

RETOS Y PERSPECTIVAS DEL FITOMEJORAMIENTO: ALGUNOS ASPECTOS DEL AMBIENTE FISICO EN RELACION A LA PRODUCCION Y PRODUCTIVIDAD DE LOS CULTIVOS

Manuel Livera Muñoz¹

INTRODUCCION

Los factores del ambiente físico a la vez que son sostén del crecimiento del cultivo, también pueden causar estrés, un cambio aberrante en los procesos fisiológicos causado por un factor o por la combinación de varios de ellos (Hale y Orcutt, 1987). Los cultivos en el campo siempre están bajo cierto nivel de estrés, ya que una condición sin estrés es sólo un concepto teórico. En cuanto a los factores del ambiente físico aéreo, su influencia sobre los cultivos ha sido observada por el hombre desde los inicios de la agricultura, pero el estudio cuantitativo de sus efectos es reciente.

El interés de los agricultores y los agrónomos en los factores meteorológicos es evidente por las referencias frecuentes al "mal clima" o "mal tiempo" para los cultivos, y los políticos casi siempre culpan a éstos de los fracasos en la producción agrícola. Por otro lado, el fitomejorador también tiene gran interés en estos factores ambientales pues sabe que el crecimiento, desarrollo y producción del cultivo depende del genotipo, del efecto del ambiente y de la interacción entre ambos; no obstante, su con-

cepto de ambiente es integral y, por lo tanto, en ocasiones no es fácil para él definir el grado en que los factores del ambiente físico están limitando la expresión del potencial productivo del genotipo. Además, considerando que en la expresión fenotípica están integrados los efectos de todos los factores del ambiente, con frecuencia utiliza a las mismas plantas para caracterizar los ambientes y estudiar la interacción genotipo x ambiente (*v. gr.* Finlay y Wilkinson, 1963; Eberhart y Russell, 1966).

Los fisiólogos también tienen interés en los efectos de los factores meteorológicos sobre los procesos fisiológicos y la productividad de las plantas, y existe gran cantidad de literatura publicada al respecto. En contraste con los fitomejoradores que realizan su trabajo en el campo, muchos estudios fisiológicos se han realizado en cámaras de crecimiento con ambiente controlado, haciendo variar solamente un factor; sin embargo, los resultados de cámara de crecimiento, que sin duda son y seguirán siendo útiles, no son extrapolables a condiciones de campo, por lo cual se reconoce que existe un vacío de información en cuanto a la fisiología a nivel de cultivo. Al respecto, Hesketh *et al.* (1982) señalan que la fisiología de plantas completas en condiciones de campo es tan compleja que podría provocar un "shock" a los fisiólogos especialistas en estudios en ambientes controlados.

¹ Profesor Investigador del Centro de Genética, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, México.

En el campo, el crecimiento, desarrollo y producción de los cultivos dependen de procesos fisiológicos cuya expresión a su vez depende del genotipo y de interacciones complejas entre el estado de las plantas, el estado de la atmósfera circundante, y la propia naturaleza de los mecanismos o procesos fisiológicos y físicos. Estas complejas interacciones determinan los niveles de intercambio de masa y energía entre el cultivo y su microclima y, por lo tanto, el interés en los factores del ambiente físico aéreo no debe limitarse a su medición para la caracterización de las condiciones imperantes en un momento o período de tiempo.

El objetivo de esta contribución es señalar la importancia de la micrometeorología para: 1) Mejorar el entendimiento del efecto de los factores del ambiente físico sobre los cultivos, y 2) Señalar algunas alternativas que pueden coadyuvar a incrementar la eficiencia del proceso productivo de las plantas y de su mejoramiento genético. Por razones de espacio, la discusión sólo se centrará en el concepto del balance de energía.

CLIMA, MICROCLIMA Y MICROMETEOROLOGIA

El clima de un lugar está definido por la expresión promedio en varios años de todos los eventos del tiempo atmosférico; es el conjunto de parámetros estadísticos que definen el estado más frecuente de los elementos meteorológicos, incluyendo sus valores extremos y su variación a través del año (García, 1986). El microclima es el clima de la capa atmosférica adyacente a la superficie terrestre, aquélla donde las plantas y animales se desarrollan y que comprende desde el nivel del suelo hasta pocos metros arriba de ellos (Rosenberg *et al.*, 1983). En

el caso de una superficie cultivada, el microclima se caracteriza por fuertes variaciones de temperatura del aire, concentración de CO₂, velocidad del viento y vapor de agua, a lo largo del perfil del cultivo y hasta pocos metros arriba de él. La micrometeorología estudia detalladamente los fenómenos físicos que tienen lugar en el microclima y su importancia para la agronomía radica en que provee la teoría para el análisis del intercambio de masa y energía entre el cultivo y su microclima.

En los últimos 40 años han habido avances significativos en el desarrollo de la teoría e instrumentación micrometeorológica, lo cual se está conjuntando con el conocimiento e instrumentación fisiológica con objeto de avanzar en el entendimiento de las respuestas de los cultivos al microclima. El interés en Fisiotecnia es ligarlos al estudio del proceso productivo y mejoramiento genético de los cultivos.

EL BALANCE DE ENERGIA

Desde que emergen las plantas están expuestas a flujos de radiación (Figura 1) y, además de la función primaria de ésta de proveer energía para la fotosíntesis, existen otros aspectos de la radiación que pueden influenciar el patrón de crecimiento y desarrollo del cultivo, así como su rendimiento y que, por lo tanto, deberían ser de interés tanto para el fitomejorador como para el fisiólogo interesado en el estudio de los cultivos en el campo.

Los flujos principales de radiación que inciden sobre el cultivo son la radiación de onda corta (ROC), con longitud de onda (λ) entre 0.15 y 3 μm , emitida por el sol; y la radiación de onda larga (ROL, con λ entre 3 y 80 μm) emitida y reflejada por las nubes, moléculas de los gases de la atmósfera y

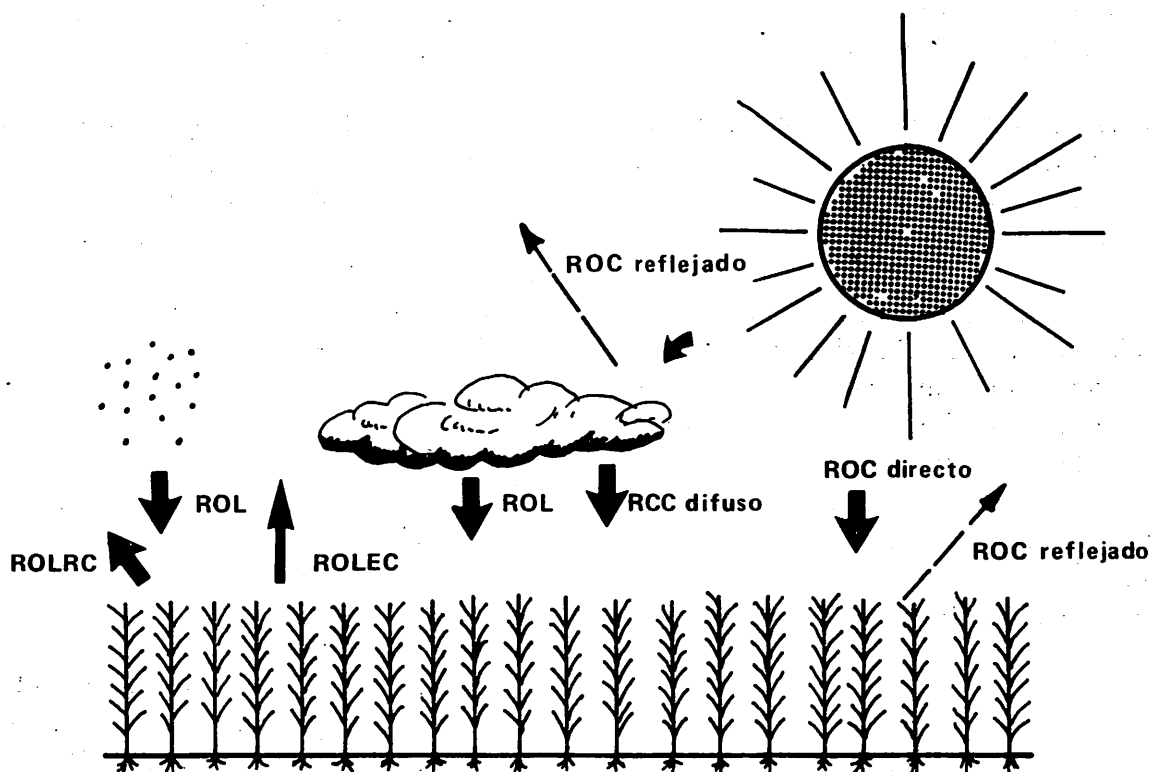


Figura 1. Flujos principales de radiación que inciden y que son emitidos o reflejados por una superficie cultivada (explicación en el texto).

partículas en suspensión (Rosenberg *et al.*, 1983). Las flechas indicadas en la Figura 1 representan la dirección del flujo.

La radiación solar neta (RSn) está dada por la relación:

$$RSn = (1-r) ROC \downarrow$$

donde r es el coeficiente de reflexión ó albedo de la superficie cultivada.

La radiación de onda larga neta (ROLn) está dada por:

$$ROLn = ROL \downarrow - ROL \uparrow$$

donde ROL \uparrow representa la suma de la ROL emitida (ROLEC) y reflejada (ROLRC) por la cubierta:

$$ROL \uparrow = \epsilon \sigma T_c^4 + (1-\epsilon) ROL \downarrow$$

donde ϵ es la emisividad; σ es la constante de Stephan-Boltzman y T_c es la temperatura de la cubierta (Kanemasu y Arkin, 1974). La emisividad de las cubiertas vegetales se estima que varía de 0.97 a 0.98 (Rosenberg *et al.*, 1983; Kanemasu y Arkin, 1974).

A la energía total absorbida por la superficie cultivada se le denomina radiación neta (Rn) y se obtiene de los balances para la ROC y ROL:

$$R_n = (ROC \downarrow - ROC \uparrow) + (ROL \downarrow - ROL \uparrow).$$

La energía absorbida es intercambiada con el ambiente a través de los procesos de evaporación, conducción, convección y radiación.

Hasta la fecha, en los programas de fitomejoramiento en México no se han considerado los aspectos micrometeorológicos relacionados con los factores de la planta y del ambiente que tienen influencia sobre el nivel de la radiación neta y las diversas formas en que ésta se utiliza. Respecto a la radiación solar¹ se pueden mencionar algunos problemas de interés para el fitomejorador:

1) ¿Cuál es la variación genotípica y cuáles son los genotipos más eficientes en términos de la conversión de energía solar a biomasa y particularmente a rendimiento económico?

2) ¿Es posible seleccionar genotipos con un coeficiente de reflexión (albedo) más alto con objeto de disminuir el nivel de la energía absorbida y la fracción utilizada en la evapotranspiración y mejorar la eficiencia en el uso del agua?

3) En relación a la radiación fotosintéticamente activa (RFA, λ entre 0.4 y 0.7 μm), ¿cuáles son los genotipos más eficientes en su intercepción y utilización?,

¹ Irradiancia es el término correcto para referirse al flujo de energía por unidad de área horizontal y por unidad de tiempo (Wm^{-2}) para la radiación con λ de 0.15 a 3 μm , correspondiente a la radiación solar; en el caso de la RFA, con λ de 0.4 a 0.7 μm , los términos correctos son irradiancia fotosintética (Wm^{-2}) y densidad de flujo de fotones fotosintéticos (μ Moles $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

¿cuánta biomasa se produce por Mega Joule interceptado o absorbido?, etc.

Formalmente la utilización de la energía absorbida (R_n) por una superficie cultivada (Figura 2) se expresa de acuerdo al principio de la conservación de la energía como:

$$R_n = S + H + LE + aM + m; \text{ o bien } R_n - S - H - LE - aM - m = 0$$

donde:

S = Flujo de calor hacia el interior del suelo.

H = Flujo de calor sensible de la superficie al aire.

LE = Flujo de calor latente desde la superficie, donde E es la tasa de evapotranspiración y L es el calor latente de vaporización del agua (2454 J/g, a 20°C).

aM = Energía fijada por la fotosíntesis, donde a es el equivalente de energía de la materia seca (aproximadamente 17 KJ/g) y M es la materia seca producida por unidad de área.

m = Energía involucrada en la respiración y almacenamiento de calor en el dosel o cubierta.

La dirección de los flujos LE, H y S pueden cambiar durante la noche.

La partición o uso de la R_n en la superficie cultivada dependerá de diversos factores: la condición hídrica de las plantas, el contenido de humedad del suelo, la densidad de población y la arquitectura de la planta, entre otros; además, también habrá influencia de factores del microclima como son la temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa, etc. En un cultivo bien abastecido de agua la mayor proporción de la radiación neta se utiliza para la evaporación

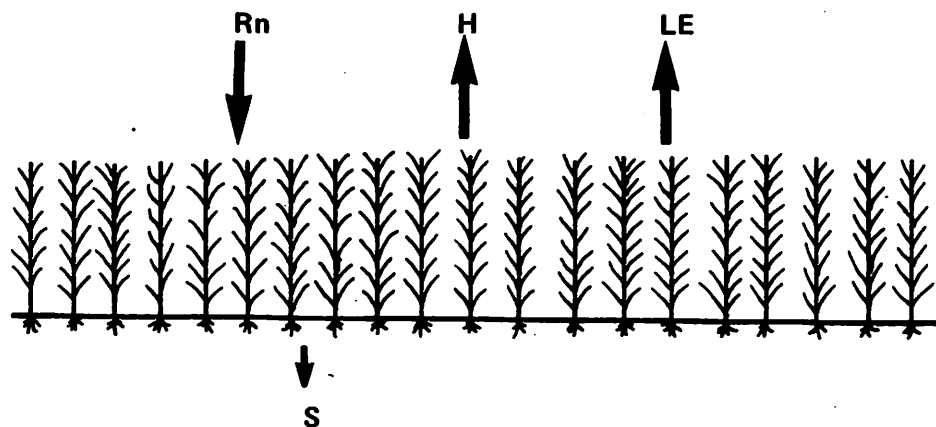


Figura 2. Representación esquemática de la utilización de la radiación neta (Rn) en el día (explicación en el texto).

del agua, ya que para evaporar un gramo de ésta se requieren aproximadamente 2454 Joules.

En el caso de un cultivo bajo sequía la proporción de la energía absorbida que es intercambiada por convección (flujo de calor sensible, H) se incrementa y es una fuente significativa de energía para la transpiración de las hojas inferiores; además, otros procesos fisiológicos de estas hojas, como la fotosíntesis y respiración, también serán afectados ocasionando normalmente una senescencia temprana. La partición de la energía en estas condiciones impactará otros factores del microclima: el déficit de saturación y la temperatura del aire serán altos. El conocimiento de estas relaciones podrían ayudar a mejorar el planteamiento de las investigaciones; como por ejemplo, no intercalando tratamientos de riego con los de sequía, sino estableciendo el experimento de sequía

dentro de una área donde haya esta condición, con objeto de tener un microclima similar al que prevalece en una región agrícola bajo tensión por sequía.

En la actualidad, el investigador puede contar con instrumentación que le permite determinar la diferencia entre la radiación neta arriba (Rna) y abajo (Rns) de la cubierta para estimar la energía absorbida por ella y su balance, el cual está dado por:

$$Rna - Rns = T + Hp + FS$$

donde T es el flujo de calor latente asociado a la transpiración, Hp es el intercambio de calor sensible entre las plantas y el aire y FS es la energía utilizada en la fotosíntesis. Al nivel del suelo el balance de energía está dado por la relación:

$$Rns = Es + Hs + S$$

donde E_s es el flujo de la calor latente asociado a la evaporación del suelo, H_s es el calor sensible intercambiado entre el suelo y el aire, y S es el flujo de calor en el suelo (Kanemasu y Arkin, 1974).

La caracterización de la radiación neta en los cultivos es esencial para entender el ambiente físico de los cultivos, porque el conocimiento de su distribución espacial en la cubierta puede dar información sobre las magnitudes posibles de la evaporación del suelo, transpiración y fotosíntesis, así como información sobre las regiones dentro de la cubierta que son más activas en estos procesos (Impens *et al.*, 1970; Denmead *et al.*, 1962).

En maíz *Zea mays* L. se ha encontrado que el 75% de la radiación neta se utiliza dentro del dosel y el 25% restante llega al suelo cuando el índice de área foliar es de 2.8 y la población de 39 000 plantas/ha; dentro del estrato superior del dosel el gasto de energía fue el 55% de la energía absorbida, correspondiente al 73% del gasto de energía dentro de la cubierta (Denmead *et al.*, 1962). En maíz sembrado en surcos con 76 cm de separación y población de 64 000 plantas/ha, a los 100 días después de la siembra, el 46% de la R_n se utilizó en la transpiración, 13% en la evaporación del suelo, 32% por el flujo de calor sensible y 6% por el flujo de calor en el suelo; y solamente el 16% de la R_n alcanzó el suelo (Brown y Covey, 1966).

Campbell *et al.* (1981) midieron R_n arriba y dentro de una cubierta de maíz dulce, sembrado a 67,750 plantas/ha, en diferentes etapas de desarrollo y estudiaron el efecto del estrés hídrico. La sequía temprana retrasó el desarrollo del dosel. En plantas sin estrés la R_n a 25 cm arriba del suelo fue 32% de la medida sobre el dosel; conforme

las hojas se fueron marchitando durante la sequía temprana, la R_n a 25 cm sobre el suelo se incrementó de 32 a 46% de la R_n medida sobre el dosel, incrementándose a 51% cuando la sequía fue tardía.

La energía absorbida por la cubierta depende del tamaño y disposición del área foliar y éstas son características en las cuales difieren los genotipos, aun cuando se siembren a la misma densidad. Cuando el agua no es limitante y el área foliar es grande, la R_n en la superficie del suelo es menor que cuando el genotipo tiene una área foliar menor; en consecuencia, la evaporación del suelo es más baja. Sin embargo, la cubierta del cultivo con mayor área foliar transpirará más porque intercepta mayor energía que la cubierta del genotipo con menor área foliar, aunque en este último caso se transmitirá más energía al suelo y habrá mayor evaporación. Lo que pasa cuando hay poca humedad en el suelo depende de diversos factores del microclima y del genotipo y se analiza brevemente a continuación.

El balance de energía para una hoja está dado por una relación similar al caso de un cultivo:

$$R_n = (R_{OC \downarrow} - R_{OC \uparrow}) + (R_{OL \downarrow} - R_{OL \uparrow})$$

Sin embargo, en este caso la R_n se utiliza principalmente en sólo dos procesos de intercambio de energía con el ambiente, ya que la energía utilizada en la fotosíntesis es muy baja (1-2%), y la cantidad almacenada también es despreciable, de tal forma que la R_n se iguala a:

$$R_n = H + LE,$$

donde H es el flujo de calor sensible y LE es el flujo de calor latente, donde L es el calor

latente de vaporización del agua (2454 J/g) y E es la tasa transpiratoria de la hoja.

Si una planta no está bien abastecida de agua sus estomas se cierran, se reduce su tasa transpiratoria y, por consiguiente, también se reduce el intercambio de energía a través del flujo de calor latente (LE); por otro lado, se incrementan el intercambio de energía por convección (H) y la temperatura de la hoja (T_h). T_h ha sido señalada como un parámetro útil en la selección de genotipos resistentes a la sequía ya que con el desarrollo de los teletermómetros infrarrojos manuales se pueden realizar determinaciones instantáneas de T_h con base en la radiación de onda larga emitida por las hojas. También se puede utilizar como parámetro de selección la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire circundante (DT) determinada con teletermetría infrarroja, ya que generalmente plantas sin estrés hídrico tienen una T_h inferior a la del aire (T_a) y plantas bajo estrés tienen una T_h similar o superior a T_a .

No obstante, hay que señalar que existe discusión sobre la utilidad de T_h o DT como indicador de estrés hídrico, debido a que algunos investigadores han encontrado que la T_h de plantas bien regadas es igual o superior a T_a . Sin embargo, esto se ha debido a determinaciones de T_h en hojas aisladas y a que en algunos casos se tomaron las hojas superiores, que son las mejor expuestas a la radiación solar; otras causas de T_h mayor a T_a están relacionadas con los instrumentos y técnicas utilizados en las determinaciones, y con las condiciones ambientales, pues en algunos casos T_h y DT se determinaron en invernadero con una humedad atmosférica alta que redujo el flujo de calor latente (Jackson, 1982). Por las razones anteriores, es recomendable realizar determinaciones de

la temperatura de la cubierta (T_c), no de T_h , con objeto de tener una temperatura promedio de superficies foliares expuestas a diferentes niveles de radiación solar.

La utilidad de T_c y/o DT para reflejar diferencias en el grado o nivel de estrés y su impacto en el rendimiento puede ilustrarse con los resultados de Livera y González (s.f.) con trigo *Triticum aestivum* L.. En este caso, en febrero de 1988 se sembró un experimento con una línea experimental del programa de mejoramiento de trigo del Centro de Genética del Colegio de Postgraduados para estudiar los efectos de la sequía sobre la producción de grano. Los tratamientos estudiados fueron 4 (Cuadro 1) producto de la combinación de dos densidades de siembra (80 y 160 kg/ha de semilla) y dos regímenes de humedad (riego y "sequía"). A los tratamientos de "sequía" se les suspendió el riego a los 17 días después de la siembra. En la Figura 3 se muestra la T_c (tomada al mediodía) de los tratamientos. Se observa que hay diferencias hasta de 5°C entre los tratamientos de riego y de sequía. En el Cuadro 2 se presentan algunas variables fisiológicas tomadas en los tratamientos destacando la depresión de la fotosíntesis y de la conductancia estomática de las hojas bandera de los tratamientos de sequía. Así como se presentaron diferencias en T_c , también las hubo en rendimiento (Cuadro 3) observándose que el principal efecto de la sequía fue a través de la disminución en el número de granos por m². De acuerdo con estos resultados, no hay duda que diferencias en temperatura están relacionadas con el funcionamiento fisiológico y la productividad de los cultivos; además, la utilidad de la T_c ó DT_c podría incrementarse si esta variable se conjugara con otras como son la radiación solar, déficit de presión de vapor del aire y velocidad del viento.

Cuadro 1. Tratamientos estudiados en el experimento de trigo en la primavera de 1988.

Clave	Descripción
RDA	Riego y densidad alta (160 kg ha ⁻¹ de semilla)
RDB	Riego y densidad baja (80 kg ha ⁻¹ de semilla)
SDA	"Sequía" y densidad alta (160 kg ha ⁻¹ de semilla)
SDB	"Sequía" y densidad baja (80 kg ha ⁻¹ de semilla)

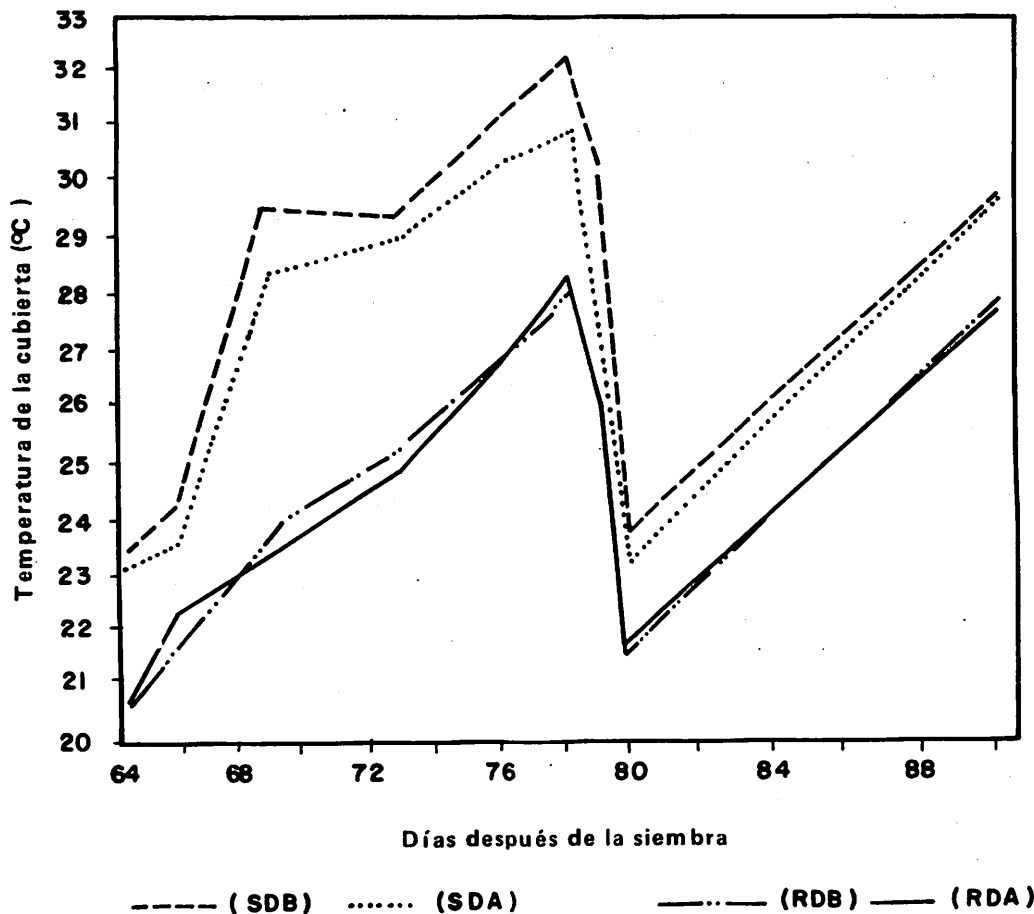


Figura 3. Temperatura de la cubierta (Tc) del trigo bajo cuatro tratamientos durante el período de los 64 a los 90 días después de la siembra.

Cuadro 2. Fotosíntesis aparente, conductancia estomática y potencial hídrico de hojas bandera de trigo bajo condiciones de humedad edáfica¹.

Trata- miento	Fotosíntesis aparente (μ moles $m^{-2}s^{-1}$)	Flujo cuántico (RFA) (μ moles $m^{-2}s^{-1}$)	Conductancia estomática (μ moles $m^{-2}s^{-1}$)	Potencial hídrico (bares)
SDB	11.62	1653	0.973	-26.0
SDA	11.46	1654	1.081	-28.6
RDB	18.41	1690	2.928	-21.6
RDA	18.17	1702	3.831	-19.8

¹ Promedios de mediciones hechas a los 76 y 78 días después de la siembra.

Cuadro 3. Rendimiento de grano (RG), sus componentes y altura de planta del trigo bajo cuatro tratamientos.

Trata- miento	RG (gm^{-2})	Espigas por m^2	Longitud de espiga (cm)	Granos por m^2	Peso de mil granos (g)	Altura de planta (cm)
RBD	554	586	9.5	17748	31.24	90.0
RAD	544	625	8.8	17071	31.86	89.1
SBD	302	545	9.0	9990	30.47	60.5
SAD	307	512	9.3	10139	29.41	68.8

Otros resultados que indican la posibilidad de utilizar a la temperatura foliar como un criterio auxiliar en la selección de genotipos superiores bajo estrés hídrico, son los obtenidos por Verma y Eastin (1985) en sorgo *Sorghum bicolor* L. Moench. y los de Fischer *et al.* (1984) en maíz.

ARQUITECTURA DE LA PLANTA E INTERCEPCION DE RADIACION FOTOSINTETICAMENTE ACTIVA

La explotación de las zonas con riego es indispensable para balancear la baja producción en áreas con limitaciones de agua. Si no

hay otros factores (nutrición, plagas, enfermedades, etc.) limitando la producción y productividad, es a través de incrementos en la densidad de población como se puede maximizar la intercepción de radiación fotosintéticamente activa (RFA, λ entre 400 y 700 nm) para aumentar la productividad primaria ya que existe una relación directa entre las dos (Biscoe *et al.*, 1979). En el caso del maíz de riego sembrado a densidades de población altas, la poca penetración de la RFA a los niveles inferiores de la cubierta puede volverse limitante para la producción de grano, pues incrementan las plantas sin mazorca. Aunque las causas de esto no están determinadas, se especula que una de ellas podría ser un reducido abastecimiento de fotosintatos por la planta a las mazorcas, lo cual podría mejorarse con una mejor penetración de la RFA en la cubierta a través de cambios en la arquitectura de la planta, principalmente en el ángulo foliar (Pendleton *et al.*, 1968; Mock y Pearce, 1975; Lambert y Johnson, 1978). No obstante, Duncan (1971) ha señalado que con un IAF menor a 3 no tiene importancia el ángulo de las hojas y que sólo se podrían tener ventajas en términos de intercepción de RFA con IAF de 5 o mayores.

En el área de Fisiotecnia del Centro de Genética del Colegio de Postgraduados se ha modificado radicalmente la arquitectura de la planta de maíz con objeto de generar genotipos más productivos. Rubio *et al.* (s. f.) estudiaron los patrones de distribución de la RFA en las cubiertas de tres genotipos de maíz sembrados bajo riego en dos densidades de población (60,000 y 90,000 plantas/ha); éstos fueron: H-30, híbrido de planta alta del INIFAP con arquitectura "normal"; L-Mock, una línea de porte intermedio, con hojas erectas arriba de la

mazorca y horizontales abajo de ésta; y L-Zopilote, una línea de altura media, prolífica (cuatera) con hojas largas y delgadas, y espiga simple. Las dos últimas líneas fueron generadas en el área de Fisiotecnia.

La distribución del área foliar, en términos del índice de área foliar (IAF) en relación a la altura de la planta (A), a la transmisión relativa de RFA (TRRFA) y los coeficientes de extinción (K), obtenidos en la floración, se presentan en las Figuras 4, 5, 6 y 7.

En las Figuras 4 y 5 se puede observar que al nivel de la primera mazorca (altura de 200 cm) del H-30, la TRRFA fue el 40% de la incidente sobre la cubierta y que al nivel del suelo sólo se transmitió un 5% de RFA. Asimismo, son evidentes los bajos niveles de RFA en los estratos inferiores de la cubierta en las dos densidades (Figuras 4 y 5). En contraste, en las Figuras 6 y 7 se aprecia que los otros dos genotipos tuvieron una mejor distribución de la RFA y al nivel de suelo se transmitió un 30 y 40% de ésta, en el caso de L-Mock y L-Zopilote a 90,000 plantas/ha, respectivamente.

Con los datos de irradiancia fotosintética (IF) y del IAF se calcularon los coeficientes de extinción (K) para el estrato de la cubierta arriba de la mazorca, para la parte inferior a ésta y para toda la cubierta (Figuras 4 a 7) relacionando los datos de IF e IAF conforme a la ley de Bouguer-Lambert (Monsi y Saeki, citados por Loomis *et al.*, 1967):

$$I_z = I_0 e^{-KF}$$

donde I_z e I_0 se refieren a la IF dentro de la cubierta al nivel z y arriba de ella, respectivamente; F es el índice de área foliar

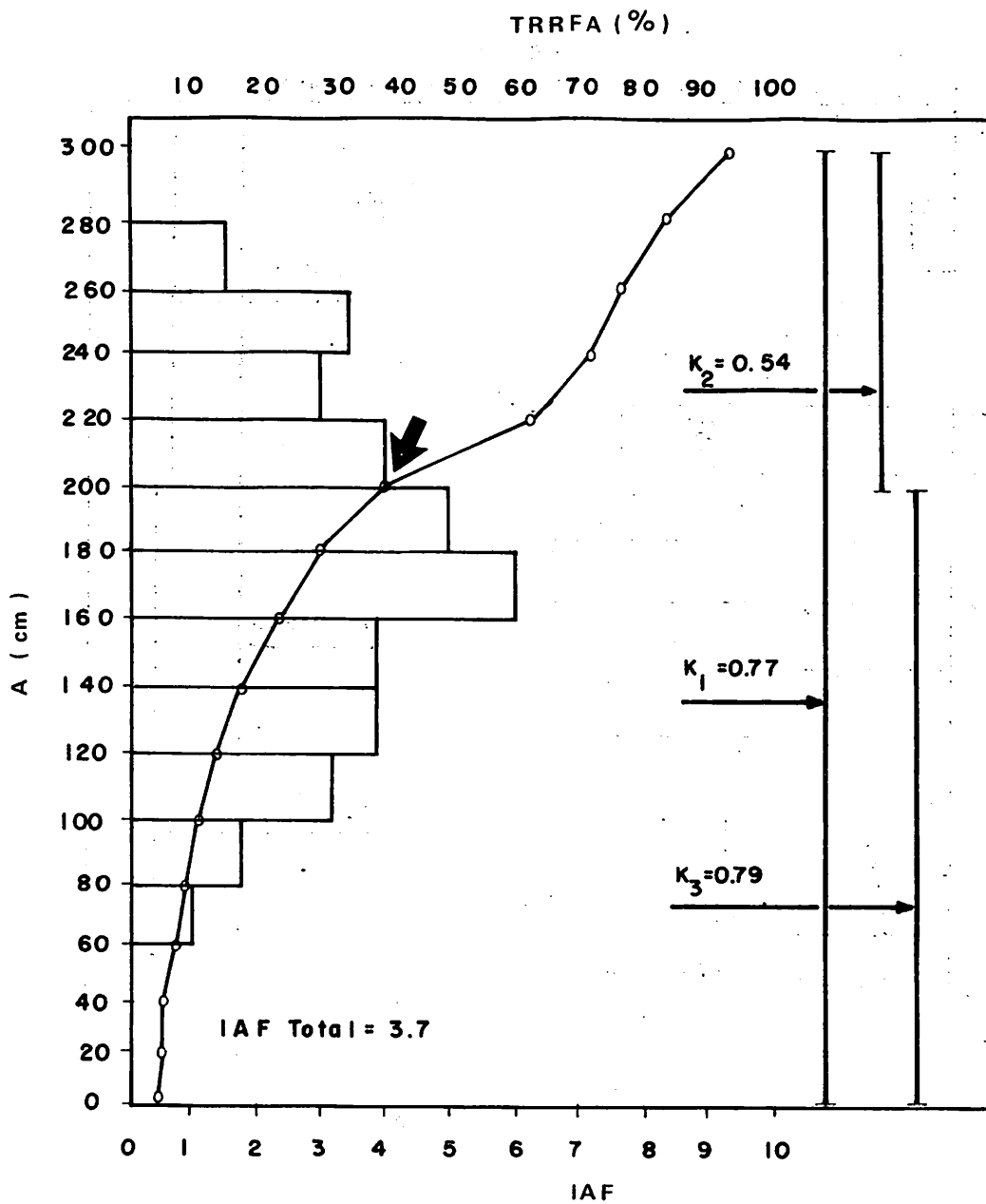


Figura 4. Transmisión de la radiación fotosintéticamente activa (TRRFA), índices de área foliar (IAF) por estratos y coeficientes de extinción (K) en relación a la altura del dosel (A) del híbrido H-30 sembrado a 90 000 plantas / l a. La flecha (↓) indica la altura promedio de la primer mazorca.

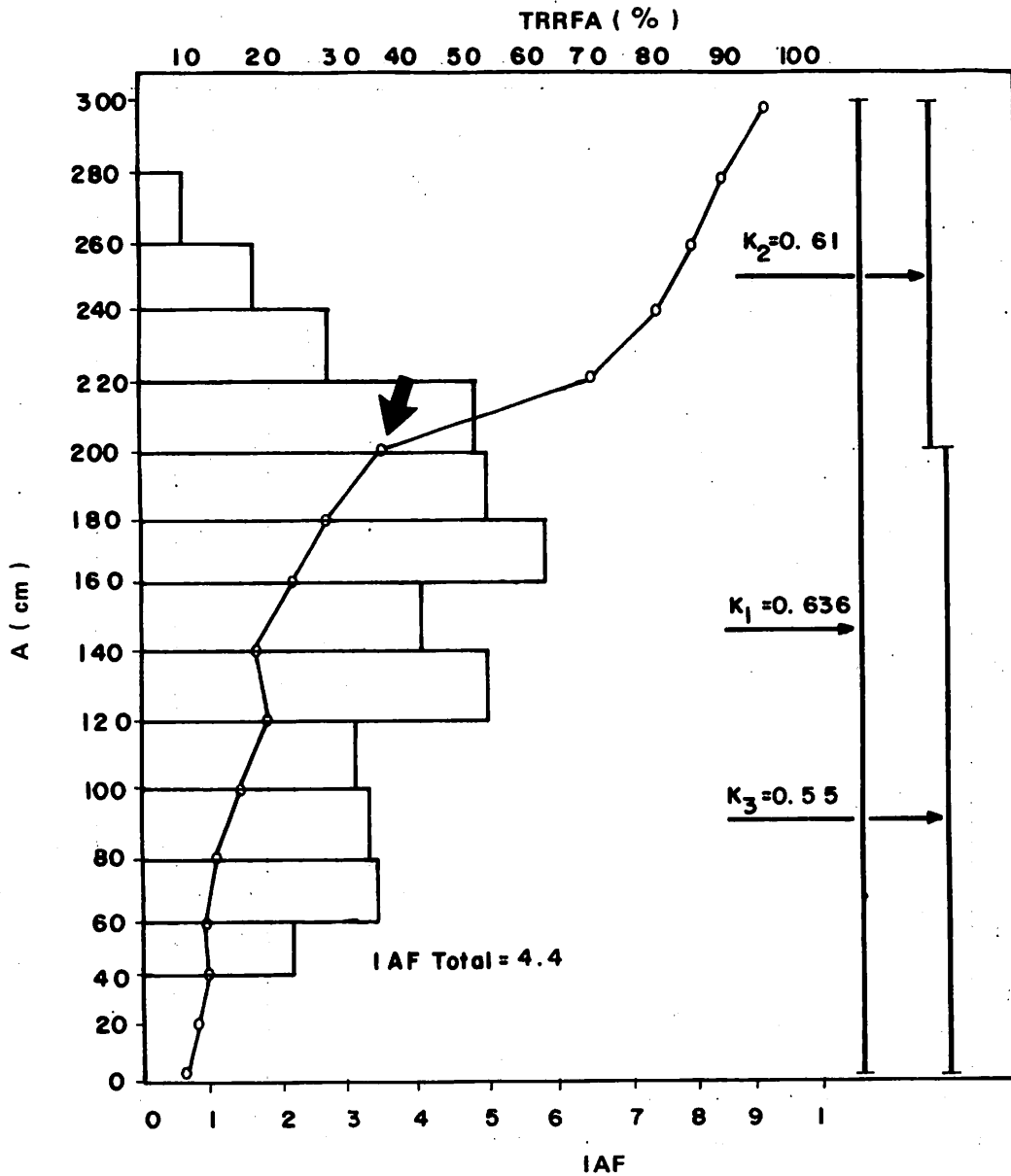


Figura 5. Transmisión relativa de la radiación fotosintéticamente activa (TRRFA), índices de área foliar por estratos y coeficientes de extinción (K) en relación a la altura del dosel (A) del híbrido H-30 sembrado a 60 000 plantas / ha. La flecha (↓) indica la altura promedio de la primer mazorca.

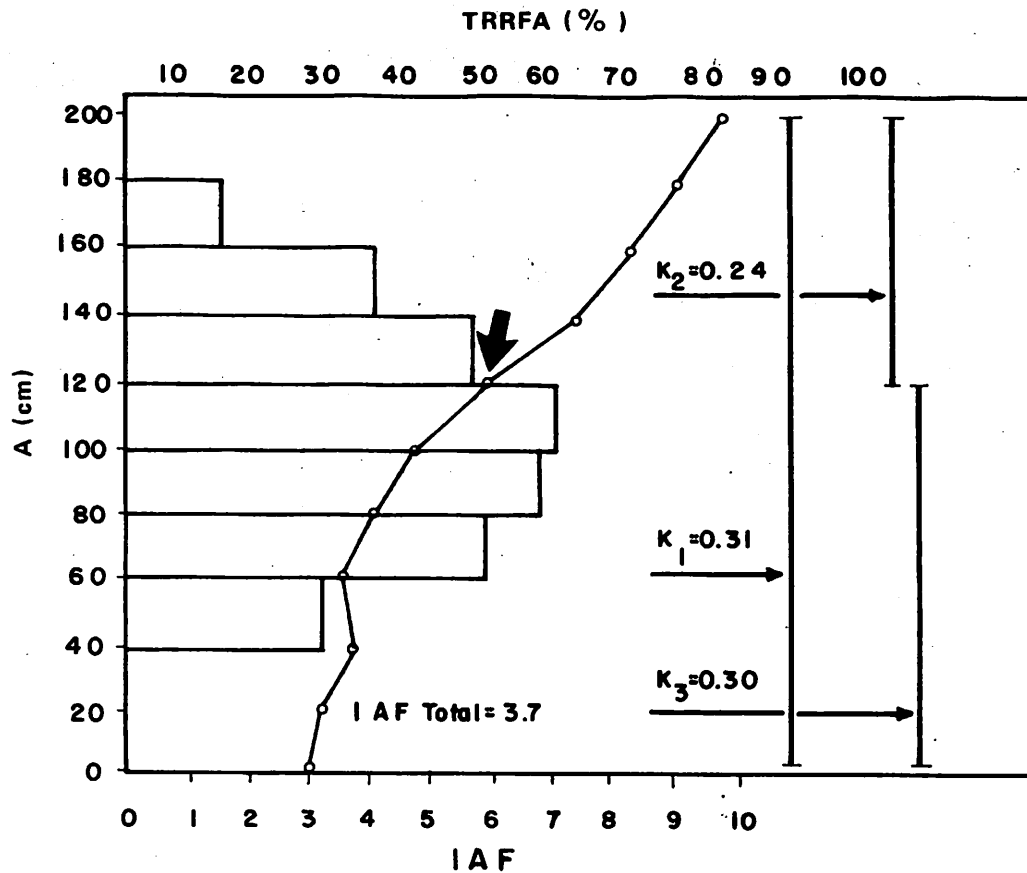


Figura 6. Transmisión relativa de la radiación fotosintéticamente activa (TRRFA), índices de área foliar (IAF) por estratos y coeficientes de extinción (K) en relación a la altura del dosel (A) del genotipo L Mock sembrado a 90 000 plantas / ha. La flecha (↓) indica la altura de la primera mazorca.

acumulado para el estrato que comprende desde el nivel z hasta la parte superior de la cubierta.

$$K = \frac{\ln I_0 - \ln I_z}{F}$$

El coeficiente de extinción ó de absorción foliar (K) representa la fracción de la energía de la RFA absorbida por unidad de área foliar. Valores pequeños de K representan una mejor distribución de la RFA. Por ejemplo, para cubiertas con hojas erectas de pastos, el valor de K varía de 0.3 a 0.5 mientras que K se aproxima a 1.0 en cubiertas con hojas horizontales.

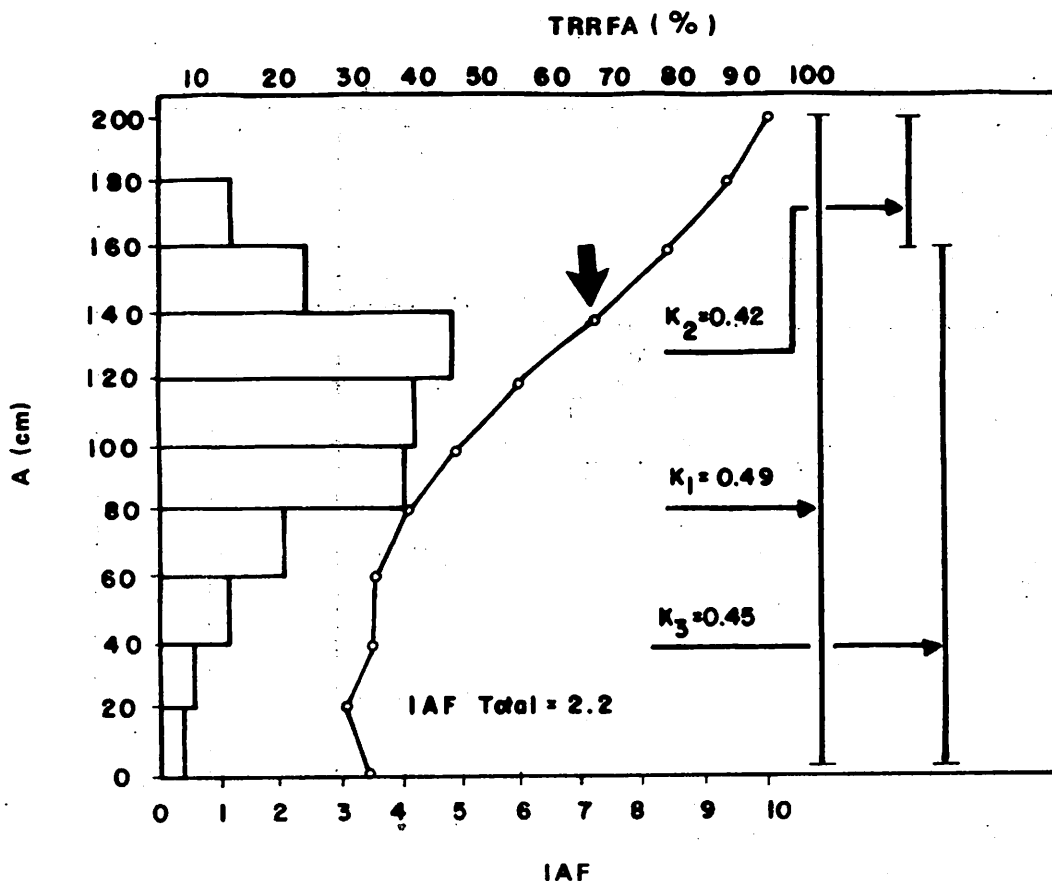


Figura 7. Transmisión de la radiación fotosintéticamente activa (TRRFA), índices de área foliar (IAF) por estratos y coeficientes de extinción (K) en relación a la altura del dosel (A) del genotipo I - Zopilote sembrado a 90 000 plantas / ha. La flecha (↓) indica la altura promedio de la primera mazorca.

De acuerdo a los valores de K obtenidos, L-Mock y L-Zopilote tienen una mejor distribución de la RFA en el perfil que H-30, y si se calculan los IAF críticos (aquel IAF con el cual se tiene una transmisión de RFA del 5% al nivel del suelo, según Brougham, citado por Gardner *et al.*, 1985) (Cuadro 4)

se observa que con genotipos con arquitectura similar a L-Mock y L-Zopilote teóricamente es posible incrementar la densidad de población hasta obtener un IAF crítico (IAFc) de 8; es decir, el doble que el IAFc del H-30.

Cuadro 4. Índices de área foliar críticos (IAFc) estimados para tres genotipos de maíz en dos densidades.

Genotipo	Población (plantas/ha)		Promedio
	60,000	90,000	
H-30	4.7	4.0	4.4
L-Mock	9.3	9.2	9.2
L-Zopilote	8.0	6.1	7.1

Las mediciones demostraron que el H-30 presentó el IAFc en las dos densidades de población. El concepto del IAFc es importante porque se estima que la mayor productividad, medida a través de la tasa de crecimiento de cultivo, ocurrirá precisamente cuando el dosel intercepte el 95% de la RFA, lo cual significa que en un día claro, cuando se tenga una Densidad de Flujo de Fotones Fotosintéticos (DFFF) de $2000 \mu\text{Mm}^2 \text{s}^{-1}$, las hojas inferiores del dosel tendrán un DFFF de $100-115 \mu\text{Mm}^2 \text{s}^{-1}$, que corresponde al punto de compensación de luz para muchas especies.

La formación de híbridos con arquitectura y área foliar por planta similar a L-Mock y L-Zopilote permitirá incrementar la densidad de población muy por encima de los niveles que se utilizan actualmente, con el consecuente incremento en el IAFc y del rendimiento.

CONCLUSIONES

La micrometeorología ha permitido avanzar en el entendimiento de las respuestas de los cultivos al microclima.

La temperatura de la cubierta depende de los balances de radiación de onda corta y

larga y del estado fisiológico del cultivo; y cuando es alta indica que el cultivo se encuentra en estrés hídrico, con la consecuente reducción de la fotosíntesis aparente, rendimiento de grano y sus componentes; de ellos principalmente el número de granos por m^2 .

Los arquetipos de maíz con hojas erectas son modelos de planta que pueden permitir incrementar los rendimientos unitarios debido a la mejor distribución de la radiación fotosintéticamente activa en la cubierta.

Los aspectos anteriores son ejemplos de como la micrometeorología permite mejorar el entendimiento de las respuestas genotípicas al ambiente físico y las interacciones genotipo x ambiente. Esto a su vez permitirá establecer el manejo de las cubiertas vegetales con los genotipos actuales de los cultivos para maximizar el rendimiento económico y también el diseño de nuevos genotipos y el manejo por ellos requerido.

Con objeto de mejorar el entendimiento de las respuestas genotípicas al ambiente físico y las interacciones genotipo x ambiente, es necesario hacer uso de la teoría y técnicas desarrolladas en la micrometeorología. Una

posibilidad para lograr esto, es establecer cursos teórico-prácticos de micrometeorología a nivel licenciatura y postgrado, enfatizando el estudio de los procesos de intercambio de energía y masa, integrando los puntos de vista físico y fisiológico, lo que resalta la necesidad de promover la formación de equipos de investigación interdisciplinarios.

BIBLIOGRAFIA

- Biscoe, P. V. and J. N. Gallagher. 1979. Weather, dry matter production and yield. In: Environmental Effects on Crop Physiology. Landsberg J. J. and C. V. Cutting (eds.). Academic Press.
- Brown, K. W. and C. Covey. 1966. The energy-budget evaluation of the micrometeorological transfer processes within a cornfield. *Agric. Meteorol.* 3:73-96.
- Campbell, R. B., D. C. Reicosky, and C. W. Doty. 1981. Net radiation within a canopy of sweet corn during drought. *Agric. Meteorol.* 23: 143-150.
- Denmead, O. T., L. J. Fritschen, and R. H. Shaw. 1962. Spatial distribution of net radiation in a corn field. *Agron. J.* 54:505-510.
- Duncan, W. G. 1971. Leaf angles, leaf area, and canopy photosynthesis. *Crop Sci.* 11:482-485.
- Eberhart, S. A. and W. A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-40.
- Finlay, K. W. and G. N. Wilkinson. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding program. *Aust. J. Agr. Res.* 14: 742-754.
- Fischer, K. S., E. C. Johnson y G. O. Edmeades. 1984. Mejoramiento y selección de maíz tropical para incrementar su resistencia a la sequía. CIMMYT, El Batán, México.
- García de Miranda, E. 1986. Apuntes de Climatología. Offset Larios, México, D.F. UNAM.
- Gardner, F. P., R. B. Pearce, and R. L. Mitchell. 1985. *Physiology of Crop Plants*. The Iowa Univ. Press, Ames, Iowa. 327 p.
- Hale, M. G. and D. M. Orcutt. 1987. *The Physiology of Plants Under Stress*. John Wiley & Sons. N. Y.
- Hesketh, J. D., J. T. Wooley, and D. B. Peters. 1982. Predicting photosynthesis. In: photosynthesis: Development, Carbon Metabolism, and Plant Productivity. Vol. II. Academic Press, Inc.
- Impens J. H., W. R. Lemeur, and F. Moermans. 1970. Spatial and temporal variation of net radiation in crops. *Agric. Meteorol.* 7:335-337.
- Jackson, D. R. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Adv. in Irrigation* 1:43-85.
- Kanemasu, E. T. and C. F. Arkin. 1974. Radiant energy and light environment of crops. *Agric. Meteorol.* 14: 211-225.
- Lambert, R. J. and R. R. Johnson. 1978. Leaf angle, tassel morphology and the performance of maize hybrids. *Crop Sci.* 18:499-502.
- Livera M., M. y V. A. González H. s.f. Sequía, temperatura de la cubierta y productividad del trigo. *Rev. Fitot. Mex.* (en revisión).
- Loomis, R. S., W. A. Williams, and W. G. Duncan. 1967. Community architecture and the productivity of terrestrial plant communities. In: *Harvesting the Sun*. A. San Pietro, F. A. Greer, and T. J. Army (eds.). Academic Press. pp. 291-308.
- Mock, J. J. and R. B. Pearce. 1975. An ideotype of maize. *Euphytica* 24:613-623.

Pendleton, J. W., G. E. Smith, S. R. Winter, and T. J. Johnston. 1968. Field investigations of the relationships of leaf angle in corn (*Zea mays* L.) to grain yield and apparent photosynthesis. *Agron. J.* 60: 422-424.

Rosenberg, N. J., B. L. Blad, and S. B. Verma. 1983. *Microclimate: the Biological Environment.* John Wiley and Sons, N. Y.

Rubio C., M. A., M. Livera M. y V. A. González H. s. f. Relaciones entre la arquitectura de la planta de maíz y la intercepción y uso de la radiación fotosintéticamente activa. *Revista Chapingo* (en revisión).

Verma, P. K. and J. D. Eastin. 1985. A technique to screen for drought tolerant sorghum genotypes. *Agron. Abst.* p. 90.