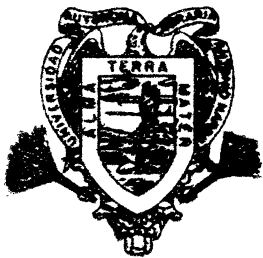


PROPIEDADES ESPECTRALES DEL MAIZ BAJO DIFERENTES
DENSIDADES DE POBLACION E INCLINACION FOLIAR Y SU
RELACION CON EL DESARROLLO Y RENDIMIENTO

JOSE ALFREDO MONTEMAYOR TREJO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AGRICOLAS
AREA: SISTEMAS DE PRODUCCION



Universidad Autónoma Agraria

Antonio Narro

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coah.

JUNIO DE 2002

13781



BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBOLLO
BANCO DE
U.A.A.

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

SUBDIRECCION DE POSTGRADO

Propiedades Espectrales del Maíz Bajo Diferentes Densidades de Población e
Inclinación Foliar y su Relación con el Desarrollo y rendimiento

TESIS

POR

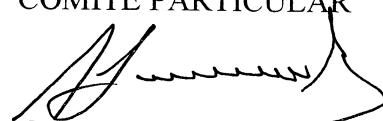
JOSÉ ALFREDO MONTEMAYOR TREJO

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y aprobada como
requisito parcial para otorgar el grado de:

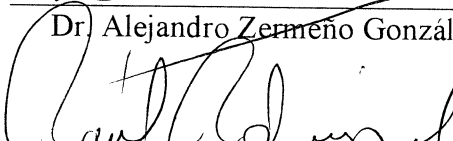
DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
AREA: SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

COMITE PARTICULAR

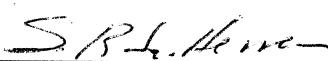
Asesor principal:


Dr. Alejandro Zermeno González


Asesor:


Dr. Raúl Rodríguez García


Asesor:

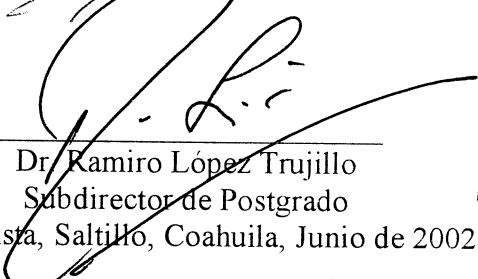

Dr. Sergio Rodríguez Herrera

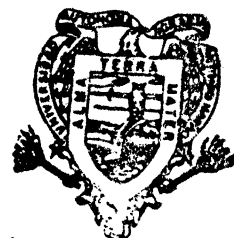
Asesor:


Dr. Manuel de la Rosa Ibarra

Asesor:


Dr. Vicente de Paúl Álvarez Reyna


Dr. Ramiro López Trujillo
Subdirector de Postgrado
Buenavista, Saltillo, Coahuila, Junio de 2002



BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.A.N.

13781

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo del Sistema Nacional de Educación Tecnológica (cosnet), por su apoyo brindado durante mis estudios de doctorado.

A la Dirección General de Educación Tecnológica Agropecuaria (DGETA), por su apoyo para la realización de esta etapa profesional.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por darme la oportunidad de desarrollarme académicamente y considerarla como mi segunda “alma terra mater”.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental de Arteaga, Coahuila.

Al Instituto Tecnológico Agropecuario N° 10, centro de mi desempeño profesional.

Al personal administrativo y manual del Rancho “Cerro del agua” por las facilidades otorgadas en el desarrollo de la investigación.

A mis maestros, por sus enseñanzas y cultivar en mí el espíritu de superación.

Al Doctor Alejandro Zermeño González, por su amistad, admiración y respeto.

Al comité particular de asesores, por sus acertadas sugerencias y correcciones al presente documento.

A la familia Jara Cantú, por su amistad y apoyo durante mi carrera profesional.

A mis amigos, por su amistad y sinceridad.

DEDICATORIA

A Mi Dios, que espero sentirlo siempre en mi existencia.

A mis padres, por que gracias a ellos estoy tratando de comprender nuestra existencia.

A mi esposa Claudia, por su apoyo, comprensión y amor que me ha demostrado durante nuestra unión.

A mis hijos José Alfredo, Mariel y Aldo, por que sin duda alguna, han sido la fuente de energía para mi superación.

A mis hermanos Fernando, Marisela, Griselda, Rosamelia, Ángeles, Claudia, Isabel, Susana y Sandra por la dicha de comprendernos y querernos.

A mis sobrinos que son la alegría y la inocencia de la juventud.

A la memoria de Luis Humberto, que se adelantó al tiempo, pero es sólo materia la que nos separa.

A mis compadres, por la amistad que nos une.

COMPENDIO

Propiedades Espectrales del Maíz Bajo Diferentes Densidades de Población e Inclinación Foliar y su Relación con el Desarrollo y Rendimiento

POR

JOSÉ ALFREDO MONTEMAYOR TREJO

DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

AREA: SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA. JUNIO 2002.

Dr. Alejandro Zermeño G. – Asesor –

Palabras clave: maíz, *Zea mays L.*, radiación solar total, radiación fotosintética activa, densidad de población, orientación foliar.

Los objetivos de este trabajo, fueron analizar el efecto de diferentes densidades de población y la orientación del follaje del cultivo de maíz, en la absorción y reflectancia de la radiación solar total y radiación fotosintética activa, su relación con el desarrollo y rendimiento del cultivo de maíz.

Los resultados obtenidos indican que la radiación solar total por el cultivo, es absorbida en una fracción de 0.75, mientras que la radiación fotosintética

activa es del orden de 0.95, esto se debe principalmente a que en el espectro de la radiación solar total, existe una muy baja absorción entre las longitudes de onda de 0.7 a 1.2 μm . Al incrementar las densidades de población, se observó que se incrementa ligeramente la absorción a la radiación fotosintética activa. Lo contrario en la banda de la radiación solar total, que muestra una tendencia a disminuir la absorción, cuando se incrementa la densidad de plantas.

La absorción de la radiación solar por el cultivo, es mayor durante las 13:00 y 15:00 horas y se debe a que en estas horas del día, la incidencia de la radiación solar, es más vertical. Durante el amanecer y atardecer, la absorción tiende a decrecer debido a los bajos ángulos solares de la radiación y aquí, las longitudes de onda de 0.38 y 0.7 μm son más dispersadas.

Los coeficientes de extinción, muestran valores mayores a mayor densidad de plantas con y sin malla. Pero la extinción de la radiación, es mayor en los tratamientos sin malla, lo cual indica que su uso favoreció la penetración de la radiación solar a los estratos inferiores del cultivo, resultando en una mayor fijación de CO_2 a nivel planta, que se manifestó con un mayor diámetro y peso de elote en los tratamientos con malla.

Los índices de reflectividad a la radiación solar, son más altos en los tratamientos con malla, resultando en valores menores de radiación neta. Esto se debe a que la malla por ser de color blanco, incrementa el índice de reflectividad del sistema suelo cultivo.

Las variables de respuesta del cultivo como el índice de área foliar, altura, peso y rendimiento de la planta en la variedad Cafime, se ven incrementadas al incrementar la densidad de plantas. Esto sugiere que la variedad utilizada, pudiera ser establecida en densidades de población más altas que la tradicionalmente utilizada de seis plantas por metro cuadrado.

Las variables diámetro, peso y longitud de elote así como la altura y peso de la planta, fueron mayores con la colocación de la malla, lo cual sugiere que la inclinación vertical forzada de la hoja induce una mejor penetración y distribución de la radiación, que resulta en una tasa mayor de fijación de CO₂.

ABSTRACT

Spectral Properties of Corn under Different Planting Density and Foliar Inclination and its Relationship with Crop Development and Yield.

BY

JOSE ALFREDO MONTEMAYOR TREJO

DOCTOR IN AGRICULTURE SCIENCE

AREA: PRODUCTION SYSTEMS

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

Buenavista , Saltillo, Coahuila. June 2002

Dr. Alejandro Zermeño G. -Major Professor-

Keywords: corn, *Zea mays L.*, total solar radiation, photosynthetic active radiation, planting density, foliar orientation.

The objectives of this research were to analyze the effect of different planting densities and foliar orientation of corn crop on the absorption and reflection of total solar radiation and photosynthetic active radiation as well as their effect on crop development and yield.

The results of this study show that corn crop absorbs a fraction of 0.75 of the total solar radiation, and a fraction of 0.95 of the photosynthetic active radiation. This may be a result of the very low radiation absorption between longwaves of 0.7 and 1.2 μm . It was observed a slightly increment of photosynthetic active radiation when planting density increased, opposite to absorption of total solar radiation which decreased at higher planting densities.

Absorption of solar radiation is higher around midday (13:00-15:00) when maximum irradiance occurs from close to vertical solar position. During dawn and dusk radiation absorption decreases because of light scattering at longwaves from 0.30 to 0.7 μm due to lower solar elevation.

Light extinction coefficients show higher values at higher planting densities. However their values were higher for the treatments without holding net. Better light distribution in treatments with holding net resulted in higher CO_2 assimilation which resulted in greater diameter and weight of ear of corn.

Reflection indexes of solar radiation are higher for the treatments with holding net; resulting in lower values of net radiation. This may be an effect of the white color of the holding net which increases reflection of light of the soil-crop system.

Variables as leaf area index plant, height, weight and crop yield for the Cafime variety increased as planting density increased. This may suggest that this corn cultivar

can be established at higher planting density than the commonly density of six plants per square meter used by farmers.

Diameter, weight and length of ear of corn as well as weight and height of plant were greater when a holding net was placed on the foliage. This may force foliage to a vertical position causing better penetration and distribution of solar radiation in the crop resulting in higher CO₂ assimilation rate.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISION DE LITERATURA	5
Radiación solar (sw) y fotosintética activa (PAR).....	5
Propiedades espectrales de las hojas.....	7
Radiación solar y su efecto en la producción de los cultivos.....	8
Forma y estructura del dosel.....	12
Inclinación de la hoja.....	12
Índice de área foliar.....	15
Metodología para medir la radiación fotosintética activa.....	15
Distribución de la radiación dentro de los doseles de las plantas.....	16
Aplicación de la ecuación de Lambert Beer.....	16
Hojas horizontales.....	18
Distribución esférica.....	18
Otras distribuciones del ángulo de la hoja.....	19
Coeficientes de extinción por el dosel del cultivo.....	20

Densidades de población e índices de área foliar en la producción del cultivo.....	21
Arquitectura foliar y radiación solar en el cultivo de maíz.....	24
III. MATERIALES Y METODOS	26
Localización del área de estudio.....	26
Tratamiento y diseño experimental.....	26
Labores de cultivo.....	28
Ciclo primavera verano de 1999.....	28
Ciclo primavera verano del 2000.....	29
Variables de respuesta del cultivo.....	29
Instrumentación y mediciones en el ciclo primavera verano de 1999.....	30
Radiación solar y fotosintética activa incidente y reflejada por el cultivo.....	30
Perfil de temperaturas en el dosel del cultivo.....	32
Instrumentación y mediciones en el ciclo primavera verano del 2000.....	32
Radiación solar y fotosintética activa incidente en el cultivo.....	32
Penetración de la radiación fotosintética activa en el dosel del cultivo.....	32
Coeficientes de extinción.....	33
Radiación neta en el cultivo	34

IV. RESULTADOS Y DISCUSION	35
Relación entre el desarrollo, rendimiento y la absorción de la radiación en el ciclo primavera verano de 1999.....	35
Índices de reflexión, absorción a la radiación solar y fotosintética activa por el cultivo.....	35
Evolución de la reflexión y absorción a la radiación solar por el cultivo.....	37
Evolución de la reflexión y absorción a la radiación fotosintética activa por el cultivo.....	40
Efecto de espaciamiento entre surcos en el perfil de temperatura del aire.....	42
Efecto de la densidad de población en el índice de área foliar y altura de la planta.....	43
Efecto de la densidad de plantas en el peso de planta, follaje en fresco y rendimiento de grano.....	45
Efecto de la densidad en el peso de la planta.....	45
Efecto de la densidad en el peso del follaje.....	46
Efecto de la densidad de plantas en el rendimiento de grano.....	46
Relación entre el desarrollo, rendimiento y la absorción de la radiación en el ciclo primavera verano del 2000.....	47
Índices de reflexión y absorción solar por el cultivo.....	47
Índices de reflectancia diaria a la radiación solar y fotosintética activa.....	48
Tratamientos sin malla.....	48
Tratamientos con malla.....	50
Coeficientes de extinción de radiación solar por el cultivo.....	52
Radiación solar neta en los tratamientos.....	53

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Pág.
4.1 Índices de reflexión (r) y absorción (a) a la radiación solar (sw) y fotosintética activa (PAR), observados en los tratamientos de 0.5, 0.7 y 0.9 m de separación entre surcos; 81 días después de siembra, ciclo Primavera-Verano 1999.....	36
4.2 Índices de reflexión (r) y absorción (a) a la radiación solar (sw) y fotosintética activa (PAR), observados en los tratamientos de 0.5, 0.7 y 0.9 m de separación entre surcos; 88 días después de siembra, ciclo Primavera-Verano 1999.....	36
4.3 Comparación de medias del índice de área foliar, altura de planta, peso y rendimiento de plantas de maíz bajo tres tratamientos de densidades de población; ciclo Primavera – Verano 1999.....	44
4.4 Índices de reflexión y absorción a la radiación solar total y fotosintética activa en los tres tratamientos a diferentes días después de siembra; ciclo Primavera-Verano 2000.....	48
4.5 Coeficientes de extinción a la radiación solar por el dosel del cultivo a los 96, 98, 103 y 106 días después de siembra en diferentes horas del día.....	53
4.6 Radiación solar neta a los 98 días después de siembra (d.d.s) en los tratamientos con y sin malla.....	54
4.7 Radiación solar neta a los 103 después de siembra (d.d.s) en los tratamientos con y sin malla.....	54
4.8 Radiación solar neta a los 105 días después de siembra (d.d.s) en los tratamientos con y sin malla.....	55
4.9 Comparación de medias para el peso, diámetro y longitud de elote, altura y peso de planta sin elote en materia seca.	57

4.10	Comparación de medias para el subtratamiento con y sin malla, para el peso, diámetro y longitud de elote, altura y peso de la planta entera. Prueba de Tukey α 0.05.....	60
A.1	Análisis de varianza del índice de área foliar de plantas de maíz bajo tres de densidad de población; ciclo Primavera-Verano 1999.....	74
A.2	Análisis de varianza para la altura de la planta; ciclo Primavera-Verano 1999.....	74
A.3	Análisis de varianza para la altura a la primera mazorca; ciclo Primavera-Verano 1999.....	74
A.4	Análisis de varianza para peso de la planta entera en fresco; ciclo Primavera-Verano 1999.....	74
A.5	Análisis de varianza para peso del follaje en fresco; ciclo Primavera-Verano 1999.....	75
A.6	Análisis de varianza para la producción de grano kg ha^{-1} ; ciclo Primavera-Verano 1999.....	75
A.7	Análisis de varianza para la altura de la planta; ciclo Primavera-Verano 2000.....	75
A.8	Análisis de varianza para el diámetro de elote; ciclo Primavera-Verano 2000.....	76
A.9	Análisis de varianza para el peso de elote fresco; ciclo Primavera -Verano 2000.....	76
A.10	Análisis de varianza para longitud de mazorca; ciclo Primavera-Verano 2000.....	76
A.11	Análisis de varianza para el peso de la planta entera en materia seca; ciclo Primavera-Verano 2000.....	77

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
4.1 Evolución del índice de reflexión (r_{sw}) y absorción (a_{sw}) a la radiación solar en el tratamiento de 50 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 263 del año; 88 días después de siembra.....	38
4.2 Evolución del índice de reflexión (r_{sw}) y absorción (a_{sw}) a la radiación solar en el tratamiento de 70 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 270 del año; 95 días después de siembra.....	38
4.3 Evolución del índice de reflexión (r_{sw}) y absorción (a_{sw}) a la radiación solar en el tratamiento de 90 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 284 del año; 109 días después de siembra.....	39
4.4 Evolución del índice de reflexión (r_{PAR}) y absorción (a_{PAR}) a la radiación fotosintética activa en el tratamiento de 50 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 284 del año; a los 109 días después de siembra.....	40
4.5 Evolución de los índice de reflexión (r_{PAR}) y absorción (a_{PAR}) a la radiación fotosintética activa en el tratamiento de 70 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día del año 270; 95 días después de siembra.....	41
4.6 Evolución de los índice de reflexión (r_{PAR}) y absorción (a_{PAR}) a la radiación fotosintética activa en el tratamiento de 90 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 263 del año; 88 días después de siembra.....	41
4.7 Perfil de temperatura del aire a 0.5 y 0.9 m de espaciamiento entre surcos observados el día del año 264 a las 11:30; a los 88 días después de siembra.....	42
4.8 Perfiles de temperatura del aire a las 7,14 y 19 hr observados a los 106 días después de siembra en el tratamiento de 0.5 m entre surcos.....	43

4.9	Índices de reflexión solar (r_{sw}) y fotosintética activa (r_{PAR}) para la distancia entre plantas de 0.1 metros sin malla, a los 107 días después de siembra.....	49
4.10	Índices de reflexión durante el día a la radiación solar (r_{sw}) y fotosintética activa (r_{PAR}) por el cultivo a una distancia entre plantas de 0.2 metros sin malla; a los 113 días después de siembra.	49
4.11	Índices de reflexión durante el día a la radiación solar (r_{sw}) y fotosintética activa (r_{PAR}) por el cultivo a una distancia entre plantas de 0.1 metros con malla; a los 97 días después de siembra.	50
4.12	Índices de reflexión durante el día a la radiación solar (r_{sw}) y fotosintética activa (r_{PAR}) por el cultivo a una distancia entre plantas de 0.2 metros con malla; a los 94 días después de siembra.	51

INTRODUCCIÓN.

El maíz, es uno de los principales cultivos de México; por ser una de las principales fuentes de alimentación humana, animal y tener una creciente demanda en los derivados agroindustriales (almidón, proteínas y celulosa). Su cultivo se enfoca principalmente a la producción de grano, pero la planta entera para ensilaje es también económicamente importante, sobre todo en las zonas productoras de lácteos.

El origen de la planta es América Central, pero debido a su potencial de productividad, ha sido cultivado en diferentes tipos de clima, sin embargo, su origen tropical es de importancia para entender el comportamiento agronómico de la planta (Duncan, 1975). Por ejemplo, la semilla no puede ser sembrada a finales de primavera en regiones templadas y frías debido a su inhabilidad de germinar a temperaturas inferiores de 10 a 12 °C. Bajo estas condiciones climáticas, el tiempo para terminar su ciclo es relativamente corto y en estas regiones el área foliar probablemente sea un factor limitante (Hunter, 1980). Por lo tanto, el máximo índice de área foliar y período reproductivo, especialmente el llenado de grano, frecuentemente toma lugar bajo condiciones no óptimas de intercepción de luz y temperatura (Varlet - Granchet *et al.*, 1982). Parte de los logros en el mejoramiento genético del cultivo, ha sido la adaptación de materiales a condiciones frías. Otros grandes logros, han sido los análisis de las relaciones fuente-demanda a varios

niveles de organización, para mejorar el transporte de carbón y nitrógeno a la formación del grano (Shannon *et al.*, 1986).

La superficie que se cultiva actualmente en México, es de aproximadamente ocho millones de hectáreas con un rendimiento promedio de 2,300 Kg ha⁻¹ inferior a su potencial de 10,000 Kg ha⁻¹. Por lo tanto, aún existe la necesidad de importarlo, tan sólo en 2001 se importaron 3.3 millones de toneladas en grano y elote.

Con un buen manejo agronómico, el rendimiento del cultivo será función de la acumulación neta de bióxido de carbono a través de su ciclo de crecimiento, esto a su vez, es función de la tasa de absorción de la radiación solar y la eficiencia de transformación de dicha energía para la fijación de moléculas de CO₂. La radiación solar incidente, sobre un cultivo, está en un rango de longitud de onda de aproximadamente 0.38 a 4.0 µm, de ésta banda, las plantas absorben para el proceso de fotosíntesis únicamente el rango de 0.38 a 0.7 µm, el cual corresponde al espectro visible. En fisiología a éste espectro se le define como la radiación fotosintética activa, por que del 80 a 85 por ciento de la absorción solar por parte de las plantas está en éste intervalo (Jones, 1992).

Investigaciones, han mostrado que el rendimiento máximo de un cultivo es función directa de su índice de área foliar óptimo, el cual, es función de la densidad de población (Pearce *et al.*, 1965; Andrade *et al.*, 1993) y la producción por planta disminuye al incrementar la densidad, la intercepción de luz en el dosel aumenta y la

producción total se incrementa (Karlen and Camp, 1985). Una respuesta positiva en la producción de maíz, se encontró cuando en la parte superior e inferior de la hoja, recibió una unidad de luz arriba del punto de compensación, la fotosíntesis fué mayor, comparada con la iluminación a un solo lado de las hojas y se encontró una relación de 1.7 g de biomasa de maíz por megajoule (MJ) de radiación absorbida (Moss, 1964; Sinclair y Horie,1989).

Una predominancia de hojas erectas del maíz, justo antes de la inflorescencia, seguida por una mayor penetración de luz, originó las más altas tasas de producción (Williams *et al.*,1968). Las hojas verticales fueron más eficientes en producción por unidad de índice de área foliar, por lo tanto, el ángulo de la hoja pudiera ser solamente una de las muchas características consideradas en un programa de mejoramiento (Whigham y Woolley, 1974). Una mayor penetración de luz en la hoja de la mazorca, contribuye a obtener una mayor tasa de producción en maíz con hojas verticalmente orientadas, comparado con hojas horizontales (Loomis y Williams,1969). Líneas altas de trigo, tuvieron un 20 por ciento más en la intercepción de luz y fotosíntesis durante el desarrollo vegetativo, aunque después de la inflorescencia no hubo diferencias y observaron que las hojas erectas tienen una mayor capacidad de fotosíntesis comparadas con las caídas (Martín y Gent,1995).

Estos antecedentes sugieren que la producción del cultivo de maíz, puede mejorarse incrementando la densidad de población y la inclinación de las hojas. En un cultivo con hojas horizontales, se intercepta la mayor parte de la radiación solar en la capa superior del follaje, éste rápidamente se satura y poca radiación penetrara a los estratos de follaje inferiores, los cuales estarán sombreados y su nivel de

REVISIÓN DE LITERATURA

Radiación Solar (sw) y Radiación Fotosintética Activa (PAR).

Una de las funciones principales del dosel de las hojas, es interceptar la radiación solar necesaria para llevar a cabo el proceso de fotosíntesis. Por lo tanto, los cultivos deben crecer de tal forma que su área foliar les permita una máxima absorción. De lo contrario, el potencial de producción, podría verse disminuido. De la radiación solar incidente, aproximadamente el 50 por ciento se ubica en una longitud de onda de 0.4 a 0.7 μm , y se le conoce como radiación fotosintética activa, ya que las plantas la usan para el proceso de fotosíntesis, el resto de la radiación absorbida genera únicamente efectos térmicos.

La producción de materia seca por un cultivo en un medio ambiente sin estrés, esta directamente relacionada con la cantidad de la radiación fotosintética activa interceptada (IPAR). La relación entre IPAR y la cantidad de materia seca producida por un cultivo es lineal (Gallagher y Biscoe, 1978). La pendiente de ésta relación representa la eficiencia de conversión a materia seca ó la eficiencia de uso de la radiación por el dosel del cultivo (RUE). Este es un parámetro ampliamente usado en la modelación de cultivos.

La cantidad de energía potencialmente disponible para la fotosíntesis y que es capturada por el follaje del cultivo, es definida como radiación fotosintética activa absorbida por el cultivo (APAR) (Gallo y Daughtry, 1986). Esta compuesta por cuatro componentes que representan la ascendencia y descendencia de flujo en el follaje del cultivo; de acuerdo con la siguiente relación:

$$APAR = (PAR_o + RPAR_s) - (TPAR + RPAR_c)$$

Donde PAR_o es la porción de radiación incidente, $TPAR$ es la transmitida a través del follaje y $RPAR_s$ es la porción reflejada por el suelo y que regresa al follaje. La PAR medida por un sensor invertido arriba del follaje incluirá la reflexión del cultivo y el suelo ($RPAR_c$). La radiación interceptada ($IPAR$) de la radiación fotosintética activa total, menos la porción transmitida por el cultivo $IPAR = PAR_o - TPAR$ ha sido usada en modelos de producción de cultivos. Sin embargo, $APAR$ podría ser más apropiada. Los autores estudiaron los efectos de la orientación, longitud de la superficie del sensor en las lecturas de PAR interceptada y los errores inducidos por el uso de $IPAR$ como un estimador de $APAR$. La PAR transmitida fue medida con un sensor nivelado y colocado perpendicular a la dirección a las hileras, con una longitud del sensor igual al espaciamiento entre hileras. La radiación fotosintética interceptada, es la diferencia en el descenso y ascenso de PAR arriba y bajo el follaje, la cual requiere pocas medidas comparada con $APAR$. Concluyen que en estado de madurez del grano, las diferencias entre $APAR$ e $IPAR$ fueron menos de un 3.5 por ciento, por lo tanto, $IPAR$ fue razonablemente una aproximación de $APAR$ y requiere pocas lecturas.

Propiedades Espectrales de las Hojas.

La absorción (a_λ) de un material, es definida como la fracción de la radiación incidente, que es absorbida por el material en una longitud de onda específica. Por ejemplo, la absorción de una hoja varía considerablemente en la región espectral, su valor en promedio es de 0.8 en el espectro visible que comprende de 0.4 a 0.7 μm (Nobel, 1991). El valor relativamente alto, se debe principalmente a los pigmentos fotosintéticos y a que la absorción mínima es cercana en los 0.55 μm de longitud de onda, donde la absorción por la clorofila es relativamente baja y así una fracción grande de la radiación incidente es reflejada o transmitida, resultando el color verde de las hojas. La a_λ es más pequeña entre 0.7 y 1.2 μm , esto es igualmente importante para minimizar la entrada de energía a la hoja, por que mucha radiación global ocurre en este intervalo del infrarrojo. La fracción de radiación absorbida, llega a ser esencialmente a la unidad a valores mayores de 2 μm .

Un buen absorbente de radiación es también un buen emisor, es decir, la absorbancia es igual a la emitancia referidas a la misma longitud de onda (Ley de radiación de Kirchhoff), para un cuerpo negro la a_λ es igual a e_λ y es igual a la unidad en todas las longitudes de onda. Cuando la radiación del medio que rodea a la hoja ocurre esencialmente en la región del infrarrojo la e_λ es la misma que la a_λ .

La reflectancia (r_λ) se define como la fracción de radiación que es reflejada por un material, en una longitud de onda específica (Jones, 1992). Similarmente la trasmisividad ó transmitancia (τ_λ) es la fracción de la radiación

incidente en una longitud de onda dada que es transmitida por un objeto, la suma de α_λ , r_λ y τ_λ es igual a la unidad en cualquier longitud de onda.

Cuando se describe la absorción y reflexión, en una longitud de banda del espectro, los términos coeficientes de absorción (a), coeficiente de reflexión (r) y coeficiente de transmisión (τ) son aplicados, el coeficiente de reflexión para la radiación solar de una superficie natural también se define como el albedo.

Es necesario distinguir entre la radiación emitida por un cuerpo y la reflejada. La nieve por ejemplo, es blanca por que ésta refleja bien en la longitud de onda visible pero entre 3 y 100 μm (región de onda larga) ésta se comporta muy parecido a un cuerpo negro siendo un buen absorbente y emisor. La mayoría de los objetos naturales (plantas, suelo, agua) tienen emisividades cercanas a uno en parte de la longitud de onda de su espectro. El color, sin embargo, depende de la longitud de onda que ellos reflejan en el visible, las hojas son verdes por que reflejan predominantemente la luz verde.

Radiación Solar y su Efecto en la Producción de los Cultivos.

Una correlación positiva entre el número de granos por metro cuadrado y la radiación interceptada durante 31 días en etapa de floración, fue encontrada en experimentos sombreados artificialmente (Andrade *et al.*, 1993). La pendiente de esta relación fue de 5.39 granos MJ^{-1} . La radiación interceptada en floración, fue modificada al variar la densidad de plantas, dentro de valores subóptimos la

respuesta al número de granos fue más grande, comparada con los experimentos de sombreado (28 vs. 5.39 granos MJ^{-1} ; $p \leq 0.0001$). Concluyen que en altas y bajas densidades, se produce un efecto negativo en la eficiencia para convertir radiación interceptada a la capacidad de la demanda del grano.

Un incremento menor al 20 por ciento en intercepción de energía durante la floración, produce al menos un 50 por ciento de incremento en grano en el cultivo de maíz cuando las densidades de población varían de 1.8 a 5 plantas m^{-2} (Williams *et al.*, 1968). En densidades subóptimas, el número de granos por mazorca fue muy cercano al potencial (Ruget, 1989). Sin embargo, se incrementa el flujo total de asimilatos por planta en etapa de floración por bajar de 10 a 5 plantas m^{-2} y produce pequeños incrementos en grano por mazorca en bajas densidades de población (Edmeades y Daynard, 1979). Por lo tanto, en bajas densidades de población, el maíz es ineficiente en términos de número de granos fijados por unidad de tasa de crecimiento de cultivo (CGR).

En la competitividad entre plantas de maíz, por la intercepción de la luz fotosintética activa en altas densidades de población, a luz ambiente y reduciendo la luz en forma artificial, se encontró que la tasa de fotosíntesis en la hoja de la mazorca, fue significativamente reducida por incrementar la densidad de plantas y el sombreado artificial, la emergencia de la inflorescencia fue retardada y siete días después de la anthesis 10 por ciento de las plantas en altas densidades y 50 por ciento de plantas sombreadas no tenían la flor femenina; el sombreado reduce el número de mazorcas productivas por planta y el número de granos por hilera en un 23 y 66 por

ciento en baja y alta densidad, cuando es comparado con ambiente normal. El peso de grano fue reducido 28 por ciento cuando incrementa la densidad y el número de hileras fue menos sensible a las altas densidades y el sombreado artificial (Hashemi, Dezfouli y Herbert 1992). Concluyeron que el primer efecto de la reducción de la luz disponible es reducir la fotosíntesis, esto podría entonces reducir el aporte de asimilatos para desarrollar la producción. Sin embargo, la reducción del nivel de luz también decrece la producción a través de posponer la emergencia del jilote (estigmas) no existiendo sincronía en la polinización y provoca la reducción en el número de granos por mazorca.

La variación de la producción de materia seca y su división en la etapa reproductora en el maíz, fueron analizados por (Otegui *et al.*, 1995) cuando ocurren los cambios estacionales de temperatura y radiación solar durante el ciclo de crecimiento del cultivo. Cuatro híbridos fueron evaluados en una densidad de ocho plantas m^{-2} y cuatro fechas de siembra, encontrándose que el peso de materia seca en madurez fisiológica, fue asociado con el monto de la radiación fotosintética activa interceptada (IPAR), la eficiencia de la radiación antes de la reproducción fue de $4.14g MJ^{-1}$ y fue más alta con respecto al período después de la misma $2.45 g MJ^{-1}$. Concluyeron que el peso de materia seca producido a la etapa de floración, puede ser considerado como un buen indicador de producción de grano. Sin embargo, la producción de maíz en regiones templadas parece estar limitada por la radiación solar incidente cercana a la etapa de floración, por que determina la fijación del grano y durante el llenado determina el peso.

Los efectos de variación en la radiación solar y temperatura en el potencial de producción de maíz entre localidades, fue analizado por (Muchow *et al.*, 1990) encontrándose que ambas, temperatura y radiación solar incidente, influyen cuantitativamente en la variación del potencial de producción de maíz. La primera influencia de la temperatura es en la duración de crecimiento, la baja temperatura incrementa la longitud de tiempo donde el cultivo puede interceptar radiación, consecuentemente altas producciones de maíz, son asociadas con bajas temperaturas y alta radiación solar. Estas conclusiones son básicas y coinciden con las de (Duncan *et al.*, 1973). Ellos observaron más altas producciones de maíz en Davis, CA que en Greenfield y Lexington, KY. En Davis se recibió más alta radiación solar y Lexington tenía la más alta temperatura, ellos atribuyeron la depresión de producción a la alta temperatura, pero ambas disminuyen la tasa y duración de fotosíntesis.

Las fechas de siembra en regiones templadas, determinan las condiciones del medio ambiente, para lo cual el cultivo de maíz es expuesto durante el llenado de grano (Cirilo y Andrade, 1996) realizaron un estudio con el objetivo de observar el efecto de las fechas de siembra en el peso de grano. Cuatro experimentos fueron evaluados en 1989-1990 y en 1993-1994 con un híbrido comercial (DK636). Los tratamientos consistieron en diferentes fechas de siembra (mediados de Septiembre a mediados de Diciembre). Las fechas tardías reducen el peso individual del grano y la tasa de crecimiento del cultivo debido a la baja radiación incidente. La tasa efectiva del llenado del grano fue afectada fuertemente por la temperatura, la disponibilidad de asimilatos y la fecha de siembra.

Forma y Estructura del Dosel.

La estructura del dosel de la planta, es un arreglo espacial de los órganos producidos por las plantas en una comunidad de éstas, las hojas y otros órganos fotosintéticos, sirven como colectores de energía e intercambiadores de gases. Tallos y pecioloos soportan estas superficies de intercambio, de tal forma que el intercambio radiativo y convectivo puede ocurrir de una manera eficiente. La presencia y estructura de un dosel, ejerce una mayor influencia en la temperatura, concentración de vapor y régimen de radiación en el medio ambiente de la planta. Afecta los procesos de fotosíntesis, transpiración, alargamiento de células, crecimiento y competición entre especies en una comunidad de plantas. Una completa descripción de un dosel, requiere la especificación de la posición, tamaño y orientación de cada elemento de superficie en el dosel. Tal descripción es imposible de obtener, excepto para doseles simples, así que los datos requeridos en términos de una aplicación específica, deben ser cuidadosamente considerados. Las propiedades del dosel son generalmente descritas estadísticamente como promedios en tiempo y espacio (Russell *et al.*, 1989).

Inclinación de la Hoja.

La inclinación de la hoja (ángulo que forma con la horizontal), a diferencia de la orientación de la misma (ángulo que forma con el norte), es la proyección del eje foliar, en casi todos los doseles se ha considerado como aleatorio y ha recibido menos atención. Sin embargo, la orientación puede ser importante para determinar la

intercepción de radiación. De acuerdo al ángulo de inclinación de las hojas en un dosel (Roderick, 1981), estas han sido definidas dentro de los siguientes rangos: planófilas, son aquellas en el que la mayoría de sus hojas están cercanamente a la horizontal, que forman un ángulo $< 35^\circ$. erectófilas sus hojas forman un ángulo $> 60^\circ$ de la horizontal. Existe otro grupo las extremófilas en la que se encuentran hojas formando ángulos de los dos tipos anteriores.

La inclinación de las hojas afecta la intercepción de la radiación y la distribución en el dosel. Por ejemplo, un trébol con hojas planofilas, necesita menos área foliar para interceptar la mayoría de la radiación, comparado con un pasto de dosel erectofilo. Esto resulta en un coeficiente de extinción promedio de 0.6 para el trébol y de 0.26 para el pasto (Loomiss y Williams, 1969). Estos valores también indican que el trébol requiere un índice de área foliar (L) menor para interceptar el 95% de la radiación incidente comparado con el pasto.

La fotosíntesis de la hoja, es más eficiente (CO_2 fijado por unidad de luz) a bajos niveles de radiación. La mayoría de las hojas individuales, son saturadas de radiación a la luz directa del sol. En el dosel de una planófila, las hojas superiores son saturadas de radiación y las hojas inferiores tienen una reducida fotosíntesis por el sombreado. Teóricamente, un dosel planófilo pudiera ser más eficiente si la radiación fuera distribuida más equitativa en la superficie de las hojas. Tal distribución pudiera ser perfecta por tener hojas al menos en la parte superior en una inclinación vertical, cuando el sol esta en una alta elevación.

En doseles de maíz con hojas en tendencia vertical arriba de la mazorca, produjeron más que aquellos con una posición planófila (Pendleton y Hammond, 1968). El patrón de hojas verticales en la parte superior y más horizontales en la parte inferior permite que las hojas superiores intercepten menos radiación y dejen pasar más luz a las hojas inferiores. Una radiación más equitativamente distribuida sobre el total del área foliar, en un dosel con hojas verticales, probablemente no requiera altos índices de área foliar, que son necesarios para una alta tasa de producción del cultivo.

Loomis y Williams (1969) estimaron la influencia de la inclinación y cantidad de hojas en la tasa de crecimiento del cultivo (CGR), teniendo en consideración el valor crítico del índice del área foliar (interceptar el 95% de la radiación incidente), éste es más bajo en doseles con hojas horizontalmente orientadas y más alto en doseles con hojas verticales; doseles con hojas horizontales, proveen la más alta tasa de crecimiento a índices de área foliar menores a tres. Un dosel con hojas verticales, requiere un índice de cuatro o más grande para tener una tasa de crecimiento más alta que los doseles con hojas horizontales. En bajos índices de área foliar hay poco sombreado entre hojas, así que doseles con hojas horizontales tienen una ligera ventaja sobre los doseles con hojas verticales, por la alta radiación en la superficie de la hoja. En altos índices de área foliar los doseles con hojas verticales tienen la ventaja, por que la luz es más equitativamente distribuida sobre el área foliar del dosel; menos intercepción por las hojas superiores permite más luz a ser interceptada por las hojas inferiores.

Índice de Área Foliar.

El índice de área foliar (L) es definido como el área foliar por unidad de área de terreno. Se puede expresar como $L = s/p$; donde (s) es la superficie funcional (verde) del dosel del cultivo que se encuentra en la superficie de terreno (p). Como normalmente tanto s y p se miden como superficies (L^2), el índice de área foliar es adimensional, s se refiere a la superficie total de las hojas; esto es, tanto a la superficie superior como a la inferior o a la superficie de una sola cara o a la proyectada por las hojas que no son planas, como en las coníferas. Al hacer comparaciones, se debe cuidar que L se mida sobre la misma base.

En teoría un óptimo índice de área foliar, es definido como aquel que soporta el incremento máximo de producción de materia seca y es alcanzado cuando las últimas capas de hojas son capaces en promedio, de mantener un balance positivo de carbón (Roderick, 1981). Esto es cuando el cultivo virtualmente intercepta toda la radiación fotosintética activa.

Metodologías Para Medir la Radiación Fotosintética Activa.

Tres técnicas para medir la radiación fotosintética activa interceptada (IPAR) y la absorbida (APAR) por los doseles del cultivo de maíz fueron comparadas (Gallo y Daughtry, 1986). Los autores concluyen que una línea portátil de sensores quantum, provee un método rápido para hacer un gran número de lecturas de los componentes de APAR. La técnica más recomendada para medir la radiación transmitida a través del follaje (TPAR) fue la técnica "C76", la cual

consistió en una línea de sensores nivelados y colocados en forma perpendicular a la dirección de los surcos. Indican también que en esta técnica, el área muestreada se aproxima al área ocupada por una sola planta (distancia entre surcos por la distancia entre plantas). La radiación transmitida a través del follaje y la reflexión solar por el cultivo y el suelo, variaron con el desarrollo del cultivo y densidad de plantas.

Distribución de la Radiación Dentro de los Doseles de las Plantas.

Aplicación de la Ecuación de Lambert Beer.

La atenuación de la radiación a través del dosel de la planta, ha mostrado ser aproximada a soluciones coloreadas o a suspensiones de células de algas (Monsi y Saeki, 1953). Este comportamiento de extinción, es conforme a la ley de absorción de Lambert-Beer, la cual afirma que cada capa de igual espesor, absorbe una fracción igual de radiación que ésta atraviesa. En el dosel de las plantas, la capa de igual espesor es basada en unidades de índice de área foliar (L). La expresión matemática de esta ley es:

$$I_i / I_o = e^{-kL}$$

Donde (I_o) es la radiación fotosintética activa incidente arriba del dosel, (I_i) es la radiación fotosintética en la capa o estrato i , k es el coeficiente de extinción que depende de las características del cultivo. Así, el monto de la penetración a través del dosel, es afectado por L y el patrón del arreglo de las hojas. El coeficiente de extinción proporciona un indicador numérico de la atenuación de la luz en el dosel, es una característica que consiste principalmente en la inclinación de la hoja y la forma en como las hojas están agrupadas dentro del dosel. Si la ecuación de Monsi

y Saeki es aplicada a la producción de cultivos, entonces la gráfica de $\ln\{I/I_0\}$ contra L , dará una línea recta cuya pendiente es k .

Aun en su forma más simple, esta relación proporciona una descripción satisfactoria de la penetración de radiación dentro de los doseles de una variedad de cultivos. La obtención de valores de k , puede ser usada para comparar los comportamientos de intercepción entre cultivares, especies, medio ambiente y sistemas de manejo.

A pesar de que los estudios de los coeficientes de extinción, han dejado un considerable interés en la estratificación vertical del área de la hoja, es importante enfatizar que la ecuación de Monsi y Saeki no contiene el término de distancia o altura, por lo que la ecuación no distingue entre doseles en la cual la misma L es distribuida sobre diferentes alturas del cultivo.

Una precisa descripción del comportamiento de la distribución de la radiación dentro del dosel de la planta, es difícil por tener que tomar en cuenta la arquitectura del dosel, la distribución angular de la radiación incidente y las propiedades espectrales de las hojas (Jones, 1992). Sin embargo, existen simplificaciones útiles que dan una adecuada precisión para la mayoría de los propósitos, incluyendo modelos de fotosíntesis y productividad.

Hojas Horizontales.

Asumiendo que los cultivos son horizontalmente uniformes, la radiación es constante en cualquier capa horizontal, solamente cambia con la altura. En general el promedio de irradiación en cualquier nivel tiende a disminuir exponencialmente cuando incrementa la profundidad en una forma similar a la predicha por la Ley de Beer. Una simple derivación, asume que el dosel consiste en un arreglo aleatorio horizontal de las hojas con un índice de área foliar (L), que es el total de hojas proyectadas por unidad de área de suelo. Este puede ser dividido por un número de capas horizontales, conteniendo cada una, igual área y dentro la cual las hojas no se cubren unas con otras. Si se considera una capa de dosel, conteniendo pequeñas hojas, un índice de área foliar (dL) interceptara un monto de radiación igual a (I_0 dL), donde I_0 es la irradiación arriba de la capa. Si las hojas son opacas, el cambio en la irradiación (dI) en pasar a través de esta capa, es igual a $-I_0$ dL. La integración a través del total del índice de área foliar L, da el promedio de irradiación en una superficie horizontal bajo ése índice de área foliar como:

$$I = I_0 e^{-L}$$

Aunque esto es similar a la Ley de Beer, en este caso, la irradiación en cualquier nivel, es el promedio de algunas áreas con luz no atenuadas (hojuelas de sol) y algunas áreas completamente sombreadas.

Distribución Esférica.

Una distribución erectófila que es de particular interés es la distribución de la hoja esférica. En ésta, se asume que las hojas tienen una igual probabilidad de

cualquier orientación. Aunque en esta asunción las hojas tienen igual probabilidad de cualquier azimut (que es la dirección N, S, E, W, etc.), hojas erectas (todas alrededor del ecuador) son más comunes que las horizontales. Siguiendo con el coeficiente de extinción que es la relación de la proyección de una esfera dentro de un plano horizontal a su área superficial, la cual es $\pi r^2 / (4\pi r^2 \sin \beta) = 0.25 \operatorname{cosec} \beta$ pero como también el lado de la hoja puede interceptar radiación, el apropiado valor de k es dos veces este valor o $0.5 \operatorname{cosec} \beta$.

Una función más general que es continua sobre un rango de ángulos de la hoja (parecida a la distribución esférica) pero que puede acomodar doseles con tendencias erectas u horizontales, es la distribución elipsoidal. Un solo parámetro (x) (la relación del semi eje horizontal de la elipse al semi eje vertical) es usado para describir la distribución de la sombra. La distribución esférica es un caso especial de la distribución elipsoidal cuando x es igual a la unidad.

Originalmente (Monsi y Saeki, 1953), en su trabajo observaron valores de k que varían de 0.3 a 1.5 dependiendo de la especie. Valores menos de uno son obtenidos para hojas no horizontales, mientras que valores más grandes que la unidad ocurren con hojas horizontales.

Otras Distribuciones de Ángulo de Hoja

El modelo para doseles horizontales, puede ser extendido a otros comportamientos de distribución de la hoja. El principio general es proyectar lo sombreado de las hojas en un plano horizontal y el uso de esta área como el

exponente en la ecuación. Si (k) es la relación del área sombreada a la actual área foliar, la ecuación anterior llega a ser:

$$I = I_0 e^{-kL}$$

Donde k es un coeficiente de extinción. La situación para hojas verticales orientadas hacia el sol, la relación de área sombreada al área actual, es igual a la cotangente β (donde β es la elevación solar). En contraste a la situación horizontal, el perfil de radiación es dependiente de β . Con un ángulo solar alto, k es menos que uno y la luz penetra fuertemente dentro del dosel comparado con un dosel horizontal. En situaciones de ángulos solares bajos, se presenta lo inverso, por lo que es posible estimar el valor de $L_{(iluminado)}$, en este caso el máximo valor de $L_{(iluminado)}$ es igual a $1/k$, así:

$$L_{(iluminado)} = (1 - e^{-kL}) / k$$

Aunque la irradiación por unidad de área foliar iluminada será dada por $k I_0$, que es alta para el sol en alto y hojas verticales. Esto tiene importantes implicaciones para la regulación de la temperatura de la hoja y fotosíntesis del dosel.

Coefficiente de Extinción por el Dosel del Cultivo.

El coeficiente de extinción es la relación entre el área del follaje proyectado y el área total de follaje arriba de una región (plano) horizontal. El área proyectada es naturalmente dependiente en la dirección del sol (α , β) y el coeficiente de extinción es denotado por $K(\alpha, \beta)$, este puede ser calculado si la pendiente y orientación (inclinación y azimut) de los elementos del follaje son conocidos. Si el follaje consiste en hojas, las hojas son arregladas como planos delgados y su orientación es dada por las normales a esos planos. Es generalmente asumido que la

inclinación de la hoja es independiente de azimut en el sentido estadístico, así que el valor promedio de $K(\alpha, \beta)$ es independiente del azimut β y por lo tanto resulta que K es denotado por $K(\alpha)$.

$$I = I_s e^{-K(\alpha)L}$$

Donde (I_s) es el flujo de radiación directa (arriba del dosel), L es el índice de área foliar arriba del plano, $K(\alpha)$ el coeficiente de extinción y α la elevación del sol.

Densidades de Población e Índices de Área Foliar en la Producción del Cultivo.

Mientras la producción por planta disminuye al incrementar la densidad, la intercepción de luz por el dosel aumenta y la producción total se incrementa (Karlen y Camp, 1985). Los doseles del cultivo, convierten solamente 5% de la radiación solar incidente a energía química, durante la estación de crecimiento (Dewit, 1967).

El incremento de densidad de población, puede promover la utilización de la radiación solar en doseles de maíz (Pepper, 1974). Sin embargo, no hay una sola recomendación para los diferentes ambientes. Por lo tanto, la óptima densidad de población varía con los factores ambientales no controlables, así como en el manejo de factores tales como fertilidad del suelo, selección del híbrido, fecha de siembra, patrón de plantación, protección del cultivo y tiempo de cosecha. La densidad de plantas arriba de un valor crítico, tiene un efecto negativo en la producción por planta por la competencia de luz, agua, nutrición y otros factores ambientales (Duncan, 1984).

En el efecto de la densidad de plantas, orientación de la hoja y su interacción en dos híbridos de maíz, se encontró que nueve por ciento más de luz fue interceptada por la hoja horizontalmente orientada, el sombreado en altas poblaciones redujo la producción por planta y el área de la hoja (Whigham y Woolley, 1974). El área de la hoja horizontal fue 17% más grande que el de la hoja vertical, la densidad de 69,189 plantas por hectárea produjo hojas más pequeñas que aquellas producidas en una densidad de 49,421 plantas por hectárea.

El índice de área foliar y la distribución de las hojas dentro del dosel del maíz, son los principales factores que determinan el total de intercepción de luz, el cual afecta la fotosíntesis, transpiración y acumulación de materia seca (Pearce *et al.*, 1967; Lieth y Reynolds, 1984). El concepto de un idiotipo o planta óptima para la fotosíntesis, crecimiento y llenado de grano fue introducido por (Donald, 1968). Un idiotipo de maíz es aquel con un LAI mayor a cuatro, con hojas orientadas verticalmente arriba de la mazorca y horizontalmente orientadas debajo de esta, para maximizar la intercepción de luz por el dosel del cultivo (Mock y Pearce, 1975).

La cantidad de la radiación solar interceptada por el follaje del dosel, fue el mayor determinante del crecimiento del cultivo durante el estado vegetativo (Loomis y Williams, 1968). Un arreglo del dosel, con una predominancia de hojas erectas, ocurrió justamente antes de la inflorescencia y permitió una mayor penetración de luz dentro del follaje y dio una más alta tasa de producción del cultivo.

El máximo índice de área foliar, en localidades de ciclos cortos para la producción de maíz, bajo densidades de plantación normal, fueron bajos, en un

rango de 2.0 a 2.7, en estos índices, el dosel del cultivo interceptó solamente 75 por ciento de la luz solar (Hunter, 1977). El mismo autor en (1980) fue capaz de incrementar la producción de grano en el maíz de ciclo corto incrementando el área de la hoja por planta, concluyó que el área foliar más grande por planta, produce más asimilatos en la planta, que resulta en un incremento en la producción.

El índice de área foliar puede ser mejorado en dos formas: incrementando el área foliar por planta e incrementando la densidad de población. Una estrategia disponible para incrementar el área foliar por planta, es incorporar una característica de frondosidad en los híbridos. Plantas con características de frondosidad, son caracterizadas por hojas extras arriba de la mazorca, bajo colocamiento de la mazorca, tallos y partes de la hoja altamente lignificados, madurez temprana y un alto potencial de producción (Shaver, 1983).

James y Knivel (1995) obtuvieron una función de respuesta del número de semillas por planta, con la radiación fotosintética activa interceptada después de 10 días de iniciada la floración; la función fue evaluada para varios híbridos en diferentes localidades. Los resultados obtenidos presentan una respuesta lineal y alcanzan un valor máximo cuando el potencial de semillas producidas ha sido alcanzado. Una sola ecuación de regresión fue adecuada para 10 híbridos en Temple, Tx. y parte central de Pennsylvania. Otros híbridos para estas y otras localidades mostraron diferentes respuestas, pero pueden ser derivadas otras funciones de predicción con una constante definida por el potencial de semilla por planta producido a bajas densidades de población.

Arquitectura Foliar y Radiación Solar en Cultivo de Maíz.

Uno de los factores más importantes en la producción, es la utilización de la radiación solar, la cual es influenciada por la estructura del dosel (Daughtry *et al.*, 1983). La eficiencia de la fotosíntesis y producción en el maíz, estuvieron fuertemente correlacionadas con el efecto de la arquitectura del dosel (Williams *et al.*, 1968). En la distribución vertical de la luz dentro del dosel, la radiación es transmitida a través y entre las hojas y el flujo de densidad de radiación y composición espectral cambia rápidamente dentro de la profundidad del dosel (Gardner *et al.*, 1985).

La intercepción de luz por el dosel y la fotosíntesis son fuertemente correlacionadas a el índice de área foliar y un valor "crítico" de éste, es requerido para interceptar el 95 por ciento de la radiación incidente (Pearce *et al.*, 1965). La producción de grano en maíz es relacionada al índice de área foliar y a la estructura del dosel (Williams *et al.*, 1968). El dosel es un óptimo arreglo de la hoja para cada genotipo, que depende del espaciamiento entre hileras y la población (Eastin, 1969).

La intercepción de la radiación solar por las hojas del dosel, es influenciada por su arquitectura, la cual es función de la pendiente, distribución y orientación de las hojas que lo constituyen (Girardin y Tollenaar, 1994). Los autores estudiaron la hipótesis de que la distribución de azimut de la hoja en el dosel de maíz, no es influenciada por la densidad de plantas y el ancho de hileras, sino que la orientación de la hoja, en la capa superior (doceava a dieciseisava hoja) fue más perpendicular a la hilera y no es influenciada por la altura o por la densidad. Un cambio azimutal

de las hojas de la parte inferior a la parte superior en la planta se presentó en todos los doseles, pero el cambio fue más grande para las más altas densidades. Concluyen que la orientación de las hojas en un dosel de maíz, es alterado por la interferencia propia, por ello, la radiación solar incidente es más eficientemente interceptada.

Flenet *et al.*, (1996) investigaron el efecto de la hora del día y estado de desarrollo del cultivo en el coeficiente de extinción para diferentes espaciamientos entre hileras en los cultivos de maíz, sorgo, soya y girasol. El coeficiente de extinción mostró una disminución lineal cuando el espaciamiento entre hileras se incrementa, la hora del día y su interacción con el espaciamiento entre hileras fue positiva para soya y girasol. Por lo tanto, para modelar la intercepción de luz por el dosel, deben tomarse en cuenta estos efectos.

Westgate *et al.*, (1997) indican que el cierre temprano del dosel, fue mejorado usando una combinación de espaciamiento entre hileras mas estrechas y aumentando la densidad de población, comparándolas con las típicamente usadas por los productores locales. Los resultados muestran que los híbridos adaptados a la franja maicera del norte de los Estados Unidos, probablemente produzcan más grano, si son sembradas a más altas densidades de población que las comúnmente usadas, para provocar un cierre temprano del dosel; siembras en hileras menores a 76 cm de ancho tendrán menos impacto en la producción de grano y los híbridos propensos a esterilidad o con baja eficiencia de convertir radiación fotosintética a biomasa, no incrementaran su producción con el cierre prematuro del dosel.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del Área de Estudio

Para lograr los objetivos, la investigación comprendió dos trabajos. El primero consistió en observar la reflectancia y absorptancia de la radiación solar y fotosintética activa, el segundo en medir la penetración y distribución de la misma en el follaje del cultivo. El primer trabajo se desarrolló en el campo experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Pecuarias (INIFAP), de Arteaga, Coahuila en el ciclo Primavera – Verano de 1999.

El segundo, fue realizado en el ciclo Primavera – Verano del 2000, en el rancho denominado “Cerro del agua”, ubicado en el kilómetro 154 de la carretera Saltillo – Matehuala. El clima de la región según el sistema de clasificación de Köppen, modificado por García (1981) es de tipo $Bo(h') W(e')$ el cual pertenece al grupo de los climas secos o estepario siendo el más seco de su tipo, muy cálido, con una temperatura media anual de $22.8^{\circ}C$, con meses extremos en el invierno.

Tratamientos y Diseño Experimental.

En el primer ciclo, se utilizó la variedad de maíz "Cafime" liberada en el campo experimental de Arteaga por el INIFAP, esta variedad tiene una altura promedio 1.6 m, rendimiento medio de 6000 kg ha^{-1} en una densidad de 60,000

plantas ha^{-1} . El diseño utilizado fue un bloques al azar con tres tratamientos y seis repeticiones. Los tratamientos consistieron en variar la densidad de plantas por metro cuadrado (6.9, 8.9 y 12.5 plantas m^{-2}). Para lograr estas densidades, se manejó una distancia entre surcos de 0.5, 0.7 y 0.9 metros, con una distancia entre plantas de 0.16 m.

El modelo del diseño experimental fue: $Y_{ij} = \mu + \beta_i + \alpha_j + e_{ij}$. Donde μ es el efecto general, β_i efecto del bloque completo i , α_j efecto del tratamiento j , e_{ij} es el error aleatorio que se asume se distribuye normalmente con media cero y varianza σ^2 , Y_{ij} es el valor de la característica en estudio.

En el segundo ciclo, el material genético utilizado fue el híbrido "Prime Time", cuya característica principal es que se destina para consumo fresco (elote) por ser clasificado dentro de los maíces dulces, tiene una altura promedio a la hoja bandera de 0.95 m. El diseño de tratamientos fue un factorial (tres por dos) bajo un diseño de bloques al azar con arreglo en franjas y tres repeticiones. El factor "a" consistió en tres densidades de población (5.5, 7.4, 11.1 plantas m^{-2}) y el factor "b" en permitir un desarrollo normal de la hoja del cultivo y un desarrollo vertical forzado. La distancia entre plantas fue de 0.2, 0.15 y 0.1 m y la separación entre hileras fue de 0.9 m en cada tratamiento. Para mantener la orientación de la hoja con una tendencia vertical, se utilizó una malla agrícola, paralela a ambos lados del surco y sostenida con varillas en los extremos del surco, de tal manera que las hojas del cultivo se mantuvieran en forma erecta, ésta fue colocada 74 días después de siembra.

El modelo del diseño experimental es $Y_{ijk} = \mu + \beta_i + \alpha_j + (\beta\alpha)_{ij} + \gamma_k + (\beta\gamma)_{ik} + (\alpha\gamma)_{jk} + e_{ijk}$, donde i es el número de repeticiones, j son los niveles del factor "a", y k son los niveles del factor "b". μ es el efecto general, β_i es el efecto del bloque "i" (al nivel i), α_j es el efecto del tratamiento "a" (al nivel j), γ_k el efecto del tratamiento "b" (al nivel k), $(\beta\alpha)_{ij}$ es el efecto de la interacción bloques por tratamientos "a", $(\beta\gamma)_{ik}$ es el efecto de la interacción bloques por tratamiento "b", $(\alpha\gamma)_{jk}$ efecto de la interacción bloques por tratamiento "a y b" y e_{ijk} el elemento de error que se asume es igual a cero y varianza σ^2 .

Labores de Cultivo

Ciclo Primavera Verano de 1999.

Las fecha de siembra para este ciclo, fue el día 26 de Junio de 1999, en húmedo y en forma manual, los riegos posteriores fueron aplicados en forma oportuna y simultánea a los tratamientos mediante un sistema de riego por aspersión, de manera que el agua no fuera un factor limitante en la producción del cultivo.

La fertilización aplicada fue 150-100-50 de Nitrógeno, Fósforo y Potasio, al momento de la siembra, se aplicaron 50 unidades de Nitrógeno y 100 unidades de Fósforo, el resto de la dosis se aplicó a los 64 días después de siembra. Las plagas y enfermedades fueron controladas con la aplicación de agroquímicos de acuerdo a las normas establecidas, de tal manera que los rendimientos no se vieron afectados por estos factores.

La cosecha se realizó el día 12 de noviembre del mismo año, a los 140 días después de la siembra. Esta fue realizada en forma manual seleccionando 10 plantas por parcela útil. las mazorcas fueron secadas a estufa y posteriormente se procedió al desgrane. El peso fue extrapolado a kilogramos por hectárea considerando las densidades de población de cada tratamiento.

Ciclo Primavera Verano del 2000.

En este ciclo, la siembra se realizó el día 20 de Mayo del 2000, en húmedo y en forma manual, los riegos y la fertilización fueron aplicados mediante un sistema de riego con cintilla T- Tape de manera simultánea a todos los tratamientos, de tal manera que la humedad y la fertilización no fueron un factor limitante. El control de plagas fue llevado en forma oportuna así como el control de las malezas, que fue llevado en forma mecánica para mantener limpios los bulbos de mojado en los surcos.

La cosecha en etapa de elote, se realizó el 12 de Septiembre del año 2000 a los 117 días después de la siembra. Esta se realizó en forma manual eligiendo al azar 10 elotes por cada unidad experimental, posteriormente se midió el peso, diámetro y longitud del elote.

Variables de Respuesta del Cultivo.

En el ciclo Primavera-Verano de 1999, la parcela experimental consistió de siete surcos de cinco metros de longitud y como parcela útil se tomaron los cinco

surcos centrales, en los cuales se tomaron diez plantas al azar y se midieron las siguientes características: índice de área foliar, altura de planta, altura a la primera mazorca, peso de planta entera en fresco, peso del follaje (hojas sin tallo) y rendimiento de grano. El índice de área foliar, la altura de planta y primera mazorca, fueron evaluadas a los 103 días después de siembra, el peso de planta, follaje y rendimiento fueron evaluados a los 140 días después de siembra.

En el ciclo Primavera-Verano del 2000, la unidad experimental consistió en nueve surcos de cinco metros de longitud y como parcela útil, se tomaron siete surcos centrales, donde fueron seleccionadas diez plantas al azar y se evaluaron las características de índice de área foliar, altura y peso de la planta. El índice de área foliar y la altura, fueron evaluadas a los 105 días y el peso de la planta a los 117 días después de la siembra.

Instrumentación y Mediciones en el Ciclo Primavera Verano de 1999

Radiación Solar y Fotosintética Activa Incidente y Reflejada por el Cultivo.

La radiación solar total (sw) Wm^{-2} y la radiación fotosintética activa (PAR) en $\mu mol m^{-2}s^{-1}$ incidente y reflejada por el dosel del cultivo, fueron medidas en diferentes etapas de desarrollo del cultivo. La radiación solar total y fotosintética activa incidentes, fueron medidas con un piranómetro de silicón y un sensor quantum respectivamente, los cuales se colocaron en una torre fija sobre el dosel del cultivo y orientados hacia arriba. Para medir la radiación solar total y fotosintética activa reflejada por el dosel del cultivo de cada tratamiento, un piranómetro de

silicón y un sensor quantum se colocaron en una torre móvil sobre el dosel del cultivo y orientados hacia abajo. Esta torre se desplazó sobre los diferentes tratamientos.

El movimiento de la torre móvil sobre los diferentes tratamientos se realizó de dos formas: la primera consistió en una rotación rápida en la cual la torre se colocó al centro de cada unidad experimental por un tiempo de 10 minutos en los cuales los sensores tomaron lecturas cada dos segundos para promediar cada cinco minutos, la rotación a través de todos los tratamientos se realizó en aproximadamente 30 minutos. Estas mediciones se realizaron los 81 y 88 días después de siembra, en diferentes horas del día.

La segunda, consistió en estacionar la torre en cada uno de los tratamientos durante un período de tres a cinco días, lo anterior con el propósito de medir el comportamiento de la absorción y reflexión a la radiación solar por el cultivo en forma diaria. Las mediciones fueron tomadas cada cinco segundos y promediadas cada veinte minutos durante las 24 horas del día. Los sensores fueron conectados a un datalogger modelo CR7 de Campbell Sci. Inc. Los índices de reflexión (r) para cada tratamiento, fueron obtenidos al dividir la radiación reflejada entre la radiación incidente y el índice de absorción (a) fue calculado, al restar a la unidad, este valor.

Perfil de Temperaturas en el Dosel del Cultivo.

El comportamiento de la temperatura del aire en perfil del dosel de cada tratamiento, se midió colocando en la torre móvil, cuatro termopares de Chromel-Constantino de 76 μm de diámetro, a las alturas de 0.07, 0.57, 1.07 y 2.0 metros sobre la superficie del suelo, la temperatura se midió cada dos segundos para realizar promedios de 20 minutos en las cuatro elevaciones, a diferentes horas del día.

Instrumentación y Mediciones en el Ciclo Primavera Verano del 2000

Radiación Solar y Fotosintética Activa Incidente en el Cultivo.

La radiación solar total y fotosintética activa incidente en el cultivo, fueron medidas instalando sobre el dosel del cultivo dos sensores, un piranómetro y un quantum, ambos en un mástil fijo previamente nivelado y orientado hacia el zenit, conectados a un micrologger 23X. Las lecturas se realizaron a una frecuencia de un segundo con promedios de 20 minutos durante el ciclo de desarrollo del cultivo.

Penetración de la Radiación Fotosintética Activa en el Dosel del Cultivo.

La penetración de la radiación fotosintética activa en el perfil del cultivo en cada tratamiento, se midió utilizando una línea de sensores quantum (barra ligera modelo apogee instruments de 10 sensores y 70 cm de longitud). Esta fue colocada y nivelada manualmente en forma perpendicular entre dos surcos vecinos de la unidad experimental para cada tratamiento, metodología propuesta por (Gallo y Daughtry

1986). Las profundidades en las que fue colocada la barra, con respecto a la altura de la planta, fueron: diez centímetros aproximados arriba del dosel y a las fracciones de 0.15, 0.33, 0.66 y 0.96 m de altura, partiendo de la parte superior hacia la parte inferior de la planta o nivel del suelo. En la primera posición, se tomaron dos lecturas, la primera fue colocando la barra viendo hacia el cenit para medir la radiación fotosintética incidente y la segunda, viendo hacia el cultivo para medir la radiación reflejada. Las lecturas fueron tomadas y almacenadas cada segundo y promediadas a cada minuto, en días claros, sin nubes y a diferentes horas del día.

Coefficientes de Extinción por el Cultivo.

En base a los valores obtenidos de la radiación fotosintética activa incidente sobre el dosel del cultivo (PAR_o) y la radiación medida en cada uno de los estratos o profundidades en el perfil del cultivo en las que fue colocada la barra (PAR_z), donde (z) es igual a las profundidades relativas de 0.15, 0.33, 0.66 y 0.96 de cada estrato, fueron obtenidos los coeficientes del cultivo, partiendo de la ecuación.

$$PAR_z = PAR_o e^{-Kz}$$

Donde (K) es el coeficiente de extinción de la radiación solar por el cultivo, Z_r es la profundidad relativa a la que fue tomada la lectura de la radiación fotosintética. En la ecuación no se consideró el índice de área foliar acumulado (L) como lo indica la ecuación de Lambert Beer, fue considerada la profundidad, es decir, la extinción de la radiación con respecto a la profundidad del cultivo,

partiendo de la parte superior del dosel hacia la parte inferior. Linearizando la ecuación resulta:

$$\text{PAR}_z / \text{PAR}_0 = e^{-Kzr}$$

$$\text{Ln} \{ \text{PAR}_z / \text{PAR}_0 \} = -Kzr$$

Los valores obtenidos de $(\text{PAR}_z / \text{PAR}_0)$, fueron transformados a logaritmos naturales para linearizar la ecuación de Beer y utilizando la técnica de regresión, fueron obtenidos los valores de los coeficientes de extinción del cultivo en cada uno de los tratamientos.

Radiación Neta en el Cultivo.

La radiación neta en cada uno de los tratamientos, se midió instalando un sensor de radiación neta en la parte superior de una torre móvil, ésta se estacionaba por un período de tres minutos en cada tratamiento, las mediciones se realizaban cada segundo obteniendo un promedio cada tres minutos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Relación entre el Desarrollo, Rendimiento y la Absortancia de la radiación en el Ciclo Primavera - Verano de 1999.

Índices de Reflexión, Absorción de la Radiación Solar y Fotosintética Activa por el Cultivo.

Los Cuadros 4.1 y 4.2 muestran los valores de los índices de reflexión (r) y absorción (a) a la radiación solar total (sw) y fotosintética activa (PAR), obtenidos en los tres tratamientos a los 81 y 88 días después de siembra. Al comparar los índices reflexión y absorción de las dos longitudes de onda sw y PAR, se observa que en promedio la radiación solar es absorbida en una fracción de 0.75 y reflejada en 0.25, mientras que la radiación fotosintética activa se absorbe en 0.95 y se refleja por el sistema cultivo-suelo en 0.05. Estos valores coinciden con los reportados por (Nobel, 1991) que indica que la absorción de la hoja en una longitud de onda, varía considerablemente con la región espectral. En el espectro visible, que corresponde a la radiación fotosintética activa (0.4 a 0.7 μm) de longitud de onda, la absorción es en promedio de 0.8, y esta fracción relativamente alta por la hoja, es realizada principalmente por los pigmentos fotosintéticos. En este espectro, el valor mínimo de absorción ocurre a los 0.55 μm y aquí una fracción más grande de la radiación incidente, es reflejada o transmitida, originando el color verde de las hojas. La absorción es más pequeña en la banda de 0.7 a 1.2 μm (cercano al infrarrojo) y es

importante por que minimiza la entrada de energía a la hoja, esta es la razón principal, por la que disminuye la absorción en la radiación solar total.

Cuadro 4.1. Índices de reflexión (r) y absorción (a) a la radiación solar (sw) y fotosintética activa (PAR), observados en los tratamientos de 0.5, 0.7 y 0.9 m de separación entre surcos; 81 días después de siembra, en el ciclo Primavera – Verano 1999.

d.d.s.	Hora	Tratamiento (m)	Radiación solar		Radiación fotosintética activa	
			r_{sw}	a_{sw}	r_{PAR}	a_{PAR}
81	13:20	0.5	0.264	0.736	0.0374	0.9626
		0.7	0.241	0.759	0.0382	0.9617
		0.9	0.217	0.782	0.0439	0.9561
	14:50	0.5	0.262	0.737	0.0378	0.9621
		0.7	0.277	0.723	0.0429	0.9570
		0.9	0.237	0.763	0.0459	0.9541
	16:20	0.5	0.298	0.701	0.0403	0.9596
		0.7	0.282	0.717	0.0444	0.9555
		0.9	0.253	0.746	0.0485	0.9515

d.d.s = días después de siembra

Cuadro 4.2. Índices de reflexión (r) y absorción (a) a la radiación solar (sw) y fotosintética activa (PAR), observados en los tratamientos de 0.5, 0.7 y 0.9 m de separación entre surcos; 88 días después de siembra, en el ciclo Primavera – Verano 1999.

d.d.s.	Hora	Tratamiento (m)	Radiación total		Radiación fotosintética activa	
			r_{sw}	a_{sw}	r_{par}	a_{par}
88	10:35	0.5	0.248	0.752	0.0377	0.962
		0.7	0.255	0.745	0.0426	0.957
		0.9	0.242	0.758	0.0440	0.956
	12:05	0.5	0.232	0.767	0.0414	0.958
		0.7	0.219	0.780	0.0402	0.959
		0.9	0.211	0.788	0.0427	0.957

Se observa también que la absorción a la radiación fotosintética activa, se incrementa al disminuir la distancia entre surcos y su reflexión decrece. En la banda de la radiación solar sw su comportamiento es inverso, es decir, al disminuir la distancia entre plantas la reflexión aumenta y la absorción disminuye. Este comportamiento se debe principalmente a que al aumentar las separaciones entre surcos, la superficie del suelo descubierto se incrementa, lo que provoca una mayor

incidencia de radiación directa al suelo y por lo tanto, una mayor absorción por el suelo. Con respecto a la radiación fotosintética activa al aumentar la distancia entre surcos, el área foliar por unidad de superficie de suelo disminuye y al ser esta la principal fuente de absorción, los valores de los índices de absorción decrecen.

Los valores de los índices de absorción y reflexión, son similares para las 13:20 y 14:50 horas. A las 16:20 hr se incrementa la reflexión de sw (Cuadro 4.1) esto puede deberse al ángulo de incidencia de la radiación con respecto al follaje del cultivo.

Evolución de la Reflexión y Absorción a la Radiación Solar por el Cultivo.

Las Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 muestran los índices de reflexión y absorción a la radiación solar total para los tres tratamientos (0.5, 0.7 y 0.9 metros de espaciamiento entre surcos) éstos índices, corresponden a los 88, 95 y 109 días después de la siembra. En los tres tratamientos, se observa que el índice de reflectividad es menor entre las 13 y 15 horas y por lo tanto, la absorción de la radiación solar es mayor por el cultivo, esto se debe a que a estas horas la incidencia de la radiación solar es más cercana a la vertical. Durante el amanecer y el atardecer, la absorción a la radiación solar tiende a ser menor y se debe principalmente a los bajos ángulos solares incidentes sobre el cultivo. Nobel, (1991) indica que en los ángulos solares bajos, las longitudes de onda corta son más dispersadas y la absorción decrece para radiaciones de mayor longitud de onda.

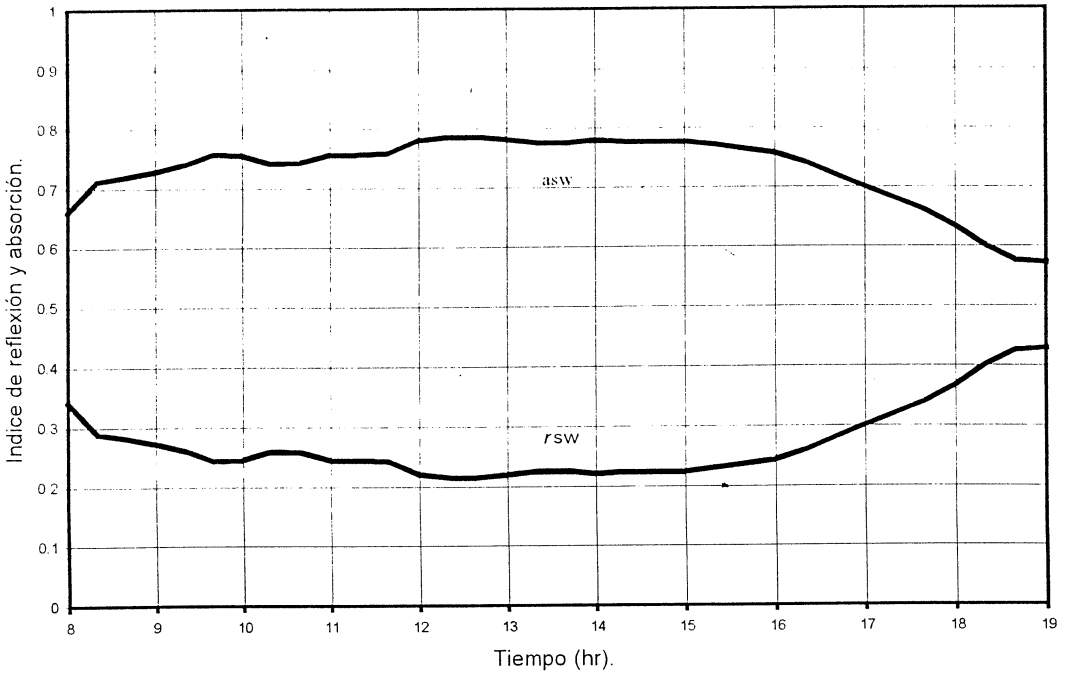


Figura 4.1 Evolución de los índices de reflexión (r_{sw}) y absorción (a_{sw}) a la radiación solar en el tratamiento de 50 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 263 del año; 88 días después de siembra.

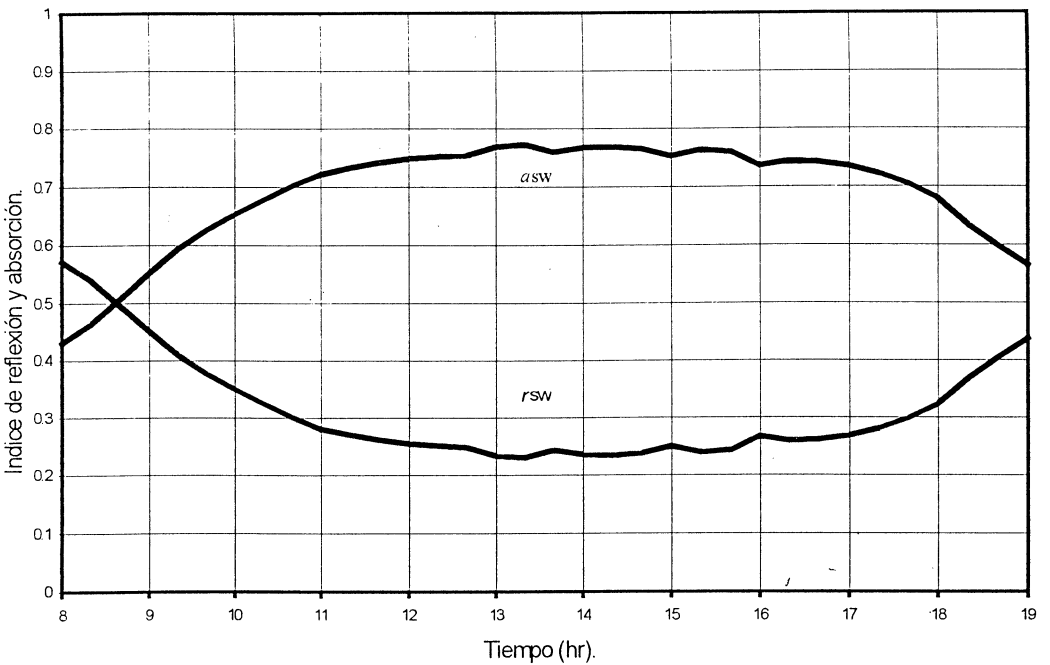


Figura 4.2 Evolución de los índices de reflexión (r_{sw}) y absorción (a_{sw}) a la radiación solar en el tratamiento de 70 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 270 del año; 95 días después de siembra.

Los índices r_{sw} y a_{sw} en el tratamiento de 0.5 m de espaciamiento entre surcos Figura 4.1 son más uniformes a través del día, comparados con los tratamientos de 0.7 y 0.9 m. Nótese que en el lapso de tiempo de las 12 a las 15 horas, el r_{sw} en el mismo tratamiento de 0.5 m entre surcos es ligeramente más pequeño comparado con los otros tratamientos, lo cual corresponde con un índice de absorción (a_{sw}) ligeramente mayor que los demás tratamientos, esto se debe a una mayor densidad de follaje.

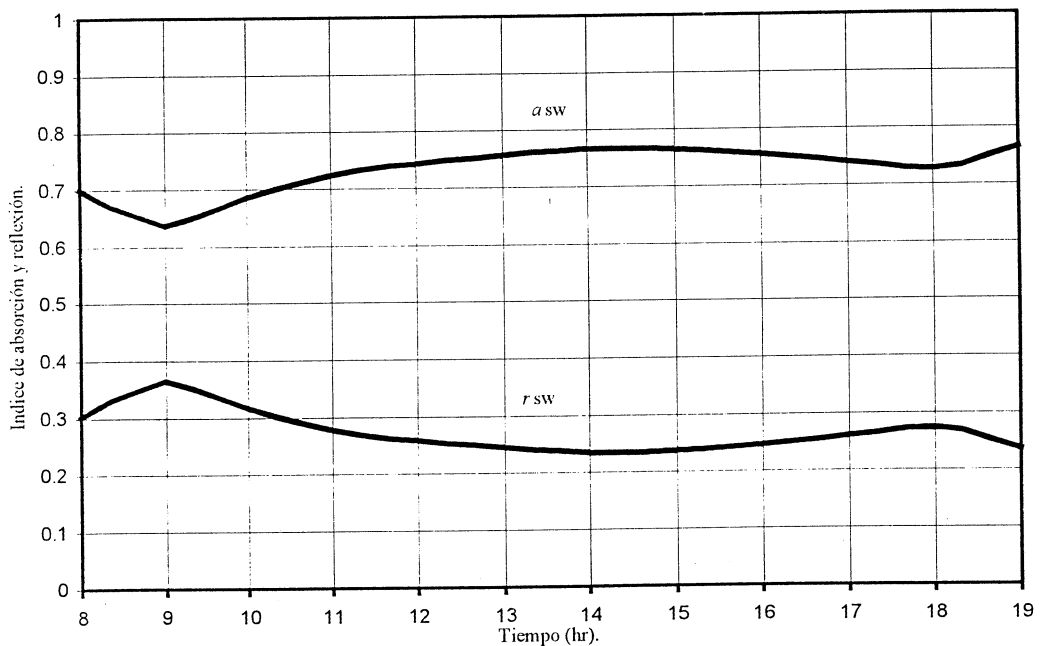


Figura 4.3 Evolución de los índices de reflexión (r_{sw}) y absorción (a_{sw}) a la radiación solar en el tratamiento de 90 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 284 del año; 109 días después de siembra.

Evolución de la Reflexión y Absorción a la Radiación Fotosintética Activa por el Cultivo.

Las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 muestran la evolución a través del día de los índices de reflexión (r PAR) y absorción (a PAR) a la radiación fotosintética activa en los tres tratamientos, a los 109, 95 y 88 días después de siembra. A diferencia de los índices de radiación solar total, los índices de la radiación fotosintética activa son más uniformes durante el día. La reflexión es ligeramente más alta entre las 8:00 y 9:00 horas y entre las 18:00 y 19:00 horas. En promedio para los tres tratamientos, el índice de absorción es de 0.95 y éste es ligeramente mayor en el tratamiento de 0.5m entre surcos, lo que explica que a mayor densidad de follaje, mayor absorción de la PAR.

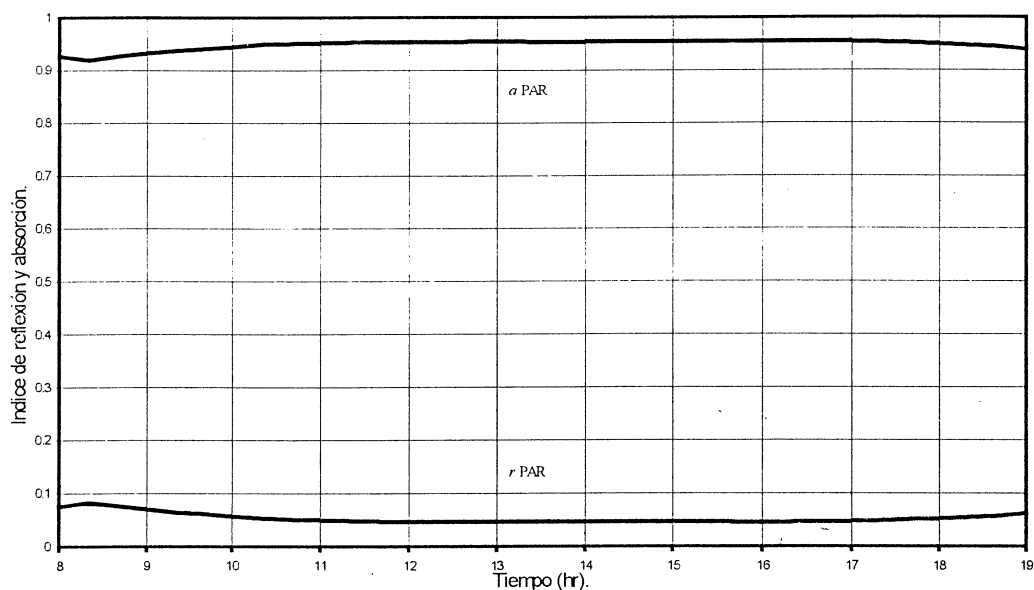


Figura 4.4. Evolución de los índices de reflexión (r PAR) y absorción (a PAR) a la radiación fotosintética activa en el tratamiento de 50 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 284 del año; 109 días después de siembra.

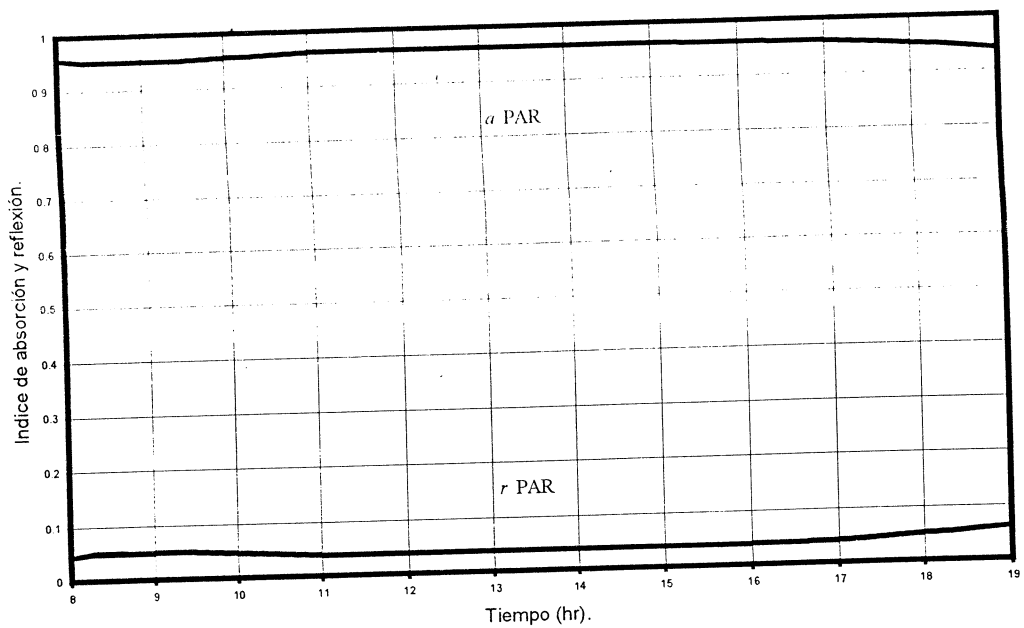


Figura 4.5 Evolución de los índices de reflexión (*r*PAR) y absorción (*a*PAR) a la radiación fotosintética activa en el tratamiento de 70 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 270 del año; 95 días después de siembra.

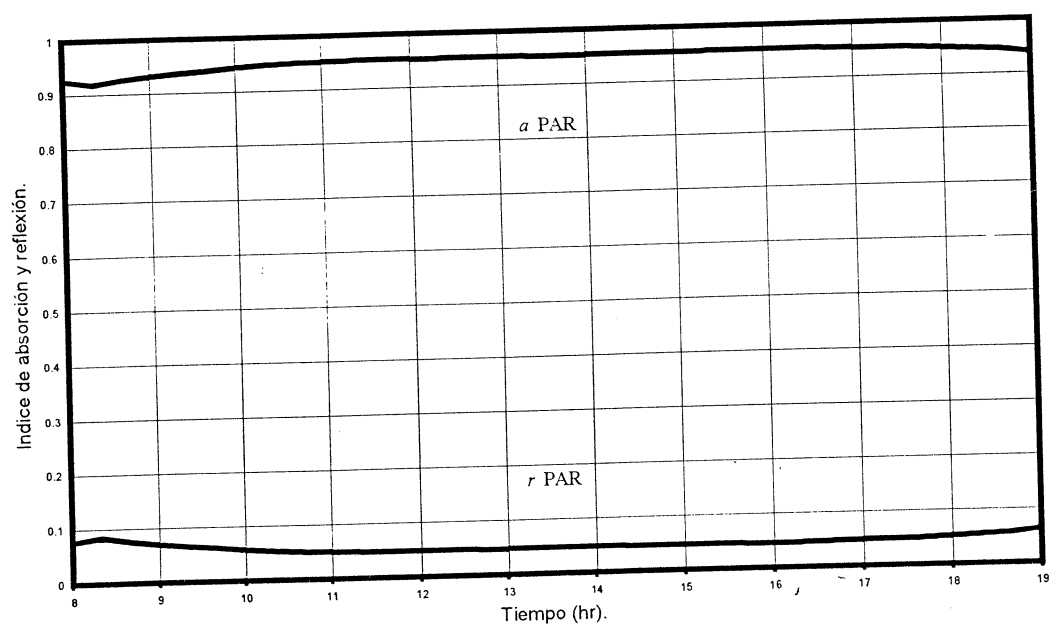


Figura 4.6 Evolución del índice de reflexión (*r*PAR) y absorción (*a*PAR) a la radiación solar en el tratamiento de 90 cm de espaciamiento entre surcos, observados el día 263 del año; 88 días después de siembra.

Efecto del Espaciamiento Entre Surcos en el Perfil de Temperatura del Aire.

La Figura 4.7 muestra el perfil de temperaturas del aire en los tratamientos de 0.5 y 0.9 m de espaciamiento entre surcos, observados a los 88 días después de siembra. Se observa, una mayor temperatura cerca de la superficie del suelo en el tratamiento de 0.9 m, lo cual se debe al efecto de un mayor calentamiento de la superficie causado por una mayor incidencia de radiación solar en este tratamiento. Note que la temperatura del aire decrece con la altura. Por el contrario, el tratamiento de 0.5 m de espaciamiento entre surcos, se observa que la temperatura del aire es menor cerca de la superficie y tiende a incrementarse con la altura, lo que es provocado por una menor incidencia de radiación hacia los estratos inferiores y una menor transferencia de calor por convección debido a una mayor rugosidad del sistema suelo-cultivo, ocasionada por una mayor densidad de población.

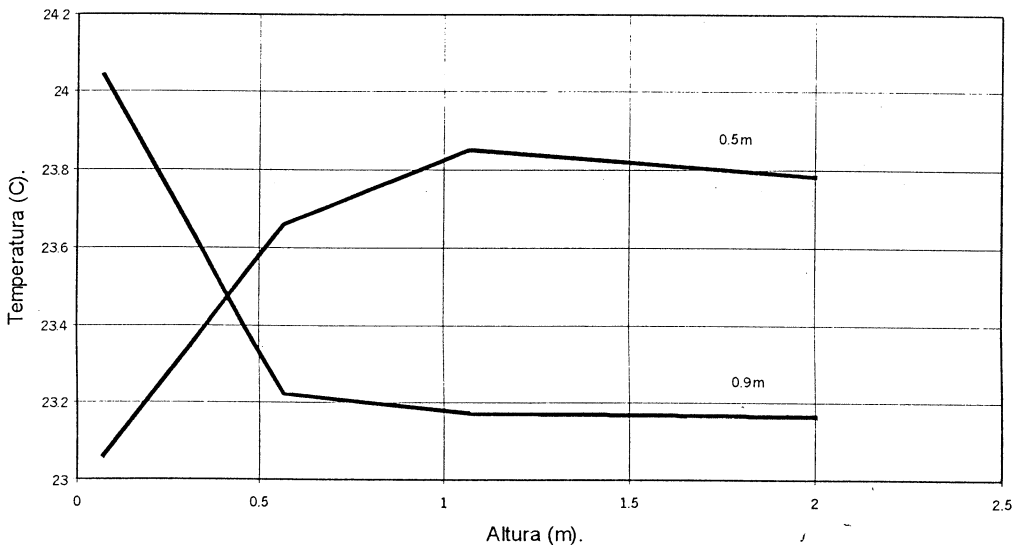


Figura 4.7 Perfil de temperatura del aire a 0.5 y 0.9 m de espaciamiento entre surcos observados el día 264 del año a las 11:30; 88 días después de siembra.

La Figura 4.8 muestra el perfil de temperaturas a las 7, 14 y 19 hr del día para el tratamiento de 0.5 m de espaciamiento entre surcos. Se observa que la temperatura del aire con respecto a la altura de la planta a una misma hora, permanece constante y su comportamiento es similar a las 7, 14 y 19 horas del día. El perfil de temperatura más alto durante el día, se observa las 14 hr, con un temperatura promedio de 23 °C y la temperatura menor se localizó a las 7 hr con una valor promedio de 6 °C.

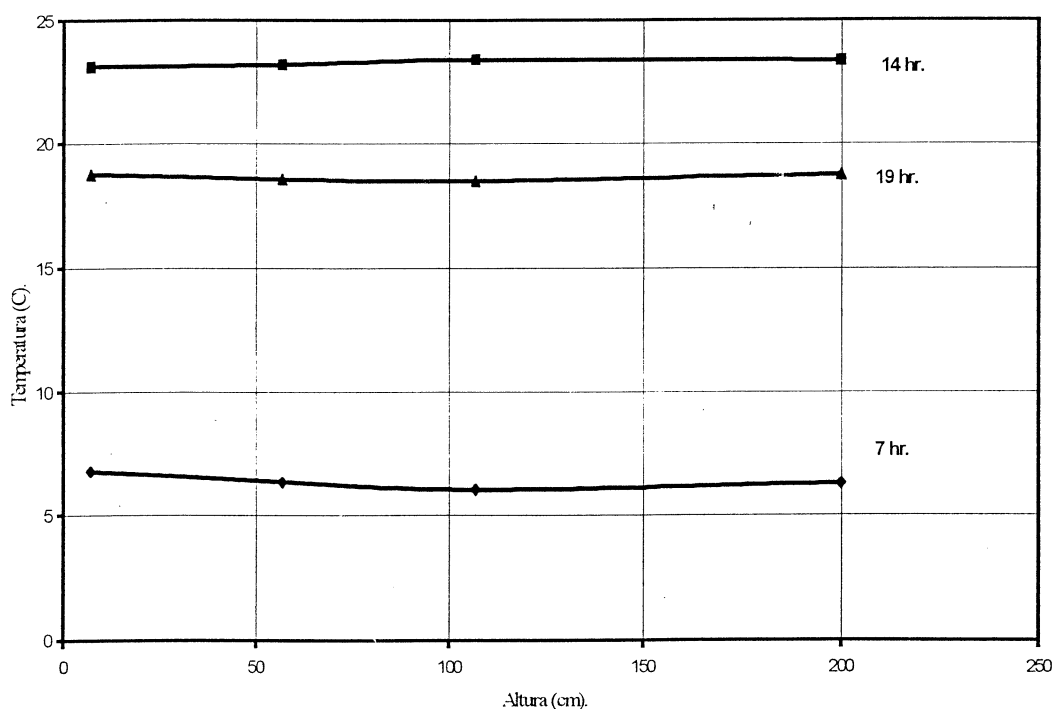


Figura 4.8 Perfiles de temperatura del aire a las 7, 14 y 19 hr observados a los 106 días después de siembra en el tratamiento de 0.5 m entre surcos.

Efecto de la Densidad de Población en el Índice de Área Foliar y Altura de la Planta.

El Cuadro A.1 muestra el análisis de varianza del índice de área foliar en los tratamientos evaluados. Se observaron diferencias estadísticas entre los tratamientos,

también se muestran los coeficientes de determinación y variación, los cuales corresponden a un valor de 0.84 y 16.77. Esto nos indica que el modelo del diseño experimental utilizado explica al menos en un 84% el comportamiento de esta característica en las densidades de población. El Cuadro 4.3 muestra la comparación de medias del índice de área foliar y altura de la planta entre los tratamientos, con la prueba de Tukey a un nivel de significancia (α) de 0.05. Se observa que el valor más alto del índice de área foliar de 4.52 correspondió a la densidad de 12.5 y no existió diferencia estadística entre los tratamientos de 8.9 y 6.9 plantas m^{-2} , donde se obtuvieron índices de 2.79 y 2.4. La tendencia de los resultados de estos índices de incrementar su valor, al incrementar la densidad de plantas, tiene una relación directa con los valores de absorción a la radiación fotosintética activa, por que al incrementar la densidad de plantas, se incrementa la absorción y disminuye la reflectancia.

Cuadro 4.3. Comparación de medias del índice de área foliar, altura de la planta, peso y rendimiento de plantas de maíz bajo tres tratamientos de densidades de población; ciclo Primavera – Verano 1999.

Plantas m^{-2}	Distancia de surcos (m)	LAI	Altura (m)	Peso planta entera (gr)	Peso de follaje (gr)	Rendimiento $kg\ ha^{-1}$
12.5	0.5	4.52 a	1.66 a	394.16 a	295.6 a	2766.5 a
8.9	0.7	2.79 b	1.60 a	390.83 a	293.3 a	1322.5 b
6.9	0.9	2.4 b	1.57 a	365.83 b	272.3 b	1067.7 b
CME		0.2954	0.0158	157.22	137.28	58368.6
DMS		0.8603	0.1991	19.84	18.54	382.37

Valores medios con una misma letra, son estadísticamente iguales; prueba de Tukey a una α de 0.05.

El Cuadro A.2 muestra el análisis de varianza de la altura de la planta entre los tratamientos. Se observa que no existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos. Sin embargo, en el Cuadro 4.3 se observa que en los valores absolutos existe una tendencia de incrementar la altura de la planta cuando se aumenta la

densidad de población. Las alturas promedio obtenidas fueron 1.66, 1.60 y 1.57 m en las densidades de 12.5, 8.9 y 6.9 plantas m^{-2} respectivamente. También fue evaluada la altura a la primera mazorca de la planta, pero no se obtuvieron diferencias entre los tratamientos, como se indica en el Cuadro A.3 que presenta el análisis de varianza para esta característica estudiada.

Efecto de la Densidad de Plantas en el Peso de Planta, Follaje en fresco y Rendimiento de grano.

Efecto de la Densidad en el Peso de la Planta.

El Cuadro A.4 muestra el análisis de varianza del peso de la planta entera para los tratamientos, que corresponden a las densidades de 12.5, 8.9 y 6.9 plantas m^{-2} . Se observa, que entre los tratamientos existieron diferencias estadísticas, así como también entre las repeticiones. Esto indica que entre los bloques, el crecimiento del cultivo fue diferente. En el Cuadro 4.3 se muestran los pesos medios de la plantas. Entre los tratamientos de 12.5 y 8.9 plantas m^{-2} no se encontraron diferencias significativas y el peso inferior de 365.83 gr correspondió a la densidad de 6.9 plantas m^{-2} . Estos resultados muestran que el peso promedio a nivel planta, se incrementa al incrementar la densidad de plantas, debido a una mayor altura y peso del follaje por la planta (Cuadro 4.3) lo que resulta en una mayor producción de biomasa. El incremento en altura y el mayor peso de follaje en los tratamientos de altas densidades de población fue resultado de una mayor competencia por la absorción de la radiación.

Efecto de la densidad de Plantas en el Peso del Follaje.

El peso de follaje es considerado como el peso de las hojas sin tallo y sin mazorca. en el Cuadro A.5 se muestra el análisis de varianza del efecto de los tratamientos en el peso del follaje a nivel planta. Se observa, al igual que en el peso de la planta que existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos y entre las repeticiones. Los pesos obtenidos fueron de 295.6, 293.3 y 272.3 gramos (Cuadro 4.3) y estos corresponden a las densidades de 12.5, 8.9 y 6.9 plantas m^{-2} . En las densidades de 12.5 y 8.9 plantas m^{-2} no existieron diferencias estadísticas y corresponden a los pesos más altos; el menor peso de follaje obtenido de 272.3 fue en la densidad de 6.9 plantas m^{-2} .

Efecto de la Densidad de Plantas en el Rendimiento de Grano.

El análisis de varianza para la producción de grano, se presenta en el Cuadro A.6 se muestra que existió diferencia estadística entre los tratamientos y en el Cuadro 4.3 se presentan los rendimientos medios de los tratamientos; el mejor rendimiento obtenido de 2766.5 kilogramos por hectárea correspondió a la densidad de 12.5 plantas m^{-2} , el análisis de comparación de medias mostró que para los tratamientos de 8.9 y 6.9 plantas m^{-2} no se encontraron diferencias estadísticas, los rendimientos fueron de 1322.5 y 1067.7 $kg\ ha^{-1}$. Los bajos rendimientos, se debieron principalmente a que en la etapa de llenado del grano, se presentó una baja temperatura que provocó que las plantas fueran secadas en forma parcial, por lo que no se obtuvieron los rendimientos normales esperados.

De acuerdo a los resultados de las variables analizadas, se puede mencionar que la variedad utilizada responde favorablemente al ser establecida en poblaciones mayores a las tradicionalmente establecidas de 6 plantas m^{-2} . Westgate et al., (1997) encontraron que al incrementar la densidad de población se induce un efecto positivo en la producción de grano en híbridos con alta capacidad de convertir PAR interceptada a biomasa. Estos fueron sembrados en poblaciones mayores a las comúnmente usadas en la franja maicera del Norte de los Estados Unidos. Los autores concluyen que en híbridos propensos a la esterilidad o con baja eficiencia de conversión de PAR a biomasa, no mejoran su producción.

Relación entre el Desarrollo, Rendimiento y la Absortancia de la Radiación en el Ciclo Primavera - Verano del 2000.

Índices de Reflexión y Absorción Solar por el Cultivo.

El Cuadro 4.4 muestra los índices de reflexión y absorción a la radiación solar y fotosintética activa en los tres tratamientos a diferentes días después de siembra y horas del día. Al igual que el ciclo agrícola anterior el índice de absorción para la radiación solar asv es en promedio de 0.75 y el índice de reflexión rsw de 0.25, comparada con la radiación fotosintética activa, esta es más absorbida con un índice de absorción a_{PAR} de 0.93 y reflexión r_{PAR} de 0.07, también se reafirma que al aumentar la densidad de plantas (menor distancia entre plantas), la absorción de la radiación fotosintética activa se incrementa y su reflexión disminuye. Para la radiación solar total la absorción y reflexión se mantienen aproximadamente constantes con respecto a la densidad de plantas, esto se debe a que se utilizó una

misma distancia entre surcos, es decir, para dar las diferentes densidades se varió únicamente la distancia entre plantas y se mantuvo constante la separación entre hileras, de tal forma que la fracción de la superficie de suelo expuesta a la radiación solar total incidente fue aproximadamente igual para los diferentes tratamientos.

Cuadro 4.4. Índices de reflexión y absorción a la radiación solar total y fotosintética activa en los tres tratamientos a diferentes días después de siembra; ciclo Primavera - Verano 2000.

d.d.s	Hora	Tratamiento (m)	Radiación solar		Radiación fotosintética activa	
			r_{sw}	a_{sw}	r_{par}	a_{par}
98	12:00	0.10	0.243	0.757	0.0539	0.9461
		0.15	0.245	0.755	0.0673	0.9327
		0.20	0.254	0.746	0.0736	0.9264
103	11:30	0.10	0.246	0.754	0.0506	0.9494
		0.15	0.229	0.771	0.0636	0.9364
		0.20	0.254	0.746	0.0684	0.9331
105	12:00	0.10	0.250	0.750	0.0569	0.9431
		0.15	0.263	0.737	0.0761	0.9239
		0.20	0.264	0.736	0.0775	0.9225

Índices de Reflectancia Diaria a la Radiación Solar y Fotosintética Activa.

Tratamientos Sin Malla.

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran el comportamiento durante el día de los índices de reflexión a la radiación solar y fotosintética activa, en los tratamientos de 0.1 y 0.2 metros de separación entre plantas, ambos sin malla a los 107 y 113 días después de siembra. En las figuras, se observa que la radiación solar r_{sw} es más reflejada por el cultivo, resultando un índice de reflexión mínimo de 0.24 durante las 13 y 14 horas para la separación entre plantas de 0.1 metros y de 0.26 para el tratamiento de 0.2 metros entre plantas. También se observa, que la reflexión de la radiación en este espectro durante el amanecer y atardecer, se incrementa y se debe

a una mayor inclinación de la incidencia de la radiación a estas horas del día, lo cual induce una mayor dispersión y reflexión de la radiación.

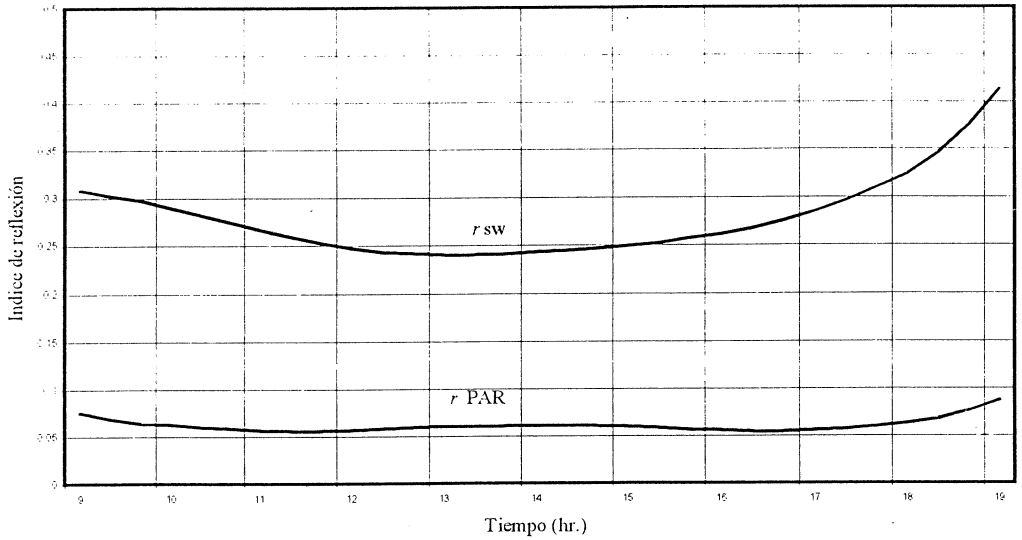


Figura 4.9 Índices de reflexión solar (r_{sw}) y fotosintética activa (r_{PAR}) para la distancia entre plantas de 0.1 metros sin malla, a los 107 días después de siembra.

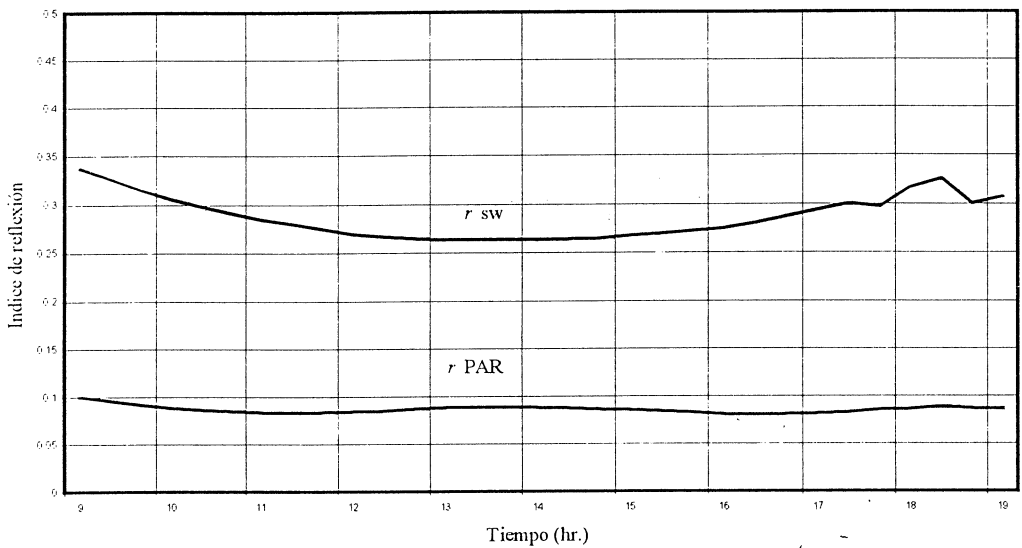


Figura 4.10 Índices de reflexión durante el día a la radiación solar (r_{sw}) y fotosintética activa (r_{PAR}) por el cultivo a una distancia entre plantas de 0.2 metros sin malla; a los 113 días después de siembra

Con respecto a la radiación fotosintética activa, ésta prácticamente se mantiene constante durante las 11 a las 18 horas con un índice de reflexión de 0.06 para las plantas separadas a 0.1 m y 0.08 para las de 0.2 metros. Estos resultados indican, que a mayor densidad de plantas mayor absorción y menor reflectancia a la radiación fotosintética activa.

Tratamientos con Malla.

Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran los índices de reflexión durante el día de la radiación solar (r_{sw}) y fotosintética activa (r_{PAR}), para los tratamientos de 0.1 y 0.2 metros de separación entre plantas con malla. Para la separación entre plantas de 0.1 m el r_{sw} promedio es de aproximadamente 0.27. Se observa, que el índice de reflexión mínimo de 0.24 ocurre durante las 13 y 15 horas, mientras los máximos

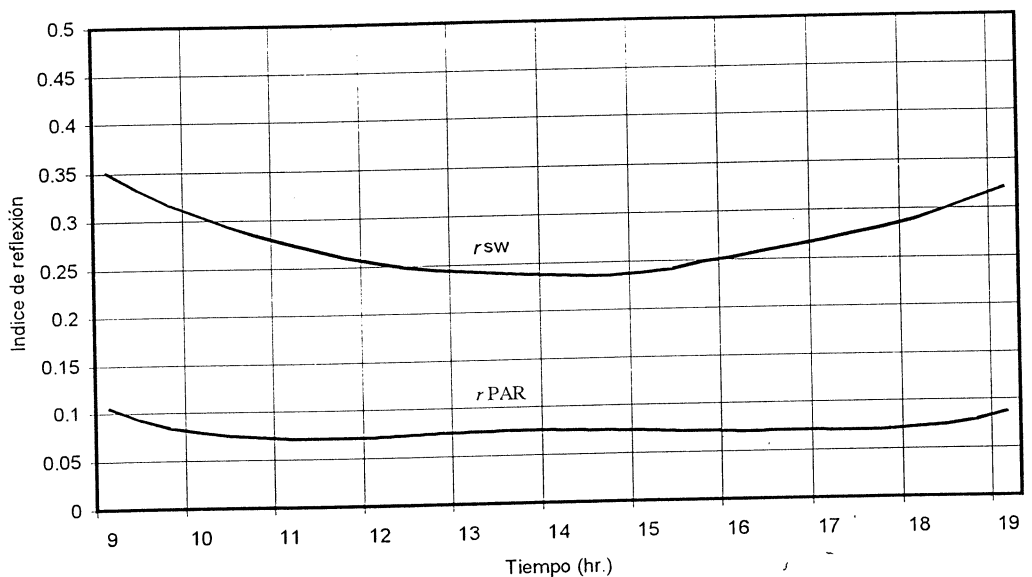


Figura 4.11 Índices de reflexión durante el día a la radiación solar (r_{sw}) y fotosintética activa (r_{PAR}) por el cultivo, a una distancia entre plantas de 0.1 metros con malla; a los 97 días después de siembra.

de 0.35 son alcanzados a las 9:00 y 19:00 horas. Este comportamiento es similar para el tratamiento de 0.2 m de separación entre plantas, más sin embargo, en esta separación el r_{sw} promedio de 0.25 es menor y más estable comparado con el de la separación a 0.1m. Con respecto a la radiación fotosintética activa, ésta tiene un comportamiento más estable durante el día en los dos tratamientos y es ligeramente menor en el tratamiento de 0.1 m con un valor promedio de 0.07 mientras que para la separación de 0.2 m su r_{PAR} es del orden de 0.08. Estos comportamientos diarios de reflexión confirman que la radiación solar, es más reflejada a mayor densidad de población y la radiación fotosintética activa es más absorbida.

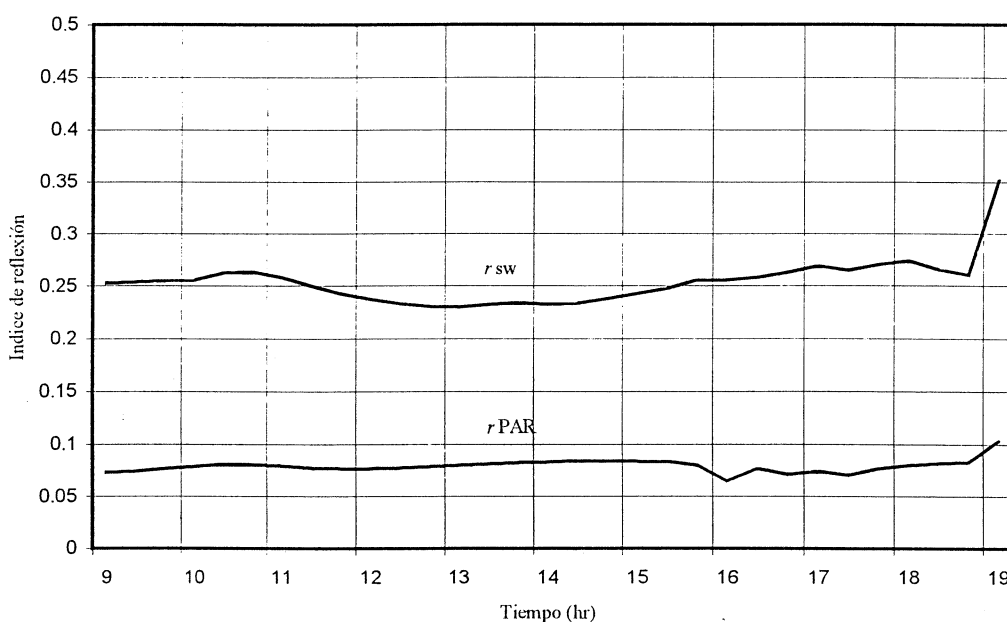


Figura 4.12 Índices de reflexión durante el día a la radiación solar (r_{sw}) y fotosintética activa (r_{PAR}) por el cultivo para la distancia entre plantas de 0.2 metros entre plantas con malla; a los 94 días después de siembra.

Coefficientes de Extinción de Radiación Solar por el Cultivo.

Los coeficientes de extinción a la radiación solar por el dosel del cultivo, fueron obtenidos de acuerdo al modelo $PAR_z = PAR_0 e^{-kZ_r}$. Donde PAR_z es la radiación fotosintética activa a la profundidad relativa (z), PAR_0 es la radiación fotosintética activa incidente sobre el dosel del cultivo, e es la base de logaritmo natural, k es el coeficiente del cultivo y Z_r es la profundidad relativa acumulada.

El Cuadro 4.5 muestra los coeficientes de extinción a la radiación solar por el dosel del cultivo a los 96, 98, 103 y 106 días después de siembra en diferentes horas del día. Así como los coeficientes de determinación (R^2) obtenidos en cada tratamiento. Se observa que los coeficientes de extinción son mayores a menor distancia entre plantas (mayor población) y disminuye conforme la separación aumenta. Este comportamiento es similar con y sin malla. También se muestra que los coeficientes de extinción son menores con la malla, lo que indica una mayor penetración de la radiación solar a los estratos inferiores de la planta, causados por el efecto de la misma. Este incremento de la radiación en los estratos inferiores, puede resultar en un incremento en el intercambio de CO_2 a nivel planta e incrementar la producción de biomasa por unidad de superficie.

La tendencia de estos resultados coinciden con los reportados por (Flenet *et al.*, 1996) donde los coeficientes de extinción mostraron una disminución lineal, cuando el espaciamiento entre hileras se incrementa. Madonni y Otegui, (1996) también encontraron diferentes coeficientes de extinción en diferentes híbridos y concluyó que éstos fueron relacionados al ángulo y área de la hoja.

Cuadro 4.5 Coeficientes de extinción a la radiación solar por el dosel del cultivo a los 96, 98, 103 y 106 días de siembra en diferentes horas del día.

Distancia entre Plantas (m)		Días después de siembra							
		96; 11:30		98; 16:30		103; 10:30		106; 11:30	
		K	R ²	K	R ²	K	R ²	K	R ²
Sin malla	0.2	-0.98	0.94	-0.72	0.96	-1.17	0.94	-0.74	0.8
	0.15	-1.24	0.83	-1.46	0.94	-1.3	0.92	-0.93	0.8
	0.1	-2.38	0.76	-1.7	0.95	-3.25	0.92	-2.46	0.85
Con malla	0.2	-0.33	0.86	-0.55	0.73	-1.0	0.90	-0.67	0.93
	0.15	-0.62	0.93	-0.91	0.98	-1.5	0.91	-0.79	0.96
	0.1	-1.79	0.94	-0.97	0.89	-2.3	0.83	-1.90	0.72

Radiación Solar Neta en los Tratamientos.

Los Cuadros 4.6, 4.7 y 4.8 muestran los índices de de la radiación solar r_{sw} y los valores de radiación neta (R_n) en cada tratamiento a los 98, 103 y 105 días después de siembra. Se observa que en los tratamientos con malla, los índices de reflectividad r_{sw} son mas altos comparados con los tratamientos sin malla. Por lo anterior, los valores de radiación neta presentan un comportamiento inverso, siendo los tratamientos sin malla los que presentan los valores más altos. Esto se debe a que la malla incrementa el índice de reflectividad del sistema suelo cultivo y por lo tanto la radiación neta es menor en estos tratamientos. Existe también una mayor incidencia de radiación solar en la superficie del suelo en los tratamientos con malla, por que ésta favorece la penetración directa de la radiación, lo que induce una mayor temperatura de la superficie y por consiguiente una mayor emisión de radiación de onda larga desde la superficie del suelo, lo cual también reduce el valor de la radiación neta.

Partiendo de la ecuación del balance de energía $R_n = (1-\alpha_s) R_{sw\downarrow} + R_{lw\downarrow} - \varepsilon\sigma T_s^4$. Donde R_n es la radiación neta, $R_{sw\downarrow}$ es la radiación de onda corta que incide en la superficie de la suelo, $R_{lw\downarrow}$ es la radiación de onda larga que incide en la superficie, ε es la emisividad de la superficie, σ constante de Stefan Boltzman, $\alpha_s \approx r_{sw}$ es la reflexión o albedo de la superficie y T_s es la temperatura de la superficie.

Aplicando la ecuación a los tratamientos evaluados; con malla y sin malla, se puede explicar que al establecer la malla en los surcos, ésta incrementa el índice de reflexión del sistema suelo cultivo por ser de color blanco y por lo tanto el balance de la radiación neta disminuye en los tratamientos con malla, como se muestra en los Cuadros 4.6, 4.7 y 4.8.

Cuadro 4.6. Radiación solar neta a los 98 días después de siembra (d.d.s) en los tratamientos con y sin malla.

Tratamiento		d.d.s	hr min	r_{sw}	Rn
Sin malla	0.2	98	12:12	0.254	615.9
	0.15	98	12:06	0.243	595.2
	0.1	98	12:12	0.254	622.6
Con malla	0.2	98	11:42	0.251	559.5
	0.15	98	11:54	0.262	575.6
	0.1	98	11:48	0.261	572.9

Cuadro 4.7. Radiación solar neta a los 103 días después de siembra (d.d.s) en los tratamientos con y sin malla.

Tratamiento		d.d.s	hr min	r_{sw}	Rn
Sin malla	0.2	103	12:03	0.264	582.3
	0.15	103	11:51	0.263	476.1
	0.1	103	11:57	0.250	588.1
Con malla	0.2	103	11:33	0.250	406.4
	0.15	103	11:45	0.275	360.4
	0.1	103	11:39	0.277	369.8

Cuadro 4.8. Radiación solar neta a los 105 días después de siembra (d.d.s) en los tratamientos con y sin malla.

Tratamiento		d.d.s	hr min	rsw	Rn
Sin malla	0.2	105	11:39	0.254	562.4
	0.15	105	11:27	0.229	544.9
	0.1	105	11:33	0.246	563.1
Con malla	0.2	105	11:09	0.251	498.9
	0.15	105	11:21	0.263	514.4
	0.1	105	11:15	0.269	515.2

La ecuación del balance de energía, para una superficie vegetal eliminando los términos menores es:

$$R_n = H + LE + G$$

Donde R_n es la radiación neta en Wm^{-2} , H es el flujo de calor sensible, LE es el flujo de calor latente o evapotranspiración y G es el flujo de calor en la superficie del suelo expresados en Wm^{-2} . De aquí el flujo de calor latente es:

$$LE = (R_n - G) - H$$

Esto nos indica que a medida que decrece la radiación neta, la evapotranspiración disminuye, lo cual sugiere que el uso de la malla puede mejorar la eficiencia del uso de agua, ya que la tasa de evapotranspiración se reduce. También se observa que al incrementar la incidencia de radiación solar hacia la superficie del suelo por efecto de la malla, la temperatura superficial se incrementa y como resultado el flujo de calor (G) hacia el interior del suelo aumenta, lo cual también reduce la tasa de evapotranspiración.

Efecto de la Densidad en el Índice de Área Foliar y Altura de la Planta

El Cuadro 4.9 muestra las medias de: índice de área foliar, altura de la planta, diámetro, peso y longitud de elote y el peso de la planta, ésta expresada en materia seca sin elote, con respecto a los tratamientos de densidad de plantas. El

índice de área foliar, fue medido solo en los tratamientos sin malla, por que la colocación de ésta, no permitía evaluar en los tratamientos con malla. El valor mayor de 1.83 corresponde a la densidad de 11.1 plantas m^{-2} y no existieron diferencias estadísticas entre las densidades de 7.4 y 5.5 plantas m^{-2} con índices de 0.98 y 0.86 respectivamente. Estos resultados son inferiores a los tradicionalmente citados en la literatura y se deben a las características fenotípicas del híbrido utilizado, de un porte pequeño con propósitos de consumo en elote fresco.

Con respecto a la altura de la planta, el Cuadro A.7 presenta el análisis de varianza de los seis tratamientos, los cuales son formados por el factor “a” que corresponden a tres densidades y el factor “b” a la orientación de las hojas; con y sin malla. Se observa que existieron diferencias estadísticas en la densidad de plantas, orientación de las hojas y para la interacción densidad-orientación. Los resultados del coeficiente de determinación 0.98 y variación 2.87 obtenidos, indican que el modelo del diseño experimental utilizado describe adecuadamente la respuesta de las característica estudiada.

El Cuadro 4.9 muestra las medias de la altura de la planta para cada tratamiento, el valor de la altura mayor correspondió a la densidad de 11.1 plantas m^{-2} con un valor de 95.5 centímetros, seguido por 88.8 cm y con menor altura de 79.3 cm que corresponden a las densidades de 7.4 y 5.5 plantas m^{-2} los tres tratamientos son diferentes estadísticamente. De acuerdo a estos resultados, se muestra que el híbrido utilizado tiende a incrementar su altura, al incrementar la densidad de población. Este comportamiento es mencionado por (Westgate *et al.*,

1977) donde al probar altas densidades de población, observó que las hojas evitan la interferencia de luz en forma propia y estimulan el crecimiento de la planta.

Cuadro 4.9. Comparación de medias para el peso, diámetro y longitud de elote, altura y peso de planta sin elote en materia seca.

Plantas m ⁻²	LAI	Altura cm	Diámetro cm.	Peso de elote g	Longitud de elote cm	Peso de planta g
11.1	1.83 a	95.5 a	4.75 a	242.17 a	18.79 a	322.79 a
7.4	0.98 b	88.8 b	4.64 a	239.28 a	18.46 a	366.46 a
5.5	0.86 b	79.3 c	4.63 a	224.87 b	18.16 a	396.79 a
CME	0.0393	6.38	0.005	18.87	0.459	31.61
DMS	0.577	5.2	0.148	8.94	1.39	115

Prueba de Tukey a un nivel de significancia α igual a 0.05

Efecto de la Densidad de Plantas en el Diámetro y Peso del Elote.

El Cuadro A.8 presenta el análisis de varianza del diámetro del elote, en los tratamientos estudiados. Se observa que no existieron diferencias significativas en la densidad, en la interacción densidad-orientación de las hojas, pero si hubo diferencias para la orientación de la hoja. Esto sugiere que la inclinación vertical de la hoja, provocado por la colocación de la malla incremento el diámetro del elote y no por la densidad o la interacción densidad orientación de la hoja. Los resultados del coeficiente de determinación 0.91 y variación 1.54 obtenidos, indican que el modelo del diseño describe adecuadamente la respuesta de esta característica. En el Cuadro 4.9 se muestran los valores medios del diámetro del elote para cada tratamiento, donde se observa que existe la tendencia a incrementar el diámetro al incrementar la densidad de plantas. Sin embargo, las diferencias son estadísticamente iguales.

El Cuadro A.9 presenta el análisis de varianza del peso del elote fresco. Se observa que existen diferencias significativas en la densidad y orientación de la hoja, pero no se encontró diferencia en la interacción densidad-orientación. Esto explica que los efectos de los tratamientos son independientes en esta característica. El peso se incrementa al incrementar densidad, siendo los mejores pesos 242.17 y 239.28 g para las densidades de 11.1 y 7.4 plantas m^{-2} (Cuadro 4.9) el menor peso fue para la densidad de 5.5 plantas m^{-2} . También se observa que hubo un efecto de la repetición en la densidad y la orientación de la hoja, esto indica que los tratamientos tuvieron un efecto por los bloques, pero esta varianza de bloques, es considerada por el diseño y no afecta la interpretación de los resultados. Los coeficientes de determinación de 0.98 y variación 1.84 obtenidos son aceptables estadísticamente.

Efecto de la Densidad de Plantas en la Longitud de Elote y Peso de la Planta.

El Cuadro A.10 y A.11 presentan los análisis de varianza para la longitud de elote y peso de la planta de los tratamientos, se observa que en ambas características de estudio, no existieron diferencias significativas, para la densidad, orientación de la hoja y en la interacción densidad-orientación. En el Cuadro 4.9 se observa que la longitud del elote tiende a incrementarse al aumentar la densidad de plantas. El peso de la planta se incrementa al disminuir la densidad de plantas, esto puede ser explicado por el comportamiento del crecimiento del cultivo, en las bajas densidades no existe competencia por la interferencia propia de la planta para captar luz solar, por lo que el crecimiento es menor y se observó que los diámetros de los tallos son mayores.

Efecto de la Malla en la Altura, Diámetro y Peso del Elote

El Cuadro 4.10 muestra la comparación de medias de las variables de la altura de la planta, diámetro, peso y longitud de elote y peso de la planta con y sin malla. Se observa que la mayor altura de 92.44 cm, corresponde al tratamiento con malla y es estadísticamente diferente al tratamiento sin malla que tiene un valor de 83.3 cm de altura. En el diámetro de elote, se encontraron diferencias en los tratamientos con y sin malla, como se observa en el Cuadro 4.10 y el valor mayor del diámetro 4.72 cm fue para el tratamiento con malla y es estadísticamente diferente al tratamiento sin malla. El peso del elote, también se ve incrementado por la malla (Cuadro 4.10) donde se muestra que el mayor peso de 241.96 g corresponde al tratamiento con malla y es estadísticamente diferente al tratamiento sin malla que tiene un valor de 228.92g.

Estos resultados muestran que la aplicación de la malla para orientar en forma vertical las hojas del cultivo, tuvo un efecto positivo en estas variables, lo que indica que la malla favoreció a una mayor penetración de radiación hacia las hojas inferiores del cultivo, como lo demuestran los coeficientes de extinción a la radiación solar obtenidos en los tratamientos con malla. Esta mayor penetración determina el total de intercepción de luz, el cual afecta fotosíntesis, transpiración y acumulación de materia seca como lo indican (Pearce *et al.*, 1967; Lieth y Reynolds, 1984).

Cuadro 4.10. Comparación de medias para el subtratamiento con y sin malla, para el peso, diámetro y longitud de elote, altura y peso de planta entera.

Subtratamiento	Altura cm	Diámetro de elote cm	Peso de elote g	Longitud de elote cm	Peso de planta g
Con malla	92.44 a	4.72 a	241.96 a	18.61 a	371.6 a
Sin malla	83.33 b	4.62 b	228.92 b	18.29 a	352.4 a
CME	6.38	0.0052	18.8	0.459	3161
DMS	3.30	0.094	5.68	1.39	115

Prueba de Tukey a un nivel de significancia α igual a 0.05

Efecto de la Malla en la longitud de Elote y Peso de la Planta.

En los Cuadros A.10 y A.11 se presentan los análisis de varianza para la longitud de elote y peso de planta, se indica que no existieron diferencias estadísticas para ambas variables. En el Cuadro 4.10 se presentan las comparaciones de medias con respecto a el efecto con y sin malla, se muestra que para ambas no existieron diferencias. Sin embargo, al igual que las variables de diámetro y peso de elote, estas tienden a incrementar su valor con el uso de la malla y por consiguiente incrementar la producción.

CONCLUSIONES

La radiación solar total (sw) es absorbida por el cultivo de maíz, en una fracción de 0.75, mientras que la radiación fotosintética activa lo es en el orden de 0.95, esto se debe principalmente a que en el espectro de la radiación solar, existe una muy baja absorción entre las longitudes de onda de 0.7 a 1.2 μm que minimiza la entrada de energía a la hoja, mientras que en la radiación fotosintética activa, ésta es fuertemente absorbida principalmente por los pigmentos fotosintéticos.

Al incrementar las densidades de población en los dos ciclos agrícolas estudiados, se incrementa ligeramente la absorción a la radiación fotosintética activa. Lo contrario en la banda de la radiación solar que existe una tendencia a disminuir la absorción, cuando se incrementa la densidad de plantas. Lo cual se debe a una mayor reflectancia por las plantas en la banda cercana al infrarrojo.

La absorción de la radiación solar por el cultivo, es mayor durante las 13:00 y 15:00 horas y se debe a que en estas horas del día, la incidencia de la radiación solar, es más cercana a la vertical. Durante el amanecer y atardecer la absorción tiende a decrecer debido a los bajos ángulos solares de la radiación y aquí, las longitudes de onda de 0.38 a 0.7 μm son más dispersadas, por lo tanto, la absorción decrece.

El comportamiento de la radiación fotosintética activa es más estable durante el día, sin embargo, también es afectado por los ángulos de incidencia de la radiación en el cultivo durante el amanecer y atardecer.

La temperatura del aire en el perfil del cultivo, para el tratamiento de separación entre surcos de 0.9 m, es mayor cercano a la superficie del suelo y disminuye con la altura. Este proceso es causado por una mayor incidencia de la radiación solar en esta separación entre surcos. Por el contrario en la separación de 0.5 m donde la temperatura es menor cerca de la superficie del suelo, causado por una menor radiación hacia los estratos inferiores y una menor transferencia de calor por convección debido a la rugosidad del sistema cultivo-suelo.

Las variables de respuesta del cultivo como el índice de área foliar, altura, peso y rendimiento de la variedad Cafime en el ciclo Primavera-Verano de 1999, se ven incrementadas al incrementar la densidad de plantas. Esto sugiere que la variedad utilizada, pudiera ser establecida en densidades de población más altas que la tradicionalmente utilizada de seis plantas por metro cuadrado.

Los valores de los coeficientes de extinción, son más altos al incrementar la densidad de plantas con y sin malla, pero éstos son mayores en los tratamientos sin malla, lo cual indica que el uso de la malla, favoreció la penetración de la radiación solar a los estratos inferiores del cultivo, resultando en una mayor fijación de CO_2 a

nivel planta, que se manifestó con un mayor diámetro y peso de elote en los tratamientos con malla.

Los índices de reflectividad a la radiación solar, son más altos en los tratamientos con malla, resultando en valores menores de radiación neta. Esto se debe, a que la malla por ser de color blanco, incrementa el índice de reflectividad del sistema suelo cultivo.

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo fueron analizar el efecto de diferentes densidades de población y la orientación del follaje del cultivo de maíz, en la absorción, reflectancia de la radiación solar total y fotosintética activa, así como su relación con el desarrollo y rendimiento del cultivo.

El trabajo fue desarrollado en dos ciclos; Primavera-Verano de 1999 y 2000. El primer ciclo fue establecido en el campo experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ubicado en el ejido Emiliano Zapata, Municipio de Arteaga Coahuila. El segundo ciclo fue establecido en el Rancho denominado "Cerro del Agua" ubicado en el kilómetro 154 de la carretera Saltillo – Matehuala.

En el primer ciclo, se estableció la variedad Cafime, bajo un diseño de bloques al azar con tres densidades de población 6.9, 8.9 y 12.5 plantas m^{-2} y seis repeticiones. En el segundo ciclo se estableció el híbrido "Prime Time", en un arreglo factorial tres por dos, bajo un diseño de bloques al azar con arreglo en franjas y tres repeticiones. Como factor "a" fueron tres densidades de población 5.5, 7.4, 11.1 plantas m^{-2} y como factor "b" en permitir un desarrollo normal de la hoja y un desarrollo con orientación

vertical forzado, esto se logro con una malla agrícola colocada en los lados laterales de los surcos a los 74 días después de siembra.

Los riegos para el primer ciclo fueron aplicados con un sistema de aspersión y en el segundo ciclo se utilizó un sistema de riego localizado utilizando cintilla T-Tape; en ambos ciclos el agua fue aplicada en forma oportuna y simultanea a los tratamientos. El control de plagas y enfermedades fue mediante la aplicación de agroquímicos de tal manera que los rendimientos no se vieron afectados por ambos factores.

La radiación solar total y fotosintética activa incidente y reflejada por el cultivo, fueron medidas con dos piranómetros de silicón y dos sensores quantum. Los sensores fueron conectados a un datalogger CR7 de la Campbell Sci. Inc. Los índices de reflexión (r), fueron obtenidos al dividir la radiación reflejada entre la radiación incidente y el índice absorción (a) de restar a la unidad el índice de reflexión.

La temperatura del aire en el perfil del cultivo, fue medida con cuatro termopares de Chromel-Constantino de 76 μm de diámetro a las profundidades de 0.07, 0.57, 1.07 y 2.0 metros y el balance de radiación neta con un radiómetro neto en cada tratamiento. La penetración de la radiación, se midió con una barra ligera modelo apogee instruments, de 10 sensores y 70 cm de longitud. Las profundidades relativas en las que se midió la radiación fotosintética activa fueron 0.15, 0.33, 0.66 y 0.96 con respecto a la altura de la planta y en la parte superior del dosel.

Los coeficientes de extinción por el cultivo para cada tratamiento, fueron obtenidos partiendo de la ecuación de Lambert Beer $PAR_z = PAR_0 e^{-Kz}$. Donde PAR_z es la radiación fotosintética a la profundidad "z", PAR_0 es la radiación incidente arriba del dosel, K es el coeficiente de extinción de la radiación solar por el cultivo, Zr es la profundidad relativa a la que fue tomada la lectura de la radiación fotosintética y e es la base de los logaritmos naturales. En esta ecuación, no se consideró el índice de área foliar acumulado, como lo hace la ecuación de Beer. Fue considerado la profundidad acumulada con respecto al cultivo, partiendo de la parte superior.

Los resultados obtenidos indican que la radiación solar total (sw) por el cultivo de maíz, es absorbida en una fracción de 0.75, mientras que la radiación fotosintética activa es del orden de 0.95, esto se debe principalmente a que en el espectro de la radiación solar, existe una muy baja absorción entre las longitudes de onda de 0.7 a 1.2 μm . Al incrementar las densidades de población se observó que se incrementa ligeramente la absorción a la radiación fotosintética activa. Lo contrario en la banda de la radiación solar que existe una tendencia a disminuir la absorción, cuando se incrementa la densidad de plantas.

La absorción de la radiación solar por el cultivo, es mayor durante las 13:00 y 15:00 horas y se debe a que en estas horas del día, la incidencia de la radiación solar, es más cercana a la vertical. Durante el amanecer y atardecer la absorción tiende a decrecer debido a los bajos ángulos solares de la radiación y aquí, las longitudes de onda de 0.38 y 0.7 μm son más dispersadas, por lo tanto, la absorción decrece.

La temperatura del aire en el perfil del cultivo, para el tratamiento de separación entre surcos de 90 cm, es mayor cercano a la superficie del suelo y disminuye con la altura. Este proceso es causado por una mayor incidencia de la radiación solar en esta separación entre surcos. Por el contrario en la separación de 50 cm donde la temperatura es menor cerca de la superficie del suelo, causado por una menor radiación hacia los estratos inferiores y una menor transferencia de calor por convección debido a la rugosidad del sistema cultivo-suelo.

Los coeficientes de extinción, muestran valores mayores a mayor densidad de plantas con y sin malla. Pero sus valores son mayores en los tratamientos sin malla, lo cual indica que el uso de la malla favoreció la penetración de la radiación solar a los estratos inferiores del cultivo, resultando en una mayor fijación de CO_2 a nivel planta, lo cual se manifestó con un mayor diámetro y peso de elote en los tratamientos con malla.

Los índices de reflectividad a la radiación solar, son más altos en los tratamientos con malla, resultando en valores menores de radiación neta. Esto se debe a que la malla por ser de color blanco, incrementa el índice de reflectividad del sistema suelo cultivo.

Las variables de respuesta del cultivo como el índice de área foliar, altura, peso y rendimiento de la planta en la variedad Cafime, se ven incrementadas al incrementar la densidad de plantas. Esto sugiere que la variedad utilizada, pudiera ser establecida en

densidades de población más altas que la tradicionalmente utilizada de seis plantas por metro cuadrado.

LITERATURA CITADA

- Andrade, F.H., S.A. Uhart, G.G. Arguissain, and R. A. Ruiz. 1992. Radiation use efficiency of maize grown in a cool area. *Field Crops Res.* 28:345-354.
- Andrade, F.H., S. A. Uhart, and I. M. Frugone. 1993. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: Shade versus Plant density effects. *Crop Science.* 33: 482-485.
- Cirilo, A.G., and F.H. Andrade. 1996 Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Science Society of America.* 36: 325-331.
- Daughtry, C.S.T., K.P. Gallo, and M.E. Bauer. 1983. Spectral estimates of solar radiation intercepted by corn canopies. *Agron. J.* 72:527-531.
- Donald, C.M. 1968. The breeding of crop ideotypes. *Euphytica* 17: 385-403.
- Dewit, C.T. 1967. Photosynthesis: Its relation to evaporation .p. 315-320. In A.S. Pietro et al. (ed.) *Harvesting the sun.* Academic Press. New York.
- Duncan, W.G., D.L. Shaver, and W.A. Williams. 1973. Insolation and temperature effects on maize growth and yield. *Crop Sci.* 13:187-191.
- Duncan, W.G. 1984. A theory to explain the relationship between corn population and grain yield. *Crop Sci.* 24:1141-1145.
- Duncan, W.G. 1975. Maize. In: *Crop physiology*, pp. 23-50, Evans, L.T., ed. Cambridge University Press, London.
- Eastin, J.A. 1969. Leaf position and leaf function in corn. P. 81-89. In. J.I. Sutherland and R.J. Falasea (ed.) *Proc. 24th Ann. Corn and Sorghum Res. Conf. Am. Seed Trade Assoc., Washington, DC.*
- Edmeades, G.O., and T.B. Daynard. 1979. The relationship between final yield and photosynthesis at flowering in individual maize plants. *Can. J. Plant Sci.* 59:585-601.

- Flenet, F., J.R. Kiniry, J.E. Board, M.E. Westgate, and D.C. Reicosky. 1996. Row spacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean and sunflower. *American Society of Agronomy*. 88: 185-190.
- Gallageher, J.N., and P.V. Biscoe. 1978. Radiación absorción, growth and yield of cereales. *J. Agric. Sci. Camb.* 91:47-60.
- Gallo, K.P, and C.S.T Daughtry. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Agronomy Journal*. 78: 752-756 (1986).
- Gardner, F.P., R.B. Pearce, and R.L. Mitchell. 1985. *Physiology of crop plants*. Iowa State University, Ames.
- García, E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. Cuarta edición. U.N.A.M., México, D.F.
- Girardin, P., and M. Tollenaar. 1994. Effects of interference on maize leaf azimuth. *Crop. Science Society of America*. 34: 151-154.
- Hashemi-Dezfouli, A. and S. J. Herbert. 1992. Intensifying plant density response of corn with artificial shade. *Agronomy Journal* 84: 547-555.
- Hunter, R.B. 1980. Increased leaf area (source) and yield of maize in short season areas. *Crop. Sci.* 20: 571-574.
- Hunter, R.B. 1977. Growing corn and sorghum in short-season areas p. 58-71. In H.J. London and D. Wilkins (ed.) *Proc. 32nd Annu. Corn and sorghum Res. Conf. Am. Seed Trade Assoc., Washington, DC.*
- James, R. K., and D. P. Knivel .1995. Response of maize seed number to solar radiation intercepted soon after anthesis. *Agronomy Journal* 87: 228-234.
- Jones, G. H. 1992. *Plants and microclimate. A quantitative approach to environmental plant physiology*. Second edition. Cambridge University press
- Karlen, D.L. and C.R. Camp. 1985. Row spacing, plant population, and water management effects on corn in the Atlantic Coastal Plain. *Agron. J.* 77: 711-715.
- Lieth, J. H. and J. F. Reynolds, 1984. A model of canopy irradiance in relation to changing leaf area in a phytotron-grown snap bean (*Phaseolus vulgaris* L.) *Crop Int. J. Biometeor* 25:61-71.

- Loomis, R. S. and W. A. Williams, 1969. Productivity and the morphology of crop stands: patterns and leaves. p. 28-45. In J.D. Eastin, F.A. Haskins, C.Y. Sullivan, and C.H.M. van Bavel (ed) Physiological aspects of crop yield. CSSA and ASA. Madison, WI.
- Maddonni, G.A. and M.E. Otegui. 1996. Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research*. 48: 1, 81-87.
- Martin, P.N., Gent. 1995. Canopy light interception, gas exchange, and biomass in reduced height isolines of winter wheat. *Crop. Sci.* 35:1636-1642.
- Moss, D. N. 1964. Optimum lighting of leaves. *Crop. Sci.* 4:131-136.
- Monsi, M. and T. Saeki. 1953. Über den lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*. 14: 22-52.
- Muchow, R.C., T.R. Sinclair, T.R., and J.M. Bennett. 1990. Temperature and solar radiation effects on potential maize yield across locations. *Agron. J.* 82:338-343
- Mock, J.J. and R.B. Pearce, 1975. An ideotype of maize. *Euphytica* 24:613-623.
- Nobel, P.S 1991. Physicochemical and environmental plant physiology. Academic Press, Inc. Pag. 345 – 392.
- Otegui, M. E., M. G. Nicolini., R. A. Ruiz., and P. A. Dodds. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agronomy Journal*. 87:29-33.
- Pearce, R. B., R.H. Brown, and R. E. Blaser. 1967. Photosynthesis in plant communities as influenced by leaf angle. *Crop Sci.* 7:321-324.
- Pearce, R.B., R.H. Brown, and R.E. Blaser. 1965. Relationship between leaf area index, light interception and net photosynthesis in orchard grass. *Crop Sci.* 5:553-556.
- Pendleton, J.W., J.J. Hammond. 1969. Relative photosynthetic potential for grain yield of various leaf canopy levels of corn. *Agronomy Journal*. 61:911-913.
- Pepper, G.E. 1974. The effect of leaf orientation and plant density on the yield of maize (*Zea mays* L.). Ph.D.Thesis (Diss. Abst. 75-10,500) Iowa State University, Ames.

- Roderick, H. 1981. Plant growth analysis. The Institute of Biology's. Studies in Biology no. 96. University of Sheffield.
- Ruget, F. 1989. Relations entre matiere seche a la floraison et rendement en grains chez le maïs: Importance du rayonnement disponible par plante. *Agronomie (Paris)* 9:457-465.
- Russell, G., B. Marshal. and P. G. Jarvis.1989. Plant Canopies: Their growth, form and function. Cambridge University Press. Cambridge, England.
- Shannon, J. C., D. P., Knieval, C.D. Boyer, 1986. Regulation of carbon and nitrogen reduction and utilization in maize. (Symposium Proceedings). Pp 1-372. American Society of Plants Physiologists, Rockville, Md.
- Shaver, D.L. 1983. Genetics and breeding of maize with extra leaves above the ears. *Proc. Annu. Corn Sorghum Res. Conf.* 38:161-180.
- Varlet-Grancher C., R. Bonhomme, M.Chartier, and P. Artis, 1982. Efficiency de la conversion de l'énergie solaire par un couvert végétal. *Acta Oecologia Oecol. Plant* 3(17), 3-26.
- Westgate. M.E., F. Forcella., D.C Reicosky., and J.Somsen. 1997. Rapid canopy closure for maize production in the northern US corn belt: Radiation-use efficiency and grain yield. *Field Crops Research.* 49: 2-3, 249-258.
- Whigham, D.K. and D.G. Woolley .1974. Effect of leaf orientation, leaf area, and plant densities on corn production. *Agronomy Journal*, 66: July-August, 482-486.
- Williams, W.A., R.S. Loomis, W.G. Duncan, A. Dovrat and F. Nuñez 1968. Canopy architecture at various population densities and the growth and grain yield of corn. *Crop Sci.* 8: 303-308.

APENDICE

Cuadro A.1 Análisis de varianza del índice de área foliar de plantas de maíz bajo tres densidades de población; ciclo Primavera - Verano 1999.

Fuente	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	5	0.4600	0.09201	0.31	0.8951 N.S
Tratamientos	2	15.3481	7.67406	25.98	0.0001 **
Error	10	2.9544	0.2954		
Total	17	18.762			
		R ²	C.V	Raíz CM	Media
		0.84	16.77	0.543	3.24

Cuadro A.2 Análisis de varianza para la altura de la planta; ciclo Primavera - Verano 1999.

Fuente	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	5	0.108	0.02160	1.36	0.3152 N. S
Tratamientos	2	0.0217	0.01086	0.69	0.5255 N. S
Error	10	0.1582	0.01582		
Total	17	0.288			
		R ²	C.V	Raíz CM	Media
		0.45	7.79	0.1258	1.61

Cuadro A.3 Análisis de varianza para la altura a la primera mazorca; ciclo Primavera - Verano 1999.

Fuente	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	5	224.66	44.93	0.55	0.7345 N.S
Tratamientos	2	243.0	121.50	1.49	0.271 N.S
Error	10	814.33	81.43		
Total	17	1282			
		R ²	C.V	Raíz CM	Media
		0.36	10.13	9.02	89

Cuadro A.4 Análisis de varianza para peso de la planta entera en fresco; ciclo Primavera - Verano 1999.

Fuente	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	5	10690.27	2138.05	13.6	0.0003 **
Tratamientos	2	2877.77	1438.88	9015	0.0055 **
Error	10	1572.22	157.22		
Total	17	15140.27			
		R ²	C.V	Raíz CM	Media
		0.89	3.26	12.53	383.61

Cuadro A.5 Análisis de varianza para peso del follaje en fresco; ciclo Primavera-Verano 1999.

Fuente	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	5	9291.11	1858.22	13.54	0.0003 **
Tratamientos	2	1981.77	990.88	7.22	0.0115 **
Error	10	1372.88	137.28		
Total	17	12645			
		R²	C.V	Raíz CM	Media
		0.89	4.08	11.71	287.11

Cuadro A.6 Análisis de varianza para la producción de grano kg ha⁻¹; ciclo Primavera - Verano 1999.

Fuente	GL	SC	CM	F	Pr > F
Repetición	5	330433.7	66086.75	1.13	0.4039 N.S
Tratamientos	2	10072221.4	5036110.72	86.28	0.0001 **
Error	10	583686.55	58368.65		
Total	17	10986341.7			
		R²	C.V	Raíz CM	Media
		0.94	14.05	241.59	1718.88

Cuadro A.7 Análisis de varianza para la altura de la planta; ciclo Primavera - Verano 2000.

Fuente	GL	S.C	C.M	F	Pr > F
Repetición	2	260.77	130.38	20.41	0.008 **
FA (densidad)	2	792.11	396.05	61.99	0.001 **
Repetición * FA	4	70.88	17.72	2.77	0.173 N.S
FB (orientación)	1	373.55	373.55	58.47	0.001 **
Repetición * FB	2	103.44	51.72	8.10	0.039 **
FA * FB	2	93.44	46.72	7.31	0.046 *
Error	4	25.55	6.38		
Total	17	1719.77			
		R²	C.V	Raíz CM	Media
		0.98	2.87	2.527	87.88

Cuadro A.8 Análisis de varianza para el diámetro de elote; ciclo Primavera - Verano 2000.

Fuente	GL	S.C	C.M	F	Pr > F
Repetición	2	0.0508	0.0254	4.89	0.0843 N.S
FA (densidad)	2	0.0516	0.0258	4.96	0.0825 N.S
Repetición * FA	4	0.0508	0.0127	2.44	0.2040 N.S
FB (orientación)	1	0.0490	0.0490	9.43	0.0373 **
Repetición * FB	2	0.0252	0.0126	2.43	0.2040 N.S
FA * FB	2	0.002	0.001	0.19	0.8316 N.S
Error	4	0.0208	0.0052		
Total	17	0.250			
		R²	C.V	Raíz CM	Media
		0.91	1.54	0.072	4.67

Cuadro A.9 Análisis de varianza para peso de elote fresco; ciclo Primavera - Verano 2000.

Fuente	GL	S.C	C.M	F	Pr > F
Repetición	2	1317.09	658.54	34.89	0.0029 **
FA (densidad)	2	1030.81	515.40	27.30	0.0047 **
Repetición * FA	4	875.61	218.9	11.60	0.0179 **
FB (orientación)	1	764.92	764.92	40.52	0.0031 **
Repetición * FB	2	338.03	169.01	8.95	0.0333 **
FA * FB	2	22.28	11.14	0.59	0.5962 N.S
Error	4	75.50	18.87		
Total	17	4424.27			
		R²	C.V	Raíz CM	Media
		0.98	1.845	4.34	235.44

Cuadro A.10 Análisis de varianza para longitud de mazorca; ciclo Primavera Verano 2000.

Fuente	GL	S.C	C.M	F	Pr > F
Repetición	2	0.580	0.2901	0.63	0.5778 N.S
FA (densidad)	2	1.191	0.5956	1.30	0.3682 N.S
Repetición * FA	4	1.192	0.2980	0.65	0.6575 N.S
FB (orientación)	1	0.561	0.5618	1.22	0.3309 N.S
Repetición * FB	2	1.1666	0.583	1.27	0.3743 N.S
FA * FB	2	0.252	0.1260	0.27	0.7733 N.S
Error	4	1.8385	0.4596		
Total	17	6.782			
		R²	C.V	Raíz CM	Media
		0.7	3.66	0.677	18.47

Cuadro A.11 Análisis de varianza para el peso de la planta entera en materia seca; ciclo Primavera - Verano 2000.

Fuente	GL	S.C	C.M	F	Pr > F	
Repetición	2	11479.39	5739.69	1.82	0.2747	N.S
FA (densidad)	2	16606.38	8303.19	2.63	0.1869	N.S
Repetición * FA	4	1868.66	467.16	0.15	0.9545	N.S
FB (orientación)	1	1656.193	1656.19	0.52	0.5092	N.S
Repetición * FB	2	3782.98	1891.49	0.60	0.5925	N.S
FA * FB	2	4990.57	2495.27	0.79	0.5141	N.S
Error	4	12644.91	3161.228			
Total	17	53029.09				
		R²	C.V	Raíz CM	Media	
		0.76	15.53	56.22	362.01	