	
Género -----	Triticum	
Especie -----	aestivum	(13)

### Características botánicas

Las características botánicas de la planta de trigo han sido descritas por diversos autores (Clement, 1969; Robles, 1978 y Briggie, 1980). El trigo es una planta herbácea, autógena, anual y está compuesta por cuatro órganos principales: raíz, tallo, hoja y espiga.

El sistema radicular del trigo es de tipo fasciculado, de poco desarrollo y presenta dos tipos de raíz: Seminales y coronarias. Las raíces seminales se originan de la semilla y eventualmente se atrofian cuando se empieza a formar el nudo vital que da origen a los hijuelos y a las raíces coronarias, las cuales forman el sistema radicular permanente. El 55% del peso total del sistema radicular se localiza entre la capa de suelo de 0 a 25 cm, el 17.5% entre 25 y 50 cm, el 14.9% entre 50 y 75 cm y el 12% por debajo de 75 cm (Clement, 1969).

El tallo se empieza a diferenciar con la aparición del primer nudo, que es la indicación del inicio del encañado.

Es hueco, cilíndrico y presenta alrededor de seis nudos y entrenudos. Dependiendo de la longitud del tallo, los trigos son clasificados en enanos, semienanos y altos.

Las hojas se originan en los nudos y están compuestas principalmente por la vaina, el limbo, las aurículas, las ligulas y el cuello. Son lanceoladas, solitarias y presentan nervaduras paralelas. La longitud de la hoja varía entre 15 y 25 cm y entre 0.5 a 1.0 cm de ancho.

La espiga está formada por un eje principal llamado raquis, al cual se encuentran insertadas alrededor de 20-25 espiguillas. Cada espiguilla contiene varias flores y la fecundación ocurre antes de la apertura de la flor, formándose un fruto único llamado cariósipide o grano. El grano de trigo se encuentra constituido por el pericarpio, el endospermo y el germen. (36)

#### Condiciones ecológicas

El trigo se produce en regiones templadas y frías situadas desde unos 15 a 60 grados de latitud Norte y de 27 a 40 grados de latitud Sur, pero esto no quiere decir que no se pueda cultivar en otras regiones; esto es debido a la obtención de nuevas variedades que se adaptan a otras regiones o países.

En México se siembra trigo en casi todos los estados de la República y se adapta tanto a tierras pobres en

nutrientes, como a tierras ricas, zonas húmedas, semihúmedas y secas; bajo estas condiciones, en México se pueden considerar seis zonas importantes en la producción de trigo: zona noroeste del país, que abarca Sonora, Sinaloa y Baja California (Norte y Sur), cuya altura sobre el nivel del mar es de 0 a 150 metros; la zona de El Bajío, que incluye Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Michoacán y partes de San Luis Potosí cuya altura varía de 1 200 a 1 700 metros sobre el nivel del mar.

La región de la Laguna, que incluye parte de Coahuila y Durango y cuya altura es de 1 000 a 1 200 metros sobre el nivel del mar, zona norte que comprende los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, cuya altura es de 300 a 1 100 metros sobre el nivel del mar. Zona Centro, que abarca los estados de Aguascalientes, Zacatecas, Durango, San Luis Potosí, cuya altura es de 1 900 a 2 500 metros sobre el nivel del mar. Los valles altos de la Altiplanicie Mexicana, que integran los estados de México, Puebla, Hidalgo, Tlaxcala y Oaxaca, cuya altura es de 1 900 a 2 400 metros sobre el nivel del mar.

Las condiciones de temperatura varían considerablemente, pero las mejores temperaturas para una buena producción de trigo oscilan entre 10 y 25 grados Celsius bajo las condiciones de temperatura en regiones trigueras de México.

La influencia del fotoperiodo en el trigo, se manifiesta en que a mayor duración del día se acelera la floración, razón por la cual se dice que las plantas que se comportan de esa manera se les llama plantas de fotoperiodo largo (días largos) o plantas de noches cortas. En general, la reducción de la longitud del día atrasa la floración de las plantas de invierno (trigo).

#### Riegos.

La profundidad, estructura y textura del suelo tienen gran influencia en las necesidades de riegos para el trigo, o para cualquier cultivo. El agua disponible es menor en suelos de textura ligera que en suelos de textura mediana y pesada. Para producir los máximos rendimientos, los suelos poco profundos y los ligeros necesitan riegos más frecuentes que aquellos que tienen mayor profundidad y textura pesada. La estructura y textura del suelo también tienen influencia en la cantidad de agua que debe ser aplicada en cada riego. En suelos nivelados el agua se distribuye uniformemente y las plantas se desarrollan mejor. El tiempo en que deben hacerse los riegos es también muy importante, si se desean obtener rendimientos óptimos.

(47)

En la Costa de Hermosillo la lámina total empleada para el cultivo de trigo es de aproximadamente 60 cm. Ortiz (1977), estimó mediante el método gravimétrico que la

lámina real es de 51.8 cm lo cual corresponde a la necesidad de agua del cultivo (Evapotranspiración). (39)

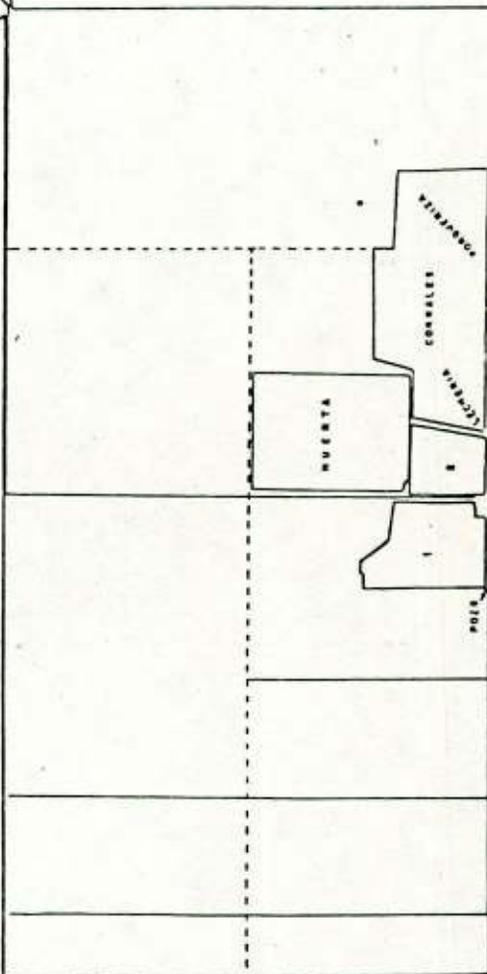
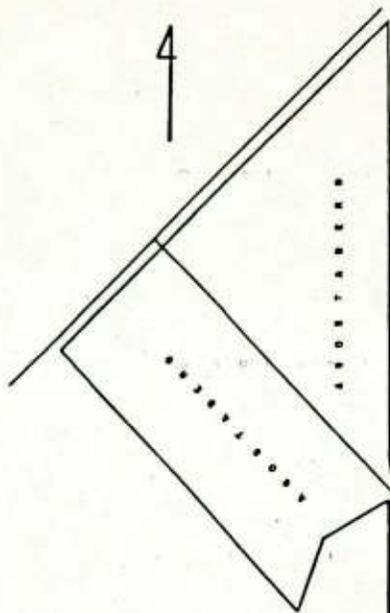
### III. MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se llevó a cabo en el campo experimental de la Escuela de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora, el cual se encuentra dentro del Distrito de Desarrollo Rural No.144 "Costa de Hermosillo". Dicho campo cuenta con una superficie de 246 hectáreas las cuales se encuentran distribuidas de la siguiente manera:

Zona urbana _____	18.00 Ha	___	7.32 %
Zona agricola _____	186.44 Ha	___	75.79 %
Área no explotada _____	41.56 Ha	___	16.89 %
	<u>246.00 Ha</u>		<u>100.00 %</u>

Como podemos observar, la zona agricola es la que cubre un mayor porcentaje, 75.79 %, por lo que se considera necesario realizar un estudio climatológico del lugar, mediante el cual podamos determinar la demanda de agua de los cultivos en base a los métodos existentes para el cálculo de la Evapotranspiración.

Para lograr dicho objetivo, se llevó a cabo un análisis de la información climatológica obtenida de la estación agroclimatológica "Campo Experimental UNISON", localizada dentro de dicho campo experimental (ver plano en la siguiente hoja) y se realizó un estudio de los diferentes métodos que existen en la determinación de la Evapotranspiración, para posteriormente aplicarla en el cultivo de trigo.



**SIMBOLOGIA:**

● ESTACION AGROCLIMATOLOGICA

ESCALA 1:16000

UNIVERSIDAD DE SONORA	
ESCUELA DE AGRI. Y GAN.	
LOCALIZACION DE LA ESTACION AGROCLIMATOLOGICA	
JESUS LOPEZ E	1987

OFICINA  
111 AULAS  
LABORATORIOS  
INVERNADEROS

ALMACEN  
121 OFICINA(CAMPO)  
FALLER

La estación mencionada presenta la siguiente ubicación:

Latitud:  $29^{\circ} 00' 52''$   
 Longitud:  $111^{\circ} 07' 56''$   
 Altitud: 149 M.S.N.M.  
 División: Sonora  
 Municipio: Hermosillo  
 Estado: Sonora

En la elaboración del presente trabajo se consideraron los 5.5 años que tiene en operación dicha estación (de Octubre de 1981 a Abril de 1987) tomándose en cuenta la temperatura, evaporación, precipitación, radiación solar y las horas-luz.

Los valores de temperatura media diaria se obtuvieron con el termómetro de extremas en la siguiente forma:

$$\bar{t}_i = (t_{i,\text{máx}} + t_{i,\text{mín}}) / 2$$

donde,  $\bar{t}_i$  es la temperatura media diaria para el día  $i$  en grados Celsius,  $t_{i,\text{máx}}$  es la temperatura máxima del día  $i$  en grados Celsius y  $t_{i,\text{mín}}$  es la temperatura mínima del día  $i$  en grados Celsius.

Los valores de evaporación diaria se obtuvieron del tanque de evaporación tipo A mediante la siguiente relación:

$$Ev_i = L_i - L_{i+1} + P_i$$

donde,  $Ev$  es la evaporación en mm,  $L$  es la lectura en el tanque en mm,  $i$  es el día considerado y  $P$  es la precipitación en mm.

Los valores de precipitación se obtuvieron directamente del pluviómetro mediante lecturas efectuadas en forma diaria a las 7 de la mañana.

Los valores de radiación solar diaria se obtuvieron planimetreando las gráficas obtenidas del piranógrafo Robitzsch.

Los valores de horas-luz diaria se obtuvieron leyendo las gráficas del Heliógrafo Campbell-Stokes.

Los promedios mensuales de la información anterior se obtuvieron mediante la siguiente fórmula:

$$\bar{X} = (1/n) \sum_{i=1}^n X_i$$

donde,  $\bar{X}$  es el valor medio mensual,  $X_i$  es el valor medio diario para el día  $i$  del mes y  $n$  es el número de días del mes.

En el caso de los promedios mensuales anuales de dicha información, sin incluir los de radiación solar y los de horas-luz, estos se obtuvieron con la siguiente fórmula:

$$\bar{X}_a = (1/m) \sum_{j=1}^m \bar{X}_j$$

donde,  $\bar{X}_a$  es el valor medio mensual anual,  $\bar{X}_j$  es el valor medio mensual para j año y m es el número de años considerados.

Las temperaturas medias máximas mensuales se obtuvieron de las temperaturas medias diarias de los meses considerados.

El total de las temperaturas máximas mensuales se obtuvieron sumando las temperaturas máximas registradas durante cada uno de los meses considerados.

La Costa de Hermosillo es una de las principales zonas agrícolas de México. El cultivo de trigo ocupa el primer lugar en cuanto a superficie sembrada.

El cultivo a manejar en el presente trabajo fué el trigo con fecha de siembra el 7 de Noviembre, mismo que presenta las siguientes características:

Variedad \_\_\_\_\_ Ciano T 79

Floración \_\_\_\_\_ 93 días

Madurez

fisiológica \_\_\_\_ 144 días  
Altura \_\_\_\_\_ 86 cm  
Fecha óptima  
de siembra \_\_\_\_ Nov.1 a Dic.1

De acuerdo a la información disponible en la estación agroclimatológica, los métodos empleados en la determinación de la Evapotranspiración fueron los siguientes:

1. Método del tanque de evaporación (Palacios).
2. Método del tanque de evaporación (Hargreaves).
3. Método del tanque de evaporación (Van Der Molen).
4. Método de Lowry-Johnson.
5. Método de Lowry-Johnson modificado.
6. Método de Thornthwaite.
7. Método de Jensen-Haise.
8. Método de Hargreaves.
9. Método de Caprio.
10. Método de García Benavides.
11. Método de García Benavides estimando la evaporación.
12. Método de Blaney-Criddle sin corregir.
13. Método de Blaney-Criddle con la corrección de Phelan.
14. Método de la curva de Hansen.
15. Método de Grassi-Christiansen.
16. Método de Penman simplificado.

#### IV. RESULTADOS

Los resultados del análisis climatológico de la información existente en la Estación Agroclimatológica "Campo Experimental UNISON" se presentan en los cuadros 40, 41, 42, 43, 44, 45 y 46. Así mismo, los resultados obtenidos en la aplicación de dicha información, en el cálculo de la Evapotranspiración del cultivo de trigo, se concentran en la Figura 18 y en el cuadro 63. Presentándose además, los cuadros del 47 al 62, los cuales contienen un análisis de cada uno de los métodos estudiados.

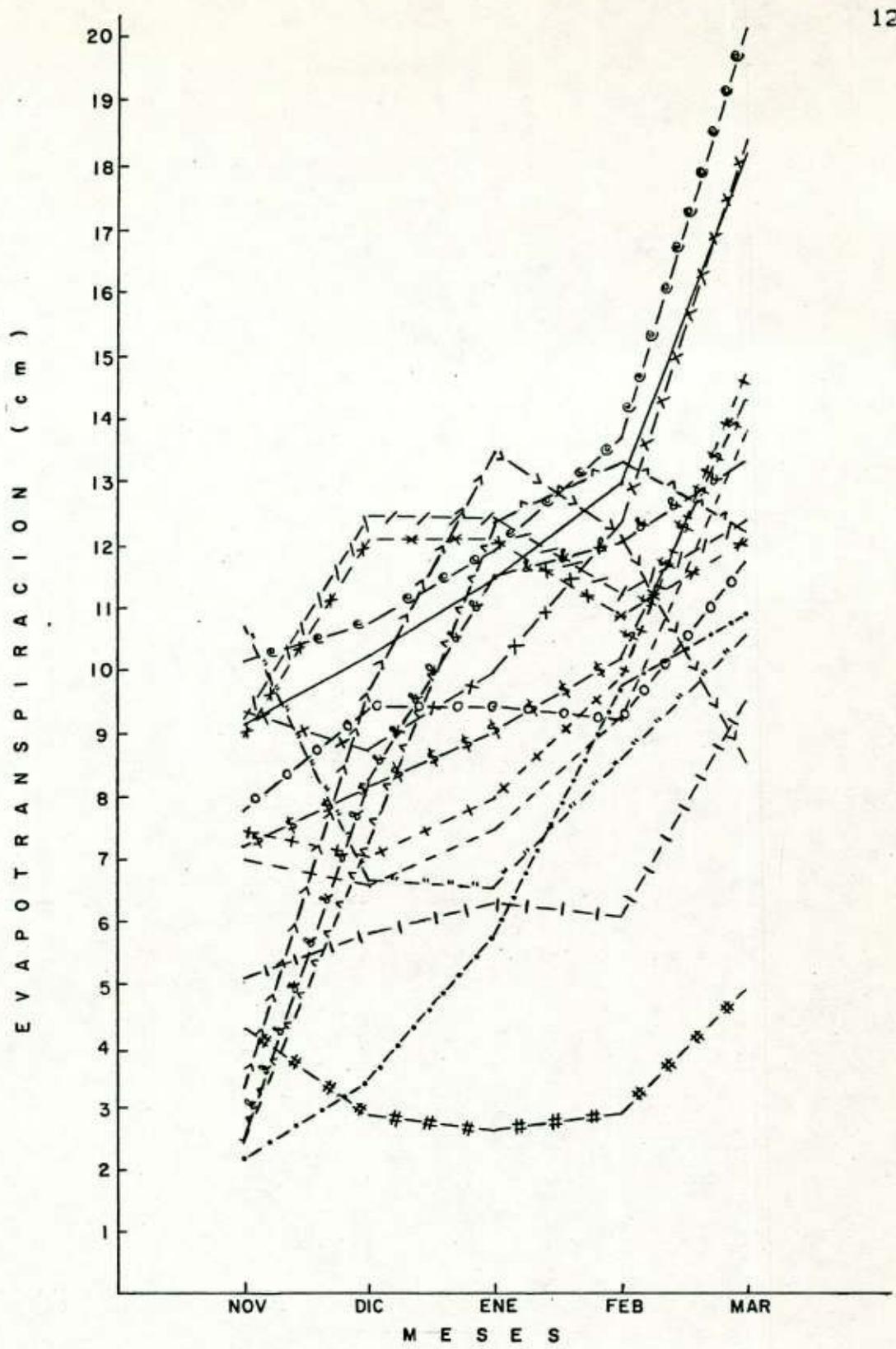


Figura 18. Gráfica que muestra los Resultados de los métodos utilizados en el cálculo de la Evapotranspiración del cultivo de trigo.

## INTERPRETACION DE LA FIGURA 18.

- — — Tanque de evaporación (Palacios).
- .—.— Tanque de evaporación (Hargreaves).
- X—X— Tanque de evaporación (Van Der Molen).
- /—/— Método de Lowry-Johnson.
- \*—\*— Método de Lowry-Johnson modificado.
- #—#— Método de Thornthwaite.
- @—@— Método de Jensen-Haise.
- Método de Hargreaves.
- \$—\$— Método de Caprio.
- +—+— Método de García Benavides (Ev a partir del tanque de evaporación).
- "—"— Método de García Benavides (Ev estimada).
- 0—0— Método de Blaney-Criddle.
- ^—^— Corrección de Phelan.
- >—>— Curva de Hansen.
- &—&— Método de Grassi-Christiansen.
- |—|— Método de Penman simplificado.

## V. CONCLUSIONES

En el cálculo de la Evapotranspiración se trabajó con información promedio mensual anual, por lo tanto, los resultados obtenidos vienen a ser en realidad una predicción de dicha Evapotranspiración. Para obtener el valor actual tenemos que trabajar con información diaria para el ciclo de desarrollo del cultivo estudiado, lo cual no es factible llevar a cabo en todos los métodos.

De acuerdo a los resultados podemos ver que existen variaciones en cuanto al valor obtenido de Evapotranspiración en los diferentes métodos, de donde podemos concluir que en virtud de que en la Costa de Hermosillo el valor obtenido por el método gravimétrico es de 51.8 cm, los métodos aquí estudiados que podemos emplear son: Caprio, Blaney-Criddle con la corrección de Phelan, Curva de Hansen, Grassi-Christiansen, Lowry-Johnson modificado y García Benavides (Ev del tanque de evaporación). Los demás métodos estudiados nos proporcionan valores superiores e inferiores, debido principalmente a que estos fueron desarrollados bajo condiciones climáticas y agronómicas diferentes a las que estamos manejando.

Cabe aclarar que los resultados obtenidos en el presente trabajo vienen a ser una primera estimación de la Evapotranspiración. Los métodos que emplean solo parámetros

climáticos, sin involucrar al cultivo, nos proporcionan valores de Evapotranspiración Potencial, los cuales deberán ser ajustados mediante ciertos coeficientes (por ejemplo los presentados en el cuadro 64) para con ello obtener la Evapotranspiración real del cultivo. En los cuadros 65,66,67 y 68 podemos ver la aplicación de coeficientes  $K_c$  en el método del tanque de evaporación propuesto por Palacios y en los cuadros 69,70,71 y 72 su aplicación en el método de Caprio, para obtener la Evapotranspiración Real.

## VI. RECOMENDACIONES.

Se recomienda seguir este tipo de estudios, tomando en cuenta un mayor número de variables climáticas como: Humedad relativa, presión atmosférica, velocidad del viento, temperatura en el psicrómetro y temperatura en la superficie de evaporación; las cuales, al igual que las variables manejadas en este trabajo, es necesario que sean medidas con una exactitud suficiente a lo largo de un cierto número de años y en forma ininterrumpida.

Por otra parte, es conveniente recalibrar estas formulas, en la región en que se emplee, mediante los métodos directos.

En todos los cálculos de Evapotranspiración no se tomó en cuenta la precipitación, sin embargo cuando se trate de hacer un cálculo de lámina de riego es necesario tomarla en consideración.

## VII. LITERATURA CITADA

- 1.- Aguilera, M. y R. Martínez. 1980. Relaciones Agua-Suelo-Planta-Atmósfera. México. Universidad Autónoma de Chapingo. 321 PP.
- 2.- Allen, R.G. 1986. A Penman for all seasons. Journal of Irrigation and Drainage Engineering (U.S.A.). 112(4):348-368.
- 3.- Allen, R.G. and W.O. Pruitt. 1986. Relation use of the FAO Blaney-Criddle formula. Journal of Irrigation and Drainage Engineering (U.S.A.). 112(2):139-155.
- 4.- Anderson, R.L. and A. Maass. 1974. A simulation of Irrigation systems; income on irrigated farms. U.S. Department of Agriculture Economic Research Service in cooperation with John Fitzgerald Kennedy School of Government, Harvard University (U.S.A.). 69 PP.
- 5.- Arkley, R.J. and R. Ulrich. 1961. Climatic limitations on plant growth evaluated by balancing soil moisture against evaporation and transpiration. California Agriculture (U.S.A.). 15(1):4-6.
- 6.- Daubenmire, R.F. 1982. Plants and environment; A textbook of autoecology. Trad. por Gabriela Berrondo de Benavides. México. Limusa. 496 PP.
- 7.- Doorenbos, J. y W.O. Pruitt. 1980. Las necesidades de agua de los cultivos. FAO: Riego y Drenaje. Roma. 194 PP.
- 8.- Eric, L.J.; O.F. French and K. Harris. 1968. Consumptive use of water by crops in Arizona. The University of Arizona. Technical Bulletin 169. U.S.A. 46 PP.
- 9.- Fernández, R. 1983. El agua en el sistema suelo planta atmósfera. Apuntes del curso HID-601 del Colegio de Postgraduados. Centro de Hidrociencias, Chapingo México.
- 10.- Food and Agriculture Organization of the United Nations / United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Inglaterra. 1973. Irrigation, Drainage and Salinity. 510 PP.
- 11.- Frère, M. y G.F. Popov. 1986. Pronóstico agrometeorológico del rendimiento de los

cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 194 PP.

- 12.- Frevest, K. et al. 1955. Soil and water conservation engineering. U.S.A. John Willey & Sons, Inc. 479 PP.
- 13.- Fu Castillo, A.A. 1986. Determinación de las dosis óptimas de fertilización nitrófosfórica del trigo (Triticum aestivum, L.) bajo los sistemas de producción de grano y producción de forraje y grano, es Sahuaripa, Sonora. Escuela de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora. 81 PP. (Tesis mimeografiada)
- 14.- Gavande, S.A. 1979. Física de suelos; principios y aplicaciones. México. Limusa. 351 PP.
- 15.- Goldberg, S.D.; B. Gornat and D. Sadan. 1967. Relation between water consumption of peanuts and class A pan evaporation during the growing season. Soil Science. U.S.A. 104(4):308.
- 16.- Griffiths, J.F. 1985. Applied climatology. Trad por Gaudencio Flores Mata. México. Publicaciones Cultural. 154 PP.
- 17.- Hargreaves, G.H. 1974. Moisture availability and crop production. Utah State University. Departament of Agricultural and Irrigation Engineering Logan, Utah. U.S.A. 16 PP.
- 18.- Hashemi, F. and J.F. Gerber. 1967. Estimating evapotranspiration from citrus orchard with weather data. Horticultural Science. U.S.A. 91:173-179.
- 19.- Henderson, D.C. and E.F. Sorensen. 1968. Consumptive irrigation requirement of selected irrigated areas in New Mexico. New Mexico State University. Agricultural Experiment Station (U.S.A.). 531: 55 PP.
- 20.- Hoare, E.R.; K.V. Garzoli and J. Blackwell. 1974. Plant water requirements as related to trickle irrigation. Proceedings of the Second International Drip Irrigation Congress. San Diego, Calif. U.S.A. pp 323-328.
- 21.- Houk, I.E. 1957. Agricultural and hidrological phases, Irrigation, Engineering (U.S.A.) I. John Wiley & Sons, Inc. 545 PP.

- 22.- Irrigation Association. U.S.A. 1977. Sprinkler irrigation. 615 PP.
- 23.- Israelsen, O.W. y V.E. Hansen. 1979. Principios y aplicaciones del riego, 2ed. España. Reverte, S.A. 396 PP.
- 24.- Kijne, J.W. 1978. Determinación de la evaporación. Principios y aplicaciones del drenaje. International Institute for Land Reclamation and Improvement (Holanda). 3(16):60-121.
- 25.- Kramer, P.J. 1974. Plant and soil water relationships. Trad. por Leonor Tejeda. México, EDUTAMEX, S.A. 538 PP.
- 26.- Linsley, R.K.; M.A. Kohler and J.H. Paulhus. 1977. Hidrology for engineers. Trad. por Alejandro Deeb, Jaime I. Ordoñez y Fabio Castrillon. 2ed. México. McGraw Hill. 386 PP.
- 27.- Maldonado, A. 1964. El método teórico de Penmann para cálculo de la evapotranspiración potencial. Ingeniería hidráulica en México. Secretaría de Recursos Hidráulicos. México. 18(1-2):50-59.
- 28.- Mather, J.R. 1977. Work in applied climatology. C.W. Thornthwaite Associates. Laboratory of Climatology. U.S.A. 30(1):1-107.
- 29.- México. Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego (CENAMAR). 1980. Apuntes de relación agua-suelo-planta-atmósfera.
- 30.- México. Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1968. Necesidades de agua de los cultivos y eficiencia en el riego. Memorandum Técnico No.260. 25 PP.
- 31.- México. Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1969. Usos consuntivos de cultivos de mayor importancia. Memorandum Técnico No.274. 99 PP.
- 32.- México. Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). 1969. Weather factors that influence water requirements of crops. Trad. por José Luis de la Loma. Memorandum Técnico No.267. 31 PP.
- 33.- México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1978. Cálculo del clima de acuerdo al segundo sistema de Thornthwaite. 2ed. publicación No.7.

- 34.- Mischenko, Z.A. 1984. Agroclimatic mapping of the continents. World Meteorological Organization. CAGM Report No.23. Geneva, Switzerland. 109 PP.
- 35.- Mojarro, F. y E. Palacios. 1979. Ajuste de las funciones de Jensen-Haise, Horton y Norero para la estimación de la evapotranspiración. México. Agrociencia. Rama de Riego y Drenaje. pp 77-87.
- 36.- Murrieta B., F. 1985. Influencia de los factores climáticos sobre el desarrollo y producción del trigo (*Triticum aestivum*, L.), y su manejo en siembras tardías en el Valle de Mexicali, B.C. Escuela de Agricultura y Ganadería de la Universidad de Sonora. 118 PP. (Tesis mimeografiada)
- 37.- Neghassi, H.M. 1974. Crop water use and yield models with limited soil water. Colorado State University. Technical Report No.32. 119 PP.
- 38.- Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza. 1982. Guía de prácticas agrometeorológicas. OMM-No.134.
- 39.- Ortiz M., J. 1977. Estudio del régimen hidrico en relación con la Evapotranspiración de cuatro variedades de trigo. Centro de Investigaciones Agrícolas del Noroeste (CIANO). Hermosillo, Sonora. México.
- 40.- Ortiz S., C.A. 1984. Elementos de Agrometeorología. México. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de suelos. 235 PP.
- 41.- Palacios V., E. 1966. Cuánto, cuándo y cómo regar. México. Ingeniería Hidráulica en México. Secretaria de Recursos Hidráulicos. 20(1):1-143.
- 42.- Peña, Ildelfonso de la. 1978. El buen uso y manejo del agua de riego. México. Boletín Técnico No.8 del Comité Directivo del Distrito de Riego No.41. SARH. 113 PP.
- 43.- Pruitt, W.O.; F.J. Lourence and S. Von Oettingen. 1972. Water use by crops as affected by climate and plant factors. California Agriculture (U.S.A.). 26(10):10-16.
- 44.- Robertson, G.W. 1980. The role of agrometeorology in agricultural development and investment projects. World Meteorological Organization. Technical Note No.168. Switzerland. 85 PP.

- 45.- Robertson, G.W. 1983. Guidelines on crop-weather models. World Meteorological Organization. WCP-50. Switzerland. 115 PP.
- 46.- Robertson, G.W. 1983. Weather-based mathematical models for estimating development and ripening of crops. World Meteorological Organization. CAGM Report No.15. Switzerland. 115 PP.
- 47.- Robles S., R. 1983. Producción de granos y forrajes. 4ed. México. Limusa. 608 PP.
- 48.- Rodríguez S., F. 1982. Riego por goteo. México. EGTEEDITOR, S.A. 158 PP.
- 49.- Rondon, F.F. 1972. Estimation of irrigation requirement for Venezuela. Utah State University. 113 PP. (Thesis M.S.)
- 50.- Springall G., R. 1970. Hidrología I. México. Instituto de Ingeniería de la UNAM. 210 PP.
- 51.- Torres R., E. 1981. Manual de conservación de suelos agrícolas. México. DIANA. 164 PP.
- 52.- Torres R., E. 1984. Agrometeorología. México. DIANA. 150 PP.
- 53.- Tosso, J. 1972. Analisis of Chilean meteorological data to estimate evapotranspiration and irrigation requirements. Utah State University. 110 PP. (Thesis of M.S.)
- 54.- Unites States Departament of Agriculture. 1955. Water. Year Book of Agriculture. Washington, D.C. 751 PP.
- 55.- United States Departament of Agriculture. 1973. Linear theory of hydrologic systems. Technical Bulletin No.1468. U.S.A. 327 PP.
- 56.- Vega G., J.D. 1982. Uso y manejo del agua. 2ed. México. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. 334 PP.
- 57.- Wierenga, P.J. 1981. Soil-Water Relations. Apuntes de Doctorado. U.S.A.
- 58.- Winter, E.J. 1979. El agua, el suelo y la planta. México. DIANA. 222 PP.
- 59.- Withers, B. y S. Vipond. 1978. Irrigation: Design and practice. Trad. por Agustín Contin. México.

DIANA. 350 PP.

- 60.- World Meteorological Organization. 1983. Guide to meteorological instruments and methods of observatrion. 5th. edition. WMO No.8. Switzerland.
- 61.- World Meteorological Organization. 1984. Glosary of terms used in agrometeorology (provisional simplified edition). CAgM Report No.21. Switzerland. 134 PP.
- 62.- Zimmerman, J.D. 1981. Irrigation. Trad. por Guillermo A. Fernández de Lara. México. CECSA. 604 PP.

# APENDICE

Cuadro 1. fórmulas para estimar las necesidades de agua de los cultivos.

Formula de:	Parámetros
Hedke (1928)	calor disponible.
Rohwer (1931)	temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, factor - del suelo, presión.
Lowry-Johnson (1942)	temperatura, factor de corrección.
Blaney-Morin (1942)	temperatura, humedad relativa, duración del día.
Thornthwaite (1948)	temperatura, latitud.
Penman (1948-1956)	temperatura, humedad relativa, radiación, velocidad del viento.
Prescott (1949)	temperatura, humedad relativa, termómetro seco y húmedo, factor de corrección.
Skvorstov (1950)	termómetro seco y húmedo, duración del día, factor de corrección.
Blaney-Criddle (1950)	temperatura, porcentaje de horas luz.
Halstead (1951)	temperatura, humedad relativa, termómetro seco y húmedo.
Sverdrup (1952)	temperatura, velocidad del viento, presión, factor de corrección.
Haude (1952)	termómetro seco y húmedo, factor de corrección.
Turc (1953)	temperatura, radiación, factor de cultivo, factor de suelo, precipitación.
Turc-Langbein (1954)	temperatura, precipitación.
Tuc (1954)	temperatura, humedad relativa,

Cuadro 1. Continuación

---

	duración del día, horas de insolación/nubosidad.
Halkais (1955)	temperatura, factor de corrección.
Thornthwaite (1955)	temperatura, factor de corrección.
Hargreaves (1956)	temperatura, humedad relativa, duración del día, factor del cultivo.
Van Bavel (1956)	temperatura, duración del día, horas de insolación/nubosidad, factor de corrección.
Maakkink (1957)	temperatura, radiación.
Ivanov (1957)	temperatura, humedad relativa.
Rijtema (1957)	temperatura, humedad relativa, radiación, velocidad del viento, datos de los cultivos.
Monson (1960)	temperatura, termómetro seco y húmedo, radiación, velocidad del viento, factor de cultivo, factor de corrección.
Olivier (1961)	termómetro seco y húmedo, radiación, factor de suelo y precipitación.
McIlory (1961)	temperatura, humedad relativa, radiación, velocidad del viento, factor de cultivo.
Jensen-Haise (1963)	radiación solar, temperatura, factor de cultivo.
Grassi-Christiansen (1964)	temperatura, radiación, nubosidad.
Blaney-Criddle (1964)	temperatura, horas luz, factor de cultivo.
Brutsaert (1965)	evaporación.

---

Cuadro 1. Continuación

Hargreaves (1966)	temperatura, altitud, humedad relativa, viento, horas luz.
Christiansen (1966)	temperatura, humedad relativa, radiación, horas de insolación/nubosidad, velocidad del viento, factor de corrección.
Linacre (1967)	temperatura, humedad relativa, duración del día, horas de insolación/nubosidad, radiación, velocidad del viento, datos de los cultivos.
Penman <<combinado>> (1970)	temperatura, radiación, viento
Hargreaves (1971)	temperatura, radiación, humedad relativa, altitud, velocidad del viento.
García-López (1972)	temperatura, humedad relativa.
Norero (1976)	evaporación, precipitación.
Bouchet (s.f.)	temperatura, humedad relativa, evaporación, factor de corrección.
Darov (s.f.)	temperatura, factor de corrección.
Kostiakov (s.f.)	temperatura, humedad relativa, factor de corrección.
Walker (s.f.)	temperatura, horas de insolación/nubosidad, factor de corrección.
Thornthwaite-Mather	temperatura, factor de suelo, factor de corrección, precipitación.

Cuadro 2. Coeficiente C. en el caso de una cubeta de la clase A. para diferentes cubiertas y niveles de humedad relativa media y vientos durante las 24 horas.

Cubeta Clase A	Caso A Cubeta rodeada de cubierta verde baja			Caso B * Cubeta con barbecho de secano				
	HR media %	baja <40	media 40-70	alta >70	baja <40	media 40-70	alta >70	
Vientos km/día	Distancia a barlovento de la cubierta verde (en m)				Distancia a barlovento del barbecho de secano (en m)			
Débiles < 175	0	0.55	0.65	0.75	0	0.70	0.80	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.70	0.80	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1 000	0.75	0.85	0.85	1 000	0.50	0.60	0.70
Moderados 175-425	0	0.50	0.60	0.65	0	0.65	0.75	0.80
	10	0.60	0.70	0.75	10	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	100	0.50	0.60	0.65
	1 000	0.70	0.80	0.80	1 000	0.45	0.55	0.60
Fuertes 425-700	0	0.45	0.50	0.60	0	0.60	0.65	0.70
	10	0.55	0.60	0.65	10	0.50	0.55	0.65
	100	0.60	0.65	0.70	100	0.45	0.50	0.60
	1 000	0.65	0.70	0.75	1 000	0.40	0.45	0.65
muy fuertes > 100	0	0.40	0.45	0.50	0	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.55	0.60	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	100	0.40	0.45	0.50
	1 000	0.55	0.60	0.65	1 000	0.35	0.40	0.45

\* En el caso de superficies extensas de barbecho desnudo y con un desarrollo agrícola nulo, se deben reducir los valores de C en un 20% en condiciones de mucho calor y vientos fuertes y en un 5-10% tratándose de una temperatura, una humedad y unos vientos moderados.

Cuadro 3. Valores del factor C

Cultivo	Húmedo			Arido o semiárido		
	templado		tropical	superficie extensa		superficie pequeña (menor de 1 ha.)
	invierno	verano		invierno	verano	
Húmedo, desde una lluvia o riego	0.9	1.0	1.0	1.0	1.2	1.5
Césped de poca altura	0.7	0.8	0.8	0.8	1.0	1.2
Cultivo de bastante altura (trigo, caña de azúcar)	0.8	1.0	1.0	1.0	1.2	1.5
Arroz	1.0	1.0	1.2	1.0	1.3	1.6

Cuadro 4. Relaciones de evaporación de cultivo/tanque

	Porcentaje de la temporada de cultivo										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Alfalfa	0.55	0.60	0.70	0.80	0.90	0.95	0.95	0.95	0.90	0.80	0.65
Frijoles	0.20	0.30	0.40	0.65	0.85	0.90	0.90	0.80	0.60	0.35	0.20
Cítricos y aguacates	0.50	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50	0.55	0.60	0.55	0.50
Maíz	0.20	0.30	0.50	0.65	0.80	0.90	0.90	0.85	0.75	0.60	0.50
Algodón	0.10	0.20	0.40	0.55	0.75	0.90	0.90	0.85	0.75	0.55	0.35
Frutales de hoja caduca	0.20	0.30	0.50	0.65	0.70	0.75	0.70	0.60	0.50	0.40	0.20
Frutales con cubierta	Promedios de aproximadamente 1.00 para periodos de crecimiento rápido del cultivo de cubierta										
Sorgo para grano	0.20	0.35	0.55	0.75	0.85	0.90	0.85	0.70	0.60	0.35	0.15
Cereales, primavera	0.15	0.20	0.25	0.30	0.40	0.55	0.75	0.85	0.90	0.90	0.30
Cereales, invierno	0.15	0.25	0.35	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.90	0.30
Vid	0.15	0.15	0.20	0.35	0.45	0.55	0.55	0.45	0.35	0.25	0.20
Trébol ladino	Promedio de aprox. 0.95 para el crecimiento máximo										
Nogales	0.30	0.35	0.55	0.70	0.75	0.75	0.75	0.65	0.55	0.30	0.15
Pacanas	0.35	0.45	0.55	0.75	0.75	0.65	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cacahuates	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55	0.60	0.65	0.65	0.60	0.45	0.30
Papas	0.20	0.35	0.45	0.65	0.80	0.90	0.95	0.95	0.95	0.90	0.90
Arroz	0.80	0.95	1.05	1.15	1.20	1.30	1.30	1.20	1.10	1.90	1.50
Remolacha azucarera	0.25	0.45	0.60	0.70	0.80	0.85	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Café de azúcar	Varía de 0.55 a 1.00, dependiendo del índice y la etapa del crecimiento										
Verduras de raíces profundas	0.20	0.20	0.25	0.35	0.50	0.65	0.70	0.60	0.45	0.35	0.20
Verduras de raíces poco profundas	0.10	0.20	0.40	0.50	0.60	0.60	0.60	0.55	0.45	0.35	0.30

\* Coeficientes, k, que deben multiplicarse por la evaporación

Cuadro 5. Factores de corrección para la velocidad del viento a diferentes alturas

---

Altura de la medición (m)	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	10.0
---------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

---

Factor de corrección	1.35	1.15	1.06	1.00	0.93	0.88	0.85	0.83	0.77
-------------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

---

Cuadro 6. Coeficientes K de uso consuntivo reportados por Blaney y Criddle

Cultivo	Período de crecimiento	Coefficiente Global (Kg)
Aguacate	Todo el año	0.50 a 0.55
Ajonjolí	3 a 4 meses	0.80
Alfalfa	Entre heladas	0.80 a 0.85
	En invierno	0.60
Algodón	6 a 7 meses	0.60 a 0.65
Arroz	3 a 5 meses	1.00 a 1.20
Cacahuate	5 meses	0.60 a 0.65
Cacao	Todo en año	0.75 a 0.80
Café	Todo el año	0.75 a 0.80
Camote	5 a 6 meses	0.60
Caña de azúcar	Todo el año	0.75 a 0.90
Cártamo	5 a 8 meses	0.55 a 0.65
Cereales de granos pequeños (Alpiste, Avena, Cebada, Centeno, Trigo)	3 a 5 meses	0.75 a 0.85
Cítricos	7 a 8 meses	0.50 a 0.65
Chile	3 a 4 meses	0.60
Espárrago	6 a 7 meses	0.60
Fresa	Todo el año	0.45 a 0.60
Frijol	3 a 4 meses	0.60 a 0.70
Frutales de hueso y pepita (hoja caduca)	Entre heladas	0.60 a 0.70
Frutales establecidos de climas tropicales y subtropicales	Todo el año	$0.75E_v + 0.80E_v$
		$2 \sum f$

En donde:

$E_v$  es la evaporación  
en el tanque tipo A.

$f$  es el factor de  
luminosidad y tem-  
peratura.

Cuadro 6. Continuación

Cultivo	Periodo de Crecimiento	Coficiente Global (Kg)
Garbanzo	4 a 5 meses	0.60 a 0.70
Girasol	4 meses	0.50 a 0.65
Gladiola	3 a 4 meses	0.60
Haba	4 a 5 meses	0.60 a 0.70
Hortalizas	2 a 4 meses	0.60
Jitomate	4 meses	0.70
Lechuga y Col	3 meses	0.70
Lenteja	4 meses	0.60 a 0.70
Lino	7 a 8 meses	0.70 a 0.80
Maiz	4 a 7 meses	0.75 a 0.85
Mango	Todo el año	0.75 a 0.80
Melón	3 a 4 meses	0.60
Nogal	Entre heladas	0.70
Papa	3 a 5 meses	0.65 a 0.75
Palma datilera	Todo el año	0.65 a 0.80
Palma de coco	Todo el año	0.80 a 0.90
Papaya	Todo el año	0.60 a 0.80
Plátano	Todo el año	0.80 a 1.00
Pastos de gramíneas	Todo el año	0.75
Pastos de trébol ladina	Todo el año	0.80 a 0.85
Remolacha	6 meses	0.65 a 0.75
Sandía	3 a 4 meses	0.60
Sorqo	3 a 5 meses	0.70
Soya	3 a 5 meses	0.60 a 0.70
Tabaco	4 a 5 meses	0.70 a 0.80
Tomate	4 a 5 meses	0.70
Zanahoria	2 a 4 meses	0.60

Nota: Los valores pequeños son para regiones costeras y los valores mayores para regiones áridas

Cuadro 7. Presión saturante del vapor sobre el agua, e, en milibares, como función de T °C.

$t$	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	6.11	6.15	6.20	6.24	6.29	6.33	6.38	6.43	6.47	6.52
1	6.57	6.61	6.66	6.71	6.76	6.81	6.86	6.90	6.95	7.00
2	7.05	7.11	7.16	7.21	7.26	7.31	7.36	7.42	7.47	7.52
3	7.58	7.63	7.68	7.74	7.79	7.85	7.90	7.96	8.02	8.07
4	8.13	8.19	8.24	8.30	8.36	8.42	8.48	8.54	8.60	8.66
5	8.72	8.78	8.84	8.90	8.97	9.03	9.09	9.15	9.22	9.28
6	9.25	9.41	9.48	9.54	9.61	9.67	9.74	9.81	9.88	9.94
7	10.01	10.08	10.15	10.22	10.29	10.36	10.43	10.51	10.58	10.65
8	10.72	10.80	10.87	10.94	11.02	11.09	11.17	11.24	11.32	11.40
9	11.47	11.55	11.63	11.71	11.79	11.87	11.95	12.03	12.11	12.19
10	12.27	12.36	12.44	12.52	12.61	12.69	12.78	12.86	12.95	13.03
11	13.12	13.21	13.30	13.38	13.47	13.56	13.65	13.74	13.83	13.93
12	14.02	14.11	14.20	14.30	14.39	14.49	14.58	14.68	14.77	14.87
13	14.97	15.07	15.17	15.27	15.37	15.47	15.57	15.67	15.77	15.87
14	15.98	16.08	16.19	16.29	16.40	16.50	16.61	16.72	16.83	16.94
15	17.04	17.15	17.26	17.38	17.49	17.60	17.71	17.83	17.94	18.06
16	18.17	18.29	18.41	18.53	18.64	18.76	18.88	19.00	19.12	19.25
17	19.37	19.49	19.61	19.74	19.86	19.99	20.12	20.24	20.37	20.50
18	20.63	20.76	20.89	21.02	21.16	21.29	21.42	21.56	21.69	21.83
19	21.96	22.10	22.24	22.38	22.52	22.66	22.80	22.94	23.09	23.23
20	23.37	23.52	23.66	23.81	23.96	24.11	24.26	24.41	24.56	24.71
21	24.86	25.01	25.17	25.32	25.48	25.64	25.79	25.95	26.11	26.27
22	26.43	26.59	26.75	26.92	27.08	27.25	27.41	27.58	27.75	27.92
23	28.09	28.26	28.42	28.60	28.77	28.95	29.12	29.30	29.48	29.65
24	29.83	30.01	30.19	30.37	30.56	30.74	30.92	31.11	31.30	31.48
25	31.67	31.86	32.05	32.24	32.43	32.63	32.82	33.02	33.21	33.41
26	33.61	33.81	34.01	34.21	34.41	34.62	34.82	35.03	35.23	35.44
27	35.65	35.86	36.07	36.28	36.50	36.71	36.92	37.14	37.36	37.58
28	37.80	38.02	38.24	38.46	38.69	38.91	39.14	39.37	39.59	39.82
29	40.06	40.29	40.52	40.76	40.99	41.23	41.47	41.71	41.95	42.19
30	42.43	42.67	42.92	43.17	43.41	43.66	43.91	44.17	44.42	44.67
31	44.93	45.18	45.44	45.70	45.96	46.22	46.49	46.75	47.02	47.28
32	47.55	47.82	48.09	48.36	48.64	48.91	49.19	49.47	49.75	50.03
33	50.31	50.59	50.87	51.16	51.45	51.74	52.03	52.32	52.61	52.90
34	53.20	53.50	53.80	54.10	54.40	54.70	55.00	55.31	55.62	55.93
35	56.24	56.55	56.86	57.18	57.49	57.81	58.13	58.45	58.77	59.10

$$* e = 6.11 \times 10 \exp.n$$

a

$$n = (7.5 t) / (237.3 + t)$$

Cuadro 8. Porcentaje de horas luz en el día para cada mes del año en relación al número total en un año.

Latitud Norte (grados)												
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
15'	7.94	7.37	8.44	8.45	8.98	8.80	9.03	8.83	8.27	8.26	7.75	7.88
16	7.93	7.35	8.44	8.45	9.07	8.83	9.07	8.85	8.27	8.24	7.72	7.83
17	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.80
18	7.83	7.30	8.42	8.50	9.09	8.92	9.26	8.90	8.27	8.21	7.66	7.74
19	7.79	7.28	8.41	8.51	9.11	8.97	9.20	8.92	8.28	8.19	7.63	7.71
20	7.74	7.26	8.41	8.53	9.14	9.00	9.23	8.95	8.29	8.17	7.59	7.65
21	7.71	7.24	8.40	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22	7.66	7.21	8.40	8.56	9.22	9.09	9.33	9.00	8.30	8.13	7.50	7.55
23	7.62	7.19	8.40	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.30	8.11	7.47	7.50
24	7.58	7.17	8.40	8.60	9.30	9.20	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.45
25	7.53	7.13	8.39	8.61	9.32	9.22	9.43	9.08	8.30	8.08	7.40	7.41
26	7.49	7.12	8.40	8.64	9.38	9.30	9.49	9.10	8.31	8.06	7.36	7.31
27	7.43	7.09	8.38	8.65	9.40	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28	7.40	7.07	8.39	8.68	9.46	9.33	9.58	9.16	8.32	8.02	7.27	7.27
29	7.35	7.04	8.37	8.70	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8.00	7.24	7.20
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.34	7.99	7.19	7.14
31	7.25	7.00	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.08
32	7.20	6.97	8.37	8.75	9.63	9.60	9.77	9.28	8.34	7.93	7.11	7.05
34	7.10	6.91	8.36	8.80	9.72	9.70	9.88	9.33	8.36	7.90	7.02	6.92



Cuadro 10. Duración media posible de la luz expresada en unidades de 30 días de 12 horas cada uno.

mes latitud	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	.94	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	.99	1.02
10	1.00	.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	.98	.99
15	.97	.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	.95	.97
20	.95	.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	.93	.94
25	.93	.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
26	.92	.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	.99	.91	.91
27	.92	.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	.99	.90	.90
28	.91	.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	.98	.90	.90
29	.91	.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	.98	.90	.89
30	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
31	.90	.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	.98	.89	.88
32	.89	.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	.98	.88	.87
33	.88	.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	.97	.88	.86
34	.88	.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	.97	.87	.86
35	.87	.87	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	.97	.86	.85
36	.87	.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	.97	.86	.84
37	.86	.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	.97	.85	.83
38	.85	.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	.96	.84	.83
39	.85	.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	.96	.84	.82
40	.84	.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	.96	.83	.81
41	.83	.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	.96	.82	.80
42	.82	.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	.95	.82	.79
43	.81	.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	.95	.81	.77
44	.81	.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.31	1.20	1.04	.95	.80	.76
45	.80	.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	.94	.79	.75
46	.79	.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	.94	.79	.74
47	.77	.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	.93	.78	.73
48	.76	.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	.93	.77	.72
49	.75	.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	.93	.76	.71
50	.74	.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	.92	.76	.70

Nota: Los valores son diarios.

2

Cuadro 11. Radiación incidente extraterrestre, R. (cal/ cm / día)

N	mes	Enero			Febrero			Marzo			Abril			Mayo			Junio		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
80	10 d. mes							45	105	195	310	455	615	750	865	960	1020	1050	1060
									115			460		860				1045	
70	10 d. mes				30	75	125	185	260	345	445	550	650	740	840	915	975	1010	1010
						75			265			550		830				1000	
60	10 d. mes	60	80	110	150	210	270	335	405	480	565	655	735	805	865	920	955	980	975
			85			210			405			650		865				970	
50	10 d. mes	190	215	250	300	355	415	475	540	605	680	745	805	860	910	945	970	985	985
			215			355			540			745		905				980	
40	10 d. mes	335	360	395	440	495	550	600	655	710	765	820	865	905	940	965	980	990	990
			365			495			655			815		935				985	
30	10 d. mes	480	500	535	575	620	665	710	750	795	835	875	905	930	950	965	970	975	975
			505			620			750			870		950				975	
20	10 d. mes	615	635	665	695	730	765	795	825	850	875	895	910	920	930	935	935	935	935
			640			730			825			895		930				935	
10	10 d. mes	745	760	775	800	820	840	860	875	890	895	900	895	895	890	885	880	875	870
			760			820			875			895		890				875	
0	10 d. mes	850	860	870	880	890	895	900	895	890	880	870	860	840	825	810	800	795	790
			860			890			895			870		825				795	

Cuadro II. Continuación

O N	mes	Julio			Agosto			Septiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre		
		-----			-----			-----			-----			-----			-----		
		I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
80	10 d. mes	1035	980	900	795	670	505	355	230	135	65	10							
			970			655			240			25							
70	10 d. mes	980	935	860	770	670	570	470	375	290	210	135	80	35					
			925			670			380			140		10					
60	10 d. mes	960	930	885	825	750	670	590	510	430	350	280	215	160	110	85	60	50	50
			925			750			510			280		120					55
50	10 d. mes	975	955	920	875	820	760	695	625	555	490	420	360	305	255	220	195	180	180
			950			820			625			425		260					185
40	10 d. mes	980	970	940	910	870	825	775	720	665	605	550	495	445	400	360	335	320	320
			965			870			720			550		400					325
30	10 d. mes	970	960	950	930	905	875	840	800	755	710	670	620	580	540	510	485	470	470
			960			905			800			665		545					475
20	10 d. mes	935	930	925	920	910	895	875	855	830	795	760	725	695	665	640	625	610	610
			930			910			855			760		665					615
10	10 d. mes	875	880	880	885	890	890	890	880	870	855	840	820	800	775	760	745	735	735
			880			890			880			840		780					740
0	10 d. mes	795	800	815	830	844	855	870	880	885	890	890	885	870	860	855	850	845	845
			805			840			880			890		860					845

Cuadro 12. Valores de L y Lo.

Mes	0 N		5 N		10 N		15 N	
	L	L/Lo	L	L/Lo	L	L/Lo	L	L/Lo
Enero	1.52	1.02	1.56	1.05	1.64	1.09	1.72	1.11
Febrero	1.47	0.99	1.50	1.01	1.54	1.02	1.61	1.04
Marzo	1.42	0.95	1.43	0.96	1.46	0.97	1.49	0.96
Abril	1.44	0.97	1.42	0.95	1.43	0.95	1.44	0.93
Mayo	1.52	1.02	1.47	0.99	1.44	0.95	1.45	0.94
Junio	1.56	1.05	1.51	1.01	1.47	0.97	1.45	0.94
Julio	1.55	1.04	1.49	1.00	1.47	0.97	1.45	0.94
Agosto	1.47	0.99	1.45	0.97	1.45	0.96	1.47	0.95
Septiembre	1.43	0.96	1.43	0.96	1.43	0.95	1.46	0.94
Octubre	1.44	0.97	1.47	0.99	1.51	1.00	1.56	1.01
Noviembre	1.50	1.01	1.56	1.05	1.61	1.07	1.70	1.10
Diciembre	1.56	1.05	1.61	1.08	1.69	1.12	1.82	1.17
Lo	1.49		1.49		1.51		1.55	

Cuadro 12. Continuación

Mes	20 N		25 N		30 N		35 N	
	L	L/Lo	L	L/Lo	L	L/Lo	L	L/Lo
Enero	1.84	1.15	2.00	1.20	2.17	1.23	2.43	1.28
Febrero	1.69	1.06	1.82	1.09	1.96	1.11	2.12	1.12
Marzo	1.54	0.96	1.61	0.96	1.69	0.95	1.78	0.94
Abril	1.46	0.91	1.49	0.89	1.54	0.87	1.61	0.85
Mayo	1.44	0.90	1.45	0.87	1.49	0.84	1.51	0.79
Junio	1.45	0.91	1.45	0.87	1.46	0.82	1.51	0.79
Julio	1.45	0.91	1.45	0.87	1.47	0.83	1.51	0.79
Agosto	1.48	0.93	1.52	0.91	1.56	0.88	1.64	0.86
Septiembre	1.49	0.93	1.54	0.92	1.61	0.91	1.69	0.89
Octubre	1.61	1.01	1.67	1.00	1.81	1.02	1.96	1.03
Noviembre	1.79	1.12	1.93	1.16	2.12	1.20	2.38	1.25
Diciembre	1.93	1.21	2.13	1.28	2.34	1.32	2.64	1.39
Lo	1.60		1.67		1.77		1.90	

Cuadro 12. Continuación

Mes	40° N		45° N		50° N		55° N	
	L	L/Lo	L	L/Lo	L	L/Lo	L	L/Lo
Enero	2.80	1.35	3.22	1.44	4.06	1.52	5.36	1.66
Febrero	2.37	1.44	2.70	1.17	3.14	1.18	3.18	1.18
Marzo	1.93	0.93	2.12	0.92	2.34	0.88	2.64	1.18
Abril	1.68	0.18	1.78	0.77	1.92	0.72	2.10	0.65
Mayo	1.58	0.76	1.66	0.72	1.75	0.61	1.88	0.58
Junio	1.55	0.75	1.61	0.70	1.71	0.64	1.83	0.57
Julio	1.56	0.75	1.64	0.71	1.73	0.65	1.84	0.57
Agosto	1.71	0.83	1.81	0.78	1.95	0.73	2.14	0.66
Septiembre	1.77	0.86	1.92	0.83	2.10	0.79	2.31	0.72
Octubre	2.13	1.03	2.38	1.03	2.68	1.00	3.13	0.97
Noviembre	2.66	1.29	3.12	1.35	3.78	1.42	4.85	1.50
Diciembre	3.11	1.50	2.70	1.60	4.90	1.84	6.85	2.12
Lo	2.07		2.31		2.67		3.23	

Para las latitudes del Sur, léanse los cuadros con un avance de 6 meses; por ejemplo, para enero, léase julio.

Cuadro 13. Radiación solar recibida sobre una superficie horizontal, expresada como mm de agua evaporable. Valores de Angot - R

A

---

Lat. N	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
40	6.44	8.56	11.40	14.32	16.36	17.29	16.70	15.17	12.54	9.58	7.03	5.68
38	6.91	8.98	11.75	14.50	16.39	17.22	16.72	15.27	12.81	9.98	7.52	6.10
36	7.38	9.39	12.10	14.67	16.43	17.16	16.73	15.37	13.08	10.59	8.00	6.62
34	7.85	9.82	12.44	14.84	16.46	17.09	16.75	15.48	13.35	10.79	8.50	7.18
32	8.32	10.24	12.77	15.00	16.50	17.02	16.76	15.58	13.63	11.20	8.99	7.76
30	8.81	10.68	13.14	15.17	16.53	16.95	16.78	15.68	13.90	11.61	9.49	8.31
28	9.29	11.09	13.39	15.26	16.48	16.83	16.68	15.71	14.08	11.95	9.90	8.79
26	9.79	11.50	13.65	15.34	16.43	16.71	16.58	15.74	14.26	12.30	10.31	9.27
24	10.20	11.89	13.90	15.43	16.37	16.59	16.47	15.78	14.45	12.64	10.71	9.73
22	10.70	12.30	14.16	15.51	16.32	16.47	16.37	15.81	14.64	12.98	11.11	10.20
20	11.19	12.71	14.41	15.60	16.27	16.36	16.27	15.85	14.83	13.31	11.61	10.68
18	11.60	13.02	14.60	15.62	16.11	16.14	16.09	15.79	14.94	13.58	12.02	11.12
16	12.00	13.32	14.69	15.64	15.99	15.92	15.91	15.72	15.04	13.85	12.43	11.57
14	12.41	13.62	14.89	15.65	15.83	15.70	15.72	15.65	15.14	14.12	12.84	12.02
12	12.82	13.93	15.08	15.66	15.67	15.48	15.53	15.58	15.24	14.38	13.25	12.47
10	13.22	14.24	15.26	15.68	15.51	15.26	15.34	15.51	15.34	14.66	13.56	12.88

---

Note: Los valores son diarios.

Cuadro 14. Duración del día (N) en horas.

° N	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
0	12.12	12.12	12.12	12.12	12.12	12.12	12.12	12.10	12.11	12.12	12.12	12.12
5	11.87	11.96	12.08	12.22	12.35	12.41	12.38	12.28	12.16	12.02	11.90	11.83
10	11.61	11.81	12.06	12.36	12.57	12.70	12.64	12.45	12.17	11.91	11.67	11.55
15	11.34	11.66	12.04	12.47	12.82	13.00	12.92	12.62	12.22	11.81	11.44	11.25
20	11.07	11.50	12.01	12.60	13.07	13.32	13.22	12.81	12.26	11.70	11.20	10.94
25	10.78	11.33	11.97	12.74	13.34	13.66	13.53	13.02	12.31	11.58	10.94	10.62
30	10.45	11.14	11.97	12.88	13.65	14.05	13.88	13.23	12.35	11.47	10.67	10.26
35	10.09	10.95	11.95	13.06	13.98	14.47	14.27	13.47	12.42	11.33	10.36	9.86
40	9.68	10.71	11.91	13.25	14.36	14.96	14.71	13.76	12.48	11.18	10.00	9.39
42	9.49	10.61	11.90	13.34	14.53	15.18	14.90	13.88	12.51	11.12	9.86	9.20
44	9.29	10.50	11.87	13.43	14.72	15.42	15.14	14.01	12.53	11.03	9.69	8.97
46	9.08	10.39	11.87	13.52	14.92	15.67	15.36	14.16	12.57	10.98	9.50	8.72
48	8.86	10.27	11.85	13.64	15.14	15.97	15.62	14.31	12.61	10.89	9.30	8.45
50	8.61	10.13	11.84	13.78	15.38	16.29	15.91	14.48	12.66	10.80	9.07	8.17
52	8.32	9.98	11.82	13.88	15.64	16.64	16.22	14.66	12.69	10.71	8.86	7.86
54	8.03	9.82	11.80	14.02	15.94	17.04	16.58	14.87	12.73	10.61	8.59	7.49
56	7.63	9.64	11.78	14.18	16.33	17.51	16.98	15.10	12.79	10.49	8.31	7.08
58	7.25	9.43	11.76	14.35	16.66	18.05	17.45	15.37	12.85	10.37	7.98	6.60
60	6.79	9.21	11.74	14.62	17.10	18.70	18.01	15.67	12.92	10.22	7.60	6.04
61	6.53	9.08	11.72	14.68	17.36	19.10	18.34	15.82	12.95	10.15	7.38	5.72
62	6.22	8.95	11.71	14.78	17.64	19.55	18.72	16.01	12.98	10.05	7.15	5.34
63	5.88	8.80	11.69	14.90	17.95	20.08	19.13	16.23	13.03	9.97	6.89	4.93
64	5.51	8.64	11.68	15.04	18.31	20.75	19.62	16.42	13.08	9.87	6.61	4.46
65	5.09	8.47	11.67	15.19	16.71	21.64	20.22	16.66	13.12	9.77	6.30	3.88

Para las latitudes del Sur, léanse los cuadros con un avance de 6 meses; por ejemplo, para enero, léase julio.

Cuadro 15. Conversión de estimaciones de la nubosidad en las escalas 0-10 y 0-8 a valores de n/N.

Nubosidad (escala 0 a 10)						Nubosidad (escala 0 a 8)					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8		0	0.2	0.4	0.6	0.8
0	.95	.90	.90	.90	.90	0	.90	.90	.90	.85	.85
1	.85	.85	.85	.85	.80	1	.85	.85	.80	.80	.80
2	.80	.80	.80	.75	.75	2	.75	.75	.75	.70	.70
3	.75	.70	.70	.70	.65	3	.65	.65	.65	.60	.60
4	.65	.65	.60	.60	.60	4	.55	.55	.50	.50	.45
5	.55	.55	.50	.50	.50	5	.45	.40	.40	.35	.35
6	.50	.45	.45	.40	.40	6	.30	.30	.25	.25	.20
7	.40	.35	.35	.30	.30	7	.15	.15	-	-	-
8	.30	.25	.25	.20	.20						
9	.15	.15	.15	-	-						

Cuadro 16. Factor de Evapotranspiración Potencial, MF, para ETp en mm/mes.

Lat. N	M E S E S											
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
60	0.001	0.177	0.525	1.039	1.700	2.026	1.970	1.334	0.705	0.299	0.085	0.037
57	0.114	0.258	0.666	1.219	1.901	2.210	2.117	1.531	0.801	0.408	0.151	0.079
55	0.159	0.319	0.762	1.334	2.021	2.317	2.233	1.652	0.965	0.487	0.200	0.116
53	0.210	0.385	0.861	1.445	2.133	2.415	2.540	1.768	1.069	0.570	0.256	0.161
50	0.300	0.493	1.012	1.605	2.288	2.548	2.485	1.932	1.220	0.703	0.351	0.242
47	0.404	0.610	1.167	1.700	2.429	2.665	2.616	2.086	1.373	0.844	0.460	0.337
45	0.481	0.693	1.271	1.859	2.515	2.736	2.695	2.184	1.481	0.942	0.539	0.409
43	0.563	0.780	1.376	1.956	2.597	2.801	2.769	2.277	1.583	1.042	0.623	0.487
40	0.697	0.915	1.535	2.096	2.710	2.887	2.869	2.410	1.734	1.198	0.758	0.615
37	0.843	1.057	1.694	2.229	2.811	2.961	2.956	2.533	1.882	1.358	0.903	0.755
35	0.940	1.148	1.780	2.301	2.856	2.987	2.931	2.506	1.967	1.456	0.999	0.851
33	1.018	1.214	1.842	2.317	2.832	2.941	2.953	2.595	2.006	1.524	1.073	0.929
30	1.135	1.310	1.916	2.336	2.793	2.071	2.895	2.589	2.058	1.621	1.184	1.048
27	1.253	1.403	1.986	2.350	2.750	2.799	2.834	2.759	2.105	1.714	1.296	1.168
25	1.332	1.465	2.029	2.356	2.719	2.750	2.792	2.569	2.133	1.774	1.369	1.249
23	1.410	1.525	2.070	2.359	2.886	2.699	2.747	2.556	2.159	1.832	1.442	1.330
20	1.527	1.612	2.126	2.359	2.663	2.621	2.678	2.573	2.192	1.916	1.550	1.451
17	1.642	1.696	2.177	2.353	2.575	2.540	2.608	2.504	2.220	1.994	1.657	1.572
15	1.718	1.750	2.208	2.346	2.534	2.454	2.555	2.482	2.235	2.044	1.726	1.652
13	1.794	1.602	2.236	2.337	2.491	2.427	2.503	2.457	2.247	2.092	1.795	1.732
10	1.905	1.878	2.273	2.317	2.423	2.339	2.421	2.415	2.260	2.159	1.895	1.850
7	2.013	1.949	2.303	2.292	2.351	2.247	2.336	2.368	2.267	2.221	1.992	1.966
5	2.084	1.994	2.320	2.272	2.300	2.185	2.277	2.333	2.268	2.259	2.055	2.043
3	2.154	2.037	2.334	2.250	2.248	2.121	2.216	2.297	2.267	2.294	2.116	2.118
0	2.255	2.098	2.350	2.211	2.165	2.023	2.123	2.237	2.760	2.343	2.205	2.229

Cuadro 17. Porcentaje medio diario (p) de horas diurnas anuales a diferentes latitudes.

Latitud o N	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
60	.15	.20	.26	.32	.38	.41	.40	.34	.28	.22	.17	.13
58	.16	.21	.26	.32	.37	.40	.39	.34	.28	.23	.18	.15
56	.17	.21	.26	.32	.36	.39	.38	.33	.28	.23	.18	.16
54	.18	.22	.26	.31	.36	.36	.37	.33	.28	.23	.19	.17
52	.19	.22	.27	.31	.35	.37	.36	.33	.28	.24	.20	.17
50	.19	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.20	.18
48	.20	.23	.27	.31	.34	.36	.35	.32	.28	.24	.21	.19
46	.20	.23	.27	.30	.34	.35	.34	.32	.28	.24	.21	.20
44	.21	.24	.27	.30	.33	.35	.34	.31	.28	.25	.22	.20
42	.21	.24	.27	.30	.33	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
40	.22	.24	.27	.30	.32	.34	.33	.31	.28	.25	.22	.21
35	.23	.25	.27	.29	.31	.32	.32	.30	.28	.25	.23	.22
30	.24	.25	.27	.29	.31	.32	.31	.30	.28	.26	.24	.23
25	.24	.26	.27	.29	.30	.31	.31	.29	.28	.26	.25	.24
20	.25	.26	.27	.28	.29	.30	.30	.29	.28	.26	.25	.25
15	.26	.26	.27	.28	.29	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.25
10	.26	.27	.27	.28	.28	.29	.29	.28	.28	.27	.26	.26
5	.27	.27	.27	.28	.28	.28	.28	.28	.28	.27	.27	.27
0	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27	.27

Para las latitudes Sur, léanse los cuadros con un avance de 6 meses; por ejemplo, para enero, léase julio.

Cuadro 18. Valores del factor de ponderación W para los efectos de la radiación sobre la Etp, a diferentes temperaturas y altitudes.

Temperatura ° C	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
W a una altitud de (m)																				
0	.43	.46	.49	.52	.55	.58	.61	.64	.66	.68	.71	.73	.75	.77	.78	.80	.82	.83	.84	.85
500	.45	.48	.51	.54	.57	.60	.62	.65	.67	.70	.72	.74	.76	.78	.79	.81	.82	.84	.85	.86
1 000	.46	.49	.52	.55	.58	.61	.64	.66	.69	.71	.73	.75	.77	.79	.80	.82	.83	.85	.86	.87
2 000	.49	.52	.55	.58	.61	.64	.66	.69	.71	.73	.75	.77	.79	.81	.82	.84	.85	.86	.87	.88
3 000	.52	.55	.58	.61	.64	.66	.69	.71	.73	.75	.77	.79	.81	.82	.84	.85	.86	.88	.88	.89
4 000	.55	.58	.61	.64	.66	.69	.71	.73	.76	.78	.79	.81	.83	.84	.85	.86	.88	.89	.90	.90







Cuadro 20. Continuación

Term. seco t C	Termómetro húmedo (diferencia) (t en °C), altitud: 1 000 a 2 000 m											
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
40	73.8	64.9	56.7	49.1	42.0	35.6	29.6	34.1	18.9	14.1	9.8	5.6
38	66.3	58.0	50.5	43.4	36.9	31.0	25.4	20.3	15.5	11.1	7.0	3.2
36	59.4	51.8	44.8	38.3	32.3	26.8	21.2	16.9	12.5	8.3	4.6	1.0
34	53.2	46.1	39.7	33.7	28.1	23.0	18.2	13.9	9.7	5.9	2.4	
32	47.5	41.0	35.1	29.5	24.3	19.6	15.2	11.1	7.3	3.7	0.4	
30	42.4	36.4	30.9	25.7	20.9	16.6	12.4	8.7	5.1	1.7		
28	37.8	32.2	27.1	22.3	17.9	13.8	10.0	6.5	3.1			
26	33.6	28.4	23.7	19.3	15.1	11.4	7.8	4.5	1.4			
24	29.8	25.0	20.7	16.5	12.7	9.2	5.8	2.8				
22	26.4	22.0	17.9	14.1	10.5	7.2	4.1	1.2				
20	23.4	19.2	15.5	11.9	8.5	5.5	2.5					
18	20.6	16.8	13.3	9.9	6.8	3.9	1.1					
16	18.2	14.6	11.3	8.2	5.2	2.5						
14	16.0	12.6	9.6	6.6	3.8	1.3						
12	14.0	10.9	8.0	5.2	2.6	0.3						
10	12.3	9.3	6.7	4.0	1.6							
8	10.7	7.9	5.4	3.0	0.6							
6	9.3	6.7	4.4	2.0								
4	8.1	5.7	3.4	1.1								
2	7.1	4.7	2.5	0.3								
0	6.1	3.8	1.7									

Presión del vapor e calculada a partir de la temperatura en el punto de rocío.

tcmp. C	d										
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
ed mbar	6.1	7.1	8.1	9.3	10.7	12.3	14.0	16.0	18.2	20.6	23.4
tcmp. C	u										
	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	
ed mbar	26.4	29.8	33.6	37.8	42.4	47.5	53.2	59.4	66.3	73.8	

Cuadro 21. Valores típicos de albedo superficial y emisividad .

Superficie	Albedo ( $\alpha$ )	Emisi- vidad ( $\epsilon$ )	Superficie	Albedo ( $\alpha$ )	Emisi- vidad ( $\epsilon$ )
Aqua	.05-.10	.95	Pedregal	.10-.20	
Alfalfa	.20-.25	.93	Pradera Natural	.15-	.90
Algodonero	.17-.25		Pasto Fresco	.25-	
Arena Seca	.18-.30		Pasto Seco	.15-.30	
Arena Amarilla	.25-.35		Piña	.05-.08	
Bosque	.03-.10	.90	Praderas Gramineas	.15-.27	
Barbecho	.08-.10		Pradera Alfalfa	.25-.27	
Caña de Azúcar	.05-.18		Papa	.15-.27	
Cebada	.20-		Remolacha	.25-.27	
Cítricos	.17-	.93	Ríos	.06-.11	
Carreteras	.08-.17	.93	Salinas	.42-	
Coníferas	.12-.16	.90	Suelo Oscuro	.05-.16	.90
Dunas (Arena)	.40-		Suelo Húmedo	.10-	.97
Espinaca	.24-.28		Suelo Claro	.20-.43	.90
Granos	.15-.25		Selva Conifera	.05-.15	
Hierba Verde	.15-.20		Tinte Negro	.04-	.92
Hierba Seca	.19-.32		Tinte Blanco	.85-	.92
Hierba Mojada	.20-.35		Trigo	.15-.25	
Maíz	.12-.24		Tierra Vegetal	.10-.25	
Nieve	.75-.90		Vegetación Desértica	.37	
Nieve Fresca	.85-	.91	Zonas Urbanas	.16-.45	

Cuadro 22. Coeficientes experimentales para a y b.

Región	a	b
Davis, Calif.	1.35	-0.35
Idaho, Sur	1.22	-0.18
Mitchell, Nebraska	0.90	0.10
Zonas áridas	1.20	-0.20
Zonas húmedas y semi-húmedas	1.10	-0.10

Cuadro 23. Coeficientes experimentales para a1 y b2.

Región	a1	b1
Davis, Calif.	0.35	-0.046
Idaho, Sur	0.325	-0.044
Mitchell, Neb.	0.37	-0.044
Inglaterra	0.44	-0.080
Australia	0.35	-0.042
En general:	0.39	-0.050*

\* Según Budyko (1956).

Cuadro 24. Valores de Rnlo para diferentes temperaturas.

T		E'	Rnlo
o C	o K		
0	273	0.241	157
5	278	0.236	165
10	283	0.221	166
15	288	0.199	160
20	293	0.171	148
25	298	0.141	130
30	303	0.110	108
35	308	0.081	85
40	313	0.055	62
45	318	0.034	41

Cuadro 25. Corrección para la temperatura  $f(t)$  con respecto a la radiación de ondas largas  $R_{nl}$ .

$t$ °C	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$f(t) = \sigma T_K$	11.0	11.4	11.7	12.0	12.4	12.7	13.1	13.5	13.8

$t$ °C	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36
$f(t) = \sigma T_K$	14.2	14.6	15.0	15.4	15.9	16.3	16.7	17.2	17.7	18.1

Cuadro 26. Corrección para la presión del vapor  $f(e)$   $R_{nl}$  con respecto a la radiación de ondas largas.

$e$ mbar	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
$f(e) =$ $0.34 - 0.044(e)^{0.5}$	.23	.22	.20	.19	.18	.16	.15	.14	.13	.12	.12	.11	.10	.09	.08	.08	.07	.06

Cuadro 27. Corrección para la relación entre las horas reales de fuerte insolación y las máximas posibles  $f(n/N)$  con respecto a la radiación de ondas largas  $R_{nl}$ .

$n/N$	0	.05	.10	.15	.20	.25	.30	.35	.40	.45	.50	.55	.60	.65	.70	.75	.80	.85	.90	.95	1.0
$f(n/N) =$ $0.1 + 0.9n/N$	.10	.15	.19	.24	.28	.33	.37	.42	.46	.51	.55	.60	.69	.73	.78	.82	.87	.91	.96	1.00	

Cuadro 28. Coeficientes de regresión de la radiación neta.

Lugar	Condición	Cultivo	a3	b3	Observaciones
Relación horaria (horas diarias), Rs y Rn en cal/cm cuadrado/hr					
New Hampshire	Despejado	Arboles de madera dura	0.83	-7.6	Basado en numerosas mediciones de corto periodo, realizadas en forma ininterrumpida a cada hora del día y todos los días del año.
Carolina del Norte	Despejado	Pino de incienso	0.97(1-0)	-9.6	Valores de octubre. $r = 0.13$
USS	Despejado	Algodón, bajo riego.	0.87	-7.8	La información fué analizada por periodos de 2 horas.
	"	Desierto, con vegetación dispersa	0.64	-10.8	La información fué analizada por periodos de 2 horas.
Valle interno de California	Despejado	Rye Grass	0.69	-60.0	Marzo a octubre, excluyendo los días más lluviosos.
	y Nublado	"	0.65	-38.0	3.5 años de observación, $r = 0.994$
Canadá.					
Guelph	Despejado	Zacate segado	0.59	-14.0	Mayo a octubre. $r = 0.89$
Ottawa	"	" "	0.58	-60.0	" " " $r = 0.97$
Toronto	"	" "	0.57	-15.0	" " " $r = 0.92$
Iowa	Despejado	Zacate	0.87	-82.0	Junio a noviembre. $r = 0.98$
	Nublado	"	0.75	-21.0	" " " $r = 0.97$
Holanda	Despejado	Apio en suelo arcilloso	0.59	-10.0	Junio 26 a oct. 22. $r = 0.97$
	y Nublado	Suelo, desnudo loam arenoso	0.48	39.0	Marzo 27 a junio 11. $r = 0.97$
Nigeria	Despejado y Nublado	Zacate	0.61	-28.0	Combinado con valores estadísticos similares a los de Senegal, mediante regresión. $r = 0.93$
Norway	Despejado y Nublado	Zacate	0.60	-15.0	Mayo a septiembre. Existen dudas si sus valores de radiación neta son demasiado pequeños.
Senegal	Despejado y Nublado	Arena	0.61	-28.0	Combinado con valores estadísticos similares a los de Nigeria, mediante regresión. $r = 0.93$

Cuadro 28. Continuación

Lugar	Condición	Cultivo	a3	b3	Observaciones
Radiación horaria (horas diarias). Rs y Rn en cal/cm cuadrado/hr					
14 lugares del mundo	—	Casi todos los zacates	0.61	-24.0	El dato de los países no tropicales incluye solo valores para verano. $r = 0.99$
Australia	Despejado y Nublado	Algodón bajo riego	0.66	-52.0	Valores de Fitzpatrick y Stern citados por Freddes.
Arizona	Despejado	Alfalfa	0.75	-6.6	Valores en Arizona obtenidos a lo largo de las respectivas etapas de crecimiento, enero a septiembre. Los coeficientes de correlación generalmente exceden de 0.995.
		Cebada	0.66	-7.2	
		Algodón	0.74	-6.0	
		Avena	0.75	-10.0	
		Sorgo	0.75	-6.4	
		Trigo	0.81	-10.4	
Inglaterra	Despejado	Zacates	0.82(1-0)	-5.9	Valores para zacates (Pasquill 1949, y Rider-Robinson, 1951). Mayo 25 a Julio 27. $r = 0.99$ Julio 3 a sept. 27. $r = 0.97$
		Trigo de primavera	0.87(1-0)	-7.9	
		Remolacha azucarera	0.83(1-0)	-5.8	
Inglaterra	Despejado	Cebada	0.92(1-0)	-6.6	El análisis mostró una remarcada homogeneidad de puntos para estos tipos de vegetación verde fresca. Los valores fueron obtenidos en junio, excepto para pasto alto, el cual también incluye agosto.
		Frijol	"	"	
		Pasto alto	"	"	
		Ortiga	"	"	
		Trigo	"	"	
Hawaii	Despejado	Zacate Bermuda	0.86	-9.0	Valores de agosto a septiembre Junio, visualizando una regresión lineal ajustada. Mayo a agosto. Agosto. Visualizando una regresión lineal ajustada. Mayo. Visualizando una regresión lineal ajustada.
		Lava	1.04	-21.6	
		Piña	0.94	-10.2	
		Suelo (Latosol)	0.88	-6.0	
		Caña de azúcar	0.84	-7.2	
Japón	Nublado	Arroz	0.65	-3.6	Hasta la etapa activa. En agosto.
Minnesota	Despejado	Zacates	0.79	-11.2	Etapas completas de desarrollo. $r = 0.98$

Cuadro 29. Modelos para estimar  $a$  y  $b$  de la ecuación  $E_v = a + b \frac{\bar{T}}{M}$  en función de

la precipitación anual ( $P$ ) y la altitud ( $h$ ).

P ANUAL (mm)	h (m)	a	b
< 500	Cualquiera	$a = -172.5083$	$b = 12.9208$
500 - 1 000	< 300	$a = -191.1454 - 2.1176h$	$b = 11.4866 + 0.0582h$
		$R^2 = 0.8930$	$R^2 = 0.8876$
	300 - 1 000	$a = 121.6224 - 0.6635h$	$b = 2.6647 + 0.0177h$
		$R^2 = 0.7123$	$R^2 = 0.7280$
	1 000 - 1 600	$a = 366.8452 - 0.6004h$	$b = 3.8258 + 0.0165h$
		$R^2 = 0.8462$	$R^2 = 0.8691$
	1 600 - 2 000	$a = 1035.2739 - 0.6346h$	$b = -48.5558 + 0.0323h$
		$R^2 = 0.8177$	$R^2 = 0.9876$
	> 2 000	$a = -249.8424$	$b = 17.8289$

Cuadro 30. Coeficiente de desarrollo Kc para el uso del cálculo de la Evapotranspiración.

% DESARROLLO	C U L T I V O S								
	MAIZ	TRIGO	ALGODON	SORGO	CARTAMO	SOYA	ARROZ	FRIJOL	AJONJOLI
0	0.42	0.15	0.20	0.30	0.14	0.51	0.45	0.50	0.30
5	0.45	0.20	0.22	0.35	0.16	0.45	0.20	0.54	0.35
10	0.48	0.30	0.25	0.40	0.18	0.41	0.55	0.60	0.40
15	0.51	0.40	0.28	0.48	0.22	0.45	0.65	0.65	0.50
20	0.60	0.55	0.32	0.60	0.27	0.51	0.72	0.73	0.60
25	0.65	0.70	0.40	0.70	0.35	0.51	0.80	0.80	0.70
30	0.70	0.90	0.50	0.80	0.44	0.51	0.85	0.90	0.80
35	0.80	1.10	0.62	0.90	0.54	0.52	0.90	0.97	0.87
40	0.90	1.25	0.89	1.00	0.64	0.55	0.92	1.05	0.95
45	1.00	1.40	0.90	1.08	0.76	0.57	0.93	1.10	1.00
50	1.05	1.50	0.98	1.08	0.88	0.60	0.93	1.12	1.10
55	1.07	1.57	1.00	1.05	0.97	0.63	0.93	1.12	1.20
60	1.08	1.62	1.02	1.00	1.07	0.66	0.92	1.10	1.28
65	1.07	1.61	1.00	0.95	1.07	0.68	0.90	1.05	1.30
70	1.05	1.55	0.95	0.90	1.08	0.70	0.85	1.02	1.32
75	1.02	1.45	0.87	0.82	1.02	0.70	0.80	0.95	1.25
80	1.00	1.30	0.80	0.75	0.96	0.69	0.68	0.87	1.25
85	0.95	1.10	0.75	0.70	0.86	0.63	0.63	0.80	1.10
90	0.90	0.95	0.65	0.65	0.76	0.56	0.58	0.72	1.00
95	0.87	0.80	0.55	0.60	0.60	0.43	0.55	0.70	0.90
100	0.85	0.62	0.50	0.55	0.45	0.31	0.47	0.62	0.80

Cuadro 30. Continuación

% DESARROLLO	C U L T I V O S							
	GARBANZO	CEBADA	JITOMATE	LINAZA	CHILE	PAPA	CACAHUATE	CUCURBITACEAS
0	0.30	0.15	0.43	0.30	0.48	0.30	0.15	0.45
5	0.35	0.20	0.43	0.35	0.50	0.35	0.17	0.47
10	0.40	0.30	0.43	0.40	0.55	0.40	0.20	0.50
15	0.50	0.40	0.45	0.50	0.65	0.45	0.25	0.53
20	0.55	0.55	0.45	0.55	0.75	0.50	0.29	0.55
25	0.65	0.70	0.50	0.70	0.80	0.60	0.36	0.60
30	0.70	0.90	0.55	0.90	0.90	0.70	0.43	0.65
35	0.75	1.10	0.65	1.00	0.95	0.62	0.52	0.70
40	0.78	1.25	0.75	1.10	0.93	0.97	0.61	0.75
45	1.80	1.40	0.85	1.15	1.03	1.05	0.61	0.80
50	0.82	1.50	0.95	1.20	1.05	1.16	0.80	0.81
55	0.85	1.57	1.00	1.28	1.05	1.25	0.90	0.82
60	0.85	1.62	1.03	1.30	1.05	1.30	1.00	0.80
65	1.82	1.61	1.02	1.35	1.05	1.35	1.01	0.79
70	0.80	1.55	0.98	1.30	1.00	1.38	1.02	0.77
75	0.75	1.45	0.95	1.28	0.97	1.38	0.91	0.75
80	0.70	1.30	0.90	1.25	0.90	1.35	0.80	0.72
85	0.65	1.10	0.85	1.10	0.85	1.33	0.60	0.71
90	0.60	0.95	0.80	0.95	0.80	1.30	0.41	0.70
95	0.50	0.80	0.75	0.80	0.70	1.25	0.25	0.67
100	0.40	0.62	0.70	0.60	0.60	1.20	0.11	0.65

Cuadro 31. Coeficiente de desarrollo Kc para el uso en el cálculo de Usos Consuntivos.

MES	CANA	ALFALFA	PASTO	VID	CITRICOS	FRUTALES HOJA CADUCA	FRUTALES HOJA PERENNE
1	0.30	0.65	0.48	0.20	0.65	0.20	0.60
2	0.35	0.75	0.60	0.23	0.67	0.25	0.75
3	0.50	0.85	0.75	0.30	0.69	0.35	0.85
4	0.60	1.00	0.85	0.50	0.70	0.65	1.00
5	0.77	1.10	0.87	0.70	0.71	0.85	1.10
6	0.90	1.13	0.90	0.80	0.73	0.95	1.12
7	0.98	1.12	0.90	0.80	0.72	0.98	1.12
8	1.02	1.08	0.87	0.75	0.71	0.85	1.05
9	1.02	1.00	0.85	0.67	0.70	0.50	1.00
10	0.98	0.90	0.80	0.50	0.68	0.30	0.85
11	0.90	0.80	0.65	0.35	0.67	0.20	0.75
12	0.78	0.65	0.60	0.25	0.65	0.20	0.60

Cuadro 32. Coeficientes periódicos de Uso Consuntivo en función del ciclo vegetativo de acuerdo con Grassi-Christiansen.

Fórmula: Blaney y Criddle

Valores del coeficiente, K y del área bajo las curvas, A, en función del 1 %.

Ciclo vege- tativo (%)	Kg = 0.35	Kg = 0.40	Kg = 0.45	Kg = 0.50	Kg = 0.55	Kg = 0.60	Kg = 0.65
	K	K	K	K	K	K	K
10	0.158	0.181	0.204	0.226	0.249	0.272	0.294
20	0.255	0.292	0.328	0.365	0.401	0.438	0.474
30	0.333	0.380	0.428	0.425	0.523	0.571	0.618
40	0.391	0.447	0.503	0.559	0.615	0.671	0.727
50	0.430	0.492	0.553	0.615	0.676	0.738	0.799
60	0.450	0.514	0.578	0.643	0.707	0.771	0.836
70	0.450	0.515	0.579	0.643	0.708	0.772	0.837
80	0.431	0.493	0.555	0.616	0.678	0.740	0.801
90	0.393	0.450	0.406	0.562	0.618	0.674	0.731
100	0.336	0.384	0.432	0.480	0.528	0.576	0.624

Ciclo vegeta- tivo (%)	Kg = 0.70	Kg = 0.75	Kg = 0.80	Kg = 0.85	Kg = 0.90	Kg = 0.95
	K	K	K	K	K	K
10	0.317	0.340	0.362	0.385	0.407	0.430
20	0.511	0.547	0.584	0.620	0.657	0.693
30	0.666	0.713	0.761	0.809	0.856	0.904
40	0.783	0.839	0.895	0.951	1.006	1.063
50	0.861	0.992	0.984	1.045	1.107	1.168
60	0.900	0.964	1.028	1.093	1.157	1.221
70	0.901	0.965	1.030	1.094	1.158	1.222
80	0.863	0.925	0.986	1.048	1.109	1.171
90	0.787	0.843	0.899	0.956	1.012	1.068
100	0.672	0.720	0.768	0.816	0.864	0.912

4

C

Cuadro 33. Radiación del cuerpo negro ( $\sigma T^4$ ) expresada en mm de agua, en función de la T C.

0 C	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	11.02	11.04	11.06	11.08	11.09	11.10	11.12	11.14	11.15	11.17
1	11.18	11.20	11.22	11.24	11.25	11.26	11.28	11.30	11.31	11.33
2	11.35	11.37	11.39	11.41	11.42	11.43	11.45	11.47	11.48	11.50
3	11.51	11.53	11.55	11.57	11.58	11.59	11.61	11.63	11.64	11.66
4	11.68	11.70	11.72	11.74	11.75	11.76	11.78	11.80	11.81	11.83
5	11.85	11.87	11.89	11.90	11.92	11.94	11.96	11.97	11.98	12.00
6	12.02	12.04	12.06	12.08	12.09	12.10	12.12	12.14	12.16	12.18
7	12.20	12.22	12.14	12.26	12.27	12.29	12.31	13.32	12.34	12.36
8	12.37	12.39	12.41	12.43	12.44	12.46	12.48	12.50	12.51	12.53
9	12.55	12.57	12.59	12.60	12.62	12.64	12.66	12.67	12.69	12.71
10	12.73	12.75	12.77	12.79	12.80	12.81	12.83	12.85	12.87	12.89
11	12.91	12.93	12.95	12.97	12.99	13.01	13.02	13.04	13.06	13.08
12	13.09	13.11	13.13	13.14	13.16	13.18	13.20	13.23	13.25	13.27
13	13.28	13.30	13.32	13.34	13.35	13.37	13.39	13.41	13.43	13.45
14	13.46	13.48	13.50	13.52	13.54	13.55	13.57	13.59	13.61	13.63
15	13.65	13.67	13.69	13.71	13.73	13.74	13.76	13.78	13.80	13.82
16	13.84	13.86	13.88	13.90	13.92	13.94	13.96	13.97	13.99	14.01
17	14.03	14.05	14.07	14.09	14.11	14.13	14.15	14.17	14.19	14.21
18	14.23	14.25	14.27	14.29	14.31	14.33	14.35	14.37	14.39	14.41
19	14.43	14.45	14.47	14.49	14.51	14.53	14.54	14.56	14.58	14.60
20	14.62	14.64	14.66	14.68	14.70	14.73	14.75	14.77	14.79	14.81
21	14.83	14.85	14.87	14.89	14.91	14.93	14.95	14.97	14.99	15.01
22	15.03	15.05	15.07	15.09	15.11	15.13	15.15	15.17	15.19	15.21
23	15.23	15.25	15.27	15.29	15.31	15.34	15.36	15.38	15.40	15.42
24	15.47	15.46	15.48	15.50	15.52	15.55	15.57	15.59	15.61	15.63
25	15.65	15.67	15.69	15.71	15.73	15.76	15.78	15.80	15.82	15.84
26	15.86	15.88	15.90	15.92	15.94	15.97	15.99	16.01	16.03	16.05
27	16.07	16.09	16.11	16.14	16.16	16.18	16.20	16.22	16.25	16.27
28	16.29	16.31	16.33	16.35	16.37	16.40	16.42	16.44	16.46	16.48
29	16.50	16.52	16.54	16.57	16.59	16.61	16.63	16.65	16.68	16.70
30	16.72	16.74	16.77	16.79	16.81	16.84	16.86	16.88	16.90	16.93
31	16.95	16.97	16.99	17.02	17.04	17.06	17.08	17.10	17.13	17.15
32	17.17	17.19	17.22	17.24	17.26	17.29	17.31	17.33	17.35	17.38
33	17.40	17.42	17.45	17.47	17.49	17.52	17.54	17.56	17.58	17.61
34	17.65	17.68	17.70	17.72	17.75	17.77	17.79	17.81	17.84	17.86
35	17.88	17.90	17.93	17.95	17.97	18.00	18.02	18.04	18.07	18.09



Cuadro 35. Valores del coeficiente C.

Oscilación	Coficiente U2
$T - T < 12 \text{ C}$ M m	0.54
$12 \text{ C} < T - T < 13 \text{ C}$ M m	0.61
$13 \text{ C} < T - T < 14 \text{ C}$ M m	0.68
$14 \text{ C} < T - T < 15 \text{ C}$ M m	0.75
$15 \text{ C} < T - T < 16 \text{ C}$ M m	0.82
$16 \text{ C} < T - T$ M m	0.89



Cuadro 37. Constantes de la ecuación Keo para varios cultivos.

CULTIVO	CONSTANTE			
	A	B	C	D
Antes de cobertura efectiva				
Maiz	-1.583	2.756	-0.4276	0.213
Remolacha	-1.435	2.382	-0.2259	0.200
Frijol	-1.353	2.562	-0.3532	0.212
Alfalfa	0.	0.	1.0870	0.250
Trigo, Cebada	-2.893	4.843	-1.1400	0.233
Papa	-1.381	2.456	-0.3710	0.213
Pastos	0.	0.	1.5080	0.250
Después de cobertura efectiva				
Maiz	$275 \times 10^{-8}$	$-4688 \times 10^{-7}$	0.01195	0.915
Remolacha	$-167 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-5}$	0.	0.899
Frijol	$165 \times 10^{-8}$	$-2644 \times 10^{-7}$	$-112 \times 10^{-6}$	1.050
Alfalfa	0.	0.	0.025	0.500
Trigo, Cebada	$444 \times 10^{-8}$	$-7261 \times 10^{-7}$	$8532 \times 10^{-6}$	1.022
Papa	0.	0.	0.	0.900
Pastos	0.	0.	0.	0.870

Quadro 38.a. Coeficientes de cultivo Kc correspondientes a cultivos extensivos y de hortalizas en diferentes fases de su crecimiento y según las condiciones climáticas predominantes.

Cultivo	Humedad		HR <sub>min</sub> > 70%		HR <sub>min</sub> < 20%	
	Viento (m/seg)		0-5	5-8	0-5	5-8
	Fase de Desarrollo					
Todos los cultivos extensivos	Inicial	1	Utilícese la Figura 17 por interpolación			
	de desarrollo del cultivo	2				
Alcachofas (perennes, cultivadas limpias)	mediados	3	0.95	0.95	1.00	1.05
	recolección	4	0.90	0.90	0.95	1.00
Cebada		3	1.50	1.10	1.15	1.20
		4	0.25	0.25	0.20	0.20
Frijoles verdes		3	0.95	0.95	1.00	1.05
		4	0.85	0.85	0.90	0.90
Frijoles secos Leguminosas		3	1.05	1.10	1.15	1.20
		4	0.30	0.30	0.25	0.25
Remolachas (de mesa)		3	1.00	1.00	1.05	1.10
		4	0.90	0.90	0.95	1.00
Zanchoarias		3	1.00	1.05	1.10	1.15
		4	0.70	0.75	0.80	0.85
Ricino		3	1.05	1.10	1.15	1.20
		4	0.50	0.50	0.50	0.50
Anjo		3	1.00	1.05	1.10	1.15
		4	0.90	0.95	1.00	1.05
Maíz dulce		3	1.05	1.10	1.15	1.20
		4	0.95	1.00	1.05	1.10
Maíz (arano)		3	1.05	1.10	1.15	1.20
		4	0.55	0.55	0.60	0.60

Cuadro 38.a. Continuación

Cultivo	Humedad	HR <sub>mín</sub> > 70%		HR <sub>mín</sub> < 20%			
		Viento (m/seg)	0-5	5-8	0-5	5-8	
Algodón	3		1.05	1.15	1.20	1.25	
	4		0.65	0.65	0.65	0.70	
Crucíferas (coles, coliflores, brécoles, coles de Bruselas)	3		0.95	1.00	1.05	1.10	
	4		0.80	0.85	0.90	0.95	
Pepino	3		0.90	0.90	0.95	1.00	
	Fresco	4		0.70	0.70	0.75	0.80
	Cosechado a máquina	4		0.85	0.85	0.95	1.00
Berenuena	3		0.95	1.00	1.05	1.10	
	4		0.80	0.85	0.85	0.90	
Lino	3	mediados recolección	1.00	1.05	1.10	1.15	
	4		0.25	0.25	0.20	0.20	
Granos	3		1.05	1.10	1.15	1.20	
	4		0.30	0.30	0.25	0.25	
Lentijas	3		1.05	1.10	1.15	1.05	
	4		0.30	0.30	0.25	0.25	
Lechuga	3		0.95	0.95	1.00	1.05	
	4		0.90	0.90	0.90	1.00	
Melones	3		0.95	0.95	1.00	1.50	
	4		0.65	0.65	0.75	0.75	
Maíz	3		1.00	1.05	1.10	1.15	
	4		0.30	0.30	0.25	0.25	
Avena	3		1.05	1.10	1.15	1.20	
	4		0.25	0.25	0.20	0.20	
Cebollas secas	3		0.95	0.95	1.05	1.10	
	4		0.75	0.75	0.80	0.85	
Cebollas verdes	3		0.95	0.95	1.00	1.05	
	4		0.95	0.95	1.00	1.05	
Maní (Cacahuete)	3		0.95	1.00	1.05	1.10	
	4		0.55	0.55	0.60	0.60	

Cuadro 38.a. Continuación

Cultivo	Humedad	HRmin > 70%		HRmin < 20%		
		Viento (m/seg)	0-5	5-8	0-5	5-8
Chicharos (arvejas)	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.95	1.00	1.05	1.10
Pimientos frescos	3		0.95	1.00	1.05	1.10
	4		0.80	0.85	0.85	0.90
Patatas	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.70	0.70	0.75	0.75
Rábanos	3		0.80	0.80	0.85	0.90
	4		0.75	0.75	0.80	0.85
Cártamo	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.25	0.25	0.20	0.20
Sorgo	3		1.00	1.05	1.10	1.15
	4		0.50	0.50	0.55	0.55
Soja	3		1.00	1.05	1.10	1.15
	4		0.45	0.45	0.45	0.45
Espinacas	3		0.95	0.95	1.00	1.05
	4		0.90	0.90	0.95	1.00
Calabazas	3	mediados	0.90	0.90	0.95	1.00
	4	recolec- ción	0.70	0.70	0.75	0.80
Remolacha azucarera	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.90	0.95	1.00	1.00
	4	no regada el último mes	0.60	0.60	0.60	0.60
Girasol	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.40	0.40	0.35	0.35
Tomates	3		1.05	1.10	1.20	1.25
	4		0.60	0.60	0.65	0.65
Trigo	3		1.05	1.10	1.15	1.20
	4		0.25	0.25	0.20	0.20

Nota: Muchos cultivos de estación fría no pueden cultivarse en climas secos y calientes. Se indican valores de Kc con respecto a estos climas ya que pueden darse ocasionalmente y entrañan unos valores de Kc más altos, especialmente en el caso de cultivos altos y desiguales.

Cuadro 38.b. Valores de Kc correspondientes a la Caña de azúcar.

Edad del Cultivo		Fases de Crecimiento	HR <sub>min</sub> > 70%		HR <sub>min</sub> < 20%	
12 meses	24 meses		Vientos de ligeros a moderados	Vientos fuertes	Vientos de ligeros a moderados	Vientos fuertes
0-1	0.2-5	de la plantación a un 0.25 de la cubierta completa	0.55	0.60	0.40	0.45
1-2	2.5-3.5	de 0.25 a 0.5 de la cubierta completa	0.80	0.85	0.75	0.80
2-2.5	3.5-4.5	de 0.5 a 7.5 de la cubierta completa	0.90	0.95	0.95	1.00
2.5-4	4.5-6	de 0.75 a la cubierta completa	1.00	1.10	1.10	1.20
4-10	6-17	utilización máxima	1.05	1.15	1.25	1.30
10-11	17-22	senescencia precoz	0.80	0.85	0.95	1.05
11-12	22-24	maduración	0.60	0.65	0.70	0.75

Cuadro 38.c. Valores de Kc correspondientes al arroz.

	Periodo de Plantación	Periodo de Re- colección	Primer mes	Segundo mes	Mediados del periodo	3a y 4a semanas últimas
<u>Asia húmeda</u>						
Estación húmeda (monzones)	Jun-Jul	Nov-Dic				
vientos débiles a moderados			1.10	1.10	1.05	0.95
vientos fuertes			1.15	1.15	1.10	1.00
Estación seca *	Dic-Ene	Mediados de Mayo	1.10	1.10	1.25	1.00 *
vientos débiles a moderados			1.15	1.15	1.35	1.05
vientos fuertes						
<u>Australia húmeda</u>						
Estación húmeda	Dic-Ene	Abr-May				
vientos débiles a moderados			1.10	1.10	1.05	0.95
vientos fuertes			1.15	1.15	1.10	1.00
<u>América del Sur húmeda</u>						
Estación húmeda	Nov-Dic	Abr-May				
vientos débiles a moderados			1.10	1.10	1.05	0.95
vientos fuertes			1.15	1.15	1.10	1.00
<u>Europa (España, sur de Fran- cia y norte de Italia)</u>						
Estación seca	May-Jun	Sept a princi- pios de Octubre	1.10	1.10	1.20	0.95
vientos débiles a moderados			1.15	1.15	1.30	1.00
vientos fuertes						
<u>EE.UU. de América</u>						
Verano húmedo (estados del sur)	Mayo	Sep-Oct				
vientos débiles a moderados			1.10	1.10	1.10	0.95
vientos fuertes			1.15	1.15	1.15	1.00
Verano seco (California)	Finales de Abril a prin- cipios de Mayo	Finales de Sep a a prin- cipios de Octubre				
vientos débiles a moderados			1.10	1.10	1.25	1.10
vientos fuertes			1.15	1.15	1.35	1.05

\* Sólo habrá que emplear los valores de Kc correspondientes a la estación húmeda cuando la HR<sub>min</sub> > 70%

Cuadro 38.d. Coeficientes de cultivo Kc (medio) de la alfalfa, las gramíneas para heno, la mezcla de trébol y leguminosas herbáceas y los pastos, y Kc (máximo) justo antes de la recolección y Kc (mínimo) inmediatamente después de ella.

	Kc(medio)			Kc(máximo)			Kc(mínimo) *		
	Húmedos, vientos débiles a moderados	Secos, vientos débiles a moderados	Secos, vientos fuertes	Húmedos, vientos débiles a moderados	Secos, vientos débiles a moderados	Secos, vientos fuertes	Húmedos, vientos débiles a moderados	Secos, vientos débiles a moderados	Secos, vientos fuertes
Alfalfa	0.85	0.95	1.05	1.05	1.15	1.25	0.50	0.40	0.30
Gramíneas para heno	0.80	0.90	1.00	1.05	1.10	1.15	0.60	0.55	0.50
Mezcla de trébol y leguminosas herbáceas	1.00	1.05	1.10	1.05	1.15	1.20	0.55	0.55	0.55
Pastos	0.95	1.00	1.05	1.05	1.10	1.15	0.55	0.50	0.50

\* En condiciones de superficie del suelo seca; en condiciones húmedas, habrá que aumentar estos valores en un 25% o más.

Cuadro 30.e. Valores de Kc correspondientes a árboles caducifolios frutales y de nuez, de pleno crecimiento.

	Con cubierta vegetal *								
	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov
<b>INVIERNOS FRIOS CON HELADAS LETALES: LA CUBIERTA EMPIEZA A FORMARSE EN ABRIL</b>									
<b>Manzanas, cerezas</b>									
-vientos de débiles a moderados, húmedos	-	0.50	0.75	1.00	1.10	1.10	1.10	0.85	-
-vientos fuertes, húmedos	-	0.50	0.75	1.10	1.20	1.20	1.15	0.90	-
-vientos de débiles a moderados, secos	-	0.45	0.85	1.15	1.25	1.25	1.20	0.95	-
-vientos fuertes, secos	-	0.45	0.85	1.20	1.35	1.35	1.25	1.00	-
<b>Melocotones (durasnos), albaricoques,</b>									
<b>peras, ciruelas</b>									
-vientos de débiles a moderados, húmedos	-	0.50	0.70	0.90	1.00	1.00	0.95	0.75	-
-vientos fuertes, húmedos	-	0.50	0.70	1.00	1.05	1.10	1.00	0.80	-
-vientos débiles a moderados, secos	-	0.45	0.80	1.05	1.15	1.15	1.10	0.85	-
-vientos fuertes, secos	-	0.45	0.80	1.10	1.20	1.20	1.15	0.90	-
<b>INVIERNOS FRIOS CON HELADAS LIGERAS: SIN LATENCIA EN LA CUBIERTA VEGETAL DE GRAMINEAS</b>									
<b>Manzanas, cerezas, nogal</b>									
-vientos de débiles a moderados húmedos	0.80	0.90	1.00	1.10	1.10	1.10	1.05	0.85	0.80
-vientos fuertes, húmedos	0.80	0.95	1.10	1.15	1.20	1.20	1.15	0.90	0.80
-vientos de débiles a moderados, secos	0.85	1.00	1.15	1.25	1.25	1.25	1.20	0.95	0.85
-vientos fuertes, secos	0.85	1.05	1.20	1.35	1.35	1.35	1.25	1.00	0.85
<b>Melocotones (durasnos), albaricoques,</b>									
<b>peras, ciruelas, almendras, pecanas</b>									
-vientos de débiles a moderados, húmedos	0.80	0.85	0.90	1.00	1.00	1.00	0.95	0.80	0.80
-vientos fuertes, húmedos	0.80	0.90	0.95	1.00	1.10	1.10	1.00	0.85	0.80
-vientos de débiles a moderados, secos	0.85	0.95	1.05	1.15	1.15	1.15	1.10	0.90	0.85
-vientos fuertes, secos	0.85	1.00	1.10	1.20	1.20	1.20	1.15	0.95	0.85

\* Habrá que aumentar los valores de Kc si son frecuentes las lluvias (véanse los ajustes oportunos en la figura 16).

En el caso de huertos jóvenes con una cubierta arbórea de un 20 y un 50%, se deberán reducir los valores Kc de mediados del periodo vegetativo de un 10 a un 15% y de un 5 a un 10%, respectivamente.

Cuadro 38.c. Continuación

		Sin cubierta vegetal ** (cultivados limpios, exentos de malas hierbas)								
		Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov
-----										
INVIERNOS FRIOS CON HELADAS LETALES: LA CUBIERTA EMPIEZA A FORMARSE EN ABRIL										
-----										
Manzanas, cerezas										
-----										
-vientos de débiles a moderados, húmedos	-	0.45	0.55	0.75	0.85	0.85	0.80	0.60	-	-
-vientos fuertes, húmedos	-	0.45	0.55	0.80	0.90	0.90	0.85	0.65	-	-
-vientos de débiles a moderados, secos	-	0.40	0.60	0.85	1.00	1.00	0.95	0.70	-	-
-vientos fuertes, secos	-	0.40	0.65	0.90	1.05	1.05	1.00	0.75	-	-
-----										
Melocotones (durasnos), albaricoques,										
-----										
peras y ciruelas										
-----										
-vientos de débiles a moderados, húmedos	-	0.45	0.50	0.65	0.75	0.75	0.70	0.55	-	-
-vientos fuertes, húmedos	-	0.45	0.55	0.70	0.80	0.80	0.75	0.60	-	-
-vientos de débiles a moderados, secos	-	0.40	0.55	0.75	0.90	0.90	0.70	0.65	-	-
-vientos fuertes, secos	-	0.40	0.60	0.80	0.95	0.95	0.90	0.65	-	-
-----										
INVIERNOS FRIOS CON HELADAS LIGERAS: SIN LATENCIA EN LA CUBIERTA VEGETAL DE GRAMINEAS										
-----										
Manzanas, cerezas, nogal										
-----										
-vientos de débiles a moderados, húmedos	0.60	0.70	0.80	0.85	0.85	0.80	0.80	0.75	0.65	-
-vientos fuertes, húmedos	0.60	0.75	0.85	0.90	0.90	0.85	0.80	0.80	0.70	-
-vientos de débiles a moderados, secos	0.50	0.75	0.95	1.00	1.00	0.95	0.90	0.85	0.70	-
-vientos fuertes, secos	0.50	0.80	1.00	1.05	1.05	1.00	0.95	0.90	0.75	-
-----										
Melocotones (durasnos), albaricoques,										
-----										
peras, ciruelas, almendras, pecanas										
-----										
-vientos de débiles a moderados, húmedos	0.55	0.70	0.75	0.80	0.80	0.70	0.70	0.65	0.55	-
-vientos fuertes, húmedos	0.55	0.70	0.75	0.80	0.80	0.80	0.75	0.70	0.60	-
-vientos de débiles a moderados, secos	0.50	0.70	0.85	0.90	0.90	0.90	0.80	0.75	0.65	-
-vientos fuertes, secos	0.50	0.75	0.90	0.95	0.95	0.95	0.85	0.80	0.70	-
-----										

\*\* Los valores de Kc presuponen unas lluvias o un riego infrecuentes (cada 2 ó 4 semanas). En el caso de riegos frecuentes en marzo, abril y noviembre, habrá que reajustar el Kc recurriendo a la figura 16; en mayo y octubre, se emplearán los valores de Kc del cuadro correspondientes a "Con una cubierta vegetal".

En el caso de huertos jóvenes con una cubierta arbórea de un 20 y un 50%, habrá que reducir los valores de Kc de mediados del periodo vegetativo de un 25 a un 35% y de un 10 a un 15%, respectivamente.

Cuadro 36.f. Valores de Kc correspondientes a los cítricos (cultivados en zonas predominantemente secas, con unos vientos de débiles a moderados).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Grandes árboles maduros que proporcionan una cubierta arbórea superior a un 70% Cultivados limpios	0.50	0.50	0.55	0.55	0.55	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.55	0.55
Sin programa de lucha contra las malas hierbas	0.75	0.75	0.80	0.80	0.80	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.80	0.80
Arboles que proporcionan una cubierta arbórea de un 50% más o menos. Cultivados limpios	0.45	0.45	0.50	0.50	0.50	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.50	0.50
Sin programa de lucha contra las malas hierbas	0.75	0.75	0.80	0.80	0.80	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.80	0.80
Arboles que proporcionan una cubierta arbórea inferior a un 20% Cultivados limpios	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.40	0.40
Sin programa de lucha contra las malas hierbas	0.85	0.85	0.90	0.90	0.90	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.90	0.90

Cuadro 38.a. Valores de Kc en el caso de la vid (riego infrecuente, suelo seco)

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Uvas maduras, cultivadas en zonas con heladas letales: primeras hojas a principios de mayo, recolección a mediados de septiembre: cubierta sombreada: 40-50% a mediados del período vegetativo: superficie cultivada limpia												
Vientos de débiles a moderados, húmedos	-	-	-	-	0.50	0.60	0.70	0.70	0.60	0.50	-	-
Vientos fuertes, húmedos	-	-	-	-	0.50	0.60	0.75	0.75	0.65	0.55	-	-
Vientos de débiles a moderados, secos	-	-	-	-	0.45	0.65	0.80	0.85	0.75	0.60	-	-
-----												
Uvas maduras, en zonas en las que solamente hay heladas ligeras: primeras hojas a principios de abril, recolección de fines de agosto o principios de septiembre: cubierta sombreada: 30-35% a mediados del período vegetativo: superficie cultivada limpia												
Vientos de débiles a moderados, húmedos	-	-	-	0.50	0.55	0.60	0.60	0.60	0.55	0.40	0.35	-
Vientos fuertes, húmedos	-	-	-	0.50	0.55	0.65	0.65	0.65	0.60	0.45	0.35	-
Vientos de débiles a moderados, secos	-	-	-	0.45	0.60	0.70	0.70	0.70	0.65	0.50	0.30	-
Vientos fuertes, secos	-	-	-	0.45	0.65	0.75	0.75	0.75	0.70	0.55	0.30	-
-----												
Uvas maduras, cultivadas en zonas secas y calientes: primeras hojas a finales de febrero o principios de marzo, recolección en la segunda quincena de julio: cubierta sombreada: 30 - 35% a mediados del período vegetativo: superficie cultivada limpia												
Vientos de débiles a moderados, secos	-	-	0.25	0.45	0.60	0.70	0.70	0.65	0.55	0.45	0.35	-
Vientos fuertes, secos	-	-	0.25	0.45	0.65	0.75	0.75	0.70	0.55	0.45	0.35	-

Cuadro 38.h. Valores de Kc en el caso de la banana.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Cultivo del primer año, basado en una plantación en marzo con unos cultivos que tengan 3.5 metros de altura agosto:												
Vientos de débiles a moderados, húmedos	-	-	0.65	0.60	0.55	0.60	0.70	0.85	0.95	1.00	1.00	1.00
Vientos fuertes, húmedos	-	-	0.65	0.60	0.55	0.60	0.75	0.90	1.00	1.05	1.05	1.05
Vientos de débiles a moderados, secos	-	-	0.50	0.45	0.50	0.60	0.75	0.95	1.10	1.15	1.10	1.10
Vientos fuertes, secos	-	-	0.50	0.45	0.50	0.65	0.80	1.00	1.15	1.20	1.15	1.15
Segunda estación, con eliminación de las plantas originales en febrero y una cubierta sombreada de un 80%												
Vientos de débiles a moderados, húmedos	1.00	0.80	0.75	0.70	0.70	0.75	0.90	1.05	1.05	1.05	1.00	1.00
Vientos fuertes, húmedos	1.05	0.80	0.75	0.70	0.70	0.80	0.95	1.10	1.10	1.10	1.05	1.05
Vientos de débiles a moderados, secos	1.10	0.70	0.75	0.70	0.75	0.85	1.05	1.20	1.20	1.20	1.15	1.15
Vientos fuertes, secos	1.15	0.70	0.75	0.70	0.75	0.90	1.10	1.25	1.25	1.25	1.20	1.20

## Climas tropicales

Meses subsiguientes a la plantación:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	.40	.40	.45	.50	.60	.70	.85	1.0	1.1	1.1	.90	.80	.80	.95	1.05
Form. vástagos				↑											
Ahijamiento									↑						
Recolección													↑		

Cuadro 38.i. Valores de Kc de las hierbas acuáticas y coeficientes correspondientes a la superficie de agua libre.

Tipo de Vegetación	Húmedos		Secos	
	Vientos de débiles a moderados	Vientos fuertes	Vientos de débiles a moderados	Vientos fuertes
Sumergidas (crassines)	1.10	1.15	1.15	1.20
Flotantes (lentejas de agua)	1.05	1.05	1.05	1.05
Hoja plana (nenúfares)	1.05	1.10	1.05	1.10
Sobresalientes (jacinto acuático)	1.10	1.15	1.15	1.20
Juncos de pantano (papiro, anea)				
agua estancada	0.90	0.90	0.95	1.00
suelos húmedos	0.70	0.70	0.80	0.85
Superficie de agua abierta	1.10	1.15	1.15	1.20

Cuadro 39. Valores de Kc en base a las características de desarrollo del cultivo.

Cultivo	Etapa de crecimiento a cobertura efectiva-100%	Coefficiente medio del cultivo Kc
<b>CULTIVOS DE CAMPO</b>		
Alfalfa	cuando la temperatura del aire alcanza y permanece por arriba de 6.1 grados Celsius.	1.0 *
Frijol	cuando empieza a formarse el sarmiento, o aproximadamente 35 días después de la siembra.	**
Maíz	10 días después de inflorescencia, o aproximadamente 85 días después de la siembra.	**
Algodón	aproximadamente 140 días después de la siembra.	**
Pastos	cuando la temperatura del aire alcanza y permanece por arriba de 6.1 grados Celsius.	**
Papa (tempranas)	aproximadamente 80 días después de la siembra	**
Papa (tardía)	aproximadamente 45 días después de la siembra.	**
Sorgo de grano	formación de grano.	**
Granos pequeños	formación de grano	**
Remolacha azucarera	aproximadamente 110 días después de la siembra.	**
<b>OTROS CULTIVOS:</b>		
Manzanas c/ Alfalfa (cultivo de cobertura)	cuando la temperatura media del aire alcanza y permanece por arriba de 6.1 grados Celsius.	1.1
Césped	cuando la temperatura media del aire alcanza y permanece por arriba de 6.1 grados Celsius y no existe dormancia total o permanente en este intervalo.	1.0 !
Dátil		0.9 !!
Huertos cultivados (cítricos)		0.6 !!

\* Disminuye a 0.5 después del corte. Vuelve a aumentar linealmente a 1.0 en 20 días. Manéjese 0.25 cuando la alfalfa inicia su crecimiento en primavera. Después aumenta linealmente a 1.0 en 30 días.

\*\* Variables. Vea las figuras 12 a 15.

! Utilice los coeficientes de césped de la ecuación  $ETp = Ct (T-Tx) R_s$  vista en el método de Jensen-Haise.

!! La presencia de malezas o cultivos de cobertura incrementan Kc significativamente. Agregue de 0.1 a 0.3 a Kc en malezas leves y tupidas.

CUADRO 40. TEMPERATURA MEDIA MENSUAL Y MEDIA MENSUAL ANUAL (C.C.), EN LA ESTACION AGROCLIMATOLOGICA "CAMPO EXPERIMENTAL UNISON".

mes año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oci	Nov	Dic
1981	X	X	X	X	X	X	X	X	X	25.9	19.7	16.2
1982	13.1	14.8	18.0	21.3	22.6	26.3	27.9	31.9	30.8	24.1	18.7	15.4
1983	15.8	16.5	18.2	18.9	25.1	28.3	32.0	30.3	30.6	26.4	14.8	16.4
1984	14.5	15.3	18.1	19.8	24.0	29.1	29.7	31.5	29.7	22.6	18.5	15.6
1985	14.5	15.2	17.9	22.5	25.3	29.9	32.1	31.0	27.7	24.6	17.9	16.1
1986	18.9	18.0	19.8	24.4	25.4	30.8	30.9	31.2	28.7	24.2	19.6	15.0
1987	14.6	16.1	17.2	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PROM	15.2	16.0	18.2	21.4	24.5	28.9	30.5	31.2	29.5	24.6	18.2	15.8

CUADRO 41. EVAPORACION MEDIA MENSUAL Y MEDIA MENSUAL ANUAL (mm), EN LA ESTACION AGROCLIMATOLOGICA "CAMPO EXPERIMENTAL UNISON".

mes año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oci	Nov	Dic
1981	X	X	X	X	X	X	X	X	X	6.05	5.29	4.02
1982	3.42	4.94	6.66	10.31	10.32	11.15	9.57	7.40	8.36	6.50	3.55	2.03
1983	2.40	3.89	5.37	6.89	10.28	12.25	11.09	7.03	9.60	X	3.12	2.48
1984	2.88	4.58	6.43	7.26	10.17	10.32	6.09	6.84	6.84	5.40	3.92	3.01
1985	2.68	3.61	5.04	7.27	8.66	9.94	9.94	7.27	7.10	5.53	3.90	2.65
1986	3.95	4.17	6.17	8.82	9.70	11.35	9.50	7.70	7.76	6.15	4.60	2.83
1987	4.00	5.45	6.09	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PROM	3.22	4.44	5.96	8.11	9.83	11.00	9.24	7.25	7.93	5.93	4.06	2.84

CUADRO 42. PRECIPITACION MENSUAL Y MEDIA MENSUAL ANUAL (mm), EN LA ESTACION AGROCLIMATOLOGICA "CAMPO EXPERIMENTAL UNISON".

mes año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1981	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0.50	3.20	0.00
1982	13.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.0	36.9	25.8	0.00	26.50	74.20
1983	10.30	16.20	33.20	6.00	0.00	0.00	68.9	57.4	203.2	X	28.00	30.00
1984	56.30	0.00	0.00	0.00	0.00	12.00	92.30	169.6	7.60	1.50	6.50	116.2
1985	22.90	9.20	0.00	14.50	0.00	0.00	93.90	53.30	38.90	20.30	11.60	2.60
1986	16.00	16.00	3.70	X	0.00	18.60	80.30	157.7	9.80	13.60	0.00	29.80
1987	0.00	35.10	0.00	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PROM	19.88	12.75	6.15	5.13	0.00	6.12	69.88	94.98	57.06	7.18	12.63	42.13

CUADRO 43. RADIACION SOLAR MEDIA MENSUAL Y MEDIA MENSUAL ANUAL (Cal/cm - cuadrado/dia), EN LA ESTACION AGROCLIMATOLOGICA "CAMPO EXPERIMENTAL UNISON".

mes año	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
1981-1982	X	X	X	X	X
1982-1983	477.4 *	429.8	462.2	584.4	700.7
1983-1984	X	460.5	492.5	612.3	720.1
1984-1985	X	401.2	443.4	596.0	684.0
1985-1986	491.4 *	X	546.7 *	625.6	734.5
1986-1987	485.0	456.4	515.8	589.7	743.3
PROMEDIO	484.6	437.0	492.1	601.6	716.5

\* NO SE CONSIDERO EL MES COMPLETO POR FALTA DE INFORMACION.

CUADRO 44. HORAS-LUZ (h) PROMEDIO MENSUAL Y PROMEDIO MENSUAL ANUAL, EN LA ESTACION AGROCLIMATOLOGICA "CAMPO EXPERIMENTAL UNISON".  
(Horas)

mes año	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
1981-1982					
1982-1983	6.87	7.43	7.53	9.18	8.23
1983-1984	X	8.17 *	8.63 *	9.63 *	9.40
1984-1985	X	6.35	6.85	8.57	7.63 *
1985-1986	7.98	X	8.52 *	9.22 *	9.00
1986-1987	7.40	7.02	8.67	9.13 *	9.57
PROMEDIO	7.42	7.24	8.04	9.15	8.77

\* NO SE CONSIDERO EL MES COMPLETO POR FALTA DE INFORMACION.

CUADRO 45. TEMPERATURA MEDIA MAXIMA MENSUAL Y SU PROMEDIO MENSUAL ANUAL, EN LA ESTACION AGROCLIMATOLOGICA "CAMPO EXPERIMENTAL UNISON".  
(Grados Celsius)

mes año	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
1981-1982	25.0	20.3	16.5	21.3	26.0
1982-1983	22.8	18.5	21.3	18.5	23.8
1983-1984	X	21.0	20.0	20.3	22.5
1984-1985	23.0	19.5	18.5	20.8	22.5
1985-1986	22.3	20.0	21.0	24.0	24.5
1986-1987	25.3	19.5	21.0	25.0	22.0
PROMEDIO	23.7	19.8	19.7	21.7	23.6

CUADRO 46. TOTAL DE TEMPERATURAS MAXIMAS MENSUALES > 0 G.C. Y SU PROMEDIO MENSUAL ANUAL, EN LA ESTACION AGROCLIMATOLOGICA 'CAMPO EXPERIMENTAL UNISON'.

mes año	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
1981-1982	885.0	812.0	672.0	722.0	864.0
1982-1983	810.0	683.0	742.0	704.0	819.5
1983-1984	789.0	754.0	711.5	739.0	891.5
1984-1985	869.0	716.0	666.0	682.5	834.0
1985-1986	827.5	827.5	918.5	778.0	895.0
1986-1987	854.5	740.0	761.5	701.0	835.0
PROMEDIO	839.2	755.4	745.3	721.1	856.5

CUADRO 47. TANQUE DE EVAPORACION (PALACIOS)

MES	DIAS	Ev (mm)	C	ET DIARIA (mm)	ET MENSUAL (cm)
NOVIEMBRE	23	4.06	0.75	3.045	7.00
DICIEMBRE	31	2.84	0.75	2.130	6.60
ENERO	31	3.22	0.75	2.415	7.49
FEBRERO	28	4.44	0.75	3.330	9.32
MARZO	31	5.96	0.75	4.470	13.86
TOTAL	144				44.27

CUADRO 48. TANQUE DE EVAPORACION (HARGREAVES)

MES	DIAS	Ev (mm)	C	ET DIARIA (mm)	ET MENSUAL (cm)
NOVIEMBRE	23	4.06	0.22986	0.933	2.15
DICIEMBRE	31	2.84	0.39236	1.114	3.45
ENERO	31	3.22	0.58264	1.876	5.82
FEBRERO	28	4.44	0.78750	3.497	9.79
MARZO	31	5.96	0.59236	3.530	10.94
TOTAL	144				32.15

CUADRO 49. TANQUE DE EVAPORACION (UAN DER MOLEN)

MES	DIAS	Ev (mm)	C	ET DIARIA (mm)	ET MENSUAL (cm)
NOVIEMBRE	23	4.06	1.0	4.06	9.34
DICIEMBRE	31	2.84	1.0	2.84	8.88
ENERO	31	3.22	1.0	3.22	9.98
FEBRERO	28	4.44	1.0	4.44	12.43
MARZO	31	5.96	1.0	5.96	18.48
TOTAL	144				59.03

CUADRO 50. LOWRY-JOHNSON

CICLO	DIAS	H (GRAD-DIA)	ET (m)	ET (cm)	ET DIARIA (mm)
NOV.8-MAR.31	144	3 735.89	0.57 887	57.89	4.02

CUADRO 51. LOWRY-JOHNSON MODIFICADO

CICLO	DIAS	H (GRAD-DIA)	ET (m)	ET (cm)	ET DIARIA (mm)
NOV.8-MAR.31	144	3 735.90	0.56 155	56.16	3.90

CUADRO 52. THORNTHWAITE

MES	DIAS	TEMP. (G.C.)	(101/1) exp.a	ET (cm)	FACTOR DE CORREC.	ETo (cm)	ETo DIARIA (mm)
NOV.	23	18.2	2.98939	4.783	0.90	4.31	1.87
DIC	31	15.8	2.01810	3.229	0.89	2.87	0.93
ENE.	31	15.2	1.81229	2.900	0.91	2.64	0.85
FEB.	28	16.0	2.08988	3.344	0.87	2.91	1.04
MAR.	31	18.2	2.98939	4.783	1.03	4.93	1.59
TOTAL	144			19.039		17.66	

I=122.7174

a=2.7785

CUADRO 53. JENSEN-HAISE

MES	DIAS	TEMP. (G.C.)	$0.0252T + 0.078$	R <sub>s</sub> (mm)	ET DIARIA (mm)	ET MENSUAL (cm)
NOVIEMBRE	23	18.2	0.53 664	8.21	4.406	10.13
DICIEMBRE	31	15.8	0.47 616	7.28	3.466	10.75
ENERO	31	15.2	0.46 104	8.34	3.845	11.92
FEBRERO	28	16.0	0.48 120	10.20	4.908	13.74
MARZO	31	18.2	0.53 664	12.14	6.515	20.20
TOTAL	144					66.74

CUADRO 54. HARGREAVES

MES	DIAS	TEMP. (G.F.)	Rs (mm)	0.0075	ET DIARIA (mm)	ET MENSUAL (cm)
NOVIEMBRE	23	64.76	8.21	0.0075	3.988	9.17
DICIEMBRE	31	60.44	7.28	0.0075	3.300	10.23
ENERO	31	59.36	8.34	0.0075	3.713	11.51
FEBRERO	28	60.80	10.20	0.0075	4.651	13.02
MARZO	31	64.76	12.14	0.0075	5.896	18.28
TOTAL	144					62.22

CUADRO 55. CAPRIO

MES	DIAS	Rs (Ly/dia)	(Tx+Tn) /2	STU	ET DIARIA (mm)	ET MENSUAL (cm)
NOVIEMBRE	23	484.6	64.76	31 351.696	3.135	7.21
DICIEMBRE	31	437.0	60.44	26 381.280	2.638	8.18
ENERO	31	492.1	59.36	29 180.056	2.918	9.05
FEBRERO	28	601.6	60.80	36 546.280	3.655	10.23
MARZO	31	716.5	64.76	46 369.540	4.637	14.37
TOTAL	144					49.04

CUADRO 56. GARCIA BENAVIDES (Ev A PARTIR DEL TANQUE DE EVAPORACION)

MES	DIAS	Ev (mm)	C	ET DIARIA (mm)	ET MENSUAL (cm)
NOVIEMBRE	23	4.06	0.8	3.248	7.47
DICIEMBRE	31	2.84	0.8	2.272	7.04
ENERO	31	3.22	0.8	2.576	7.99
FEBRERO	28	4.44	0.8	3.552	9.95
MARZO	31	5.96	0.8	4.768	14.78
TOTAL	144				47.23

CUADRO 57. GARCIA BENAVIDES (CON ESTIMACION DE LA Ev)

MES	DIAS	TM (G.C.)	b TM	Ev (mm)	C	ET MENSUAL (mm)	ET MENSUAL (cm)	ET DIARIA (mm)
NOV.	23	23.7	306.223	133.715	0.8	106.97	10.70	4.65
DIC	31	19.8	255.832	83.324	0.8	66.66	6.67	2.15
ENE.	31	19.7	254.540	82.031	0.8	65.63	6.56	2.12
FEB.	28	21.7	280.381	107.873	0.8	86.30	8.63	3.08
MAR.	31	23.6	304.931	132.423	0.8	105.94	10.59	3.42
TOTAL	144						43.15	

a=-172.5083

b=12.9208

CUADRO 58. BLANEY-CRIDDLE SIN CORREGIR

MES	DIAS	TEMP. (G.C.)	$(t+17.8)$ /21.8	P	f	K	ET MENSUAL (cm)	ET DIARIA (mm)
NOV.	23	18.2	1.6514	5.55	9.1653	0.85	7.79	3.39
DIC.	31	15.8	1.5413	7.20	11.0974	0.85	9.43	3.04
ENE.	31	15.2	1.5138	7.35	11.1264	0.85	9.46	3.05
FEB.	28	16.0	1.5505	7.04	10.9155	0.85	9.28	3.31
MAR.	31	18.2	1.6514	8.37	13.8222	0.85	11.75	3.79
TOTAL	144				56.1268		47.71	

CUADRO 59. BLANEY-CRIDDLE CON LA CORRECCION DE PHELAN

MES	DIAS	TEMP. (G.C.)	f	Kc	Kf	ET (cm)	C	Eto (cm)	ET DIARIA (mm)
NOV.	23	18.2	9.1653	0.2896	0.8064	2.140	1.121	2.40	1.04
DIC.	31	15.8	11.0974	0.8021	0.7317	6.513	1.121	7.30	2.35
ENE.	31	15.2	11.1264	1.3926	0.7130	11.048	1.121	12.39	4.00
FEB.	28	16.0	10.9155	1.4781	0.7379	11.905	1.121	13.35	4.77
MAR.	31	18.2	13.8222	0.9829	0.8064	10.956	1.121	12.28	3.96
TOTAL	144		56.1268			42.562		47.72	

CUADRO 60. CURVA DE HANSEN

MES	DIAS	TEMP. (G.C.)	f	Kc	ET (cm)	C	ETo MENSUAL (cm)	ET DIARIA (mm)
NOV.	23	18.2	9.1653	0.319	2.924	1.275	3.73	1.62
DIC	31	15.8	11.0974	0.690	7.657	1.275	9.76	3.15
ENE.	31	15.2	11.1264	0.950	10.570	1.275	13.48	4.35
FEB.	28	16.0	10.9155	0.876	9.562	1.275	12.19	4.35
MAR.	31	18.2	13.8222	0.486	6.718	1.275	8.57	2.76
TOTAL	144		56.1268		37.431		47.73	

CUADRO 61. GRASSI-CHRISTIANSEN

MES	DIAS	TEMP. (G.C.)	f	Km	ET (cm)	C	ETo MENSUAL (cm)	ET DIARIA (mm)
NOV.	23	18.2	9.1653	0.263	2.410	1.033	2.45	1.08
DIC	31	15.8	11.0974	0.720	7.990	1.033	8.25	2.66
ENE.	31	15.2	11.1264	1.002	11.149	1.033	11.52	3.72
FEB.	28	16.0	10.9155	1.072	11.701	1.033	12.09	4.32
MAR.	31	18.2	13.8222	0.936	12.938	1.033	13.37	4.31
TOTAL	144		56.1268		46.188		47.68	



CUADRO 63. RESULTADOS DE LOS METODOS UTILIZADOS EN EL CALCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACION DEL CULTIVO DE TRIGO.

METODO	EVAPOTRANSPIRACION (cm)					
	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	TOTAL
TANQUE DE EVAPORACION (PALACIOS)	7.00	6.60	7.49	9.32	13.86	44.3
TANQUE DE EVAPORACION (HARGREAVES)	2.15	3.45	5.82	9.79	10.94	32.2
TANQUE DE EVAPORACION (VAN DER MOLEN)	9.34	8.80	9.98	12.43	18.48	59.0
LOWRY - JOHNSON	9.25	12.46	12.46	11.26	12.46	57.9
LOWRY - JOHNSON MODIFICADO	8.97	12.09	12.09	10.92	12.09	56.2
THORNTHWAITTE	4.31	2.87	2.64	2.91	4.93	17.7
JENSEN - HAISE	10.13	10.75	11.92	13.74	20.20	66.7
HARGREAVES	9.17	10.23	11.51	13.02	18.28	62.2
CAPRIO	7.21	8.18	9.05	10.23	14.37	49.0
GARCIA BENAVIDES (EV OBTENIDA DEL TANQUE DE EVAPORACION)	7.47	7.04	7.99	9.95	14.78	47.2
GARCIA BENAVIDES (EV ESTIMADA)	10.70	6.67	6.56	8.63	10.59	43.2
BLANEY - CRIDDLE	7.79	9.43	9.46	9.28	11.75	47.7
CORRECCION DE PHELAN	2.40	7.30	12.39	13.35	12.28	47.7
CURVA DE HANSEN	3.73	9.76	13.48	12.19	8.57	47.7
GRASSI - CHRISTIANSEN	2.45	8.25	11.52	12.09	13.37	47.7
PENMAN SIMPLIFICADO	5.08	5.83	6.32	6.08	9.55	32.9

CUADRO 64. VALORES DE KC PARA OBTENER LA EVAPOTRANSPIRACION REAL

METODO MES	HARGREAVES	PALACIOS	GRASSI	DEMMEAD-SHAW
NOVIEMBRE	0.5 388	0.3 051	0.4 735	0.3 818
DICIEMBRE	0.9 585	0.5 128	0.8 656	0.5 823
ENERO	1.0 055	0.6 360	1.0 381	0.7 649
FEBRERO	0.7 278	0.6 268	1.0 051	0.7 376
MARZO	0.0 657	0.4 303	0.7 595	0.2 989

CUADRO 65. EVAPOTRANSPIRACION REAL PARA EL METODO DEL TANQUE DE EVAPORACION PROPUESTO POR PALACIOS, UTILIZANDO LOS COEFICIENTES  $K_c$  DE HARGREAVES.

MES	$K_c$	ET	ETr
NOVIEMBRE	0.5 388	7.00	3.77
DICIEMBRE	0.9 585	6.60	6.33
ENERO	1.0 055	7.49	7.53
FEBRERO	0.7 278	9.32	6.78
MARZO	0.0 657	13.86	0.91
TOTAL		44.27	25.32

CUADRO 66. EVAPOTRANSPIRACION REAL PARA EL METODO DEL TANQUE DE EVAPORACION PROPUESTO POR PALACIOS, UTILIZANDO LOS COEFICIENTES  $K_c$  DEL MISMO.

MES	$K_c$	ET	ETr
NOVIEMBRE	0.3 051	7.00	2.14
DICIEMBRE	0.5 128	6.60	3.38
ENERO	0.6 360	7.49	4.76
FEBRERO	0.6 268	9.32	5.84
MARZO	0.4 303	13.86	5.96
TOTAL		44.27	22.08

CUADRO 67. EVAPOTRANSPIRACION REAL PARA EL METODO DEL TANQUE DE EVAPORACION PROPUESTO POR PALACIOS, UTILIZANDO LOS COEFICIENTES  $K_c$  DE GRASSI.

MES	$K_c$	ET	ETr
NOVIEMBRE	0.4 735	7.00	3.31
DICIEMBRE	0.8 656	6.60	5.71
ENERO	1.0 381	7.49	7.78
FEBRERO	1.0 051	9.32	9.37
MARZO	0.7 595	13.86	10.53
TOTAL		44.27	36.70

CUADRO 68. EVAPOTRANSPIRACION REAL PARA EL METODO DEL TANQUE DE EVAPORACION PROPUESTO POR PALACIOS, UTILIZANDO LOS COEFICIENTES  $K_c$  DE DENMEAD - SHAW.

MES	$K_c$	ET	ETr
NOVIEMBRE	0.3 818	7.00	2.67
DICIEMBRE	0.5 823	6.60	3.84
ENERO	0.7 649	7.49	5.73
FEBRERO	0.7 376	9.32	6.87
MARZO	0.2 989	13.86	4.14
TOTAL		44.27	23.25

CUADRO 69. EVAPOTRANSPIRACION REAL PARA EL METODO DE CAPRIO, UTILIZANDO  
LOS COEFICIENTES  $K_c$  DE HARGREAVES.

MES	$K_c$	ET	ETr
NOVIEMBRE	0.5 388	7.21	3.88
DICIEMBRE	0.9 585	8.18	7.84
ENERO	1.0 055	9.05	9.10
FEBRERO	0.7 278	10.23	7.45
MARZO	0.0 657	14.37	0.94
TOTAL		49.04	29.21

CUADRO 70. EVAPOTRANSPIRACION REAL PARA EL METODO DE CAPRIO, UTILIZANDO  
LOS COEFICIENTES  $K_c$  DE PALACIOS.

MES	$K_c$	ET	ETr
NOVIEMBRE	0.3 051	7.21	2.20
DICIEMBRE	0.5 128	8.18	4.19
ENERO	0.6 360	9.05	5.76
FEBRERO	0.6 268	10.23	6.41
MARZO	0.4 303	14.37	6.18
TOTAL		49.04	24.74

CUADRO 71. EVAPOTRANSPIRACION REAL PARA EL METODO DE CAPRIO, UTILIZANDO  
LOS COEFICIENTES  $K_c$  DE GRASSI.

MES	$K_c$	ET	ET <sub>r</sub>
NOVIEMBRE	0.4 735	7.21	3.41
DICIEMBRE	0.8 656	8.18	7.08
ENERO	1.0 381	9.05	9.39
FEBRERO	1.0 051	10.23	10.28
MARZO	0.7 595	14.37	10.91
TOTAL		49.04	41.07

CUADRO 72. EVAPOTRANSPIRACION REAL PARA EL METODO DE CAPRIO, UTILIZANDO  
LOS COEFICIENTES  $K_c$  DE DEMEAD-SHAW.

MES	$K_c$	ET	ET <sub>r</sub>
NOVIEMBRE	0.3 818	7.21	2.75
DICIEMBRE	0.5 823	8.18	4.76
ENERO	0.7 649	9.05	6.92
FEBRERO	0.7 376	10.23	7.55
MARZO	0.2 989	14.37	4.30
TOTAL		49.04	26.28