

PROGRAMA EN BASIC PARA LA ESTIMACION DEL RENDIMIENTO CLIMATICO MAXIMO

PROGRAM IN BASIC TO ESTIMATE THE MAXIMUM CLIMATIC YIELD

Daniel Fco. Campos Aranda¹

RESUMEN

En este trabajo se presenta un algoritmo computacional desarrollado para hacer expedita la aplicación del método propuesto por la FAO para la estimación del rendimiento climático máximo de cualquiera de los cinco cultivos siguientes: alfalfa (*Medicago sativa*), maíz (*Zea mays* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) y trigos de invierno y de primavera (*Triticum* spp.). Tal método está basado en el criterio desarrollado por el Instituto Internacional de Mejoramiento y Recuperación de Tierras, de Wageningen, Holanda. El método se aplica mediante un procedimiento que estima variables y parámetros climáticos y del cultivo, por medio de una serie de tabulaciones; por ello, éstas se representaron mediante ecuaciones de tipo polinomial y senoidal obtenidas por optimización; los coeficientes de las segundas fueron posteriormente relacionados con la latitud y el número de día del año. Al final se mencionan varias características operativas del programa de cómputo, se describen dos aplicaciones numéricas y se formulan algunos comentarios.

Palabras clave: Agroclimatología, cultivos, rendimiento potencial.

ABSTRACT

This paper shows a computational algorithm developed to simplify the application of a method that was proposed by FAO, for the estimation of maximum climatic yield of any of the following five crops: lucerne (*Medicago sativa*), corn (*Zea mays* L.), sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench.) and spring and winter wheats (*Triticum* spp.). Such method is based upon the criterion developed in the International Institute for Land Reclamation and Improvement of Wageningen, The Netherlands. The method is applied through a procedure which estimates variables and crop and climatic parameters, by a series of tabulations; for this, the tabulations were transformed to poly-

nomial and sinusoidal equations obtained by optimization and then, their coefficients were related to latitude and the number of the day of the year. At the end, several operative characteristics of the computer program are mentioned, two numerical applications are described and some remarks are formulated.

Key words: Agroclimatology, crops, potential yield.

INTRODUCCION

La agroclimatología moderna se caracteriza por su enfoque cuantitativo. Una de sus principales estimaciones es la relativa al rendimiento real de un cultivo, la cual requiere del conocimiento del rendimiento máximo o potencial. Cuando en la zona bajo análisis no existe información fenológica histórica, o bien, en tal área se está analizando la factibilidad de desarrollar actividades agrícolas, se debe recurrir a estimaciones climáticas del rendimiento máximo. El International Institute for Land Reclamation and Improvement (IILRI) de Wageningen, Holanda, desarrolló un procedimiento que permite estimar los rendimientos máximos de cinco cultivos que son: alfalfa (*Medicago sativa* L.), maíz (*Zea mays* L.), sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), trigo (*Triticum aestivum* L.), de invierno y trigo de primavera (Feddes *et al.*, 1978), método que fue modificado someramente por los expertos de la FAO (Doorenbos y Kassam, 1979) para incluir parte de la experiencia de FAO en tales estimaciones; para este último procedimiento es que se desarrolla el programa propuesto.

En general, el rendimiento máximo de un cultivo (Y_m) está determinado principalmente por sus características genéticas y por la buena adaptación del cultivo al clima del lugar. El Y_m se define como el rendimiento cosechado de una variedad de gran producción, bien adaptada al ambiente de que se trate, incluyendo el tiempo disponible para llegar a su madurez, en condiciones tales que su rendimiento no esté limitado por el agua, los nutrimentos, las plagas o las enfermedades (Doorenbos y Kassam, 1979).

Los elementos climáticos que determinan el Y_m son la temperatura, la radiación y la duración del

¹ Especialidad en Riego y Drenaje, Facultad de Ingeniería de la U.A.S.L.P. Genaro Codina No. 240. Col. Jardines del Estadio. 78280 San Luis Potosí, S.L.P. 91 FAX (48)13-09-24.

Recibido: Marzo, 1993.

Aceptado: Agosto, 1993.

Publicado en Agrociencia 30: 21-30. 1996.

ciclo de crecimiento, así como las necesidades específicas del cultivo, en cuanto a temperatura y duración del día, para su desarrollo. Además de las necesidades climáticas, para algunos cultivos el período de crecimiento total necesario para alcanzar el Ym debe manejarse mediante el suministro adecuado de agua (Doorenbos y Kassam, 1979).

MATERIALES Y METODOS

Descripción del Método del IILRI-FAO

El potencial de producción de materia seca vegetal para un clima dado, se calcula para un cultivo tipo mediante el concepto de C.T. De Wit presentado en 1965 y citado por Doorenbos y Kassam (1979), conocido como *modelo lineal*, el cual utiliza datos sobre la radiación y la evapotranspiración. Para su aplicación a los cultivos agrícolas se hacen correcciones utilizando constantes que dependen del cultivo y términos que expresen el efecto de la temperatura, la eficiencia de desarrollo (respiración) y la parte cosechada del rendimiento final. El procedimiento consiste de los seis pasos siguientes (Doorenbos y Kassam, 1979):

Paso 1) Cálculo de la producción bruta de materia seca (PBMS) de un cultivo tipo, con base en el modelo lineal:

$$PBMS = F \times Y_o + (1 - F) \times Y_c \quad (1)$$

en la cual:

F = fracción de tiempo desde la salida del sol a su puesta (ocaso); se estima con la fórmula:

$$F = (R_{se} - 0.50 \times R_i) / (0.80 \times R_{se}) \quad (2)$$

donde:

R_{se}: es la recepción máxima de radiaciones activas de onda corta en días despejados, en cal cm⁻² d⁻¹; se obtiene del Cuadro 1 en función de la latitud del lugar y de la época o meses del período de crecimiento del cultivo.

R_i: es la radiación solar incidente o recepción real medida de radiaciones de onda corta, en cal cm⁻² d⁻¹; puede obtenerse de Almanza y López (1978).

Y_c = velocidad de producción bruta de materia seca de un cultivo tipo para un lugar dado en

un día despejado (sin nubes), en kg determina en el Cuadro 1.

Y_o = velocidad de producción bruta de materia seca de un cultivo tipo para un lugar dado en un día completamente nublado, en kg determina en el Cuadro 1.

Paso 2) Corrección por efecto del clima (ET_m/(E_s - E_d)). La velocidad de crecimiento del cultivo está también relacionada con la evapotranspiración máxima (ET_m, en mm d⁻¹) y el déficit de presión de vapor medio diario (DVP, en milibares), durante todo el período de crecimiento, donde E_s es la presión parcial (media) de agua a saturación y E_d es la presión (media) del vapor de agua real. Ambos valores promedio se calculan en función de la humedad relativa media y de la temperatura promedio diaria, durante el período de crecimiento del cultivo.

Paso 3) Corrección por especie de cultivo. Se relaciona la PBMS del cultivo tipo con la PBMS (PBMS) de alfalfa, maíz, sorgo o trigo se utilizan las constantes K obtenidas empíricamente para los valores siguientes: alfalfa, 0.90; maíz, 1.17; 1.60; trigo de primavera, 1.17 y trigo de invierno, 0.65.

Paso 4) Corrección por temperatura. La producción de materia seca vegetativa, se aplica una corrección (c_T) para obtener la producción neta de materia seca. Se tiene en cuenta que aproximadamente 40% de la producción total la necesita la planta para los períodos de crecimiento y mantenimiento (respiración). Los valores de c_T se obtienen del Cuadro 2.

Paso 5) Corrección por parte cosechada. En general, sólo se cosecha una parte de la materia seca. Para la alfalfa, al menos el 50% de la materia seca total neta se cosecha, las raíces durante el primer año de crecimiento y del orden de 10% para los años siguientes. Cuando se cosechan para grano el maíz y el trigo, sólo se obtiene una fracción de la materia seca. La relación entre el rendimiento cosechado y la materia seca total se conoce como índice de cosecha (cH) y tiene los valores del Cuadro 3.

Paso 6) Por último, el rendimiento máximo (Y_m) en kg/ha será:

$$Y_m = PBMS \times [ET_m / (E_s - E_d)] \times K \times cT$$

donde, DPC es la duración del período de crecimiento, en días.

Cuadro 1. Valores de los parámetros Rse, Yc y Yo¹, dato(d) y calculados(c)².

Lat N	Pará- metro	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Dif	
														+	-
10	Rse d	299	332	359	375	377	374	375	377	369	345	311	291		
	Rse c	312	325	343	364	381	389	386	373	354	333	316	308	17	16
	Yc d	376	401	422	437	440	440	440	439	431	411	385	370		
	Yc c	385	396	411	429	443	450	448	437	420	403	388	382	12	11
	Yo d	197	212	225	234	236	235	236	235	230	218	203	193		
	Yo c	202	209	218	229	238	242	240	234	224	213	205	201	8	7
20	Rse d	249	293	337	375	394	400	399	386	357	313	264	238		
	Rse c	259	285	322	365	398	414	409	383	343	302	268	253	15	15
	Yc d	334	371	407	439	460	468	465	451	425	387	348	325		
	Yc c	343	365	397	434	462	476	472	449	415	380	350	337	12	10
	Yo d	170	193	215	235	246	250	249	242	226	203	178	164		
	Yo c	175	189	208	231	248	257	254	240	219	198	180	172	8	7
30	Rse d	191	245	303	363	400	417	411	384	333	270	210	179		
	Rse c	201	239	293	355	403	427	419	381	323	263	214	192	13	10
	Yc d	281	333	385	437	471	489	483	456	412	356	299	269		
	Yc c	290	325	374	431	475	497	490	455	402	347	302	282	13	11
	Yo d	137	168	200	232	251	261	258	243	216	182	148	130		
	Yo c	143	163	193	227	254	267	262	242	210	177	150	138	8	7
40	Rse d	131	190	260	339	396	422	413	369	298	220	151	118		
	Rse c	136	185	255	334	396	427	417	368	293	216	153	124	6	5
	Yc d	219	283	353	427	480	506	497	455	390	314	241	204		
	Yc c	227	275	343	421	482	513	503	455	382	306	244	216	12	10
	Yo d	99	137	178	223	253	268	263	239	200	155	112	91		
	Yo c	104	132	173	219	255	272	267	238	195	151	114	97	6	5

¹ Recepción máxima de radiaciones activas de onda corta (Rse, en cal cm⁻² d⁻¹) y producción bruta de materia seca de un cultivo tipo en días despejados (Yc, en kg ha⁻¹ d⁻¹) y nublados (Yo, en kg ha⁻¹ d⁻¹); según Doorenbos y Kassam (1979). ² De acuerdo con las Ecuaciones 6 a 17.

Obtención de las ecuaciones de apoyo

La idea fundamental de la deducción de las ecuaciones de apoyo es evitar el uso del Cuadro 1 (Doorenbos y Kassam, 1979), esto es, la interpolación para estimar los valores medios de Rse, Yc o Yo durante el período de crecimiento de alguno de los cinco cultivos previamente citados.

Ecuaciones polinomiales y de regresión.

Inicialmente se buscó un polinomio de ajuste entre Rse, Yc o Yo de cada latitud (LAT) y el número de día del año (ND) o valores con asterisco del Cuadro 4, con objeto de posteriormente intentar relacionar sus coeficientes con dicha latitud. El polinomio más simple requerido fue el de 4º grado y sus coeficientes no mostraron una tendencia o evolución correlacionable con la latitud.

Cuadro 2. Valores de la corrección por temperatura (cT).

Cultivo	Temperatura ambiente promedio en el período de crecimiento, en °C						
	5	10	15	20	25	30	35
Alfalfa	0.00	0.20	0.40	0.55	0.60	0.60	0.50
Maíz	0.00	0.10	0.35	0.50	0.60	0.60	0.60
Sorgo	0.00	0.10	0.30	0.45	0.55	0.60	0.60
Trigo	0.05	0.30	0.55	0.60	0.35	0.10	0.00

Cuadro 3. Valores de la corrección por parte cosechada (cH).

Cultivo	Índice de cosecha (cH)
Alfalfa	0.40 a 0.50 para el primer año 0.80 a 0.90 años siguientes
Maíz	0.40 a 0.50
Sorgo	0.35 a 0.45
Trigo	0.30 a 0.40

Cuadro 4. Valores del No. de Día (ND) para las fechas indicadas.

Fecha	ND	Fecha	ND
1 enero	1	1 julio	182
15 enero	15*	15 julio	196*
1 febrero	32	1 agosto	213
14 febrero	45*	15 agosto	227*
1 marzo	60	1 septiembre	244
15 marzo	74*	15 septiembre	258*
1 abril	91	1 octubre	274
15 abril	105*	15 octubre	288*
1 mayo	121	1 noviembre	305
15 mayo	135*	15 noviembre	319*
1 junio	152	1 diciembre	335
15 junio	166*	15 diciembre	349*

A continuación se intentó ajustar una ecuación empírica polinomial del tipo siguiente:

$$Z = a + b \times ND + c \times LAT + d \times ND \times LAT + e \times ND^2 + f \times LA^2$$

Los resultados respecto a su bondad de ajuste fueron:

para Z = Rse:	EEE = 33.9	R ² = 0.849
para Z = Yc:	EEE = 34.2	R ² = 0.813
para Z = Yo:	EEE = 20.1	R ² = 0.824

donde, EEE, error estándar de la estimación, que puede ser definido como una desviación estándar del modelo predictivo; y R², coeficiente de determinación, el cual indica qué cantidad de la variabilidad original de los datos es explicada por el modelo regresional. Usando la notación de Chapra y Canale (1988):

$$EEE = [Sr / (N - np)]^{1/2}$$

$$R^2 = (St - Sr) / St$$

en las cuales, Sr es la suma de los cuadrados de los residuos o errores, St es la suma de los cuadrados alrededor de la media para la variable dependiente, N es el número total de parejas y np el número de parámetros de ajuste del modelo, en este caso N=48 y np=6. En general, los resultados citados se pueden interpretar como un valor elevado de EEE y una reducida correlación, por ello no son aceptables.

Ecuaciones senoidales por optimización. Al dibujar los valores de Rse, Yc y Yo para las latitudes de 10 y 40 grados norte, entre las cuales queda

to semejante al de la senoide, cuya ecuación (Hernández, 1975):

$$Y = A + B \times \text{sen}(X)$$

al tener doce valores de cada variable, los incrementos de X serán de 30 grados; para precisar en qué valor comienzan, se utilizó el algoritmo de Rosenbrock de múltiples variables restringidas (Kuester y Mize, 1973), empleando como función objetivo (FO) el error estándar entre los valores tabulados en el Cuadro 1 de Rse, Yc o Yo, el cual fue estimado por la Ecuación 4, en la cual se obtienen por regresión lineal (Hernández, 1975) entonces:

$$FO = \{[\text{SUM}(Yd - Y)^2] / 12\}^{1/2}$$

en donde el término SUM abarca de 1 a 48, es decir, son doce valores mensuales para cada una de las cuatro magnitudes de latitud norte analizadas. Lo tanto, Yd son todos los valores de Rse, Yc o Yo tomados del Cuadro 1, y Y son los valores de Rse, Yc o Yo estimados por medio de la Ecuación 4. En los casos, el valor óptimo buscado del número de grados (X) fue cercano a 83 grados. El número de casos analizados fueron 12, correspondiendo a tres variables citadas y a las cuatro magnitudes analizadas (10, 20, 30 y 40 grados norte).

A continuación se buscó relacionar los coeficientes A y B con la latitud en grados, encontrándose una buena correlación entre la pendiente B, pero no así para la ordenada A; por ello se recurrió a un ajuste de tipo senoide de grado n (Poole et al., 1983). Además se buscó la magnitud de grados X de la Ecuación 4 para el número de día (ND) correspondiente a la latitud; lo anterior permitirá estimar el valor de Yc o Yo para cualquier día del año; en la práctica la relación sí es lineal y casi perfecta cuando se esperarse.

Comprobación de las ecuaciones senoidales. Las ecuaciones obtenidas son las siguientes:

$$Rse = A1 + B1 \times \text{sen}(X1)$$

$$R^2 = 0.9871 \quad EEE = 9.409$$

$$A1 = 354.8289 - 0.1437278 \times \text{LAT} - 0.04585576 \times \text{LAT}^2$$

$$B1 = 3.070381 - 4.5346640 \times \text{LAT} + 0.01603516 \times \text{LAT}^2$$

$$X1 = 83.17516 - 0.00516 \times \text{LAT}$$

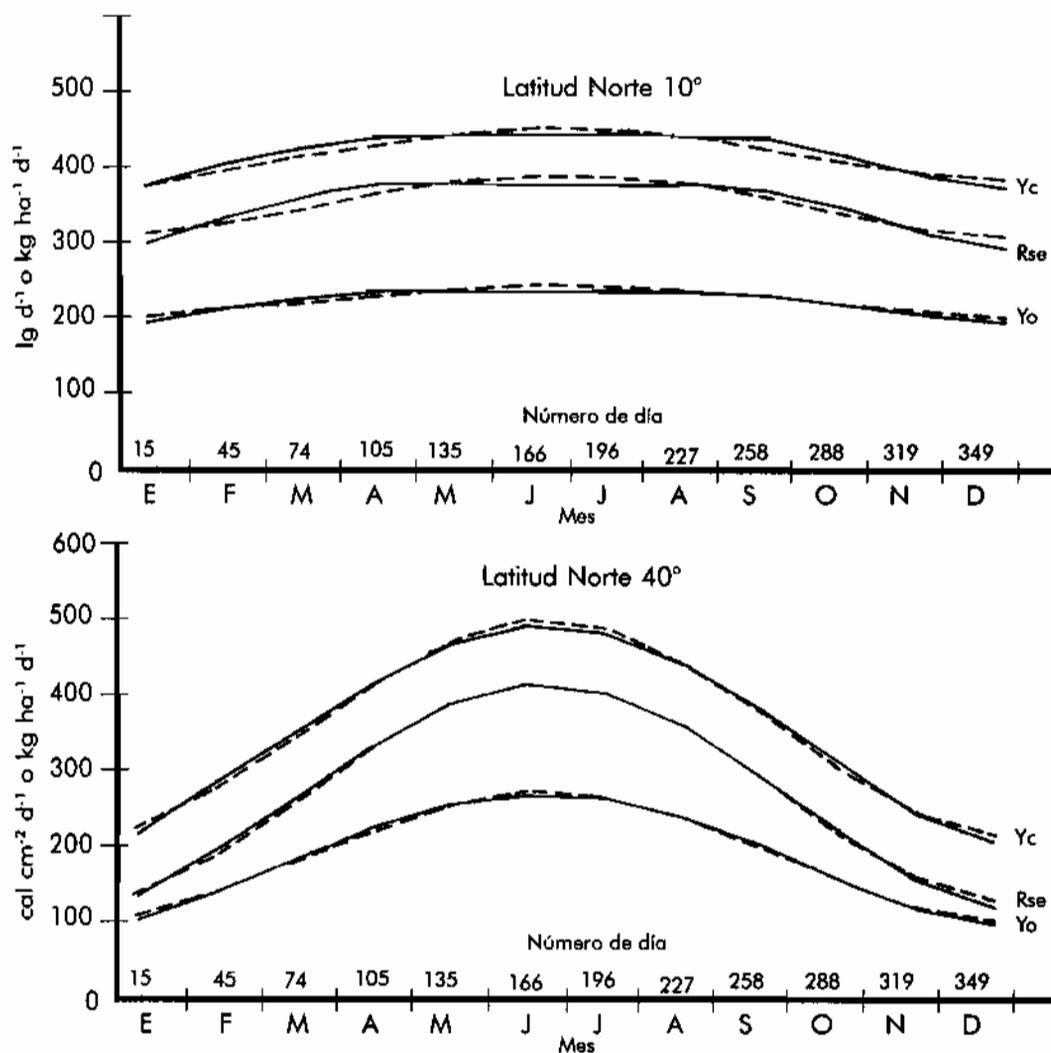


Figura 1. Ilustración de la bondad predictiva de las ecuaciones senoidales.

(con $N=48$ y $np=2$)

$$A2 = 417.5006 + 0.2520018 \times \text{LAT} - 0.03956738 \times \text{LAT}^2 \quad (11)$$

$$B2 = -1.365752 - 3.1747950 \times \text{LAT} - 0.01327754 \times \text{LAT}^2 \quad (12)$$

$$X2 = 99.03568 + 0.98516 \times \text{ND} \quad (13)$$

$$Y_o = A3 + B3 \times \text{sen}(X3) \quad (14)$$

$$R^2 = 0.9880 \quad \text{EEE} = 4.999$$

(con $N=48$ y $np=2$)

$$A3 = 222.8544 + 0.09404921 \times \text{LAT} - 0.0260356 \times \text{LAT}^2 \quad (15)$$

$$B3 = 0.3006075 - 2.071174 \times \text{LAT} - 0.003555859 \times \text{LAT}^2 \quad (16)$$

$$X3 = 99.07568 + 0.98516 \times \text{ND} \quad (17)$$

En el Cuadro 1 se muestra la diferencia entre los valores de R_{se} , Y_c y Y_o , reportados por Doorenbos y Kassam (1979) y los estimados con las Ecuaciones 6 a 17 para los valores del número de día del año

(ND) correspondientes a la mitad del mes, los cuales se han destacado con asteriscos en el Cuadro 4, la cual ayuda a definir los valores de ND relativos al inicio y final del período de crecimiento del cultivo. También en el Cuadro 1 se muestran dos indicadores elementales de la bondad predictiva de las Ecuaciones 6 a 17. Además, en la Figura 1 se muestra el contraste para las latitudes extremas analizadas.

RESULTADOS

Estructura del programa de cómputo

El programa de cómputo desarrollado para la aplicación del método del IILRI-FAO fue denominado **RENMAX** (Anexo) y presenta la estructura general siguiente: en la primera parte se selecciona el cultivo para el cual se estima su rendimiento máximo; en

esta parte internamente se asignan sus parámetros K y cH , y se accesa la información climática promedio durante el periodo de crecimiento. En la segunda porción del programa, la cual inicia en la línea 1340, se estiman los valores promedio de R_i , Y_c y Y_o en el periodo de desarrollo del cultivo, con base en las Ecuaciones 6 a 17; a continuación se evalúa la producción bruta de materia seca y, por último, se determinan la CEC, la cT y el Y_m . La tercera parte del programa RENMAX corresponde a la impresión de datos y resultados, inicia en la línea 1730.

Características del programa de cómputo

El programa RENMAX tiene las siguientes características fundamentales:

Primera, requiere como datos climáticos los valores promedio en el periodo de crecimiento del cultivo, de la temperatura ambiente (T_f), la humedad relativa (HR), y la radiación solar incidente (R_i). También es necesaria la evapotranspiración máxima media diaria (ET_m); en este caso el programa RENMAX ofrece dos opciones, una consiste en asignar tal valor de ET_m estimado previamente, y la otra en calcularlo dentro del programa por medio de la fórmula de Hargreaves y Samani (1982), con base en T_f y R_i . Se escogió este criterio porque ha demostrado ser bastante aproximado y consistente (Hargreaves et al., 1985; Hargreaves, 1989; Camargo, 1991).

Segunda, evalúa los valores de R_{se} , Y_c y Y_o promedio en el periodo de crecimiento de los cultivos locales, con base en cinco valores, dos de ellos correspondientes a las fechas de inicio y final del ciclo de crecimiento, los otros tres son obtenidos dividiendo el número de días de duración del cultivo (DPC) entre cuatro y evaluando los parámetros al mínimo de cada intervalo. En el caso de la alfalfa, se cuantifican los doce valores de R_{se} , Y_c y Y_o relativos a la mitad de cada mes y se obtiene su promedio.

Tercera, para valuar la presión parcial del vapor de agua a saturación (E_s) en milibares, emplea un polinomio de 4° grado (Poole et al., 1983), con $R^2 = 0.99996$ y $EEE = 0.03125$, los coeficientes de este polinomio se tienen en el listado del programa. Con base en la HR y E_s , se estima el valor de E_d necesario para calcular la corrección por efecto del clima (EC). En relación con la corrección por temperatura (cT), ésta es evaluada con polinomios de 3° y 4° orden (Poole et al., 1983), cuyos coeficientes se pueden consultar en el listado del programa; sus ecuaciones de ajuste son:

para alfalfa se obtuvo: $R^2 = 0.9985$
 $EEE = 0.013$ (3er. orden)
 para maíz se obtuvo: $R^2 = 0.9981$
 $EEE = 0.019$ (4° orden)
 para sorgo se obtuvo: $R^2 = 0.9992$
 $EEE = 0.012$ (4° orden)
 para trigo se obtuvo: $R^2 = 0.9955$
 $EEE = 0.028$ (4° orden)

Variables principales y listado

El programa RENMAX fue escrito usando una designación de variables idénticas a las que han sido empleadas en las ecuaciones expuestas, por ello es fácilmente interpretable su listado, el cual se tiene al final; sin embargo, se consideró conveniente citar las siguientes variables que no han sido descritas:

NC\$	nombre del cultivo
NDI	número de día inicial del periodo de crecimiento
NDF	número de día final del periodo de crecimiento
ID	incremento en días entre evaluaciones de R_{se} , Y_c , Y_o
ND	número de día en que se evalúa R_{se} , Y_c , Y_o
TAMB	temperatura ambiente promedio en el periodo de crecimiento
RIT	radiación solar incidente transformada a $mm\ d^{-1}$

Aplicaciones numéricas

La primera aplicación corresponde al ejemplo numérico presentado por Doorenbos y Kassam (1979), cuyo enunciado es: maíz; latitud = 30°N; periodo de crecimiento total = 123 días (1 de mayo al 31 de agosto); radiación solar incidente media durante el ciclo de crecimiento = 650 langley/día; temperatura ambiente promedio = 27.5 °C; humedad relativa media = 55%; media de evapotranspiración máxima (ET_m) = 6.8 $mm\ d^{-1}$. Obtener el peso seco del grano.

Al aplicar el programa RENMAX se obtuvieron los resultados siguientes:

$R_{se} = 397.0\ cal\ cm^{-2}\ d^{-1}$	$K = 1.90$
$Y_c = 469.9\ kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$	$cT = 0.60$
$Y_o = 250.4\ kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$	$cH = 0.45$
$F = 0.23$	$E_s = 36.7\ mb$
$PBMS = 420.1\ kg\ ha^{-1}\ d^{-1}$	$E_d = 20.2\ mb$
$DPC = 123\ días$	$CEC = 0.41$
$Y_m = 10\ 991\ kg\ ha^{-1}$ (rendimiento seco de grano)	

El valor obtenido por Doorenbos y Kassam (1979) fue de 10 910 $kg\ ha^{-1}$; la escasa diferencia se debe

principalmente a la forma de obtener los valores de R_{se} , Y_c y Y_o promedio en el período de crecimiento del cultivo.

Como ejemplo práctico se estimó la producción de alfalfa bajo riego en el valle de San Luis Potosí con latitud de $22^\circ N$ y datos climáticos promedio anual (SMN, 1982) siguientes: $T_t = 18.2^\circ C$, $HR = 52\%$, $k_c = 0.90$ y $R_i = 420 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Almanza y López, 1978). Con tales datos los resultados son:

$R_{se} = 329.3 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$K = 0.90$
$Y_c = 403.8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$	$cT = 0.493$
$Y_o = 212.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$	$cH = 0.85$
$F = 0.453$	$E_s = 20.9 \text{ mb}$
$PBMS = 317.0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$	$E_d = 10.9 \text{ mb}$
$DPC = 365 \text{ días}$	$CEC = 0.312$
$Y_m = 13\,594 \text{ kg ha}^{-1}$ (rendimiento de forraje)	

Comentarios finales

Quizás la mayor dificultad para aplicar el método del IILRI-FAO en la República Mexicana sea la estimación de los valores mensuales de humedad relativa media requeridos, problema que ha sido abordado por Arteaga (1989), Mosiño (1989) y Ozuna *et al.* (1989). Campos (1992) presenta un enfoque práctico diferente, que consiste en encontrar regresiones lineales mensuales entre la presión parcial del vapor de agua (E_d) y la temperatura promedio de mínimas (t), es decir: $E_d = m \times t + b$, utilizando los datos de los observatorios meteorológicos cercanos a la zona en estudio; para el estado de San Luis Potosí los mejores resultados se obtuvieron al emplear los observatorios de las ciudades de León, Huejucar, Lagos de Moreno, Aguascalientes, Torreón, Saltillo, Monterrey, Soto La Marina, Río Verde, Tampico, Jalapa, Veracruz y Orizaba; tales resultados se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Parámetros del modelo: $E_d = m \times t + b$.

Mes	Pendiente (m)	Ordenada al origen (b)	R ²
Enero	0.914	4.047	0.970
Febrero	1.035	2.216	0.984
Marzo	1.202	-0.890	0.982
Abril	1.344	-4.164	0.974
Mayo	1.412	-5.617	0.966
Junio	1.413	-5.384	0.945
Julio	1.301	-2.837	0.931
Agosto	1.294	-2.575	0.955
Septiembre	1.238	-1.195	0.935
Octubre	1.093	1.179	0.953
Noviembre	0.957	3.357	0.978
Diciembre	0.930	3.758	0.978

Es factible ampliar el programa RENMAX, al permitir ajustar un polinomio de 4° ó 5° grado a los doce valores mensuales accesados de temperatura ambiente, humedad relativa media y radiación solar incidente, de manera que esto permita estimar las magnitudes promedio de tales elementos climáticos en el período vegetativo que se analiza, según el planteamiento de búsqueda de fechas óptimas para alcanzar el rendimiento climático máximo.

CONCLUSIONES

Dada la importancia de la estimación del rendimiento climático máximo, el programa RENMAX brindará una gran ayuda cuando se tienen que procesar varias estaciones climatológicas y se quieren buscar las fechas óptimas de inicio y terminación del período de crecimiento de los cultivos de maíz, sorgo o trigo.

LITERATURA CITADA

- Almanza, R. y S. López. 1978. Radiación solar global en la República Mexicana mediante datos de insolación. Series del Instituto de Ingeniería No. 357. U.N.A.M. Ciudad Universitaria, México, D.F. 2a. edición.
- Arteaga R., R. 1989. Estudio preliminar para la estimación de la humedad relativa en la República Mexicana. 2a. Reunión Nacional de Agroclimatología. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. pp: 334-344.
- Campos A., D. F. 1991. Descripción y desarrollo computacional del balance hídrico-edafológico de C.W. Thornthwaite. Facultad de Ingeniería de la U.A.S.L.P. San Luis Potosí, S.L.P.
- Campos A., D.F. 1992. Aplicación de la clasificación bioclimática de UNESCO-FAO en el estado de San Luis Potosí. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Capítulo VI: Impacto Ambiental. Cocoyoc, Morelos.
- Chapra, S. C. y R. P. Canale. 1988. Métodos Numéricos para Ingenieros. Capítulo 10: Regresión con mínimos cuadrados. McGraw-Hill/Interamericana de México. México, D.F.
- Doorenbos, J. y Á. H. Kassam. 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO: Riego y Drenaje No. 33. Roma, Italia.
- Feddes, R. A., P. J. Kowalik, and H. Zaradny. 1978. Simulation of Field Water Use and Crop Yield.

- Chapter 7: Calculation of potential production. Center for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, The Netherlands.
- Hargreaves, G. H. 1989. Accuracy of estimated reference crop evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 115 (6): 1000-1007.
- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Technical Note. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering* 108(IR3): 225-230.
- Hargreaves, G. L., G. H. Hargreaves, and J. P. Riley. 1985. Irrigation water requirements for Senegal river basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 111 (3): 265-275.
- Hernández V., M. 1975. Ecuaciones Empíricas. 10a Función senoidal. Edición del autor. México, D.F.
- Kuester, J. L. and J. H. Mize, 1973. Optimization Techniques with Fortran. Chapter 9: Multivariable unconstrained methods (ROSENBL and McGraw-Hill Book Co. New York, L.
- Mosiño P., A. 1989. Cálculo de parám humedad del aire para lugares c cuentan con registros de tempe presión. IV Congreso Nacio Meteorología, Chihuahua, Chihual 94-97.
- Ozuna Q., R. L., R. Arteaga R., R. González A. Vázquez P. 1989. Modelo para es humedad relativa en la República M IV Congreso Nacional de Meteorolog huahua, Chihuahua. pp: 9-14.
- Poole, L., M., Borchers, y D. M. Castlewit. Algunos programas de uso común er Programa: Regresión de orden N. O McGraw-Hill. México, D.F.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Normales climatológicas. Período 1970. Secretaría de Agricultura y R Hidráulicos. México, D.F.

Anexo

```

1000 REM PROGRAMA "RENMAX" (REndimiento MAXimo)
1010 REM ESTE PROGRAMA ESTIMA EL RENDIMIENTO MAXIMO DE CUALQUIERA
1020 REM DE LOS SIGUIENTES 5 CULTIVOS: MAIZ, SORGO, TRIGOS DE VERANO
1030 REM Y DE INVIERNO Y ALFALFA, SEGUN EL METODO DEL INTERNATIONAL
1040 REM INSTITUTE FOR LAND RECLAMATION AND IMPROVEMENT (IILRI) DE
1050 REM WAGENIGEN, HOLANDA. EN LATITUDES COMPRENDIDAS ENTRE 10 Y 40
1060 REM GRADOS NORTE. PROGRAMA D.F. CAMPOS ARANDA EN JUNIO DE 1992.
1070 REM SE INTRODUCEN DATOS BASICOS
1080 CLS:PRINT"ESTIMACION DEL RENDIMIENTO CLIMATICO MAXIMO"
1090 PRINT"      CON EL METODO DEL IILRI-FAO"
1100 PRINT:INPUT"ESTACION CLIMATOLOGICA: ";NES$
1120 PRINT"      1.ALFALFA":PRINT"      2.MAIZ"
1130 PRINT"      3.SORGO":PRINT"      4.TRIGO DE INVIERNO"
1140 PRINT"      5. TRIGO DE PRIMAVERA"
1150 PRINT:INPUT"QUE CULTIVO DESEA ANALIZAR (introducir número):";NC
1160 IF NC=1 THEN K=.9:NC$="ALFALFA";GOTO 1210
1170 IF NC=2 THEN K=1.9:CH.45:NC$="MAIZ":GOTO 1230
1180 IF NC=3 THEN K=1.6:CH.4:NC$="SORGO":GOTO 1230
1190 IF NC=4 THEN K=.65:CH.35:NC$="TRIGO DE INVIERNO":GOTO 1230
1200 IF NC=5 THEN K=1.17:CH.35:NC$="TRIGO DE PRIMAVERA":GOTO 1230
1210 PRINT:INPUT"ES PRIMER AÑO (S/N):";A$
1220 IF A$="S" OR A$="s" THEN CH=.45 ELSE CH=.85
1230 PRINT:INPUT"LATITUD DEL LUGAR (grados)";LAT
1240 PRINT:INPUT"NUMERO DEL DIA INICIAL:";NDI
1250 INPUT"NUMERO DEL DIA FINAL:";NDF
1260 IF NDI>NDF THEN DPC=366-NDI+NDF ELSE DPC=NDF-NDI+1
1270 INPUT"TEMPERATURA AMBIENTE PROMEDIO (°C):";TAMB

```

```

1280 INPUT"HUMEDAD RELATIVA MEDIA (%):";HR
1290 INPUT"RADIACION SOLAR INCIDENTE (cal/cm ^ 2/d):";RI:PRINT
1300 INPUT"SE ACCESA EL VALOR DE ETm EN mm/día (S/N):";B$:PRINT
1310 IF B$="N" OR B$="n" THEN IZ=2:GOTO 1330 ELSE IZ=1
1320 INPUT"EVAPOTRANSPIRACION MAXIMA (mm/d):";ETM:GOTO 1360
1330 INPUT"COEF. DE DESARROLLO (kc) MEDIO:"KC
1340 HV=597.3-.564*TAMB:RIT=10*RI/HV:ETM=.0075*RIT*(1.8*TAMB+32)*KC
1350 REM INICIA CALCULO DE PRODUC. BRUTA DE MATERIA SECA (PBMS)
1360 IF DPC=365 THEN 1500
1370 REMEN CULTIVOS ANUALES
1380 ND=NDI:GOSUB 2180:RS1=RSE:YC1=YC:YO1=YO
1390 ID=INT (DPC/4):ND=NDI+ID:IF ND>365 THEN ND=ND-365
1400 GOSUB 2180:RS2=RSE:YC2=YC:YO2=YO
1410 ND=NDI+2*ID:IF ND>365 THEN ND=ND-365
1420 GOSUB 2180:RS3=RSE:YC3=YC:YO3=YO
1430 ND=NDI+3*ID:IF ND>365 THEN ND=ND-365
1440 GOSUB 2180:RS4=RSE:YC4=YC:YO4=YO
1450 ND=NDI+4*ID:IF ND>365 THEN ND=ND-365
1460 RSE=(RS1+RS2+RS3+RS4+RS5)/5:YC=(YC1+YC2+YC3+YC4+YC5)/5
1470 YO=(YO1+YO2+YO3+YO4+YO5)/5
1480 F=(RSE-.5*RI)/(.8*RSE):PBMS=F*YO+(1-F)*YC:GOTO 1570
1490 REM EN CULTIVO DE ALFALFA
1500 RESTORE:SRSE=0:SYC=0:SYO=0
1510 FOR II=1 TO 12:READ ND:GOSUB 2180
1520 SRSE=SRSE+RSE:SYC=SYC+YC:SYO=SYO+YO
1530 NEXT II:RSE=SRSE/12:YC=SYC/12:YO=SYO/12
1540 F=(RSE-.5*RI)/(.8*RSE):PBMS=F*YO+(1-F)*YC
1550 DATA 15,45,74,105,135,166,196,227,258,288,319,349
1560 REM SE CALCULA CORRECCION POR EFECTO DEL CLIMA (CEC)
1570 E1=6.090078+.4478918*TAMB+1.430175E-02*TAMB ^ 2
1580 E2=6.090078+.4478918*TAMB+1.430175E-02*TAMB ^ 2
1590 E3=6.090078+.4478918*TAMB+1.430175E-02*TAMB ^ 2
1600 E4=6.090078+.4478918*TAMB+1.430175E-02*TAMB ^ 2
1610 ED=E3*HR/100:CEC=ETM/(E4-ED)
1620 REM INICIA CORRECCION POR TEMPERATURA (CT)
1630 T1=TAMB:T2=TAMB ^ 2:T3=TAMB ^ 3:T4=TAMB ^ 4
1640 CT1=-.2357059+4.650617E-02*T1+4.771631E-05*T2-2.222378E-05*T3
1650 C1=.2070873-9.265533E-02*T1+1.224634E-02*T2
1660 CT2=C1-4.452946E-04*T3+5.149287E-06*T4
1670 C2=8.564654E-02-4.780798E-02*T1+7.246859E-03*T2
1680 CT3=C2-2.513855E-04*T3+2.725527E-06*T4
1690 C3=.1356176-8.468008E-02*T1+.0172444*T2
1700 CT4=C3-8.189528E-04*T3+1.120884E-05*T4
1710 IF NC=1 THEN CT=CT1:GOTO 1730
1720 IF NC=2 THEN CT=CT2:GOTO 1730
1730 IF NC=3 THEN CT=CT3 ELSE CT=CT4
1740 REM CALCULO DEL RENDIMIENTO MAXIMO EXPERIMENTAL (YME)
1750 YME=K*CT*CH*DPC*PBMS*CEC
1760 REM INICIA IMPRESION DE DATOS Y RESULTADOS
1770 IF IZ=1 THEN Z$=" valor asignado" ELSE Z$=" criterio de Hargreaves"
1780 LPRINT" ESTIMACION DEL RENDIMIENTO MAXIMO POR MEDIO DEL METODO DEL"
1790 LPRINT" INTERNATIONAL INSTITUTE FOR LAND RECLAMATION AND IMPROVEMENT"
1800 LPRINT:LPRINT"ESTACION CLIMATOLOGICA: ";NE$
1810 LPRINT:LPRINT"LATITUD NORTE DEL LUGAR (grados): ";LAT
1820 LPRINT:LPRINT "NOMBRE DEL CULTIVO: ";NC$;
1830 LPRINT"      INDICE DE COSECHA: ";CH:LPRINT

```

```

1820 LPRINT"NUMERO DEL DIA INICIAL: ";NDI;;LPRINT"      Fecha: _____"
1830 LPRINT"NUMERO DEL DIA FINAL: ";NDF;;LPRINT"      Fecha: _____"
1840 LPRINT:LPRINT"DURACION EN DIAS DEL PERIODO VEGETATIVO: ";DPC:LPRINT"
1850 LPRINT"DATOS CLIMATICOS PROMEDIO DURANTE EL PERIODO VEGETATIVO"
1860 LPRINT"TEMPERATURA AMBIENTE (°C):      ";TAMB
1870 LPRINT "HUMEDAD RELATIVA MEDIA (%):      ";HR
1880 LPRINT"RADIACION SOLAR INCIDENTE (cal/cm ^ 2/d):";RI
1890 LPRINT"EVAPOTRANSPIRACION MAXIMA (mm/d):      ";
1900 LPRINT USING"###.###";ETM;;LPRINT Z$
1910 IF IZ=2 THEN LPRINT"COEF. DE DESARROLLO ASIGNADO      ";KC
1920 LPRINT:LPRINT"RENDIMIENTO MAXIMO EXPERIMENTAL (kg/ha)";
1930 LPRINT USING"#####";YME:LPRINT
1940 PRINT:INPUT"DESEA IMPRESION DE VALORES CALCULADOS (S/N)";C$
1950 IF C$="N" OF C$="n" THEN 2150
1960 LPRINT"RECEP. MAX. DE RAD. ACTIVA (Rse)
1970 LPRINT USING"#####.##";RSE;;LPRINT"  cal/cm ^ 2/día"
1980 LPRINT"VEL. DE PRODUC. EN DIA DESPEJADO (Yc)      ="
1990 LPRINT USING"#####.##";YC;;LPRINT"  kg/ha/día"
2000 LPRINT"VEL. DE PRODUC. EN DIA NUBLADO (Yo)      ="
2010 LPRINT USING"#####.##";YO;;LPRINT"  kg/ha/día"
2020 LPRINT"PRODUC. BRUTA DE MAT. SECA (PBMS)      ="
2030 LPRINT USING"#####.##";PBMS;;LPRINT"  kg/ha/día"
2040 LPRINT"FRACCION DE TIEMPO QUE ESTA NUBLADO (F) ="
2050 LPRINT USING"##.###";F
2060 LPRINT"CORRECCION POR ESPECIES DE CULTIVO (K)      ="
2070 LPRINT"CORRECCION POR TEMPERATURA (cT)      ="
2080 LPRINT USING"##.###";CT
2090 LPRINT"PRESION DE VAPOR DE SATURACION (es)      ="
2100 LPRINT USING"#####.##";ES;;LPRINT"  mb"
2110 LPRINT"PRESION DE VAPOR ACTUAL o REAL (e)      ="
2120 LPRINT USING"#####.##";ED;
2130 LPRINT"  mb":LPRINT"CORRECCION POR EFECTO DEL CLIMA (CEC) ="
2140 LPRINT USING"#####.###";CEC:LPRINT
2150 END
2160 REM INICIA SUBROUTINA DE CALCULO DE PARAMETROS BASICOS
2170 REM INICIA CALCULO DE RECEP. MAX. DE RAD. ACTIVA (RSE)
2180 ARS=354.8289-.1437278*LAT-4.585576E-02*LAT ^ 2:PI=3.1415927#
2190 BRS=3.070381-4.534664*LAT+1.603516E-02*LAT ^ 2
2200 GRARS=(99.17568+98516*ND)*PI/180:RSE=ARS+BRS*SIN(GRARS)
2210 REM INICIA CALCULO DE VEL. DE PRODUC. EN DIA DESPEJADO (YC)
2220 AYC=417.5006+.2520018*LAT-3.956738E-02*LAT ^ 2
2230 BYC=-1.365752-3.174795*LAT-1.327754E-02*LAT ^ 2
2240 GRAYC=(99.03568+.98516*ND)*PI/180:YC=AYC+BYC*SIN(GRAYC)
2250 REM INICIA CALCULO DEL VEL. DE PRODUC. EN DIA NUBLADO (YO)
2260 AYO=222.8544+9.404921E-02*LAT-.0260356*LAT ^ 2
2270 BYO=.3006075-2.071174*LAT-3.555859E-03*LAT ^ 2
2280 GRAYO=(99.07568+.98516*ND)*PI/180:YO=AYO+BYO*SIN(GRAYO)
2290 RETURN

```