

Monitoreo del sorgo en el norte de Tamaulipas

Daniel Francisco Campos Aranda

Facultad de Ingeniería, UASLP

En este artículo se destaca la importancia del pronóstico del rendimiento de los cultivos y, por lo tanto, de su cosecha; se define el concepto general de monitoreo de un cultivo y se proponen y describen dos índices climáticos para realizar el pronóstico del rendimiento de un cultivo anual. Se detallan, además, los dos métodos propuestos por los expertos de la FAO para alcanzar un buen monitoreo. Después se aplican los cuatro criterios al monitoreo del sorgo en la zona de San Fernando, Tamaulipas, México y se formulan comentarios respecto a los resultados. El alcance práctico y didáctico del trabajo se complementa en un sentido técnico al presentar la información fenológica y climática mensual disponible, así como la relativa a precipitaciones y temperatura ambiente procesada por decenas, lo que permite aplicar otros modelos de pronóstico del rendimiento promedio, e incluso desarrollar nuevos enfoques.

Desde el inicio de la agricultura, los campesinos se han interesado por establecer la cantidad de cosecha en relación con lo que han sembrado, ya que periódicamente se produce una escasez de alimentos debido a la inestabilidad del clima y a sus inevitables consecuencias en la producción de los cultivos. Por esto, los encargados de la planeación agrícola en los diferentes países cada vez dan mayor importancia al seguimiento de los cultivos y a la estimación de la producción final, respecto a su dependencia de las condiciones atmosféricas y climáticas. Esto es lo que se conoce como monitoreo agroclimático de los cultivos.

En general, la investigación de las relaciones cultivo-ambiente siempre ha recibido gran atención por parte de los científicos; en cambio, la aplicación práctica de este conocimiento para estimar los rendimientos de los cultivos a partir de datos meteorológicos no tuvo un progreso importante durante los años cincuenta y sesenta, ya que en los países exportadores de alimentos los grandes excedentes en granos hacían innecesario el monitoreo de los cultivos. Sin embargo, al inicio de los setenta la situación cambió drásti-

camente en virtud de los reducidos rendimientos y el incremento de la demanda. En 1972, las condiciones atmosféricas adversas afectaron la producción de cereales simultáneamente en la ex URSS, China, India, Australia, el norte de África y el sureste asiático. Esto provocó que en muchos países en desarrollo las reservas de arroz y otros granos desaparecieran por completo y que las reservas mundiales descendieran al 7% del consumo anual, equivalente al requerimiento de 25 días (Baier, 1977).

En México, el estudio de la producción agrícola condujo a Cervantes *et al.* (1989), a identificar tres periodos característicos:

- El primero, de 1925 a 1940, presentó tasas negativas de crecimiento anual en la superficie cosechada y en su rendimiento.
- El segundo, de 1940 a 1965, mostró un crecimiento sostenido, la superficie cosechada creció 2.5 veces y los rendimientos se incrementaron un 100%, lo cual originó que la producción se quintuplicara.

- Finalmente en el tercero, de 1965 a 1988, se observaron fluctuaciones alrededor de los valores alcanzados en 1965.

Estos autores obtuvieron, de acuerdo con las proyecciones de oferta–demanda para los años 1992, 1994 y 2000, superávit en trigo, sorgo y cebada, y déficit en maíz, frijol y arroz. Indicaron también que en la producción futura de estos últimos tres cultivos, los proyectos agrícolas de temporal serían decisivos. Lógicamente, en tales desarrollos, el monitoreo de cultivos jugará un papel fundamental.

Descripción de los métodos

Generalidades

El monitoreo de un cultivo anual consiste en relacionar los rendimientos promedio observados con cualquier índice agroclimático, de manera que al estimarlo se podrá obtener, con base en la relación previamente establecida, una estimación anticipada del rendimiento promedio, y por lo tanto, de la producción futura. La relación citada podrá ser gráfica o analítica, y su validez dependerá de la calidad de la información empleada o disponible. En este trabajo se describe el empleo del Índice climático de crecimiento de Papadakis (ICCP), el Factor de reducción del rendimiento (FRR), el Índice de potencialidad agrícola de Turc (IPAT) y el Índice de satisfacción de humedad (ISH). Todos ellos se aplicaron al monitoreo del sorgo, grano de temporal, en la zona de San Fernando, Tamaulipas. A continuación se resume la teoría de cada criterio y en el inciso siguiente se describen los resultados de su aplicación.

Índice climático de crecimiento de Papadakis (ICCP)

Este índice fue propuesto en 1952, modificado en 1960 y actualmente tiene la expresión siguiente (Papadakis, 1980):

$$ICCP = 1/((A + B + C + 0.010)D) \quad (1)$$

$$A = \frac{1.0}{10^{0.10T}} \quad B = \frac{10^{0.10t}}{10^5}$$

$$C = \frac{0.50}{10^{2.5H}} \quad D = (12/N)^{0.75}$$

en la cual:

- ICCP = índice climático de crecimiento de Papadakis mensual para el año analizado, adimensional.
- T = temperatura promedio de las máximas diarias del mes, en °C.
- t = temperatura promedio de las mínimas diarias del mes en °C.
- H = índice hídrico, igual al cociente de la precipitación mensual más la humedad disponible en el suelo, entre la evapotranspiración potencial del mes, adimensional.
- N = duración máxima media diaria de insolación, en horas.

A fin de evitar la interpolación del parámetro N en la tabulación respectiva, Campos (1989) desarrolló la siguiente fórmula:

$$N = E + F \cdot \text{sen}(30nm + 85) \quad (2)$$

donde nm es en número del mes, 1 para enero y 12 para diciembre, E y F son constantes en función de la latitud del lugar (LAT) en grados, con las expresiones siguientes cuando ésta varía de 10 a 40°N:

$$E = 12.10162 + 0.00226 \text{ LAT}$$

$$F = 0.2036 - 0.0717 \text{ LAT}$$

Para la evaluación del índice hídrico (H) se llevó a cabo un balance hídrico edafológico, considerando un suelo de capacidad de retención de humedad disponible de 100 mm en el mes precedente al que se analizó. Cuando H es menor que la unidad, se puede considerar igual a uno, para evaluar el ICCP bajo riego; cuando H es mayor que la unidad, ambos índices, de bajo temporal y de riego, son iguales.

En relación con la evapotranspiración potencial, ésta se debe estimar a través de la fórmula de Papadakis (1980):

$$ETP = 5.625(e_{sT} - e) \quad (3)$$

donde:

- ETP = evapotranspiración potencial mensual, en mm
- e_{sT} = presión de vapor de saturación correspondiente a la temperatura T, en mb
- e = presión de vapor media del mes, en mb

Al tomar en cuenta que las mediciones psicrométricas son muy escasas y que la temperatura de punto de rocío (t_*) es muy cercana a la temperatura t , Papadakis propuso, en 1966, la siguiente expresión:

$$ETP = 5.625(e_{sT} - e_{st}) \quad (4)$$

donde e_{st} es la presión de vapor de saturación correspondiente a la temperatura t menos dos. Por lógica, esta corrección numérica se debe basar en un estudio regional entre t_* y t .

De nuevo, en la estimación de la presión de vapor de saturación (e_s) se emplea la fórmula encontrada por Campos (1989):

$$e_s = 6.2162 + 0.43687 TEM + 0.01256 TEM^2 + 0.00043 TEM^3 \quad (5)$$

en ella, TEM es la temperatura para la cual se evalúa la presión de vapor de saturación, en mb.

Factor de reducción del rendimiento (FRR)

En general, la manera en que el déficit de agua afecta al crecimiento del cultivo y a su rendimiento, varía según la especie de cultivo y el periodo vegetativo del mismo. La relación entre el rendimiento del cultivo y el suministro de agua puede determinarse cuando es posible cuantificar, por una parte, las necesidades de agua del cultivo y los déficit de éstas, y por otra, el rendimiento o penuria de agua. Es necesario deducir la relación entre la disminución del rendimiento relativo y el déficit de la evapotranspiración relativa, dada por el factor del efecto sobre el rendimiento (ky), deducido empíricamente (Doorenbos y Kassam, 1979):

$$\left(1 - \frac{Y_c}{Y_m}\right) = ky \left(1 - \frac{ET_r}{ET_c}\right) \quad (6)$$

donde:

- Y_c = rendimiento real cosechado, en t/ha
- Y_m = rendimiento máximo cosechado, en t/ha
- ET_r = evapotranspiración real, en mm
- ET_c = evapotranspiración máxima o potencial del cultivo, en mm

Para la mayoría de los cultivos, las magnitudes de ky (véase cuadro 1) se dedujeron empíricamente, suponiendo que la relación entre el rendimiento relativo (Y_r/Y_m) y la evapotranspiración

relativa (ET_r/ET_c) es lineal y válida para deficiencias de humedad hasta de 50% aproximadamente (Doorenbos y Kassam, 1979). Los valores de ky en dicho cuadro se refieren a variedades de gran producción, bien adaptadas al ambiente vegetativo y desarrolladas en grandes campos donde se aplican sistemas agronómicos y de riego óptimos, incluyendo el suministro de insumos apropiados, excepto en lo referente al agua (Doorenbos y Kassam, 1979).

El método basado en el factor ky consiste en cuantificar las necesidades hídricas del cultivo (ET_c) y las evapotranspiraciones reales (ET_r) para cada fase fenológica. Con estos términos se cuantifica la porción derecha de la ecuación (1), o Factor de Reducción del Rendimiento (FRR). Se ha encontrado que esta magnitud guarda una buena correlación inversa con el rendimiento observado, por lo que puede ser utilizada para pronosticar los rendimientos reales y máximos, según ha demostrado Gomme (1983).

Índice de potencialidad agrícola de Turc (IPAT)

Este índice permite estimar la producciones agrícolas anuales, principalmente de plantas forrajeras (alfalfa), considerando el total de materia vegetal seca recolectable, obtenida en las mejores condiciones de producción (Turc, 1972). El $IPAT$ se calcula sumando los 12 índices mensuales, cada uno producto de un factor heliotérmico y de uno de sequedad, el cual depende de las condiciones climáticas de los meses precedentes. Cuando el factor de sequedad no se evalúa y se considera

1. Factores del efecto sobre el rendimiento (ky) en cultivos anuales y perennes

Cultivo	Periodo vegetativo		Periodo de floración	Formación de la cosecha	Periodo de maduración	Periodo vegetativo Total	
	Inicial	Final					
Algodón	-	-	0.20	0.50	-	0.25	0.85
Cacahuate	-	-	0.20	0.80	0.60	0.20	0.70
Caña de azúcar	-	-	0.75	-	0.50	0.10	1.20
Cártamo	-	-	0.30	0.55	0.60	-	0.80
Cebolla	-	-	0.45	-	0.80	0.30	1.10
Frijol	-	-	0.20	1.10	0.75	0.20	1.15
Girasol	0.25	0.50	-	1.00	0.80	-	0.95
Maíz	-	-	0.40	1.50	0.50	0.20	1.25
Papa	0.45	0.80	-	-	0.70	0.20	1.10
Sandía	0.45	0.70	-	0.80	0.80	0.30	1.10
Sorgo	-	-	0.20	0.55	0.45	0.20	0.90
Soya	-	-	0.20	0.80	1.00	-	0.85
Tabaco	0.20	1.00	-	-	0.50	0.50	0.90
Tomate	-	-	0.40	1.10	0.80	0.40	1.05
Trigo de invierno	-	-	0.20	0.60	0.50	-	1.00
Trigo de primavera	-	-	0.20	0.65	0.55	-	1.15
Alfalfa	-	-	0.7 a 1.1	-	-	-	0.70 a 1.10
Banano	-	-	-	-	-	-	1.20 a 1.35
Pimentero	-	-	-	-	-	-	1.10
Remolacha	-	-	-	-	-	-	0.60 a 1.00
Azucarera { azúcar	-	-	-	-	-	-	0.70 a 1.10
Vid	-	-	-	-	-	-	0.85

Fuente: Doorenbos y Kassam, 1979

2. Radiación global en el tope de la atmósfera, en langleys/día

	Lat. Norte	10°	20°	30°	40°
Ene		759	642	508	364
Feb		821	732	624	495
Mar		873	834	764	673
Abr		894	902	880	833
May		885	930	950	944
Jun		873	934	972	985
Jul		879	930	955	958
Ago		880	902	891	858
Sep		872	843	788	710
Oct		830	755	658	536
Nov		767	656	528	390
Dic		735	610	469	323

Fuente: Turc, 1972

igual a la unidad, el *IPAT* corresponde a la condición de riego y la comparación entre éste y el de temporal indica el incremento en productividad debido al riego. Esta comparación también es válida para índices estacionales (Forteza del Rey, 1986). Las ecuaciones del *IPAT* son las siguientes (Turc, 1972):

$$IPAT = FT \cdot FS \tag{7}$$

en la cual:

FT = factor heliotérmico mensual, adimensional.

FS = factor de sequedad mensual, adimensional.

y siendo:
$$FT = Ft \cdot Fh \tag{8}$$

donde *Ft* es el factor térmico mensual, igual a:

$$Ft = \frac{Tt(60 - Tt)}{1000} \left(\frac{t - 1}{4} \right) \tag{9}$$

Tt es la temperatura ambiente promedio y *t* la temperatura promedio de mínimas del mes, ambas en °C. *t* se considera únicamente cuando varía de 1 a 5 °C, si no es así, toma tales valores límite, de manera que *Ft* = 0 si *t* ≤ 1 °C y, en consecuencia, *IPAT* = 0. El segundo término de la ecuación (9) está correlacionado positivamente con el número de días de helada.

El factor solar corresponde a la menor de las dos funciones siguientes, cuando ésta es positiva, si esto no ocurre, el *IPAT* es cero:

$$Fh = N - (LAT/40)^2 - 5 \tag{10}$$

$$Fh = 0.03(R_i - 100) \tag{11}$$

donde *R_i* es la radiación solar incidente media diaria del mes, en langleys/día. *R_i* se puede estimar con base en mapas, como los propuestos por Almanza y López (1978) y de preferencia, en función de la insolación relativa (*n/N*), por medio de la expresión propuesta por Jáuregui (1978) para la República Mexicana:

$$R_i = R_A \left(0.29 \cos LAT + 0.55 \frac{n}{N} \right) \tag{12}$$

donde *n* es el promedio diario de horas de insolación mensual, medidas en el heliógrafo Campbell-Stokes y *R_A* es la radiación global en el tope de la atmósfera, cuyos valores se pueden interpolar en el cuadro 3.

Cuando el cálculo de *IPAT* se hace para el nivel medio anual, se toma para *Fh* el menor de tres valores, siendo el tercero la media aritmética de los dos ya indicados, disminuido en 0.50.

Para estimar el factor de sequedad (*FS*), se evalúa primero la evapotranspiración potencial (*ETP*) con la fórmula de Turc y se realiza el balance hídrico para una capacidad de campo de 70 mm cuando el *IPAT* calculado es medio anual, y de 100 mm cuando es anual (Turc, 1972).

Turc (1961) propuso la siguiente fórmula para estimar la *ETP* mensual en mm.

$$ETP = a \left(\frac{Tt}{Tt + 15} \right) (R_i + 50) \left(1 + \frac{50 - HR}{70} \right) \tag{13}$$

donde *a* es un coeficiente con un valor de 0.40, excepto para febrero, cuando vale 0.37, y *HR* es la humedad relativa media mensual, en %. El último paréntesis de la ecuación (13) sólo se considera si *HR* < 50%.

El factor *FS* varía de 0 a 1, de manera que si resulta negativo se toma *FS* = 0, y el valor negativo interviene en el cálculo del mes subsecuente. Para determinar *FS* se selecciona la menor magnitud de los dos valores siguientes y se designa con *X*:

$$1) ETP \quad \text{o} \quad 2) 0.30ETP + 50$$

después se calcula la expresión:

3. Temperaturas promedio de máximas, mínimas y ambiente en la estación climatológica La Piedad, Tamaulipas.

Año	Temp.	E	F	M	A	M'	J	J'	A'	S	O	N	D
1972	T	25.0	24.0	29.8	30.9	30.4	31.6	32.6	34.0	33.9	32.0	22.2	22.4
	l	13.3	15.3	19.5	21.6	22.2	23.3	23.4	24.2	23.0	22.0	13.5	12.9
1973	T	19.2	19.7	24.7	26.3	26.3	27.5	28.0	29.1	28.5	27.0	17.9	17.7
	l	8.7	12.4	18.6	20.2	21.4	22.1	24.2	24.1	23.5	21.7	19.2	(14.1)
1974	T	12.3	16.2	23.3	24.5	26.4	27.1	28.8	29.1	29.3	27.7	24.8	18.2
	l	(17.5)	(21.6)	(29.1)	(31.1)	(33.0)	(34.5)	(35.1)	35.6	34.8	31.1	27.7	22.1
1975	T	14.0	18.0	24.0	26.3	27.7	29.0	29.7	29.6	29.1	25.9	21.9	18.7
	l	19.1	23.2	30.2	33.5	34.5	37.0	36.7	35.2	33.4	31.4	22.9	24.6
1976	T	12.1	16.3	19.2	22.8	23.2	24.6	24.4	23.3	22.7	20.7	14.5	16.8
	l	15.6	19.8	24.7	28.2	28.9	30.8	30.6	29.3	28.1	26.1	18.7	20.7
1977	T	20.1	24.6	27.6	28.0	31.5	35.0	32.6	33.8	29.6	25.8	17.9	16.9
	l	14.9	16.5	18.7	18.2	20.8	23.6	21.0	22.2	19.4	16.8	10.7	6.1
1978	T	17.5	20.6	23.2	23.1	26.2	29.3	26.8	28.0	24.5	21.3	14.3	11.5
	l	15.1	20.9	26.8	27.2	31.3	32.9	35.1	35.9	34.7	28.6	27.9	23.2
1979	T	6.6	10.6	16.7	20.0	21.3	22.1	23.7	23.9	23.2	18.6	15.9	9.1
	l	10.9	15.8	21.8	23.6	26.3	27.5	29.4	29.9	29.0	23.6	21.9	16.2
1980	T	18.2	19.3	26.9	30.0	34.4	36.5	37.0	36.9	32.5	29.8	26.3	22.9
	l	12.1	7.0	11.2	16.3	22.2	24.1	23.5	23.7	21.6	11.3	15.7	12.7
1981	T	15.2	13.2	19.1	23.2	28.3	30.3	30.3	30.3	27.1	20.6	21.0	17.8
	l	19.1	21.6	27.0	30.9	32.3	34.2	36.3	35.8	31.6	31.9	25.7	21.5
1982	T	6.6	7.6	15.6	18.6	20.5	22.2	23.3	21.6	19.6	15.9	11.0	9.7
	l	12.9	14.6	21.3	24.8	26.4	28.2	29.6	28.7	25.6	23.9	18.4	15.6
1983	T	21.8	22.0	27.9	29.0	34.0	35.9	29.7	28.5	29.3	26.2	23.2	24.6
	l	9.6	8.6	12.3	14.6	21.9	23.6	22.6	21.5	20.9	15.2	13.6	15.7
1984	T	15.7	15.3	20.1	21.8	28.0	29.8	26.2	25.0	25.1	20.7	18.4	20.2
	l	19.3	22.0	24.5	27.5	30.1	31.8	35.0	34.1	31.4	28.1	24.2	21.4
1985	T	9.7	11.9	13.9	19.4	22.0	23.7	24.1	24.6	21.9	17.4	14.5	13.3
	l	14.5	17.0	19.2	23.5	26.1	27.8	29.6	29.4	26.7	22.8	19.4	17.4
1986	T	19.0	21.8*	28.3*	30.1*	31.5	35.9	37.5	37.2	36.7	31.1	25.9	22.2
	l	9.0	8.9*	14.8*	18.8*	23.0	24.4	24.8	24.5	22.5	18.2	14.2	10.9
1987	T	14.0	15.4	21.6	24.5	27.3	30.2	31.2	30.9	29.6	24.7	20.1	16.6
	l	21.0	25.0	29.0	31.5	32.7	36.0	36.0	37.5	34.1	32.0	29.0	19.5
1988	T	9.1	10.1	13.6	16.6	22.1	23.6	23.9	24.4	22.5	18.4	14.9	5.9
	l	15.1	17.6	21.3	24.1	27.4	29.8	30.0	31.0	28.3	25.2	22.0	12.7
1989	T	17.2	24.2	28.9	34.0	32.6	35.1	35.6	37.0	30.6	31.4	29.3	26.0
	l	6.5	10.5	14.3	18.3	20.6	22.4	22.9	23.2	21.0	21.2	14.8	15.1
1990	T	11.9	17.4	21.6	26.2	26.6	28.8	29.3	30.1	25.8	26.3	20.6	20.6
	l	17.5	20.1	27.7	30.5	33.6	35.4	35.6	37.6	35.7	31.8	29.0	20.7
1991	T	6.6	9.5	16.2	19.2	22.1	23.6	23.2	24.6	23.2	20.0	16.7	8.9
	l	12.1	14.8	22.0	24.9	27.9	29.5	29.4	31.1	29.5	25.9	22.9	14.8
1992	T	23.4	26.5	29.9	31.8*	32.1*	35.2	36.7	36.8	34.3	30.2	24.6	18.9
	l	9.6	12.1	13.8	21.7*	22.5*	24.3	23.9	23.9	24.4	19.0	14.0	8.7
1993	T	16.5	19.4	21.9	26.8	27.3	29.8	30.3	30.4	29.4	24.6	19.3	13.8
	l	19.8	24.0	25.2	28.9	32.5	34.5	35.4	37.3	35.2	32.1	25.7	23.1
1994	T	7.6	10.7	12.5	14.7	22.0	23.7	24.4	24.9	23.7	17.9	14.6	12.0
	l	13.7	17.4	18.9	21.8	27.3	29.1	29.9	31.1	29.5	25.0	20.2	17.6
1995	T	17.6	20.9	26.1	32.2	(33.0)	34.9	35.7	30.7*	27.2*	31.6*	29.3*	23.5*
	l	7.4	14.0	13.7	21.4	(23.7)	22.5	24.0	22.9*	22.5*	19.1*	18.4*	15.2*
1996	T	12.5	17.5	19.9	26.8	28.4	28.7	29.9	26.8	24.9	25.4	23.9	19.4
	l	25.7*	21.9*	26.0*	28.9*	33.4*	32.3*	35.2*	34.4*	31.6*	27.6*	27.7*	14.9*
1997	T	15.3*	10.9*	14.2*	19.5*	25.3*	25.7*	29.2*	25.8*	24.9*	20.7*	19.0*	6.6*
	l	20.5*	16.4*	20.1*	24.2*	29.4*	29.0*	32.2*	30.1*	28.3*	24.2*	23.4*	10.8*
1998	T	22.5*	21.4*	27.5*	29.7*	33.6*	33.5*	32.2*					
	l	12.5*	13.3*	18.0*	20.7*	25.3*	26.9*	25.7*					
1999	T	17.5	17.4	22.8	25.2	29.5	30.2	28.9					
	l	14.8	17.0	21.6	24.7	27.5	29.1	29.5	29.4	27.7	24.5	20.5	16.7

*Datos de la estación Palo Soto, Tamaulipas. () Valores estimados.

$$[(X - DH)/X] + sma \quad (14)$$

sma representa la suma del mes anterior, se determina durante el cálculo de FS y varía de 0 a -1. DH es la deficiencia de humedad mensual y se obtiene al realizar el balance hídrico-edaforológico, en mm. Entonces, si el resultado de la ecuación (14) es mayor que 0, Fs se toma igual a tal valor y sma es nula para el mes siguiente. Si el resultado de la ecuación (14) es menor que 0, FS = 0 y sma es iguales a este valor si es mayor que -1, en el sentido algebraico, si no es así, sma se considera igual a -1. Los cálculos descritos detallados para obtener el IPAT mensual se pueden consultar en Campos (1988b).

Con base en las confrontaciones que realizó en climas muy diversos, Turc (1972) encontró que la masa cosechable de materia seca en t por ha es del orden del 60% del IPAT anual. Conviene aclarar que el hecho de obtener un 0 para el índice mensual no significa que la producción de materia seca sea nula (Forteza del Rey, 1986).

Índice de satisfacción de humedad (ISH)

El método de ISH se basa en el balance hídrico acumulativo desarrollado a través de la estación de crecimiento del cultivo y realizado en intervalos de 10 días. El balance hídrico es la diferencia entre la precipitación que ha recibido el cultivo y el agua perdida por éste y por el terreno, incluyendo la retenida en el suelo. Esto se calcula:

$$S_i = S_{i-1} + R - DE \quad (15)$$

donde Si es la humedad del suelo al final del i-ésimo intervalo, R es la recarga, precipitación o riego, y DE es la descarga, transpiración y evaporación. Por supuesto que el valor de Si está limitado por la capacidad de retención de humedad del suelo (Gommes, 1983).

Además de los cálculos del balance hídrico, es necesario evaluar la suma de las demandas hídricas del cultivo (ΣETc) y los déficit y excesos de humedad durante el periodo de crecimiento. Un déficit (D) es cero cuando Si resulta positivo o nulo, y para valores negativos de Si, D es igual a la magnitud absoluta. Los excesos (E) ocurren cuando Si excede a la capacidad de retención del suelo. Los valores de D y de Fp por E se suman y dividen entre ΣETc, expresando qué cantidad del total de agua necesaria no fue suministrada al cultivo y cuál fue perjudicial. Entonces, la diferencia de esta magnitud con la unidad expresará qué cantidad fue abastecida o estuvo disponible, es decir que:

$$ISH = 100 \left[1 - \frac{\Sigma(D + Fp \cdot E)}{\Sigma ETc} \right] \quad (16)$$

donde ISH es el índice de satisfacción de humedad expresado en porcentaje y Fp es un factor de ponderación, cuyo valor más común es 0, ya que el ISH es especialmente útil en regiones o países donde la disponibilidad de agua es el mayor factor limitante para la producción de los cultivos. (Frère y Popov, 1980).

El ISH se calcula así: se supone igual al 100% en el momento de la siembra y permanecerá en tal

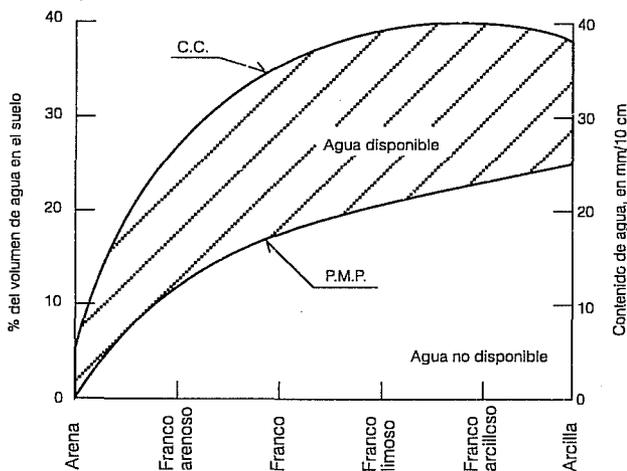
valor hasta que aparezca un déficit o un exceso; en caso de que se produzca una deficiencia de 20 mm, por ejemplo, y que el valor de ΣET_c sea igual a 400 mm, la reducción será de $20/400 = 0.05$, y por lo tanto, el índice pasará a un valor de 95%. Lógicamente este índice no aumentará aun cuando el déficit hídrico sea compensado y el suelo vuelva a contener una reserva de humedad.

Como en general resulta difícil obtener datos de campo sobre la capacidad hídrica de los suelos, Frère y Popov (1986) presentan la gráfica de la ilustración 1, desarrollada por Kramer (1983), como una guía útil, a falta de mejor información. Por otra parte, si se toma en cuenta que el sistema radicular crece junto con la planta, es lógico considerar que la capacidad de retención de humedad varía dentro del cálculo del balance hídrico, aumentando desde un valor bajo hasta el máximo, que tendrá lugar más o menos al mismo tiempo en que florece el cultivo anual (Frère y Popov, 1986).

El método del *ISH* no toma en cuenta directamente la temperatura ambiente; sin embargo, interviene indirectamente en tres circunstancias: en la duración del ciclo de crecimiento del cultivo, en la estimación de las demandas y, por último, en las temperaturas extremas, heladas y golpes de calor, que reducen los rendimientos potenciales. La demanda hídrica del cultivo (ET_c) se estima evaluando primero la evapotranspiración potencial del cultivo de referencia o pasto (ET_o) y multiplicando ésta por el coeficiente de desarrollo del cultivo (k_c):

$$ET_c = k_c(ET_o) \quad (17)$$

1. Variación en la capacidad de retención de humedad para diferentes texturas de suelos



Fuente: Kramer, 1983.

Para calcular los valores de k_c decenales se define la curva de variación de tal coeficiente durante el periodo vegetativo, de acuerdo con el procedimiento detallado por Doorenbos y Pruitt (1977) para cultivos extensivos y hortalizas; en cambio, para el arroz, café, caña de azúcar, cítricos, frutales caducifolios, pastos, plátano, té y vid se siguen las recomendaciones específicas dadas por estos autores.

Frère y Popov (1986) sugieren estimar la ET_o por medio de la fórmula de Penman, aplicada mensualmente. Después los valores se desglosan por decenas. Cuando no se disponga de la información meteorológica necesaria para aplicar esta fórmula, se pueden aplicar criterios empíricos como los de Papadakis, Turc, Hargreaves-Samani, Thornthwaite, Blaney-Criddle modificado y de radiación, seleccionando el más conveniente de acuerdo con la aplicabilidad y disponibilidad de datos. Los dos primeros criterios ya se han descrito y el tercero se expone a continuación. Los dos últimos se pueden consultar en Doorenbos y Pruitt (1977) y el método de Thornthwaite fue expuesto por Jiménez (1978). En caso de contar con registros de evaporación en el tanque clase A, se pueden corregir dichos valores para obtener una estimación de la ET_o (Doorenbos y Pruitt, 1977; Frevert *et al.*, 1983).

La fórmula propuesta por Hargreaves-Samani (1982) para estimar la ET_o es la siguiente:

$$ET_o = 0.0075 \cdot R_i' \cdot Tt \quad (18)$$

en la cual, ET_o está expresada en mm/d, Tt es la temperatura ambiente promedio en la decena o mes, en °F y R_i' es la radiación solar incidente media diaria en la decena o mes, en mm/d. Para transformar el valor de la radiación solar incidente R_i en langley/día a lámina de agua evaporada, se usa el calor latente de evaporación H_v , de acuerdo con la expresión siguiente (Linsley *et al.*, 1977):

$$R_i' = \frac{10 \cdot R_i}{H_v} = \frac{10 \cdot R_i}{597.3 - 0.564 \cdot Tt} \quad (19)$$

donde ahora Tt se expresa en °C.

En la obtención manual del *ISH* es conveniente llevar los datos y análisis en una hoja de cálculo como la que se presenta en la ilustración 2, cuyos detalles descriptivos respecto a los datos necesarios y cada una de las columnas se pueden consultar en Frère y Popov (1980 y 1986), Torres (1983), SARH (1988) y Campos (1991).

7. Estimación de la evapotranspiración potencial en la estación La Piedad, Tamaulipas

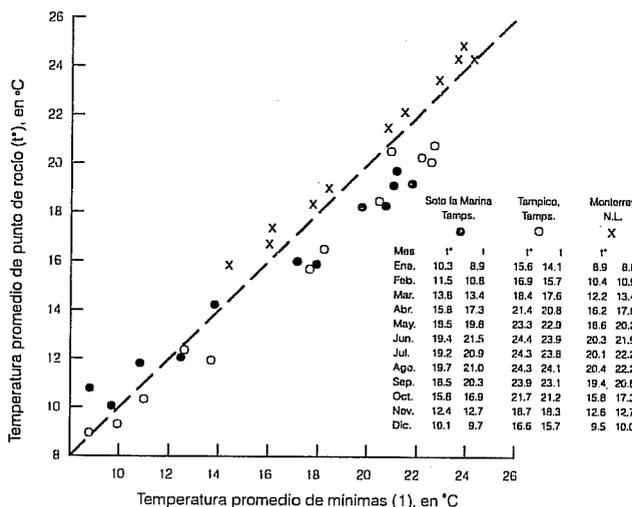
	Ti °C	Ti °F	Hv cal/g	Ri lg/d	R'i mm/d	No. de días	ETP mm/mes	IDH
Ene	14.8	58.6	589.0	280	4.754	31	64.8	0.085
Feb	17.0	62.6	587.7	335	5.700	28	74.9	0.083
Mar	21.6	70.9	585.1	380	6.494	31	107.0	0.026
Abr	24.7	76.5	583.4	410	7.028	30	120.9	0.054
May	27.5	81.5	581.8	460	7.997	31	149.8	0.136
Jun	29.1	84.4	580.9	520	8.952	30	170.0	0.151
Jul	29.5	85.1	580.7	540	9.300	31	184.0	0.055
Ago	29.4	84.9	580.7	510	8.782	31	173.4	0.080
Sep	27.7	81.9	581.7	450	7.736	30	142.5	0.404
Oct	24.5	76.1	583.5	380	6.513	31	115.2	0.227
Nov	20.5	68.9	585.7	290	4.951	30	76.8	0.133
Dic	16.7	62.1	587.9	260	4.423	31	63.8	0.130
Total							1443.1	

se presentan en la última columna, de la que se concluye que todos los meses, excepto septiembre, tienen una humedad muy deficiente, y que el clima es clasificado como árido, es decir, muy poco adecuado para la agricultura de temporal (Hargreaves, 1975; Campos, 1989). Sin embargo, se puede apreciar la factibilidad de realizar dos ciclos: el temprano, de febrero a junio y el tardío, de agosto a noviembre. Sin duda, el primero debe ser mejor, por la posibilidad de captar, en la humedad del suelo, las lluvias de diciembre y enero, además de permitir el aprovechamiento de las lluvias de mayo y junio.

Resultados del ICCP

Papadakis (1980) establece que el valor de su

4. Relación entre las temperaturas que se indican en tres observatorios meteorológicos



Índice está correlacionado con la productividad agrícola y a la gráfica que representa la variación de los índices mensuales la designa como *auxograma*, con la idea de recordar los efectos de la auxinas, hormonas que favorecen el crecimiento longitudinal de las plantas.

Antes de iniciar los cálculos del ICCP se revisó la relación entre las temperaturas de punto de rocío y el promedio de las mínimas, a partir de los datos disponibles en las normales climatológicas (SMN, 1982), de tres observatorios meteorológicos cercanos a la zona de San Fernando. Los valores se presentan en la ilustración 4, de donde se concluye que es improcedente la corrección numérica sugerida por Papadakis.

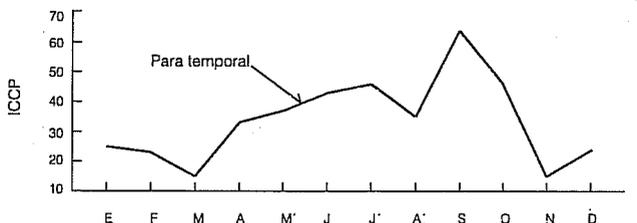
Con base en los datos de los cuadros 3 y 4 se calcularon los ICCP para temporal, cuyos resultados se han concentrado en el cuadro 8; a partir de tales valores se obtuvieron los valores promedio mensuales de dicho índice y se dibujó el *auxograma* respectivo (véase ilustración 5), el cual confirma la posibilidad de realizar dos ciclos, el temprano, de marzo a junio y el tardío, de agosto a noviembre.

Al considerar que el primer ciclo aprovecharía la humedad almacenada en el suelo como resultado

8. Valores del índice climático de Papadakis en temporal para la estación climatológica La Piedad, Tamaulipas

Año	E	F	M	A	M'	J	J'	A'	S	O	N	D	Temprano	Tardío
1972	5.5	9.1	36.1	80.6	86.8	86.4	86.3	75.7	65.0	61.3	12.5	4.7	-	-
1973	25.6	46.6	76.4	35.7	16.6	90.5	82.5	71.3	17.3	46.7	5.8	3.3	76.9	76.9
1975	14.1	1.9	2.0	2.0	74.5	23.5	79.4	85.8	81.3	34.4	4.2	61.4	19.3	19.3
1976	45.7	49.2	19.2	85.8	68.7	11.6	93.1	87.3	85.0	73.8	35.2	29.8	156.3	156.3
1977	20.3	9.4	3.8	29.2	4.2	91.2	51.4	80.8	79.1	61.6	29.6	15.9	59.5	59.5
1978	22.3	14.1	2.3	26.8	2.5	3.7	2.4	2.5	84.8	75.6	5.0	39.1	52.3	52.3
1979	19.2	23.5	2.2	41.9	3.7	92.1	68.0	91.3	87.0	14.0	1.8	44.8	81.8	81.8
1980	39.2	36.4	2.4	2.4	6.3	8.0	5.0	18.7	75.4	71.8	60.6	58.3	120.4	231.5
1981	34.9	17.8	4.0	11.1	31.7	55.4	10.6	6.6	68.8	7.2	3.9	15.4	111.0	97.1
1982	1.7	47.3	2.1	82.5	68.5	2.2	2.4	4.0	3.7	12.9	4.2	23.7	64.4	27.2
1983	5.0	20.6	5.1	2.1	13.3	39.9	75.3	5.5	45.5	5.8	5.7	2.9	49.3	138.8
1984	31.5	52.9	2.0	2.1	90.7	8.3	18.3	3.4	83.9	70.2	3.2	36.6	87.3	179.0
1985	32.1	13.6	5.7	89.8	87.9	69.2	24.1	12.1	35.6	17.8	2.5	37.3	84.3	92.1
1986	1.8	4.8	2.0	2.4	27.7	9.8	7.0	4.5	72.5	56.4	44.0	37.0	43.9	184.4
1987	37.2	12.0	3.9	3.5	24.2	86.1	61.8	2.4	52.2	2.2	9.0	4.4	86.2	127.6
1988	33.4	51.8	62.9	14.1	5.6	17.8	2.9	2.1	74.4	52.0	2.7	1.8	89.6	134.1
1989	66.6	10.9	1.9	22.0	2.1	7.9	56.3	9.9	46.5	29.1	5.1	21.4	79.3	146.9
Prom.	25.7	24.8	13.8	31.4	36.2	41.4	42.8	33.2	62.2	40.9	13.8	25.9		

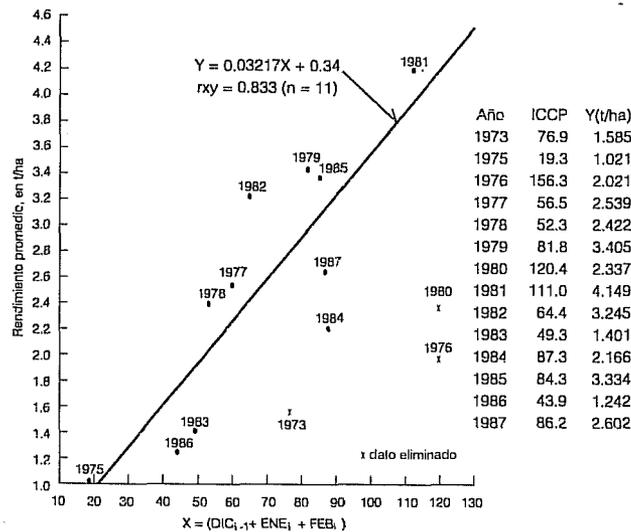
5. Auxograma promedio del periodo 1972-1989 en la estación La Piedad, Tamaulipas



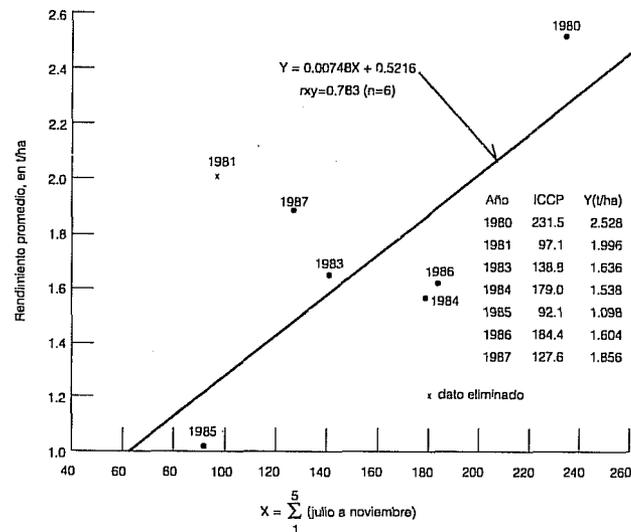
de las lluvias de diciembre, enero y febrero, se definió un parámetro agroclimático integrado por la suma de los valores del ICCP para tales meses, cuyos valores se tienen en la penúltima columna del cuadro 8. Para el ciclo tardío, el parámetro agroclimático adoptado fue la suma de las magnitudes del ICCP de julio a noviembre, dado en la última columna del mismo cuadro. La relación entre los parámetros definidos y los rendimientos promedio observados (véase cuadro 6) se muestra en la ilustración 6 para el temprano, y en la ilustración 7 para el tardío.

Resultados del IPAT

Forteza del Rey (1986) menciona que al evaluar 6. Relación entre el ICCP mensual y el rendimiento promedio de sorgo temprano



7. Relación entre el ICCP mensual y el rendimiento promedio de sorgo tardío



el IPAT de un lugar para un determinado periodo (mes, estación o año), y disponer de los valores que alcanza la producción de distintos cultivos en esos mismos periodos, puede establecerse la relación producción-índice, que permitirá predecir la cosecha esperable de tal cultivo en cualquier otro lugar o periodo, siempre y cuando se disponga del valor que alcanza el IPAT en el mismo.

Por esto, primero se evaluó el IPAT para temporal, con base en los datos de los cuadros 3 y 4, y la ilustración 3; los resultados se muestran en el cuadro 9. En seguida se cuantificó el mismo parámetro agroclimático definido con el ICCP para el análisis del ciclo temprano; sus valores y la relación con el rendimiento promedio observado se muestran en la ilustración 8.

Resultados del FRR y del ISH

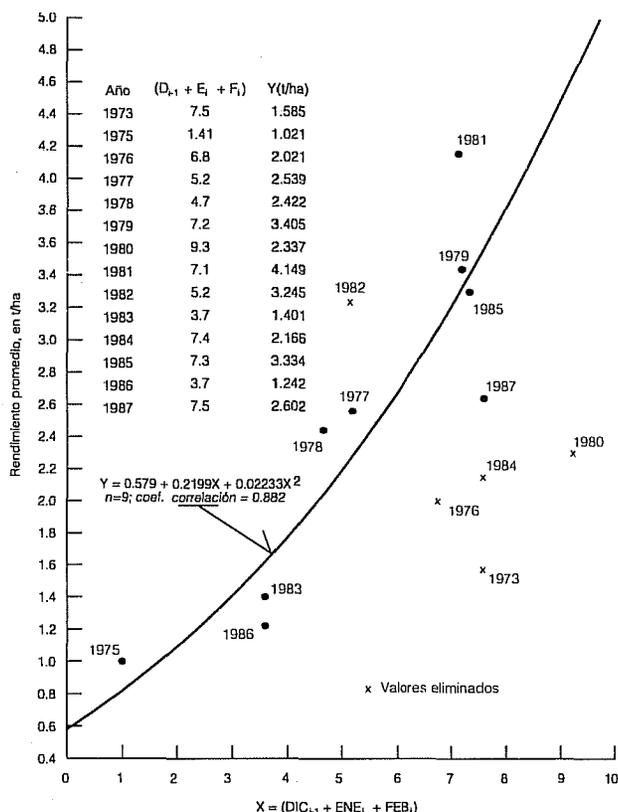
Al considerar que el cálculo de estos índices se lleva a cabo por decenas, se consideró la conveniencia de realizarlos conjuntamente en un solo programa de cómputo. Por esto, primero se definieron los periodos vegetativos del sorgo, en 130 y 120 días para el temprano y el tardío, respectivamente; en relación con el inicio, terminación y duración de sus fases de desarrollo, éstas se muestran en las ilustraciones 9 y 10, así como los valores calculados para el coeficiente de cultivo según el criterio propuesto por Doorenbos y Pruitt (1977). Además, en las mismas ilustraciones se tiene el ajuste del polinomio que representa la curva de dicho coeficiente (Poole et al., 1983).

Posteriormente, se abordó la manera de estimar la temperatura ambiente promedio de cada decena, para lo que se realizó un contraste entre el

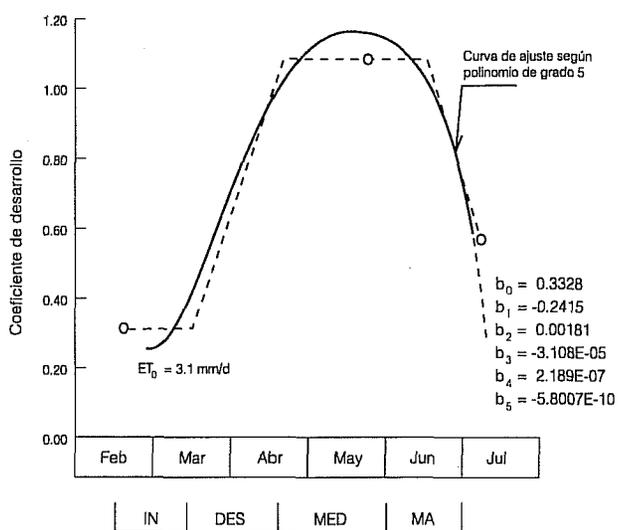
9. Valores del índice de potencialidad agrícola de Turc en temporal para la estación climatológica La Piedad, Tamaulipas

Año	Anual												Prom.	Riego
	E	F	M	A	M'	J	J'	A'	S	O	N	D		
1972	0.9	0.9	2.8	6.6	7.2	7.5	7.4	2.1	4.7	4.7	1.2	0.6	46.6	68.5
1973	2.8	4.1	3.4	0.8	0.2	7.5	5.0	2.0	1.3	4.7	0.9	0.4	33.1	67.5
1975	0.7	0.0	0.0	0.0	1.5	1.8	7.4	6.9	6.2	1.0	0.4	3.6	29.5	68.6
1976	3.2	0.0	0.5	6.3	3.5	0.0	6.6	6.9	6.0	5.0	3.3	2.5	43.8	66.0
1977	1.6	1.1	0.0	0.0	0.0	5.1	1.2	6.9	6.2	5.2	3.4	2.0	32.7	63.3
1978	1.1	1.6	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	4.9	2.3	2.7	14.5	66.1
1979	2.0	2.5	0.0	2.4	0.0	5.1	4.3	6.9	6.1	0.8	0.0	3.0	33.1	66.0
1980	3.0	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.2	3.9	3.0	16.4	66.1
1981	2.4	1.7	0.0	0.0	0.0	1.2	0.0	0.0	1.3	0.2	0.4	1.2	8.4	66.6
1982	0.0	4.0	0.0	4.9	3.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	13.0	66.9
1983	0.7	2.8	0.2	0.0	0.0	0.8	7.3	0.0	2.3	0.6	1.2	0.3	16.2	67.0
1984	2.8	4.3	0.0	0.0	2.6	7.0	0.0	0.0	3.6	4.1	0.3	3.1	20.8	67.4
1985	2.8	1.4	0.0	6.4	7.2	0.0	1.3	0.3	3.7	1.9	0.0	2.8	34.8	66.7
1986	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	7.2	0.0	0.0	0.0	4.1	3.2	2.8	11.0	67.6
1987	2.9	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	3.5	0.0	1.4	0.0	0.2	0.7	17.7	66.7
1988	2.9	4.3	2.6	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	11.4	67.3
1989	3.9	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	6.7	67.1
Prom.	2.0	2.1	0.6	1.8	1.5	2.5	2.6	1.9	2.5	2.4	1.2	1.8	22.9	67.0

8. Relación entre el IPAT mensual y el rendimiento promedio del sorgo temprano

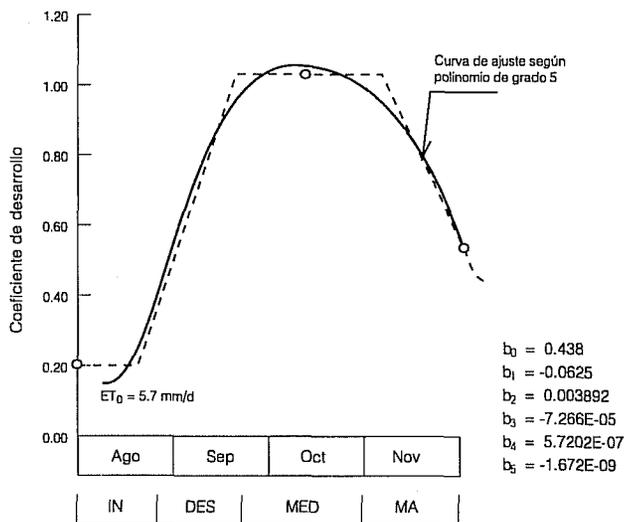


9. Curva del coeficiente de desarrollo del sorgo-grano temprano



valor medio obtenido como promedio de la decena y el definido para los días 5, 15 o 25, según la decena en análisis. Las temperaturas ambiente de cada día se obtuvieron como la semisuma de las temperaturas máxima y mínima del día correspon-

10. Curva del coeficiente de desarrollo del sorgo-grano tardío



diente (García, 1983), en cambio la temperatura ambiente de los días 5, 15 o 25 se definió como la semisuma de los valores máximo y mínimo reportados en tal renglón, esto es, utilizando la temperatura mínima del día siguiente. Esto se muestra en el cuadro 10, aceptándose tal aproximación. En los cuadros 11 y 12 se presentan los valores estimados de temperatura ambiente en cada decena, para los ciclos temprano y tardío, respectivamente.

Para completar la información de precipitación decenal (véase cuadro 5), se adoptaron los valores correspondientes a la moda, o magnitud más frecuente, y en caso de no existir tal valor, se aceptó la mediana. Por otra parte, la capacidad de retención de humedad del suelo se adoptó igual a 60 mm, magnitud que se dividió entre el número de decenas de cada ciclo, y al realizar el balance hídrico, esta última magnitud se fue incrementando en ella misma, lo cual equivale

10. Comparación entre la temperatura ambiente promedio decenal y la adoptada en la estación La Piedad, Tamaulipas

1972	1981	1990	1980	1984	1986						
3a. Feb.	2a. Abr.	3a. Jun.	1a. Ago.	2a. Sep.	3a. Oct.						
Día	Día	Día	Día	Día	Día						
Tl(°C)	Tl(°C)	Tl(°C)	Tl(°C)	Tl(°C)	Tl(°C)						
21	22.5	11	23.3	21	31.0	1	25.5	11	27.8	21	26.0
22	23.0	12	24.5	22	31.0	2	25.5	12	28.7	22	25.5
23	23.0	13	24.5	23	30.5	3	25.5	13	27.5	23	27.5
24	22.5	14	23.5	24	30.0	4	25.5	14	26.5	24	28.5
25	22.8	15	22.5	25	30.5	5	25.5	15	26.0	25	24.0
26	24.0	16	22.5	26	29.5	6	25.5	16	25.8	26	22.5
27	24.3	17	22.0	27	31.0	7	24.5	17	24.2	27	23.2
28	23.0	18	22.0	28	30.0	8	23.0	18	23.2	28	24.3
29	23.5	19	22.5	29	31.0	9	24.0	19	23.0	29	18.8
-	-	20	23.8	30	31.5	10	25.5	20	22.8	30	23.3
-	-	-	-	31	-	-	-	-	-	31	23.0
Prom.	23.2	Prom.	23.1	Prom.	30.6	Prom.	25.0	Prom.	25.6	Prom.	24.2
Estim.	23.5	Estim.	21.0	Estim.	31.6	Estim.	25.5	Estim.	25.8	Estim.	23.5

11. Temperatura ambiente adoptada para la decena indicada en la estación climatológica La Piedad, Tamaulipas

Mes	Feb.			Marzo			Abril			Mayo			Junio		
	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a
1972	23.5	26.5	21.8	26.0	25.3	29.0	26.0	23.3	26.3	28.5	26.5	29.3	29.3		
1973	18.5	21.8	26.3	24.8	19.5	25.0	26.5	22.0	22.5	29.3	29.3	29.3	24.3		
1974	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
1975	11.5	21.5	22.0	26.0	29.5	26.0	25.0	31.8	25.5	25.3	30.5	32.0	31.3		
1976	18.5	20.5	22.0	25.0	25.3	24.3	21.8	26.8	24.8	26.0	28.5	28.5	29.8		
1977	22.3	19.0	23.0	20.5	22.5	24.5	21.0	26.0	24.5	26.0	28.5	28.5	26.0		
1978	18.0	11.8	18.5	22.5	26.5	22.0	25.5	27.5	28.0	29.0	28.3	31.0	32.0		
1979	17.0	15.5	21.0	20.3	17.0	28.5	24.5	18.0	24.5	26.0	26.0	25.5	29.0		
1980	20.0	20.0	23.5	23.0	21.5	17.0	23.5	26.5	29.0	28.5	29.0	29.0	30.3		
1981	22.0	20.5	19.0	18.5	20.0	21.0	21.0	25.5	24.5	27.0	25.0	27.0	29.0		
1982	19.0*	22.5*	26.5*	22.0*	27.5*	28.0*	23.0*	(25.4)	28.0	24.0	29.3	30.5	31.0		
1983	21.8	26.0	21.5	20.3	28.5	18.5	22.8	23.5	31.0	27.5	30.0	29.0	32.0		
1984	20.5	24.3	24.5	26.0	24.5	21.5	24.8	28.5	22.0	28.3	29.0	28.3	30.8		
1985	16.0	21.0	15.0	24.8	26.0	22.0	26.5	25.0	29.0	29.5	28.0	29.0	29.3		
1986	19.0	17.8	24.5	21.0	25.5*	27.0*	26.5*	28.5	30.0*	28.0	28.5	27.5	30.0		
1987	20.8	14.5	20.5	22.0	17.0	21.0	24.3	25.8	28.5	28.5	25.8	29.3	31.3		
1988	17.0	16.8	16.5	25.0	25.5	26.3	29.5	(25.4)	(26.3)	(27.4)	27.0	30.5	31.2		
1989	18.5*	22.5*	24.0*	24.5*	17.5*	19.5*	28.0*	27.5*	28.5*	30.5*	30.0*	28.5*	27.0*		
1990	18.0*	21.0*	28.0*	24.5*	24.0*	18.5*	29.0*	25.0*	29.0*	30.0*	27.5*	32.0*	31.0*		
Prom.	19.2	20.1	21.7	22.9	23.3	23.1	24.1	25.4	26.3	27.4	28.1	28.9	29.7		

* Datos de la estación Palo Solo, Tamaulipas () Valores estimados

12. Temperatura ambiente adoptada para la decena indicada en la estación climatológica La Piedad, Tamaulipas

Mes	Agosto			Septiembre			Octubre			Noviembre		
	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a
1980	25.5	25.0	25.5	24.5	28.0	24.0	22.3	23.0	20.5	21.3	17.0	14.0
1981	26.0	28.0	29.0	26.5	25.5	27.5	27.5	27.0	17.0	20.0	20.0	22.0
1982	31.3	32.0	31.3	30.3	30.5	27.8	28.8	22.5	19.0	13.5	20.3	10.5
1983	30.0	31.0	31.8	31.8	28.8	24.8	28.3	23.5	22.5	26.5	25.0	16.5
1984	30.0	30.8	30.5	28.0	25.6	29.0	25.8	28.5	20.0	22.0	24.5	19.8
1985	31.8	30.5	31.5	30.5	28.5	30.5	25.5	28.5	26.5	18.0	27.0	26.8
1986	29.0	30.5	29.3	25.0	30.5	29.5	28.0	16.8	23.5	25.3	17.0	17.2
1987	30.5	32.0	31.5	29.5	32.0	25.0	24.5	22.5	27.0	24.0	25.5	24.3
1988	27.5*	24.0*	27.0*	25.0*	22.0*	24.5*	22.5*	24.0*	23.0*	24.0*	27.0*	24.0*
1989	30.0*	28.0*	29.0*	31.5*	27.5*	26.0*	24.0*	23.5*	23.5*	26.0*	26.0*	25.5*
Prom.	29.2	29.2	29.6	28.2	27.9	26.9	25.7	24.0	22.3	22.1	22.9	20.1

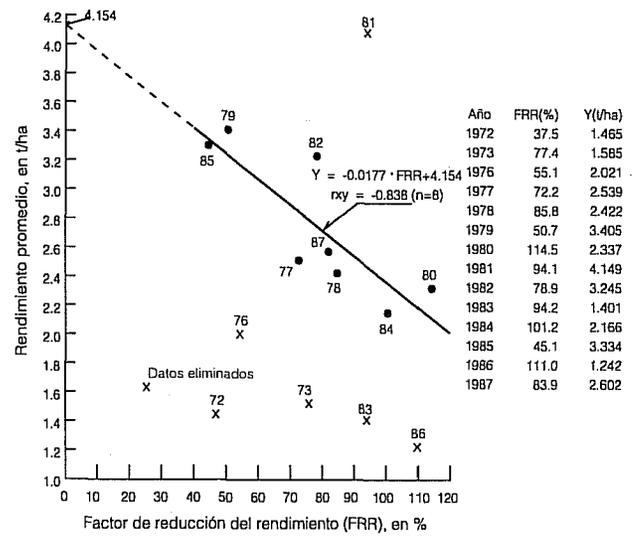
* Datos de la estación Palo Solo, Tamaulipas.

a considerar una variación lineal de la segunda decena a la última.

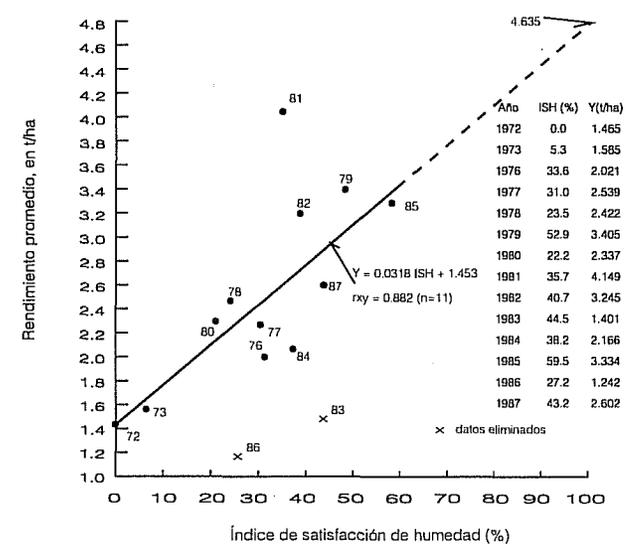
En relación con las condiciones de humedad inicial, se adoptó para el ciclo temprano la lluvia ocurrida en la primera y segunda decenas de febrero, ya que la siembra se consideró al inicio de la tercera decena, y para el ciclo tardío se aceptó un valor de humedad inicial correspondiente al 50% de la lluvia ocurrida durante julio.

Haciendo uso del programa de cómputo desarrollado, de los datos concentrados en los cuadros 5, 11 y 12, y con apoyo en los valores definidos en las consideraciones previamente citadas, así como en los coeficientes de ajuste mostrados en las ilustraciones 3, 9 y 10, se obtuvieron los resultados que se han concentrado en la 11 para el factor de reducción del rendimiento del sorgo temprano, y en la 12 y 13 para el índice de satisfacción de humedad de los ciclos temprano y tardío, respectivamente.

11. Relación entre el FRR y el rendimiento promedio del sorgo temprano



12. Relación entre el ISH y el rendimiento promedio del sorgo temprano

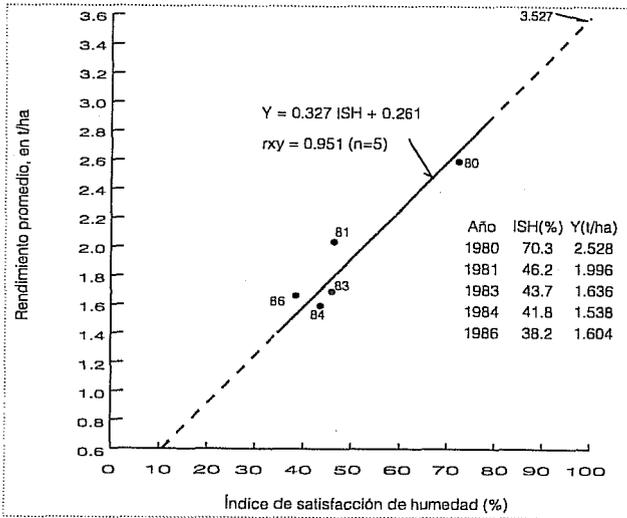


Comentarios generales

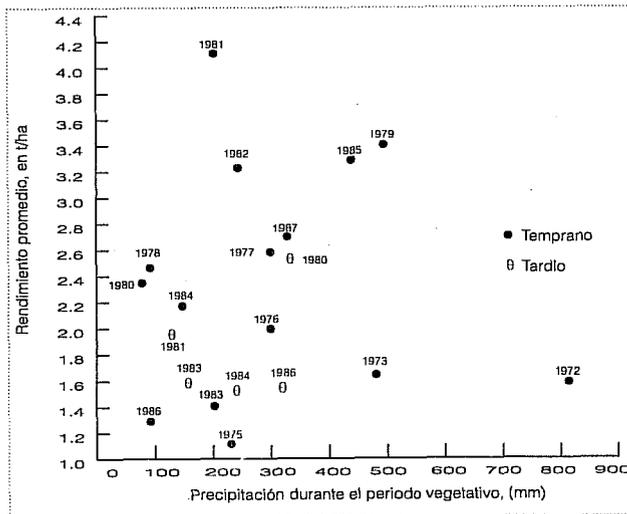
Tras analizar los resultados obtenidos con los cuatro criterios propuestos, no hay duda que el ICCP se proyecta como una gran herramienta para el monitoreo de los cultivos, ya que a pesar de que sólo requiere de datos climáticos mensuales, condujo a excelentes resultados de aplicación, de calidad semejante a los resultados del ISH, el cual, sin embargo, requiere de mucha más información tecnológica y climática.

La aplicación del IPAT, cuyo planteamiento fue similar al del ICCP, condujo a resultados también semejantes a los de este último índice, pero con

13. Relación entre el ISH y el rendimiento promedio del sorgo tardío



14. Relación entre la precipitación estacional y el rendimiento promedio observado, para el sorgo de temporal en el norte de Tamaulipas



una mayor dificultad en el cálculo y con requerimientos de mayor información climática.

A partir de los resultados del *FRR* se observó que este parámetro no es adecuado para condiciones de un temporal deficiente, ya que conduce a valores superiores al 100% en este factor, lo que es inadmisibles, como se deduce de la ecuación (6). Además, los rendimientos muy bajos, debidos a factores diferentes a los déficit de agua, no pueden ser representados por el *FRR*, como se observa en la ilustración 11. Para los años 1972 y 1973 los excesos de humedad causaron grandes daños a las cosechas, ya que todavía no existía en la zona un sistema de drenaje pluvial agrícola, y respecto a los años 1983 y 1986, al revisar

los cálculos del *ISH* se observó la ocurrencia de fuertes deficiencias durante las fases de floración y formación de la cosecha, motivo por el cual el rendimiento pudo haber sido tan bajo, o bien, debido a la participación de otras causas.

Conviene recordar que en los análisis del *ISH* se adoptó una única fecha de siembra, y por lo tanto, no se realizaron los seguimientos del balance de humedad de acuerdo con la fecha real de cada año, probablemente debido a esto, no se encontró concordancia para el año de 1981, en el cual se reporta el rendimiento promedio máximo observado.

Los valores del *ISH* para el ciclo temprano, correspondientes a 1988, 1989 y 1990, resultaron ser 44.8, 18.5 y 21.0, por lo cual los rendimientos esperados fueron 2.9, 2.0 y 2.1 t/ha, respectivamente. De acuerdo con los valores reportados por Covarrubias y Rodríguez (1990) en tres localidades durante el ciclo temprano de 1990, la cantidad representativa fue de 1.9 t/ha, la cual prácticamente coincide con el rendimiento pronosticado.

Nota

Se destaca la gran ayuda que brindó el Ing. José Luis García Salas al proporcionar la información diaria de la estación climatológica La Piedad, Tamaulipas., del período de enero de 1960 a diciembre de 1987. Se agradece la cooperación del Ing. Francisco Porras Méndez para completar los datos climáticos y por haber recopilado la información sobre los rendimientos promedio observados (cuadro 6).

Revisado: agosto, 1992

Referencias

Aceves N. L. A. y Arteaga R. *Agroclimatología del sorgo en México*. IV Congreso Nacional de Meteorología, pp. 214-219, Chihuahua, Chih., 1989.

Almanza, R. y López, S. *Radiación solar global en la República Mexicana mediante datos de insolación*. Series del Instituto de Ingeniería núm. 357, UNAM, México, 2a. ed. corregida y aumentada, 20 p., 1978.

Baier, W. *Crop-Water Models and their Use in Yield Assessments*. Technical Note No. 151, WMO-No. 458. Secretariat of the World Meteorological Organization, Ginebra, Suiza, 1977.

Campos, A. *Función de distribución de probabilidades gamma mixta: soluciones y aplicaciones*, 10º Congreso Nacional de Hidráulica. Tomo II, pp. 318-332. Morelia, Michoacán, 1988a.

Campos, A. *El Índice de potencialidad agrícola de Turc: descripción y aplicaciones*, IV Congreso Nacional de Irrigación, 6-9 noviembre, Reynosa, Tamaulipas, 1988b.

Campos, A. *Primera estimación del potencial agrícola del Estado de San Luis Potosí por medio de índices climáticos*. 2: Análisis de datos y resultados, 2a. Reunión Nacional de Agroclimatología, pp. 80-91. Universidad

- Autónoma Chapingo, Dpto. de Irrigación. Texcoco, Edo. de México, 1989.
- Campos, A. *Introducción al pronóstico agroclimatológico de cosechas*, Facultad de Ingeniería, UASLP, San Luis Potosí, SLP, 35 pp., 1991.
- Cervantes, M. E., Islas, R. M. A. y Duarte, A. J. L. "Análisis de la producción agrícola nacional", *Revista Ingeniería Hidráulica en México*, vol. IV núm. 2, pp. 46-53. CIVAC, Morelos, 1989.
- Covarrubias, R. J. M. y Rodríguez, H. R. *Sistemas de producción en sorgo de temporal en el norte de Tamaulipas*. XXIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo, 333 pp. Comarca Lagunera, México, 1990.
- Doorenbos, J. y Kassam, A. H. *Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos*. Estudio FAO; Riego y Drenaje No. 33. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia, 1979.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W. O. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage paper No. 24. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia, 1977.
- Forteza del Rey, M. M. *Caracterización agroclimática de la Provincia de Badajoz*. Dirección General de Producción Agraria del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España, 160 pp. y 26 mapas, 1986.
- Frère, M. y Popov, G. F. *Pronóstico de cosechas basado en datos agrometeorológicos*. Estudio FAO: producción y protección vegetal No. 17. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia, 1980.
- Frère, M. y Popov, G. F. *Pronósticos agrometeorológicos del rendimiento de los cultivos*. Estudio FAO: producción y protección vegetal No. 73. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia, 1986.
- Frevert, D. K., Hill, R. W. y Braaten, B. C. "Estimation of FAO Evapotranspiration Coefficients", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 109, núm. 2, pp. 265-270, 1983.
- García de M. E. *Apuntes de climatología*. Capítulo II: Temperatura, pp. 7-48, tercera edición publicada por la autora, México, 1983.
- Gommes, R. A. *Pocket Computers in Agrometeorology*. FAO, Plant Production and Protection, Paper No. 45. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italia, 1983.
- Hargreaves, G. H. *Manual de requerimientos de agua bajo riego y para agricultura de secano*. Documento preparado bajo financiamiento de la AID, Utah State University, Logan, Utah, EUA, 43 pp., 1975.
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. *Estimating Potential Evapotranspiration*. Technical Note in the Journal of Irrigation and Drainage Division, Vol. 108, No. IR3. pp. 225-230, 1982.
- Jáuregui O. E. "Una primera estimación de la distribución de la radiación global y neta en México", *Revista Recursos Hidráulicos*, vol. VII, núm. 2, pp. 96-105., SRH, México, 1978.
- Jiménez L. J. *Cálculo del clima de acuerdo al Segundo Sistema de Thornthwaite*. Publicación No. 7, 2a. ed., Dirección General de Estudios, SRH, México, 1978.
- Kramer, E. *Water Relations of Plants*, Academic Press, Nueva York, EUA, 487 pp., 1983.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A. y Paulus, J. L. H. *Hidrología para ingenieros*. Capítulo 2: El tiempo atmosférico y la hidrología, Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S. A. Bogotá, Colombia, 1977.
- Papadakis, J. *El clima con especial referencia a los climas de América Latina*, Península Ibérica, ex-colonias ibéricas y sus potencialidades agropecuarias, Editorial Albatros, Buenos Aires, República Argentina, 1980.
- Poole, L., Borchers, M. y Castlewitz, D. M. *Algunos programas de uso común en Basic*. Edición para Apple II. Programa: Regresión de Orden N., Osborne/McGraw-Hill, México, 1983.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SRH). *Boletín climatológico*, núm. 6, Tomo I, Subdirección de Hidrología, México, 1983.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). *Términos de referencia para estudios agroclimatológicos*, Dirección General de Irrigación y Drenaje, Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica, México, 1988.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH). *Atlas del agua de la República Mexicana*. Capítulo 13: Climas, pp. 158-159, México, 1976.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). *Normales climatológicas*. Período 1941-1970, Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional, SARH, México, 1982.
- Torres R. E. *Agrometeorología*. Capítulo 9: Programaciones agrícolas, pp. 137-147, Editorial Diana, México, 1983.
- Turc, L. "Evaluation des Besoins en Eau d'Irrigation, Evapotranspiration Potentielle. Formule Climatique simplifiée et mise a jour.", *Ann. Agron.*, 12(1), pp. 13-49, 1981.
- Turc, L. "Indice Climatique de Potentialité Agricole", *Supplement au Bulletin de L'Association Francaise pour L'Etude du Sol*, núm. 2, pp. 81-102, 1972.