

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**EFFECTO DE LA DENSIDAD DE POBLACIONAL SOBRE EL CRECIMIENTO,
DESARROLLO Y RENDIMIENTO DE MAÍZ PARA GRANO SECO (*ZEA MAYS L.*)
EN CHILE**

POR

MARIO ANTONIO PARRA TORO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN PARA
OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE
2024**

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EFFECTO DE LA DENSIDAD DE POBLACIONAL SOBRE EL CRECIMIENTO,
DESARROLLO Y RENDIMIENTO DE MAÍZ PARA GRANO SECO (*ZEA MAYS*
L.) EN CHILE**

POR

MARIO ANTONIO PARRA TORO

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CHILLÁN – CHILE
2024

Aprobada por:

Profesor Asistente, Abdelhalim Khaled E.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

Guía

Profesor Asistente, Miguel Garriga C.
Biólogo, Dr. Cs.

Asesor

Profesor Asociado, Nelson Zapata S. M.
Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

Asesor

Profesor Asociado, Guillermo Wells M.
Ing. Agrónomo, Mg. Cs.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Objetivo.....	8
Desarrollo de la monografía.....	8
Efecto de factores de manejo y ambientales en la producción de maíz.....	8
Efecto de la densidad de plantación en la morfología y el desarrollo de la planta.....	9
Efecto de la densidad de plantación en el rendimiento y sus componentes.....	12
Conclusiones.....	14
Referencias.....	15

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

	Página
Tabla 1 Taxonomía del maíz.....	3
Tabla 2 Principales regiones productoras de maíz en Chile en la temporada 2021 - 2022.....	5
Tabla 3 Clasificación del rendimiento del maíz según el ciclo de crecimiento (clasificación FAO)	6
Figura 1 Producción mundial de maíz en los últimos 10 años.....	4

EFFECTO DE LA DENSIDAD DE POBLACIONAL SOBRE EL CRECIMIENTO, DESARROLLO Y RENDIMIENTO DE MAÍZ PARA GRANO SECO (*ZEAMAYS L.*) EN CHILE

EFFECT OF POPULATION DENSITY ON THE GROWTH, DEVELOPMENT, AND YIELD OF DRY GRAIN MAIZE (*ZEAMAYS L.*) IN CHILE.

Palabras claves: Densidad de siembra, número de granos, peso de granos, potencial genético, rendimiento de granos.

RESUMEN

El maíz es una gramínea originaria de Mesoamérica. En Chile, la mayoría de la superficie de maíz (75 %) se destina a la alimentación animal y una menor cantidad al consumo humano. En la producción de esta gramínea, es fundamental determinar la densidad de plantación óptima para cada genotipo en las distintas regiones productoras del país. Aunque un incremento en la densidad puede aumentar el rendimiento de forma cuadrática, este se verá reducido si se supera la densidad óptima, lo que resultará en un menor número de granos por mazorca y menor peso de estos. Asimismo, el impacto de la densidad en el rendimiento también está condicionado por el potencial genético del material utilizado. En consecuencia, es necesario establecer una densidad de siembra óptima que permita maximizar la utilización de los recursos disponibles y obtener el máximo rendimiento por unidad de área al coordinar la densidad de población y el desarrollo individual de las plantas. Con este fin, el objetivo de esta monografía es investigar acerca del efecto de la densidad de siembra sobre la morfología y la productividad del cultivo de maíz.

SUMMARY

Corn is a grass native to Mesoamerica. In Chile, most of the corn area (75 %) is used for animal feed, with a smaller amount for human consumption. In the production of this grass, it is essential to determine the optimal planting density for each genotype in the different producing regions of the country. Although an increase in density can quadratically increase yield, it will be reduced if the optimal density is exceeded, resulting in fewer grains per ear and lower grain

weight. Additionally, the impact of density on yield is also conditioned by the genetic potential of the material used. Consequently, it is necessary to establish an optimal planting density that maximizes the use of available resources and achieves the maximum yield per unit area by coordinating population density and individual plant development. To this end, the objective of this monograph is to investigate the effect of planting density on the morphology and productivity of corn crops.

INTRODUCCIÓN

Importancia del maíz

El maíz es un cultivo de enorme importancia económica y alimentaria y uno de los cereales más cultivados en el mundo, junto al arroz y el trigo (Chura *et al.*, 2019). Está presente en aproximadamente 135 naciones y se utiliza principalmente como grano seco. Sin embargo, en algunos países como Chile se utiliza como grano blando (Chang *et al.*, 2018). Además de su versatilidad, el maíz muestra una gran adaptabilidad y desarrollo frente a diversas condiciones agroclimáticas. Su utilidad como fuente de alimentación abarca tanto a los seres humanos, animales y la acuicultura. Asimismo, se utiliza en plantas industriales para la producción de almidón, proteínas, aceites, edulcorantes alimentarios, bebidas alcohólicas y combustible. También se emplea como forraje en la alimentación de ganado destinado a la producción de carne y leche (Chamba *et al.*, 2017). El maíz no solo es un componente necesario en la dieta humana, sino que también es un alimento ideal para el ganado, como vacas, cerdos y pollos, que proporciona carne y leche en las producciones ganaderas. A pesar de que su aporte a los biocombustibles es limitado, desempeña un papel significativo en su desarrollo. No obstante, este uso ha generado preocupaciones sobre la seguridad alimentaria debido a la disminución de la oferta de alimentos para consumo humano y animal (Contreras *et al.*, 2019).

Origen y distribución del maíz

A pesar de los debates que han surgido en la comunidad científica acerca del lugar de origen del cultivo de maíz, numerosas investigaciones respaldan a México como el centro de origen de esta especie. Hace aproximadamente 7.000

años, se produjo una mutación a partir de la especie conocida como teoclinte o teosinte (*Zea mays* ssp. *parviglumis*), la cual todavía se cultiva en México, especialmente, en las cuencas del río Balsas, y que dio origen al maíz moderno. Este concepto del centro de origen fue consolidado por el destacado genetista Nikolai Vavilov (Chérrez, 2015; Loza, 2017).

El maíz pertenece a la familia de las gramíneas y tribu maideas, la que engloba tres géneros de origen americano: *Zea*, *Tipsacum* y *Euchlaena*. Estos últimos géneros tienen una relevancia significativa debido a su relación filogenética con el género *Zea* (Anchundia, 2015; Tabla 1).

Tabla 1. Taxonomía del maíz.

Taxonomía	Categoría
Reino:	Vegetal
División:	Tracheophyta
Clase:	Angiosperma
Orden:	Graminales
Familia:	Gramineae
Género:	<i>Zea</i>
Especie:	<i>Mays</i> L.

Fuente: Adaptado de Anchundia (2015) y Chérrez (2015).

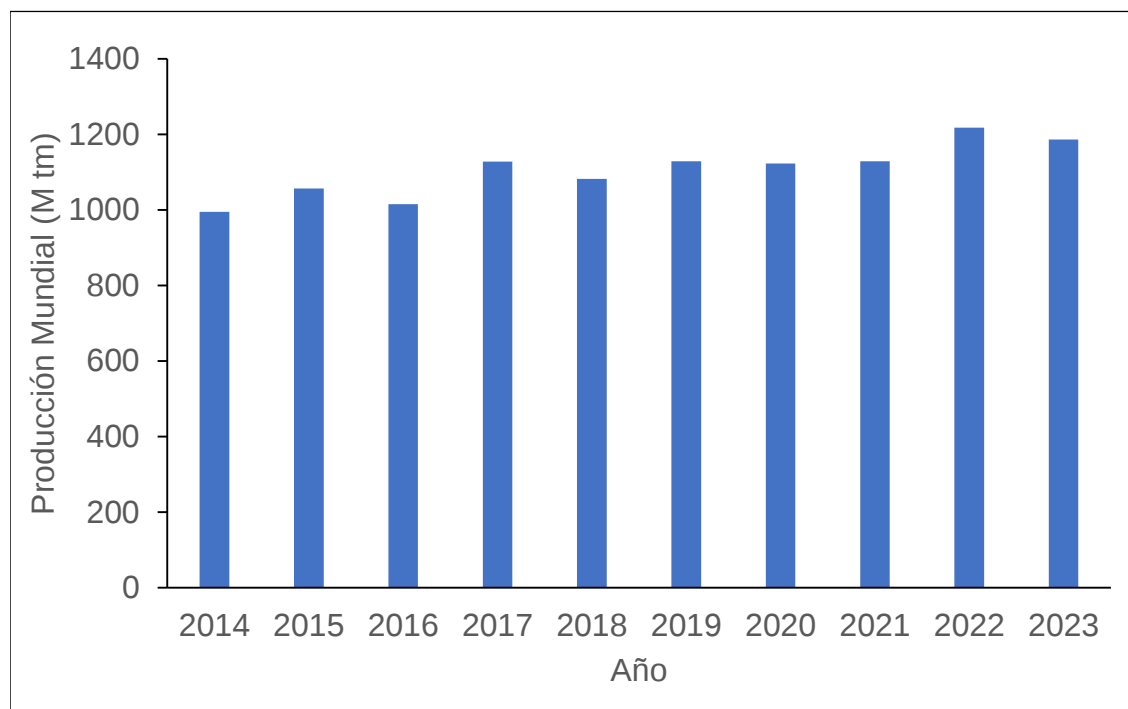
Producción mundial y nacional del maíz

En la temporada 2022 - 2023, de acuerdo con estimaciones más recientes del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), la producción mundial de maíz alcanzó aproximadamente 1.151,4 millones de toneladas (Figura 1). La producción global de maíz está liderada por Estados Unidos con 30,3 %, China 24,1 % y Brasil 10,9 % (Agrositio, 2023).

En Sudamérica, destacan países como Brasil y Argentina, con producciones de maíz de 64,14 y 39,8 millones de toneladas, respectivamente. Estas cifras representan conjuntamente el 9,8 % de la cosecha mundial. Además, México ocupa mundialmente el quinto lugar, con una producción de 25,25 millones de toneladas. Le siguen Ucrania con 28,07 millones y otros países que contribuyen a que el maíz sea un cultivo de gran importancia económica (López, 2018).

Para la temporada 2022 - 2023, la superficie nacional sembrada es de 41.794 ha destinadas al maíz para consumo. Esto representa una caída del 13,5 % en comparación con la temporada anterior (ODEPA, 2023).

Figura 1. Producción mundial de maíz en los últimos 10 años.



Fuente: Adaptado de GCMA (2023).

En Chile, el 75 % del maíz producido se destina al consumo animal, lo que ha llevado al país a depender de las importaciones para cubrir la demanda interna. La siembra de maíz se concentra principalmente en las regiones del Libertador Bernardo O'Higgins (90 kilómetros al sur de Santiago) y del Maule (270 kilómetros al sur de la capital), que representan el 75 % de la superficie sembrada en Chile (Tabla 2). El 75 % de la superficie nacional se dedica a la producción de maíz para alimentación animal, mientras que una cantidad menor se destina al consumo humano (ODEPA, 2021).

Debido a la insuficiente producción, Chile importó un total de 830.635 toneladas de maíz en el año 2021, provenientes principalmente de Argentina (48,2 %), Estados Unidos (45,2 %) y Paraguay (6,5 %). En el año 2021, la superficie nacional de maíz grano aumentó un 9 % y el incremento en los rendimientos de maíz (grano + semilla) se estimó en un 6,5 % (ODEPA, 2021).

Tabla 2. Principales regiones productoras de maíz en Chile en la temporada 2021 - 2022.

Región	Metropolitana	O'Higgins	Maule	Ñuble	Biobío
Superficie (ha)	2.475	22.025	20.346	7.313	14.239

Fuente: Adaptado por ODEPA (2023).

Rendimiento de granos y hábitos de crecimiento

Durante todo el proceso de crecimiento y desarrollo, la formación del rendimiento se lleva a cabo, influenciada por factores ambientales. La siguiente ecuación resume el rendimiento del grano y sus componentes:

$$\text{Rendimiento de grano} = \text{Densidad (planta ha}^{-1}\text{)} \times \text{N}^{\circ} \text{ mazorcas por planta} \times \text{N}^{\circ} \text{ Granos por mazorca} \times \text{peso de 1.000 granos}$$

Una mayor captura de radiación permitirá un mayor rendimiento potencial en condiciones no limitantes de agua y nutrientes. Para incrementar la captura de radiación, se puede incrementar la densidad de las plantas por hectárea, sin embargo, este aumento no es permanente y depende principalmente de los recursos ambientales disponibles (Limagrain Ibérica, 2024).

Se clasifican los híbridos del maíz según los hábitos de crecimiento a híbridos de maduración temprana, de menor rendimiento, y tardíos, de mayor rendimiento (Tabla 3). En zonas con temporadas de crecimiento más cortas, los híbridos de maduración temprana suelen tener una fase vegetativa más corta. Los híbridos de maduración tardía tienen una fase vegetativa más extensa y son adecuados para áreas con temporadas de crecimiento más prolongadas (Eze *et al.*, 2020; Sela, 2021).

Según el ciclo del cultivo (temprano o tardío), las densidades de siembra recomendadas para los híbridos de maíz varían. Se recomienda una densidad de siembra de entre 80.000 y 100.000 plantas por hectárea para los híbridos tempranos que tienen un ciclo corto. Por otro lado, la densidad ideal para los híbridos tardíos puede ser ligeramente menor entre 70.000 y 90.000 plantas por hectárea (Limagrain Ibérica, 2024). El rendimiento de los granos está directamente influenciado por estas diferencias en la densidad de siembra, ya que una densidad adecuada mejora la captura de luz y el uso de recursos, lo que resulta en un mayor rendimiento por hectárea (Eze *et al.*, 2020; Sela, 2021).

Tabla 3. Clasificación del rendimiento del maíz según el ciclo de crecimiento (clasificación FAO).

Ciclo	Días
Ciclo FAO 200	entre 86 y 95 días.
Ciclo FAO 300	entre 90 y 105 días.
Ciclo FAO 400	entre 106 y 115 días.
Ciclo FAO 500	entre 116 y 120 días.
Ciclo FAO 600	entre 121 y 130 días.
Ciclo FAO 700	entre 131 140 días.
Ciclo FAO 800	entre 141 y 150 días.
Ciclo FAO 900	entre 151 y 160 días.
Ciclo FAO 1000	más de 161 días.

Fuente: Adaptado de Limagrain Ibérica (2024).

Problemas de producción actuales

La producción de maíz ha experimentado una gran variabilidad en sus rendimientos, en gran parte debido a un manejo inadecuado, condiciones climáticas irregulares y otros factores que afectan el desarrollo y la productividad del cultivo (Choriego, 2018). Esta situación tiene un impacto significativo en los márgenes de beneficio de los productores, considerando los altos costos de mano de obra y los insumos convencionales (Medina *et al.*, 2018).

En la producción de maíz, es fundamental determinar la densidad poblacional óptima para cada genotipo en las distintas regiones productoras del país (Quevedo *et al.*, 2015). Aunque un incremento en la densidad puede aumentar el rendimiento de forma cuadrática, este se verá reducido si se supera la densidad óptima, lo que resultará en un menor número de granos por mazorca y menor peso de estos. Asimismo, el impacto de la densidad en el rendimiento también está condicionado por el potencial genético del material utilizado (Quiroz *et al.*, 2017). En consecuencia, es necesario establecer una densidad de siembra óptima que permita maximizar la utilización de los recursos disponibles y obtener el máximo rendimiento por unidad de área al coordinar la densidad de población

y el desarrollo individual de las plantas (Jiang *et al.*, 2018). Debido a lo anterior, es necesario ajustar la densidad de siembra del maíz (Ortiz, 2016).

Densidad de siembra y su importancia

La densidad poblacional es una de las labores culturales más eficientes para maximizar la captura de los rayos solares en la plantación y, por ende, obtener mejores resultados durante la cosecha. La cantidad de plantas necesarias para lograr una mayor eficiencia en la captura de radiación solar depende de la morfología de las hojas y del área foliar (Sisalema, 2019).

Una densidad baja afecta considerablemente la captura de luz y, por lo tanto, la productividad, ya que una gran parte de los rayos solares no son absorbidos por las plantas, lo que resulta en un menor contenido de materia seca en el follaje. Las plantas con menos hojas y hojas erectas requieren una mayor densidad para cubrir completamente la superficie del suelo. Por esta razón, los híbridos modernos de maíz, con características morfológicas como estas, responden mejor al aumento de la densidad para lograr una mayor producción de grano (Maddonni y Otegui, 1996).

En general, se recomienda en maíz distancias de siembra de 40 a 80 cm para cultivares de baja estatura, mientras que para aquellos con mayor área foliar y altura se recomienda 90 cm. Es importante destacar que el rendimiento del cultivo está directamente relacionado con el número de granos por unidad de superficie, no con la cantidad de mazorcas en cada planta (Rodríguez, 2018).

El maíz, al igual que otros cultivos, se ve fuertemente influenciado por la disponibilidad de recursos como el agua y el nitrógeno, los cuales modifican notablemente la respuesta a la densidad de siembra. En condiciones de buena disponibilidad de agua y nutrientes en el suelo, junto con altas densidades, se pueden obtener rendimientos considerablemente altos. Por otro lado, en ambientes con escasez de agua, la densidad óptima podría disminuir significativamente, ya que, si los recursos disponibles en el entorno son limitados, la tasa de crecimiento, floración y otros aspectos disminuyen considerablemente (Rodríguez, 2018).

OBJETIVO

Realizar una revisión sobre el efecto de la densidad de siembra en los rasgos morfológicos, el desarrollo y el rendimiento, así como sus componentes, en híbridos de maíz (*Zea mays* L.) para grano seco.

DESARROLLO DE LA MONOGRAFÍA

Efecto de factores de manejo y ambientales en la producción de maíz

Distancia entre hileras: los mejoradores de maíz han logrado estabilizar su rendimiento en diferentes condiciones de estrés como altas densidades de población, sequía, salinidad y suelos infértiles (Campos *et al.*, 2006), lo que ha mejorado significativamente el rendimiento, principalmente debido a una mayor tolerancia al estrés en lugar del potencial genético de rendimiento (Duvick y Cassman, 1999). Almedia *et al.* (2000) observaron que los híbridos de maíz liberados durante la década de 1990 demostraron un mayor rendimiento a densidades de población de plantas más altas, en comparación con los genotipos liberados anteriormente. Según Cardwell (1982), a finales de los años setenta, la distancia estándar entre las hileras, que era de (107 cm) en 1930, se disminuyó a (90 cm). El maíz actualmente se siembra con hileras amplias (76 cm) o estrechas (38 cm) que es la menos común, pero la tendencia es aumentar la población de plantas y reducir el ancho de las hileras. Porter *et al.* (1996) encontraron un aumento en el rendimiento de 7,2 % para los anchos de hilera de 25 cm y 50 cm en comparación con el ancho de hilera de 76 cm. Esta respuesta fue similar tanto en condiciones de riego como sin riego. Debido a la baja transmitancia de la radiación solar a la superficie del suelo, la anchura de las hileras ayuda a reducir la competencia de los cultivos con las malezas por agua y nutrientes (Porter *et al.*, 1996). En la primera parte del ciclo del cultivo, el crecimiento del maíz se incrementa, lo que aumenta la interceptación de la radiación y la eficiencia de uso de la radiación, se reduce la transmitancia de la luz a través del dosel y aumenta el rendimiento del grano (Bullock *et al.*, 1988). Además, debido a la anchura reducida de las hileras, el rápido cierre del dosel ayuda a reducir la pérdida de agua por escorrentía, evaporación y erosión del suelo (Sangoi *et al.*, 1998).

Eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN): el nitrógeno (N) es el principal nutriente del suelo que limita el crecimiento de los cultivos (Raven *et al.*, 2004). Este forma parte de compuestos como clorofilas, hormonas del crecimiento, ARN, ADN y proteínas y tiene un gran impacto en la senescencia y expansión de la superficie foliar (Andrews *et al.*, 2013). La relación entre la cantidad de materia seca (g) producida por la planta y la cantidad de nitrógeno (g) que absorbe una planta se conoce como eficiencia del uso del nitrógeno (EUN). También, la EUN puede expresarse como rendimiento de grano por unidad de nitrógeno disponible (van Beem y Smith, 1997). Según Mosier (2002), la EUN apenas supera el 50 % en condiciones de campo en cereales. La predicción de la EUN para el maíz en diferentes entornos es difícil debido a la posibilidad de interacciones importantes entre las prácticas de manejo, como la densidad de las plantas y la fertilización con N (Ciampitti y Vyn, 2011). Sin embargo, se ha reportado que la EUN aumentó con espaciamientos reducidos entre hileras entre 12 – 15 % (Barbieri *et al.*, 2006).

Eficiencia en el uso del agua (EUA): la relación entre CO₂ fijado (g) en la fotosíntesis y H₂O perdido (g) por transpiración constituye la eficiencia del uso del agua (EUA), la cual también se puede definir como la relación entre la acumulación de biomasa por unidad de superficie y el agua consumida por el cultivo (expresada como evapotranspiración o transpiración) para producir el rendimiento (Sinclair *et al.*, 1984; Fitter y Hay, 2002). El déficit hídrico afecta negativamente la productividad de los cultivos en suelo fértil (Boyer, 1982). En condiciones de regadío, el aumento de la densidad de plantas baja la EUA del maíz en un 24 %, mientras que en condiciones de secano aumenta en un 17 % (Ogola *et al.*, 2005).

Efecto de la densidad de plantación en la morfología y el desarrollo de la planta

Índice de área foliar (IAF) y la eficiencia del uso de radiación (EUR): la intercepción total de la luz, que afecta la fotosíntesis, la transpiración y la acumulación de materia seca, está influenciada por el IAF y la distribución del área foliar dentro del dosel del maíz (Stewart y Dwyer, 1999). Para interceptar

de manera efectiva la energía radiante que incide sobre la superficie del cultivo, es necesaria una superficie foliar adecuada. Esto se puede lograr mediante la manipulación de la densidad y la distribución de la población sobre la superficie del terreno (Modarres *et al.*, 1998). Kiniry y Knievel (1995) descubrieron que la principal limitación para el crecimiento, desarrollo y rendimiento es la radiación solar interceptada por las plantas en ausencia de deficiencias de nutrientes, temperaturas extremas o estrés hídrico.

El rendimiento en grano del maíz se correlaciona linealmente con el IAF durante el periodo de ensilado. Los valores altos de IAF ($>4,0$) reducen la penetración de la luz y el rendimiento (Buren, 1974; Li *et al.*, 2022). Debido al sombreado mutuo de las plantas, la eficiencia de la conversión de la radiación solar interceptada en rendimientos económicos del maíz (o la eficiencia del uso de radiación, EUR) podría disminuir (Buren, 1974). Li *et al.* (2022) informaron que la alta densidad de las plantas aumentó la senescencia de las hojas, el sombreado de las hojas y disminuyó la asimilación neta de las plantas.

La radiación incidente interceptada tiene un impacto en el crecimiento y el rendimiento del maíz (Pommel *et al.*, 2001). Toler *et al.* (2013) reportan que los cultivos de alta densidad experimentan un aumento del 15 % en la interceptación de luz en comparación con cultivos de baja densidad. El número de granos por planta está relacionado con la cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada cuando el agua y los nutrientes no son limitantes (Otegui y Andrade, 2000).

Floración femenina y masculina: según Tokatlidis y Koutroubas (2004), una alta densidad de plantas tiene un impacto en el intervalo necesario para el desprendimiento del polen y la aparición de la seda. El aumento en la densidad de cinco a 20 plantas por m^2 aumentó el tiempo transcurrido desde la siembra hasta la seda de 84 a 95 días. Además, el tiempo entre el desprendimiento de polen y la seda aumentaba con la densidad de las plantas, pasando de casi cero a nueve días. Hashemi-Dzefouli y Herbert (1992) investigaron tres densidades de plantas y descubrieron que los cambios en la densidad de las plantas afectaron ligeramente la emergencia de la panoja masculina. Por el contrario, el tiempo para el 100 % de la flor femenina (seda) se retrasó hasta 5 días al

aumentar la densidad de siete plantas por m² y con densidad de 12 plantas por m², el 10 % de las plantas no mostraron ninguna seda 7 días después de la antesis. A medida que aumentó la densidad de las plantas, aumentó el número de plantas estériles.

Altura de la planta: de acuerdo con el estudio de Yokozawa y Hara (1995), las condiciones ambientales durante el alargamiento del tallo tienen un efecto notable en la altura y el diámetro que alcanzará la planta al finalizar su crecimiento. El fotoperiodo y la temperatura pueden influir en la altura del tallo al afectar el número de entrenudos. Sin embargo, la temperatura, el estrés hídrico, la nutrición, las plagas y enfermedades y la cantidad y calidad de la luz tienen los efectos más directos sobre la altura de la planta (Baggett y Kean, 1989). El estrés hídrico puede afectar la longitud de los entrenudos al evitar que las células en desarrollo se elonguen.

En experimentos con diferentes densidades de plantas, se ha observado con frecuencia que a medida que aumenta el sombreado mutuo, las plantas de maíz son más altas. Sin embargo, esta característica presenta una gran variación varietal (Yokozawa y Hara, 1995). Por lo tanto, las plantas que crecen en un dosel denso, con alta densidad de plantas, reciben una calidad de luz diferente, enriquecida en rojo lejano (RL) y empobrecida en radiación roja (R). El alargamiento del tallo es impulsado por esta relación. Además, Troyer y Rosenbrook (1991) descubrieron que, debido al sombreado mutuo, las plantas de maíz apiñadas tienen tallos y vástagos de menor diámetro, lo que aumenta la rotura de tallos y la caída de mazorcas. Estos cambios aumentan la probabilidad de que los tallos de maíz se rompan antes de que alcancen la madurez fisiológica.

Número de mazorcas y esterilidad: Sarquis *et al.* (1998) confirmaron que la densidad de las plantas tiene un impacto significativo en la producción de múltiples mazorcas. La reducción del 30 % en la interceptación de luz durante el ciclo de cultivo fue suficiente para eliminar por completo el desarrollo de una segunda mazorca. Tetio-Khago y Gardner (1988) indican que la capacidad de la fuente se reduce cuando se limita la interceptación de la luz. Este efecto podría

retrasar el crecimiento de la segunda mazorca de tal manera que, tras la fecundación de los óvulos de la mazorca apical, esta quede totalmente reprimida.

La intercepción de luz por planta disminuye debido a la alta densidad de las plantas, y el sombreado mutuo probablemente afecta la capacidad de la fuente para proporcionar fotoasimilados a una segunda mazorca. Según Edmeades *et al.* (2000), los asimilados prefieren moverse de una hoja a su sumidero más cercano. Esto significa que las dos hojas, por encima y por debajo de la mazorca primaria proporcionan la mayor parte de los asimilados para el llenado del grano, mientras que los asimilados de las hojas inferiores tienen más probabilidades de ir a la raíz y al tallo inferior.

Otegui (1995) descubrió que la población de plantas se correlaciona negativamente con la cantidad de mazorcas por planta y el peso de mazorcas. Sin embargo, el rendimiento de grano suele variar ligeramente en diferentes poblaciones de plantas. Esto indica que hay una compensación entre la masa y el número de mazorcas.

La esterilidad reduce significativamente el rendimiento en grano de muchos híbridos plantados a altas densidades (Buren *et al.*, 1974). Ritchie y Alagarswamy (2003) reportaron que las densidades de plantas de siete a 10 plantas por m² tenían altos rendimientos de maíz, pero la esterilidad ocurría con mayor frecuencia cuando las densidades de plantas superaban las 10 plantas por m².

Efecto de la densidad de plantación en el rendimiento y sus componentes

Rendimiento de granos y número de granos: el número de mazorcas producidas, el peso medio del grano en las mazorcas (Hatfield *et al.*, 1984) y el número de plantas por área (Sangoi *et al.*, 2002) están directamente relacionados con el rendimiento de grano en maíz. La densidad de plantación aumenta el rendimiento de grano hasta un óptimo, posterior al cual disminuye. El rendimiento generalmente aumenta con la densidad hasta que uno o más factores, como el suministro de agua, los nutrientes disponibles para la planta, la radiación, entre otros, se vuelven limitantes. Debido a su baja capacidad de macollamiento, las variaciones en la densidad de las plantas tienen un mayor

impacto en el rendimiento del maíz que en cualquier otro miembro de la familia de las gramíneas (Vega *et al.*, 2001).

Echarte *et al.* (2000) descubrieron que la respuesta del rendimiento en grano a la densidad de las plantas es positiva y fuertemente relacionada con el número de granos por metro cuadrado, mientras que la respuesta era negativa y débilmente relacionada con el peso por grano. La densidad de plantas, al aumentar de cinco a 15 plantas por metro cuadrado, provocó un incremento en el número de granos por mazorca, que se elevó del 38 % al 56 %. Sin embargo, Tollenaar *et al.* (1997) confirmaron que cuando la densidad de las plantas supera la densidad óptima, el rendimiento del grano de maíz disminuye. Esto se debe principalmente a una disminución del índice de cosecha y a un aumento del encamado de los tallos. Bajo alta densidad ocurre una competencia intensa entre las plantas por flujo de fotones fotosintéticos, así como por nutrientes y agua del suelo. Durante la fase de llenado de grano, las plantas sombreadas experimentan las pérdidas más significativas en el número de granos por mazorca (Kiniry y Ritchie, 1985). Sangoi *et al.* (2002) descubrieron que a medida que aumentaba la población sobre la densidad óptima, el número de granos potenciales por mazorca, medido al inicio del ensilado y antes de la polinización, disminuía de 550 a 474 granos por mazorca. Por lo tanto, la alta densidad de plantas disminuyó el número de sitios de grano por mazorca disponibles en el momento de la polinización, aunque no afectó el momento de inicio del primordio de la mazorca. Además, la disminución en el número de granos indicaba que, a medida que aumentaba la densidad de las plantas, se producía una falta de polinización en las mazorcas que se retrasaban en la seda, así como el aborto posterior de algunos granos fértiles (Hashemi-Dzefouli y Herbert, 1992). Tokatlis y Koutroubas (2004) también reportaron que una mayor densidad de plantas que la óptima reduce el suministro de asimilados y ocasiona el aborto de granos, especialmente, en la punta de la mazorca.

Peso del grano: el tamaño inicial de las espiguillas, las tasas de crecimiento durante las fases exponencial y lineal (deposición de almidón) del crecimiento del grano o la duración de dichas fases pueden ser las causas de las diferencias relativamente significativas en el peso de grano observadas a diferentes densidades de plantas (Jones y Simmons, 1983). Según Lemcoff y Loomis

(1986), el peso inicial del grano después de la polinización es esencial para el crecimiento temprano del grano. Por lo tanto, el peso del grano es menor cuando las plantas tienen alta densidad. Esto podría deberse a un retraso en el desarrollo (la espiguilla comienza más tarde) o a un menor tamaño inicial del primordio de la espiguilla. El número de células y gránulos de almidón formados, particularmente en el endospermo, que representa alrededor del 85 % de la masa de los granos maduros de maíz, está fuertemente correlacionada con la masa final del grano. Por lo tanto, en condiciones de alta densidad de plantas, el rendimiento puede verse limitado por restricciones en la capacidad de crecimiento del endospermo, ya sea por la cantidad, el tamaño o la actividad de las células del endospermo (Salvador y Pearce, 1995). En términos de competencia por los sustratos necesarios para el crecimiento, también existe una interacción entre la posición y el número de granos, que es más acentuada a alta densidad de plantas. Las flores en la punta de la mazorca son más pequeños y se sedan más tarde que las flores basales. Los granos de la punta, que también contienen menos células del endospermo y gránulos de almidón, tienen una tasa de llenado inferior a la de los granos basales (Jones y Simmons, 1983).

CONCLUSIONES

- El espaciamiento estrecho entre hileras mejora el crecimiento, la interceptación de la radiación y la producción de grano del maíz a principios de la estación, al reducir la transmisión de luz a través de la cubierta y mejora la conservación del agua.
- Una elevada densidad de plantas más que la óptima puede provocar efectos negativos en el crecimiento, desarrollo y rendimiento de grano de la planta como:
 - Se retrasa el desarrollo de las flores femeninas (sedas) al 100 %, lo que puede dar lugar a plantas estériles que afecta negativamente el éxito de la polinización.
 - Se afecta significativamente el crecimiento del cultivo y el desarrollo de múltiples mazorcas, con una reducción del 30 % en la interceptación de la luz que suprime el crecimiento de una segunda mazorca.

- La reducción del suministro de asimilados causa el aborto de granos, especialmente en la punta de la mazorca en comparación con los granos basales, lo que se traduce en una disminución del número de granos por mazorca y un aumento de la esterilidad de la planta.
- La respuesta del rendimiento en grano a la densidad de plantas está relacionada positivamente con el número de granos por metro cuadrado y negativamente con el peso por grano, con una densidad de plantas excesiva que conduce a una disminución del número de granos por planta.

REFERENCIAS

1. Agrositio. 2023. Perspectivas del maíz en el mercado mundial en 2023. [en línea].Agrositio,MercadoMundial.<<https://www.agrositio.com.ar/noticia/229227-perspectivas-del-maiz-en-el-mercado-mundial-en-2023.html>>. [Consulta: 21 abril 2024].
2. Almedia, M. L., Jr.A. Merotto, L. Sangoi, M. Ender y A.F. Guidolin. 2000. Increase in plant density: an alternative to increase the yield of corn grain in regions short summer growing season. *Ciência Rural*. Santa Maria, V. 30(1): 23-29.
3. Anchundia, C. 2015. Efecto de diferentes dosis de fertilizantes para en el comportamiento agronómico del híbrido de maíz (*Zea mays* L.) Pionner 30F35 en el cantón Balzar, provincia del Guayas [en línea]. Universidad de Guayaquil. <<http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/8152>>. [Consulta: 12 noviembre 2023].
4. Andrews, M., J.A. Raven y P.J. Lea. 2013. Do plants need nitrate? The mechanism by which nitrogen forms affect plants. *Ann. Appl. Biol.* 163: 174-199.
5. Baggett, J. y D. Kean. 1989. Reduction of plant height by head smut infection in sweet corn cultivars. *HortScience*. 24: 497-505.
6. Barbieri, P. A., H.E. Echererria, H.R. Sainz Rozas y F.H. Andrade. 2006. Nitrogen Use Efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. J.* 100(4): 1094-1100.
7. Boyer, J. S. 1982. Advances in drought tolerance in plants. *Adv. Agron.* 56:187-218.

8. Bullock, D. G, R.I. Nielsen, W.E.A. Nyquist. 1988. Growth analysis comparison of corn grown in conventional and equidistant plant spacing. *Crop Science*. 28(2): 254-258.
9. Buren, L.L., J.J. Mock y I.C. Anderson. 1974. Morphological and Physiological Traits in Maize Associated with Tolerance to High Plant Density. *Crop Sci*. 14: 426-429.
10. Campos, H., M. Cooper, G.O. Edmeades, C. Löffler, J.R. Schussler y M. Ibañez. 2006. Changes in drought tolerance in maize associated with fifty years of breeding for yield in the U.S. corn belt. *Maydica* 51: 369-381.
11. Cardwell, V.B. 1982. Fifty Years of Minnesota Corn Production: Sources of Yield Increase, *Agron J*. 74: 984-990.
12. Chamba, M., F. Cordero, E. Ramiro. 2017. Implicaciones sociales, técnicas y económicas de la comercialización de (*Zea mays* L.) en el cantón Espíndola, provincia de Loja. *Bosques Latid Cero*. 7(2): 55-70.
13. Chang, A., A. Rodríguez, E. Pile. 2018. Evaluación productiva de cinco híbridos de maíz en estado tierno en Villa Darién, Darién. *Rev Colón Ciencias, Tecnol y Negocios*. 5(2): 48-54.
14. Chérrez, V. 2015. Evaluación de dos distancias de siembra y tres niveles de fertilización con N, P, K, en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) Presentado como requisito parcial para obtener el título de ingeniero Agrónomo. Universidad de Riobamba, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.
15. Choriego, R. 2018. Impacto del cambio climático en el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en El Salvador. Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el Grado Académico de Licenciatura. Universidad Zamorano, Escuela Agrícola, Honduras.
16. Chura, J., J. Mendoza, J. de la Cruz. 2019. Dosis y fraccionamiento de nitrógeno en dos densidades de siembra del maíz amarillo duro. *Sci Agropecu*. 10(2): 241- 248.
17. Ciampitti, I. A. y T.J. Vyn. 2011. A comprehensive of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crops Res*. 121: 2-18.
18. Contreras, C. 2019. Evaluación de la percepción de los agricultores maiceros sobre los daños observados en el cultivo de maíz, ocasionados por insectos plaga en la zona de Mocache Proyecto de Investigación Previo a la

Obtención del Título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de ciencias agrarias. Ecuador.

19. DuVick, D. N. y K.G. Cassman. 1999. Post-Green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39: 1622 – 1630.
20. Echarte, L., S. Luque, F.H. Andrade, V.O. Sadras, A. Cirilo, M.E. Otegui y C.R.C. Vega. 2000. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Res.* 68: 1-8.
21. Edmeades, G.O., J. Bolanos, A. Elings, J.M. Ribaut, and M. Banziger. 2000. The role and regulation of the anthesis-silking interval in maize. pp: 43-73. In M.E. Westgate and K.J. Boote (Eds.). *Physiology and Modeling Kernel Set in Maize*. CSSA, Madison, WI.
22. Eze, C. E., Akinwale, R. O., Michel, S., and Bürstmayr, H. (2020). Grain yield and stability of tropical maize hybrids developed from elite cultivars in contrasting environments under a rainforest agro-ecology. *Euphytica*, 216: 1-13.
23. Fitter, A.H., and R.K.M. Hay. 2002. *Environmental physiology of plants* (3rd ed.). Academic Press. San Diego, California, USA.
24. GCMA. 2023. Grupos consultores de mercados agrícolas. [en línea]. *Perspectivas del Mercado de Maíz*. <<https://gcma.com.mx/reportes/perspectivas/maiz/>>. [Consulta: 03 marzo 2024].
25. Hashemi-Dezfouli, A y S.J. Herbert. 1992. Intensifying plant density response of corn with artificial shade. *Agron. J.* 84: 547-551.
26. Hatfield, A.L., G.R. Benoit y J.L. Ragland. 1984. The growth and yield of corn. IV. Environmental effects on grain yield components of mature ears. *Agron. J.* 57: 293-295.
27. Jiang X, L. Tong, S. Kang, F. Li, D. Li, Y. Qin. 2018. Planting density affected biomass and grain yield of maize for seed production in an arid region of Northwest China. *J. Arid Land.* 10(2): 292-303.
28. Jones, R.J. y S.R. Simmons. 1983. Effect of altered source-sink ratio on growth of maize kernels. *Crop Sci.* 23: 129-134.
29. Kiniry, J.R. y D.P. Knievel. 1995. Response of maize seed number to solar radiation intercepted soon after anthesis. *Agron. J.* 87: 228-234.

30. Kiniry, J.R. y J.T. Ritchie. 1985. Shade-sensitive interval of kernel number of maize. *Agron. J.* 77: 711-715.
31. Lemcoff, J.H. y R.S. Loomis. 1986. Nitrogen influences on yield determination in maize. *Crop Sci.* 26: 1017-1022.
32. Li, Y., B. Ming, P. Fan, Y. Liu, K. Wang, P. Hou, J. Xue, S. Li y R. Xie. 2022. Quantifying contributions of leaf area and longevity to leaf area duration under increased planting density and nitrogen input regimens during maize yield improvement. *Field Crops Res.* 283: 108-551.
33. Limagrain Ibérica. 2024. Apuntes técnicos: Maíz grano - Densidad de siembra óptima. [en línea]. <<https://www.lgseeds.es/blog/apuntes-tecnicos-maiz-grano-densidad-de-siembra-optima/>>. [Consulta: 01 agosto 2024].
34. López, B. 2018. Análisis de la producción de maíz en la provincia de Manabí y su aporte al desarrollo local. Periodo (2012-2017). Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de economista. Universidad de Guayaquil. Facultad de Ciencias Económicas. Guayaquil, Ecuador.
35. Loza, A. 2017. Evaluación de híbridos de maíz dulce (*Zea mays L.*) var Saccharata, bajo dos distancias de siembra para grano enlatado. Trabajo de titulación presentado como requisito previo a la obtención del título de Ingeniera Agrónoma. Universidad Central del Ecuador. Facultad de Ciencias Agrícolas. Quito, Ecuador.
36. Maddonni, G.A. y M.E. Otegui. 1996. Leaf area, light interception and crop development in maize. *Field Crops Res.* 48: 81-87.
37. Medina, J., G. Alejo, J. Soto, M. Hernández. 2018. Rendimiento de maíz grano con y sin fertilización en el estado de Campeche. *Rev Mex Ciencias Agrícolas*.
38. Modarres, A.M., R.I. Hamilton, M. Dijak, L.M. Dwyer, D.W. Stewart y D.L. Smith. 1998. Plant population density effects of maize inbred lines grown in short season environments. *Crop Sci.* 38:104-108.
39. Mosier, A.R. 2002. Environmental Challenges Associated with Needed Increases in Global Nitrogen Fixation. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 63:101-116.
40. ODEPA. 2021. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. [en línea]. Boletín de Cereales, mayo 2021. <<https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/70789/BoletinCerealesMayo2021.pdf>>. [Consulta: 05 diciembre 2023].

41. ODEPA. 2023. Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. [en línea]. Boletín de Cereales, mayo 2023. <<https://www.odepa.gob.cl/wpcontent/uploads/2023/05/Semana-del-1-al-7-de-mayo2023.pdf>> [Consulta: 21 abril 2024].
42. Ogola, J. B. O., T.R. Wheeler y P.M. Harris. 2005. Water use of maize in response to planting density and irrigation. S. Afr. J. Plant Soil. 22(2):116-121.
43. Ortiz, A. 2016. Evaluación de la respuesta del maíz (*Zea mays* L.) ante cambios en la densidad de siembra y dosis de nitrógeno. Rev sobre Estude Investig del Saber Académico. 10(10): 82-85.
44. Otegui, M. E. y F. H. Andrade. 2000. New relationships between light interception, ear growth and kernel set in maize. pp: 89-102. In: M. Westgate y K. Boote (Eds.), Physiology and modeling kernel set in maize. CSSA Spec. Publ. 29. CSSA and ASA, Madison WI.
45. Otegui, M. 1995. Prolificacy and grain yield components in modern Argentinian maize hybrids. Maydica. 40, 371-376.
46. Pommel, B., Y. Sohbi y B. Andrieu. 2001. Use of virtual 3D maize canopies to assess the effect plot heterogeneity on radiation interception. Agric. For. Meteorol. 110: 55-67.
47. Porter, P. M., D. R. Hicks, W. E. Lueschen, J. H. Ford, D. D. Warnes y T. R. Hoverstad. 1996. Corn response to row width and plant population in the Northern Corn Belt. J. Prod. Agric. 10(2): 293-300.
48. Quevedo, A., E. Barragan, J. Beltran. 2015. Efecto de altas densidades de siembra sobre el híbrido de maíz (*Zea mays* L.) impacto. Rev Sci Agroaliment. 2:18-24.
49. Quiroz, J., D. Pérez, A. González, M. Rubí, F. Gutiérrez y J. Franco. 2017. Respuesta de 10 cultivares de maíz a la densidad de población en tres localidades del centro mexicano. Rev Mex Ciencias Agrícolas. 8(7):1521-35.
50. Raven, J. A., L.L. Handley y M. Andrews. 2004. Global aspects C/N interactions determining plant – environment interactions. J. Exp. Biol. 55: 11-25.
51. Ritchie, J.T. y G. Algarswamy. 2003. Model concepts to express genetic differences in maize yield components. Crop Sci. 95: 4-9.

52. Rodríguez, L. 2018. Efecto del número de plantas por golpe, a diferentes distanciamientos, en el rendimiento de dos híbridos de maíz amarillo duro *Zea mays* L. (Poaceae). *Ciencia y Desarrollo*. 24(3):7-50.
53. Salvador, R.J. y R.B. Pearce. 1995. Proposed standard system of nomenclature for maize grain filling events. *Maydica*. 40: 141-146.
54. Sangoi, L. y R.J. Salvador. 1998. Influence of plant height and of leaf number on maize production at high plant densities. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília. 33(3): 297-306.
55. Sangoi, L., M.A. Gracietti, C. Rampazzo y P. Biachetti. 2002. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. *Field Crops Res*. 79: 39-51.
56. Sarquis, J.I., H. Gonzales y J.R. Dunlap, J.R. 1998. Yield response of two cycles of selection from a semi-prolific early maize (*Zea mays* L.) population to plant density, sucrose infusion and pollination control. *Field Crops Res*. 55: 109- 116.
57. Sela, G. 2021. Planting Density: Maximizing Crop Potential. [en línea]. Cropaia. <<https://croipa.com/blog/planting-density/>>. [Consulta: 01 agosto 2024].
58. Sinclair, T. R., C.B. Tanner y J.M. Bennett. 1984. Water-Use Efficiency in crop production. *BioScience*. 34(1): 36-40.
59. Sisalema, K. 2019. Efectos de población y fertilización en dos híbridos de maíz (*Zea mays* L.) sembrados en la zona de Babahoyo, provincia de Los Ríos. Trabajo Experimental Presentado al H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito previo a la obtención del título de Ingeniera Agrónoma. Universidad Técnica de Babahoyo, Facultad de Ciencias Agropecuarias. Babahoyo, Los Ríos, Ecuador.
60. Stewart, D.D. y L.M. Dwyer. 1999. Mathematical characterization of leaf shape and leaf area of maize hybrids. *Crop Sci*. 39: 422-427.
61. Tetio-Kagho, F y F.P. Gardner. 1988. Response of maize to plant population density. I. Canopy development, light relationships, and vegetative growth. *Agron. J*. 80: 930-935.
62. Tokatlis, I.S. y S.D. Koutroubas. 2004. A review of maize hybrids dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. *Field Crops Res*. 49: 119-126.

63. Toler, J. E., E.C. Murdock, G.S. Stapleton y S.U. Wallace. 2013. Corn leaf orientation effects on light interception, intraspecific competition, and grain yields. *J. Prod. Agric.* 12(3): 396-399.
64. Tollenaar, A., A. Aguilera y S.P. Nissank. 1997. Grain yield is reduced more by weed interference in an old than in a new maize hybrid. *Agron. J.* 89: 239-246.
65. Troyer, A.F y R.W. Rosenbrook. 1991. Utility of higher plant densities for corn performance testing. *Crop Sci.* 23: 863-867.
66. Van Beem, J. y M. E. Smith. 1997. Variation in N use-efficiency and root system size in temperate maize genotypes. pp: 241-244. In: G.O. Edmeades, M. Banziger, H. R. Mickelson y C. B. Pena-Valdivia (Eds.). *Developing Drought and Low-N Tolerant Maize. Proceedings of a symposium, Elbatán, Mexico, 25–29 Mar. CIMMYT, Mexico, D.F.*
67. Vega, C.R.C., F.H. Andrade, V.O. Sadras, S. Uhart y O.R. Valentinuz. 2001. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower and maize. *Crop Sci.* 41: 748-754.
68. Yokozawa, M. y T. Hará. 1995. Foliage profile, size structure and stem diameter-plant height relationship in crowded corn plant population. *Ann Bot.* 76: 271-285.