



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**  
**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**PROGRAMA DE POSTGRADO EN RECURSOS GENÉTICOS Y  
PRODUCTIVIDAD**

**FISIOLOGÍA VEGETAL**

**EVALUACIÓN MORFOLÓGICA Y FISIOLÓGICA  
DE ARQUETIPOS DE MAÍZ**

**MARLEN GUADALUPE HIDALGO SÁNCHEZ**

**T E S I S**  
**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

2018

**CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACION**

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Marlen Guadalupe Hidalgo Sánchez, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Victor A. González Hernández, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis

EVALUACIÓN MORFOLÓGICA Y FISIOLÓGICA DE ARQUETIPOS DE MAÍZ y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre el colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre, las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 21 de junio de 2018

Firma del  
Alumno (a)

Dr. Víctor A. González Hernández  
Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **Evaluación morfológica y fisiológica de arquetipos de maíz**, realizada por la alumna Marlen Guadalupe Hidalgo Sánchez bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

FISIOLOGÍA VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



---

Dr. Víctor A. González Hernández

ASESOR



---

Dr. Leopoldo E. Mendoza Onofre

ASESOR



---

Dr. Nicacio Cruz Huerta

Montecillo, Texcoco, Estado de México, junio de 2018

# EVALUACIÓN MORFOLÓGICA Y FISIOLÓGICA DE ARQUETIPOS DE MAÍZ

Marlen Guadalupe Hidalgo Sánchez, M. en C.  
Colegio de Postgraduados, 2018

## RESUMEN

El maíz (*Zea mays* L.) es un alimento básico en la alimentación mundial y con una demanda en constante aumento, por lo que es necesario incrementar su producción y rendimiento. Además, ante los cambios climáticos y la cada vez menor superficie de cultivo es necesario diseñar plantas modelo o “arquetipos” con el fin de “producir más con menos”. En el presente estudio se evaluó durante dos años (2016 y 2017) el comportamiento de 13 líneas endogámicas y dos testigos (Variedad “Dulce” y el híbrido HS2) en 2016 y de seis líneas endogámicas de maíz y de tres testigos (Variedad Dulce, y los híbridos HS2 y PG133) en 2017 sembrados en dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas ha<sup>-1</sup>). Las variables medidas de tipo fueron agronómico, morfológico, fisiológico y de rendimiento de grano, con el fin de identificar a los arquetipos con características y comportamiento más deseables. Los resultados mostraron una amplia variación genotípica y arquetípica en todas las variables medidas, lo cual se vio reflejado en el rendimiento final de grano. Los arquetipos que en ambos años demostraron el mejor desempeño y adaptación a las altas densidades de siembra fueron los testigos Var. Dulce, los híbridos HS2 y PG133, y la línea endogámica L145. Las características asociadas con un alto rendimiento de grano de 6 a 18 t ha<sup>-1</sup> fueron índices de área foliar mayores de 3 en floración, intercepción de 90 % o más de la radiación fotosintéticamente activa en floración, tasas de fotosíntesis neta mayores a 39  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  en clima templado, y una prolificidad de 1.4 o más mazorcas por planta.

**Palabras clave:** *Zea mays*, arquetipos de maíz, altas densidades, morfología de planta, desempeño fisiológico, rendimiento de grano.

**MORPHOLOGICAL AND PHYSIOLOGICAL EVALUATION OF MAIZE IDEOTYPES**  
**Marlen Guadalupe Hidalgo Sánchez, M. en C.**  
**Colegio de Postgraduados, 2018**

**ABSTRACT**

Maize (*Zea mays* L.) is a staple in the world and showing a constantly increasing demand, so it is necessary to increase its production and yield. In addition, for facing the climate change and the increasingly smaller area of cultivation, it is necessary to design model plants or "ideotypes" in order to "produce more with less". In the present study, the behavior of thirteen inbred lines and two controls (Variety "Dulce" and hibryd HS2) on 2016 and six inbred lines of maize and three controls (Variety 'Dulce', and hybrids 'HS2' and 'PG133') on 2017, sowed at two plant densities (62,500 and 125,000 plants/ha) were evaluated during two growing seasons (2016 and 2017). The measured variables were grouped as agronomic, morphological, physiological and grain yield, in order to identify the desirable characteristics for maize ideotypes having outstanding performance in field conditions. The results showed a wide genotypic and ideotype variation in all the measured variables, which was reflected in the harvested grain yield. The maize ideotypes that in both years showed the best performance and adaptation to the high planting densities were Var. 'Dulce', hybrids 'HS2' and 'PG133', and the inbred line L145. The traits associated with a high grain yield of 6 to 18 t ha<sup>-1</sup> were a leaf area index greater than 3 at blooming, interception of 90% or more of the photosynthetically active radiation at the flowering stage, net photosynthetic rates greater than 39 μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> in temperate weather, and a prolificity of 1.4 ears per plant or higher.

**Keywords:** *Zea mays*, ideotypes, high plant density, plant morphology, physiological performance, grain yield.

## AGRADECIMIENTOS

**Al Colegio de Postgraduados**, por acogerme en sus instalaciones durante los dos años de mi formación académica, y por los conocimientos impartidos por sus catedráticos.

**Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo financiero proporcionado durante la realización de mis estadios de maestría.

**Al Dr. Víctor Arturo González Hernández** por su apoyo como consejero quien me dio la oportunidad de iniciar en el camino de la investigación y me supo guiar para la conclusión de este proyecto.

**Al Dr. Nicacio Cruz Huerta** porque siempre estuvo dispuesto a resolver mis dudas por más pequeñas que estas fueran y por ayudarme con el manejo estadístico de mis datos.

**Al Dr. Leopoldo E. Mendoza Onofre** que de manera cordial y atenta me brindó su apoyo como asesor y de quien pude aprender algunas técnicas de redacción y presentación de datos.

**Al M.C. Iván Ramírez Ramírez** por su amistad y por todos los consejos y regaños que me han ayudado a llegar hasta este punto.

**Al Dr. Juan Valente Hidalgo Contreras** que siempre ha sido mi ejemplo a seguir, y es quien me ha guiado y aconsejado en mi vida profesional.

**Al equipo de trabajo del laboratorio de Fisiotecnia Vegetal** Víctor, Juan Carlos, Sagrario, Pedro y Joel porque sin ellos no hubiera podido concluir mi trabajo de investigación.

**A mis compañeros y amigos fisiólogos** Adriana, Deisy, Fabi, Gaby, Miguel, Natalia, Raúl Sandoval y Vicky con quienes tuve la oportunidad de convivir este tiempo y que contribuyeron de alguna u otra forma con mi trabajo de investigación.

**A mis amigas y colegas bioquímicas** Angelica, Belegui, Betsy y Lili quienes estuvieron siempre al pendiente de mi avance en la maestría y me brindaron su apoyo.

## DEDICATORIA

A mis padres Rigoberto e Isabel quienes me han dado como herencia el conocimiento y desarrollo profesional y siempre han apoyado de manera incondicional mis decisiones personales y profesionales.

A mis hermanos Carlos, Erika y Dalia, mis cuñados Jorge y Betty y mis sobrinos Augusto, Danna, Carlos y Aylin quienes me han brindado su comprensión y apoyo a lo largo de mi estancia en la maestría.

*“... Para poder producir es necesario salir de las oficinas, internarse en el campo, ensuciarse las manos y sudar... es el único lenguaje que entiende el suelo, las plantas y los animales.”*

**Dr. Norman E. Borlaug**  
**Premio Nobel de la Paz 1970**

## CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	vi
<b>DEDICATORIA</b> .....	vii
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	xi
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	3
2.1 Generalidades del maíz.....	3
2.2 Establecimiento y cultivo del maíz.....	3
2.1 Establecimiento del cultivo.....	3
2.2.1 Requerimientos edáficos.....	4
2.2.2 Requerimientos hídricos.....	4
2.2.3 Temperatura y fotoperiodo.....	5
2.3 Desarrollo y crecimiento del maíz.....	5
2.3.1 Desarrollo.....	5
2.3.2 Crecimiento.....	5
2.4 Morfología y fisiología del maíz.....	6
2.4.1 Ángulo y orientación de la hoja.....	6
2.4.2 Fotosíntesis.....	6
2.4.3 Radiación fotosintéticamente activa.....	7
2.4.4 Índice de área foliar.....	7
2.4.5 Interacción de la morfología y fisiología en el dosel y su efecto en el rendimiento.....	8
2.5 Densidad de población.....	8

2.5.1 Efecto del aumento de la densidad de población en la morfología y fisiología del maíz	9
2.5.2 Efecto de la densidad de población en el rendimiento del maíz .....	9
2.6 Arquetipos de maíz .....	10
2.6.1 Definición.....	10
2.6.2 El arquetipo del maíz.....	11
3. MATERIALES Y MÉTODOS .....	12
3.1 Localización y condiciones de cultivo.....	12
3.2 Material genético .....	12
3.3 Variables agronómicas .....	13
3.4 Variables morfológicas.....	14
3.5 Variables fisiológicas .....	15
3.6 Distribución de biomasa .....	16
3.7 Prolificidad y mazorcas dañadas .....	16
3.8 Características de la mazorca .....	16
3.9 Componentes del rendimiento y rendimiento por unidad de superficie .....	17
3.8 Estimación del daño de aves en mazorcas.....	17
3.9 Análisis estadístico .....	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	20
4.1. Variables agronómicas .....	20
4.1.1 Número de plantas por surco.....	20
4.1.2 Floración.....	23
4.2 Variables morfológicas.....	27
4.2.1 Altura de la mazorca y altura de planta.....	27
4.2.2 Tamaño y orientación de la hoja (LOV) .....	31
4.3 Variables fisiológicas .....	45

4.3.1 Intercambio de gases .....	45
4.3.2 IAF y RFAI .....	49
4.4 Distribución de biomasa en la planta.....	54
4.5 Análisis de prolificidad a través de densidades .....	59
4.5.1 Prolificidad (P) .....	59
4.5.2 Porcentaje de mazorcas dañadas por parcela .....	61
4.6 Características de la mazorca .....	65
4.7 Componentes del rendimiento .....	66
4.8 Rendimiento por unidad de superficie.....	72
4.9 Estimación del daño de aves en mazorcas.....	74
5. DISCUSIÓN GENERAL.....	81
6. CONCLUSIONES .....	82
LITERATURA CITADA .....	83
ANEXO.....	91

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Características fenotípicas de arquetipos de maíz. ....	13
<b>Cuadro 2.</b> Sumas de Cuadrados (SC) del número de plantas intermedias. ....	21
<b>Cuadro 3.</b> Comparación de medias para el número de plantas por surco de la Fase I para los factores arquetipo (A) y densidad (D). ....	22
<b>Cuadro 4.</b> Comparación de medias de Tukey del número de plantas por surco entre densidades de la Fase II. ....	22
<b>Cuadro 5.</b> Sumas de Cuadrados (SC) de las variables de floración. ....	24
<b>Cuadro 6.</b> Comparación de medias de las variables de floración para el factor arquetipo. ....	25
<b>Cuadro 7.</b> Sumas de Cuadrados (SC) de las variables morfológicas.....	27
<b>Cuadro 8.</b> Sumas de Cuadrados (SC) de las variables de tamaño y orientación de la hoja en la Fase II (2017).....	37
<b>Cuadro 9.</b> Comparación de medias entre densidades para las características de la hoja en 2017.....	38
<b>Cuadro 10.</b> Comparación de medias de las características de la hoja entre arquetipos.....	39
<b>Cuadro 11.</b> Análisis de correlación de Pearson de las variables de tamaño y orientación de la hoja (LOV).....	40
<b>Cuadro 12.</b> Sumas de Cuadrados (SC) de los componentes del intercambio gaseoso. ....	46
<b>Cuadro 13.</b> Comparación de medias de componentes del intercambio gaseoso entre densidades.....	47
<b>Cuadro 14.</b> Comparación de medias de los componentes del intercambio gaseoso entre arquetipos.....	48
<b>Cuadro 15.</b> Análisis de correlación de Pearson de las variables de intercambio gaseoso..	49
<b>Cuadro 16.</b> Sumas de Cuadrados (SC) de índice de área foliar (IAF).....	50
<b>Cuadro 17.</b> Comparación de medias entre densidades para el índice de área foliar (IAF) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI). ....	51
<b>Cuadro 18.</b> Comparación de medias entre arquetipos para el índice de área foliar (IAF) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI). ....	52
<b>Cuadro 19.</b> Sumas de Cuadrados (SC) de las variables de distribución de biomasa en planta. ....	55
<b>Cuadro 20.</b> Comparación de medias de y su distribución de biomasa entre densidades....	56

<b>Cuadro 21.</b> Comparación de medias entre arquetipos para las variables de distribución de biomasa. ....	58
<b>Cuadro 22.</b> Sumas de Cuadrados (SC) de la prolificidad (P). ....	59
<b>Cuadro 23.</b> Comparación de medias de Tukey entre densidades para la prolificidad. ....	60
<b>Cuadro 24.</b> Comparación de arquetipos en la prolificidad (P). ....	61
<b>Cuadro 25.</b> Sumas de Cuadrados (SC) del porcentaje de daño de mazorca por parcela. ...	63
<b>Cuadro 26.</b> Comparación de medias entre densidades para el porcentaje de daño de mazorcas por parcela. ....	63
<b>Cuadro 27.</b> Comparación de medias entre arquetipos para el porcentaje de daño de mazorcas por parcela. ....	65
<b>Cuadro 28.</b> Sumas de Cuadrados (SC) del número de granos por superficie. ....	67
<b>Cuadro 29.</b> Sumas de Cuadrados (SC) del peso individual de grano. ....	68
<b>Cuadro 30.</b> Comparación de medias del número de granos por mazorca y peso de 100 semillas para el factor densidad. ....	68
<b>Cuadro 31.</b> Comparación de medias del número de granos por mazorca para los factores Arquetipo (A) e interacción D x A. ....	70
<b>Cuadro 32.</b> Sumas de Cuadrados (SC) del rendimiento. ....	72
<b>Cuadro 33.</b> Comparación de medias de rendimiento para el factor densidades. ....	73
<b>Cuadro 34.</b> Estimación del peso de grano de mazorcas del arquetipo HS2. ....	78
<b>Cuadro 35.</b> Estimación del peso de grano de mazorcas del arquetipo PG133. ....	79
<b>Cuadro 36.</b> Estimación del peso de grano de mazorcas del arquetipo L63. ....	80

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Efecto de daño por granizo a lo largo del ciclo de cultivo de maíz en el año 2016.....	20
<b>Figura 2.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para los días a floración masculina (DFM). .....	26
<b>Figura 3.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para la asincronía floral (ASF).. .....	26
<b>Figura 4.</b> Comparación de medias entre arquetipos para la altura de mazorca (AMZ) y altura de la planta (AP) de la primera fase experimental (2016).. .....	28
<b>Figura 5.</b> Comparación de medias entre arquetipos para la altura de mazorca (AMZ) y altura de la planta (AP) de la segunda fase experimental (2017).....	29
<b>Figura 6.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para la altura de la mazorca (AMZ). .....	30
<b>Figura 7.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para altura de planta (AP)..	30
<b>Figura 8.</b> Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L126.	31
<b>Figura 9.</b> Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L63 ..	32
<b>Figura 10.</b> Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L145. ....	32
<b>Figura 11.</b> Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L71.	33
<b>Figura 12.</b> Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L13.	33
<b>Figura 13.</b> Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L95	34
<b>Figura 14.</b> Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo VDulce. ....	34
<b>Figura 15.</b> Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo PG133. ....	35
<b>Figura 16.</b> Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo HS2	35
<b>Figura 17.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para el ancho de la lámina foliar. ....	40
<b>Figura 18.</b> Medias de ángulo de inserción de la hoja para el estrato superior, medio e inferior de cada arquetipo... ..	41

<b>Figura 19.</b> Medias de longitud de la hoja para el estrato superior, medio e inferior de cada arquetipo. ....	42
<b>Figura 20.</b> Medias del ancho de lámina foliar para el estrato superior, medio e inferior de cada arquetipo. ....	43
<b>Figura 21.</b> Medias del grado de cuelgue de la hoja para el estrato superior, medio e inferior de cada arquetipo.. ....	44
<b>Figura 22.</b> Medias del LOV del estrato alto, medio y bajo para cada arquetipo. ....	45
<b>Figura 23.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para la tasa instantánea de fotosíntesis (A). ....	49
<b>Figura 24.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para el índice de área foliar (IAF). ....	53
<b>Figura 25.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI). ....	53
<b>Figura 26.</b> Daño de aves en mazorca inmadura de maíz. ....	62
<b>Figura 27.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para número de granos por superficie. ....	71
<b>Figura 28.</b> Comparación de medias entre la interacción D x A para el peso individual de grano ....	71
<b>Figura 29.</b> Comparación de medias entre arquetipos para rendimiento de grano de la primera fase experimental (2016). ....	73
<b>Figura 30.</b> Comparación de medias entre arquetipos para rendimiento de grano de la segunda fase experimental (2017). ....	74
<b>Figura 31.</b> Modelo de estimación de peso grano con base en el volumen de mazorca. ....	75
<b>Figura 32.</b> Modelo de estimación de peso grano usando volumen de grano. ....	75
<b>Figura 33.</b> Mazorcas sanas (parte superior) y dañadas (parte inferior) del arquetipo HS2. ....	76
<b>Figura 34.</b> Mazorcas sanas del arquetipo PG133. ....	76
<b>Figura 35.</b> Mazorcas sanas (parte superior) y dañadas (parte inferior) del arquetipo L63. ....	77

## 1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*) es el cereal que más se produce en el mundo (FAO-AMIS, 2018), por ser un alimento básico en muchos países y tener múltiples aplicaciones industriales. En el año 2016, la superficie sembrada en México fue de 7,794,917 ha, con una producción de 23,273,257 t y un rendimiento de 3.28 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2018); en 2017 la producción aumentó 7.72 % con respecto al año anterior, pero el incremento no fue suficiente para cubrir la demanda de grano, lo que se reflejó en el aumento de las importaciones y decremento en las exportaciones (FAO-AMIS, 2018).

De acuerdo con estudios recientes el rendimiento de cereales en el mundo necesita aumentar 1000 millones de toneladas para cubrir la demanda del año 2030 debida al aumento de población (FAO, 2015) y al aumento del consumo de productos de origen animal. Al respecto, Rötter *et al.* (2015) aseguran que el principal desafío para los productores y mejoradores del presente siglo XXI es lograr la seguridad alimentaria, además de combatir los daños provocados por eventos climáticos extremos como sequías u olas de calor, por lo que subrayan la importancia de diseñar “plantas modelo” o arquetipos que se adapten a los cambios climáticos, que tengan un buen rendimiento y que produzcan mayor calidad y cantidad de grano, aceites u otros productos de importancia antropocéntrica (Laurila *et al.*, 2012). Algunas características ideales en maíz son: hojas erectas arriba de la mazorca y horizontales debajo de la misma, espiga pequeña, plantas tolerantes a altas densidades y prolíficas (Mock y Pearce, 1975).

La evaluación de la arquitectura de una planta depende en gran medida de rasgos morfológicos y fisiológicos, como área foliar, ángulo y orientación de la hoja, fotosíntesis y rendimiento, por lo que su optimización puede incrementar el rendimiento (Huang *et al.*, 2017)

La temperatura y la radiación están íntimamente ligadas al crecimiento y desarrollo del maíz, y la densidad de población es una de las prácticas agrícolas más efectivas para maximizar el rendimiento en diferentes condiciones climáticas (Xu *et al.*, 2017), y en algunos sistemas de producción agrícola (De la Cruz-Lázaro *et al.*, 2009).

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo general**

Evaluar el efecto de la arquitectura del maíz (arquetipo) sobre su fisiología, crecimiento y rendimiento.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar arquetipos de maíz con base en variables morfológicas.
- Hacer la caracterización fisiológica de los arquetipos de maíz.
- Elegir los genotipos sobresalientes en rendimiento y en su adaptación a la alta densidad de población.

## **1.2 HIPÓTESIS**

Existen características morfológicas y fisiológicas del maíz que contribuyen a mejorar el rendimiento de grano.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1 Generalidades del maíz**

El maíz es uno de los granos alimenticios más antiguos que se conocen. Perteneció a la familia Poacea (Gramíneas) tribu Maydea, y es la única especie cultivada de este género; se cultiva a los 50° LN en Canadá y Rusia y a los 40° LS en Argentina y Chile (Paliwal, 2001).

México es considerado centro de origen y domesticación del maíz (Kato, 2005) por lo que cuenta con una amplia diversidad de razas. Con una producción mundial de 1,060,107,470 toneladas en el ciclo 2016 el maíz es el cereal que ocupa el primer lugar (FAOSTAT, 2018). México es el séptimo productor con 23,273,257 t producidas en 2016 (SAGARPA, 2017); también es el cuarto consumidor y el segundo importador (WOC, 2018).

Su importancia radica en que no sólo se utiliza maíz para la nutrición de humanos y animales, sino también como materia prima en la industria de la transformación (Salazar y Godínez, 2008); además, el maíz es el único cereal cuyos órganos pueden consumirse como alimento en distintas etapas de desarrollo de la planta (Paliwal, 2001).

### **2.2 Establecimiento y cultivo del maíz**

#### **2.1 Establecimiento del cultivo**

El maíz se adapta ampliamente a diversas condiciones ecológicas y edáficas, por lo que se cultiva en casi todo el mundo (Bonilla, 2009), pero su productividad varía de acuerdo con el nivel tecnológico del cultivo, el clima, la fertilización y el manejo de malezas (Barros *et al.*, 2017). Para determinar el genotipo a sembrar en cada zona se consideran factores como: la altitud, intensidad y frecuencia de heladas, precipitación pluvial, disponibilidad de sistemas de riego, época de siembra y la densidad de población (INEGI, 1997).

Su ciclo de cultivo dura entre 80 a 200 días desde la siembra a la cosecha (INEGI, 1997) y puede cultivarse en altitudes desde 0 a los 2500 msnm (Cruz, 2013). En México, el periodo de cosecha es entre los meses de noviembre y enero para el ciclo de otoño, y en junio para el ciclo Primavera-Verano (SAGARPA, 2017).

La fecha recomendada de siembra en el Estado de México; cuando se dispone de riego o existe humedad residual, es durante la segunda semana de marzo para que las plantas alcancen su madurez fisiológica durante la segunda semana de septiembre (180 días) y así eviten las heladas tempranas; en condiciones de temporal o secano es recomendable el uso de variedades de ciclo corto para evitar que las plantas alcancen su etapa reproductiva en la temporada de heladas (Turrent *et al.*, 1992).

### 2.2.1 Requerimientos edáficos

Para su crecimiento del maíz se prefieren suelos profundos, fértiles y permeables que sean de textura franca, con una buena capacidad de retención de agua, que no tengan tendencias a inundarse o encharcarse (Deras, 2014; Ospina, 2015). En cuanto a los requerimientos nutricionales, un cultivo de maíz que produce  $4000 \text{ kg ha}^{-1}$  de grano requiere alrededor de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrógeno,  $18 \text{ kg ha}^{-1}$  de fósforo y  $68 \text{ kg ha}^{-1}$  de potasio (Sánchez, 1976).

### 2.2.2 Requerimientos hídricos

Una planta de maíz requiere aproximadamente de 5 mm de agua al día (Cruz, 2013) y entre 500 a 1000 mm durante todo su ciclo de cultivo (Bonilla, 2009), las etapas con mayor demanda son germinación, floración y llenado del grano (Ospina, 2015). De acuerdo con Turrent *et al.* (1992), se conocen cuatro sistemas de cultivo de maíz en el Estado de México en cuanto al régimen hídrico:

- 1) **Riego completo:** se utilizan sistemas de riego y no depende del periodo de lluvias o edáficas para su establecimiento; se prefiere sembrar genotipos de ciclo largo (tardíos). Es la modalidad que produce mayor rendimiento.
- 2) **Riego incompleto:** También conocido como “punta de riego” consiste en la aplicación de un riego pesado previo a la siembra. Ideal para zonas con abasto adecuado de agua de lluvia y suelos con textura fina. Se acostumbra hacer en siembra temprana.

- 3) **Temporal con humedad residual:** Se realiza en las zonas del eje volcánico que tienen suelos profundos con un horizonte superficial grueso y de textura ligera, permite la siembra 2 meses antes de temporada de lluvias.
- 4) **Temporal estricto:** La siembra debe realizarse al inicio de la temporada de lluvias y se recomienda sembrar variedades de ciclo corto (precoces).

### 2.2.3 Temperatura y fotoperiodo

El maíz requiere una temperatura de 25 a 30 °C (Ortas, 2008) aunque puede soportar temperaturas mínimas de 8 °C y máximas de 39 °C (Cruz, 2013), y un fotoperiodo de 11 a 14 horas (INEGI, 1997; Bonilla, 2009).

## 2.3 Desarrollo y crecimiento del maíz

### 2.3.1 Desarrollo

El desarrollo del cultivo de maíz se basa en cuatro eventos estratégicos: semilla en reposo (S), iniciación floral (IF), floración (F) y madurez fisiológica (MF), por medio de los cuales puede establecerse una escala fenológica de tres etapas:

**I. Etapa vegetativa:** periodo desde la siembra de semilla a la iniciación floral, en esta fase se determina el número de hojas y el área foliar potencial.

**II. Formación de inflorescencia:** Es el periodo desde la iniciación floral a la floración, en esta fase se determina el número potencial de semillas.

**III. Llenado de grano:** periodo desde floración a la madurez fisiológica de la semilla, en esta fase se determina el número final de semillas y el peso de semilla.

### 2.3.2 Crecimiento

De acuerdo con Tanaka y Yamaguchi (2014), el proceso de crecimiento de las plantas del maíz se divide en cuatro fases:

**I. Fase vegetativa inicial:** Se caracteriza por una lenta acumulación de biomasa, e inicia con la emergencia de las hojas.

**II. Fase vegetativa activa:** En esta fase se desarrollan las hojas, el tallo y el primordio de los órganos reproductivos; en cuanto a la materia seca ocurre un incremento activo de peso de las hojas y posteriormente del tallo. La fase termina con la emisión de estigmas.

**III. Fase inicial de llenado de grano:** El peso de tallo y hojas continúan incrementando, pero a velocidad menor, también aumenta el peso de las espatas y raquis, así como el peso de los granos.

**IV. Fase de llenado activo del grano:** rápido incremento en el peso de los granos acompañado de un ligero abatimiento de la biomasa de hojas, tallo, espatas y raquis.

## **2.4 Morfología y fisiología del maíz**

### **2.4.1 Ángulo y orientación de la hoja**

El ángulo de la hoja es la distancia en grados angulares desde el tallo a la inserción de la hoja, algunos investigadores relacionan hojas erectas con ángulos menores a 45° (Pendleton *et al.*, 1968; Winter y Ohlrogge, 1973). Sin embargo, aunque las láminas foliares tengan un mismo ángulo de inserción al tallo, estas pueden tener una orientación diferente que las hace visualmente más erectas o más colgadas; a esto se le llama valor de orientación de la hoja o LOV por su nombre en inglés “Leaf Orientation Value” (Pepper *et al.*, 1977).

En altas densidades de siembra los genotipos no cambian su ángulo de inserción de la hoja, sino la orientación de la misma para tener un mejor uso de la radiación (Gou *et al.*, 2017), en consecuencia, a nivel de dosel la caracterización de la arquitectura de la hoja debería hacerse por medio de la determinación del LOV ya que explica mejor su comportamiento ante los cambios del ambiente.

### **2.4.2 Fotosíntesis**

La fotosíntesis es un proceso biológico mediante el cual los órganos fotosintéticos utilizan la energía radiante sintetizar carbohidratos a partir de dióxido de carbono y agua, y liberar oxígeno (Taiz y Zeiger, 2010). En cuanto a su ciclo de carboxilación, las plantas pueden dividirse en tres

grupos C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub> y CAM (Ehleringer *et al.*, 1997); el maíz se ubica en el grupo C<sub>4</sub>. Como planta C<sub>4</sub>, el maíz alcanza tasas fotosintéticas promedio de 40 a los 85  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , con un punto de compensación del CO<sub>2</sub> de 11 a 25 partes por millón y un punto de fotosaturación máximo cercano a 2200  $\mu\text{moles de fotones m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Zelitch, 2012).

De acuerdo con Parry *et al.* (2010), la fotosíntesis total de un cultivo depende de los siguientes factores:

- La habilidad de interceptar y capturar la energía radiante.
- Duración de la captura de radiación.
- Capacidad y eficiencia y tamaño del aparato fotosintético del dosel.

### **2.4.3 Radiación fotosintéticamente activa**

La radiación fotosintéticamente activa (RFA) es la porción de radiación solar que las plantas utilizan para la fotosíntesis (Gou *et al.*, 2017), la cual se encuentra en la región del espectro solar cuya longitud de onda está comprendida entre 0.40 y 0.70  $\mu\text{m}$  (Righini y Grossi, 2005).

### **2.4.4 Índice de área foliar**

El índice de área foliar (IAF) es un índice cuantitativo de la estructura del dosel (Xu, 2017), y consiste en una expresión numérica adimensional que resulta de la división aritmética del área de los limbos foliares de un cultivo ( $\text{m}^2$ ) entre el área de suelo sobre el cual se encuentra establecido ( $\text{m}^2$ ). El IAF permite estimar el tamaño del aparato fotosintético laminar de las plantas y ayuda a entender la relación entre acumulación de biomasa y rendimiento bajo las condiciones ambientales imperantes en una región determinada (Intagri, 2018).

#### **2.4.5 Interacción de la morfología y fisiología en el dosel y su efecto en el rendimiento**

El rendimiento potencial está determinado por el producto de la energía radiante disponible, la eficiencia en la captura de la radiación y la conversión de la energía en biomasa de interés antropocéntrico, es decir, el grano en el caso del maíz (Long *et al.*, 2015).

Una buena arquitectura de la planta provee una mejor distribución de la radiación evitando desperdicio de luz e incrementar la tasa fotosintética bajo condiciones de saturación. Las hojas horizontales interceptan mayor radiación en los estratos superiores del dosel, lo que representa un desperdicio de la radiación, por lo que conviene que el estrato superior intercepte una pequeña fracción, lo cual puede conseguirse con arquetipos de hojas erectas en la parte superior (Long *et al.*, 2006).

La estructura del dosel depende del índice de área foliar y de la geometría del cultivo (Stewart *et al.*, 2003; Liu, T *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2017). Una arquitectura óptima del dosel permite una captura eficiente de radiación para la fotosíntesis y una mejor circulación del aire, lo cual repercute directamente en el rendimiento y la fotosíntesis (Liu *et al.*, 2012; Truong *et al.*, 2015; Shi *et al.*, 2016).

Cuando la radiación interceptada por el dosel es baja, disminuye la producción de materia seca, el rendimiento de grano (Tiwari *et al.*, 2012) y la tasa fotosintética (Li *et al.*, 2015a), además de que disminuye la fuerza mecánica de las áreas bases de los entrenudos e incrementa el riesgo de acame (Gou *et al.*, 2017). Las altas densidades de población promueven la elongación del tallo (Casal, 2013), por lo que la defoliación de hojas senescentes en etapas tempranas post-antesis puede cambiar el balance de asimilación de la planta y aumentar la capacidad fotosintética en las hojas restantes (Iqbal *et al.*, 2012; Liu *et al.*, 2015).

#### **2.5 Densidad de población**

Se entiende por densidad de población al número de plantas sembradas en una superficie determinada, lo cual depende de factores como: fertilidad del suelo, humedad edáfica, porcentaje de germinación, sistema de producción, fecha de siembra y ancho de surco (Sangoi, 2001; Cruz, 2013), por lo que las densidades óptimas varían entre ambientes (Tokatlidis, 2013).

Los sistemas de producción recientes de maíz, en condiciones ambientales óptimas o no limitantes, se basan en altas densidades de siembra, aunque si se establece un número de plantas superior al óptimo se incrementa la competencia por luz, agua y nutrimentos (Sher *et al.*, 2017); por el contrario, si se establecen pocas plantas por superficie se presentan problemas con malezas y desperdicio de suelo (Njoka *et al.*, 2005).

### **2.5.1 Efecto del aumento de la densidad de población en la morfología y fisiología del maíz**

Las plantas pueden adaptarse a las altas densidades de población ajustando su morfología (arquitectura) y en consecuencia la estructura del dosel (Liu *et al.*, 2017a). Algunos cambios morfológicos que ocasionan el aumento de la densidad de población son: disminución del diámetro de tallo, reducción del ancho de láminas foliares, reducción del largo de láminas en el estrato superior del dosel, modificación de la orientación de las hojas (Turgut *et al.*, 2005; Song *et al.*, 2016; Gou *et al.*, 2017).

De acuerdo con varios autores, el arquetipo de maíz idóneo para su siembra en altas densidades de población debe tener hojas angostas, con menor ángulo de inserción y mayor LOV en el dosel arriba de la mazorca; en cambio, a partir de la mazorca, las hojas deben ser pequeñas y colgadas (Gou *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2017a).

### **2.5.2 Efecto de la densidad de población en el rendimiento del maíz**

El rendimiento por superficie es el producto del rendimiento promedio por planta y el número de plantas por unidad de área (densidad de población) (Hashemi *et al.*, 2005). Por su parte, el rendimiento de grano por planta depende del número final de granos que alcanzan la madurez fisiológica (Rossini *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 2016) y del peso individual del grano (Cui *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017b).

El aumento excesivo de la densidad de población puede representar un estrés para el maíz debido a la escasez en la magnitud y calidad de los factores ambientales (agua, nutrimentos y radiación, principalmente) para cada planta (Tokatlidis, 2017); esta competencia por factores físicos del ambiente disminuye el rendimiento debido a que reduce el número y tamaño de mazorcas por planta (Xu *et al.*, 2017). Sin embargo, el aumento de la densidad de población incrementa el

rendimiento por superficie (Sarlangue *et al.*, 2007) de manera lineal hasta que se alcanza densidad de población óptima (Turgut *et al.*, 2005).

La disminución del rendimiento por planta se debe a una menor cantidad de biomasa acumulada por planta (Luque *et al.*, 2006) y la disminución de todos los componentes del rendimiento (Hashemi *et al.*, 2005; Testa *et al.*, 2016), además del aumento de acame (Novacek *et al.*, 2013; Xue *et al.*, 2016), a la asincronía entre la floración masculina y femenina (Hernández *et al.*, 2014), así como disminución de la prolificidad (Carrera y Cervantes, 2006) y del índice de cosecha (Tollenaar *et al.*, 1997).

## **2.6 Arquetipos de maíz**

### **2.6.1 Definición**

El término arquetipo fue acuñado por primera vez por Donald (1968) quien lo definió como un modelo biológico el cual se prevé se desarrolle o comporte de una manera predecible en un ambiente determinado. En principio este término se utilizaba solamente para cereales como el trigo (Donald, 1968; Semenov y Stratonovitch, 2015), arroz (Peng *et al.*, 2008; Yi *et al.*, 2016), o maíz (Mock y Pearce, 1975; Sangoi y Salvador, 1998; Gong *et al.*, 2015). Sin embargo, actualmente se utiliza para describir también manzanos (Da Silva *et al.*, 2014; Parisi *et al.*, 2014), tomates (Sarlikioti *et al.*, 2011; Zsögön *et al.*, 2017) e incluso se han desarrollado arquetipos de órganos de la planta como la raíz (Lynch, 2013).

Así, la definición de arquetipo ha evolucionado desde el concepto de planta al concepto de cultivo (Andrison *et al.*, 2013), por lo que ahora se define como la combinación de rasgos morfológicos, fisiológicos y genéticos que optimicen el desarrollo del cultivo para un ambiente en particular (Martre *et al.*, 2015), que influyen en su fotosíntesis, crecimiento y producción de grano (Sharma *et al.*, 2013) para que produzcan mayor calidad y cantidad de grano, aceites u otros productos de importancia antropocéntrica (Laurila *et al.*, 2012).

Existen dos opciones para diseñar un arquetipo; empezar con un genotipo ya existente el cual se quiera modificar, o bien plantear primero un objetivo y seleccionar el arquetipo adecuado a las necesidades planteadas (Andrison *et al.*, 2013). Con respecto a la segunda opción, Martre *et al.* (2015) proponen tres pasos para diseñar un arquetipo: 1) Definir el objetivo principal del proceso

de mejoramiento; 2) Definir el caracter morfo-fisiológico para alcanzar el objetivo planteado; y 3) Ensayo y análisis del material y su integración con el ambiente, es decir, evaluación en campo del arquetipo.

### **2.6.2 El arquetipo del maíz**

Según Mock y Pearce (1975), el arquetipo de maíz debe tener hojas erectas arriba de la mazorca y horizontales debajo, espiga pequeña, tolerancia a altas densidades de población y ser prolífica. Por otro lado, Sangoi y Salvador (1998) establecieron que la planta ideal de maíz debería tener una mazorca apical, carecer de espiga, tener porte bajo, tener pocas hojas y ser tolerante a altas densidades de siembra.

Un estudio más reciente propone que en sistemas de producción sin restricciones ambientales, el arquetipo de maíz debe ser apto para su siembra en altas densidades de población, resistente al acame, con rápida tasa de llenado y deshidratación del grano, altura uniforme que facilite el proceso de mecanización, y tener alta eficiencia del uso de radiación (Gong *et al.*, 2015).

Debido a las cambiantes condiciones climáticas y de uso del suelo, algunos autores consideran que el diseño del arquetipo de maíz debe incluir una mayor eficiencia fotosintética, adaptación al cambio climático (Foyer *et al.*, 2017), ser independiente de las densidades de población, es decir, que pueda establecerse en densidades bajas y altas dependiendo de las necesidades del productor (Tokatlidis *et al.*, 2011; Tokatlidis, 2017), resistente a patógenos (Ando *et al.*, 2007; Dann y Leister, 2017), que pueda cultivarse en asociación con otras especies (Awal *et al.*, 2006) y poseer tolerancia a sequía (Perego *et al.*, 2014).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Localización y condiciones de cultivo

Se establecieron dos experimentos de campo en dos años sucesivos (2016 y 2017), identificados como fase I y fase II, en el campo experimental del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, ubicado en Montecillo, Texcoco, Estado de México (19°28'4.16" N, 98°53'50.53" O); ambos ensayos fueron conducidos en condiciones de riego. El primer experimento se sembró el 12 de abril de 2016 y el segundo el 5 de abril de 2017. Es importante mencionar que en el primer experimento se presentaron daños intensos ocasionados por granizo y aves por lo que las mediciones fisiológicas se vieron fuertemente afectadas.

En 2016 se sembraron 15 arquetipos y en 2017 se incluyeron 8 de los arquetipos del año anterior más uno nuevo. Cada arquetipo se sembró en dos densidades de siembra, 62,500 y 125,000 plantas ha<sup>-1</sup>. Se sembraron dos semillas por mata a una distancia de 20 cm para la densidad baja y de 10 cm para la densidad alta. En 2016 el aclareo a una planta por mata se hizo a los 57 días después de siembra (dds), y en 2017 a los 58 dds.

En 2016 cada parcela experimental constó de 3 surcos de 0.80 m de ancho por 3 m de largo, y en 2017 de 4 surcos de 0.80 m de ancho por 2 m de largo. En ambos años, se hicieron dos aplicaciones de Malathion® 50 CE (515 g i. a. L<sup>-1</sup> de Malatión) a una dosis de 7.5 mL L<sup>-1</sup> agua para el control de gusano cogollero, y dos aplicaciones de Gramoxone® (200 g L<sup>-1</sup> i.a. Paraquat) con una dosis de 6.66 mL L<sup>-1</sup> agua y dos deshierbes manuales para el control de malezas.

#### 3.2 Material genético

Los arquetipos de la Fase I incluyeron 13 líneas de maíz que contrastan en arquitectura de planta, una variedad regional llamada Dulce, y como testigo el híbrido comercial HS2 de arquitectura convencional. En la Fase II se redujo el número de arquetipos por dos razones: la primera, por falta de semilla de algunos arquetipos, y la segunda, para asegurar la oportuna la medición de las

variables fisiológicas, en este año se agregó el testigo híbrido PG133 de hojas erectas. En el Cuadro 1 se indican las características importantes de cada arquetipo y su establecimiento en ambas fases.

**Cuadro 1.** Características fenotípicas de arquetipos de maíz.

<b>Nombre</b>	<b>Características</b>	<b>Fase I</b>	<b>Fase II</b>
		<b>2016</b>	<b>2017</b>
<b>L13</b>	Valles altos, porte medio.	Sí	No
<b>L14</b>	Tropicalita, resistente a sequía, porte alto	Sí	Sí
<b>L39</b>	Tropicalita, porte bajo	Sí	No
<b>L63</b>	Valles Altos, tipo piña, porte bajo.	Sí	Sí
<b>L71</b>	Tropicalita, cuatera, porte medio.	Sí	Sí
<b>L95</b>	Valles Altos/Tropicalita, cuatera.	Sí	Sí
<b>L104</b>	Valles altos, porte alto	Sí	No
<b>L126</b>	Valles Altos, hojas erectas, porte bajo.	Sí	Sí
<b>L129</b>	Tropicalita, porte medio-bajo	Sí	No
<b>L145</b>	Porte medio, hojas erectas.	Sí	Sí
<b>VDulce</b>	Tropical/Valles altos, grano rojo, porte medio	Sí	Sí
<b>CP177</b>	Donado por el Doctor J. Jesús García Zavala	Sí	No
<b>CP334</b>	Donado por el Doctor J. Jesús García Zavala	Sí	No
<b>PG133</b>	Porte alto, hojas erectas, maíz blanco, cuatera	No	Sí
<b>HS2</b>	Porte alto, híbrido comercial del C.P.	Sí	Sí

### 3.3 Variables agronómicas

**Número de plantas por surco.** Al término del aclareo, se contó el número de plantas de los surcos intermedios de cada parcela, los cuales fueron la parcela útil.

**Floración.** Se registraron los días a floración masculina (DFM) y femenina (DFF); el primero desde la siembra al día en que la mitad de las plantas de cada parcela tuvieran espigas dehiscentes (con derrame de polen), y el segundo al día en que la mitad de las plantas de cada parcela

presentaran estigmas visibles. También se registró la magnitud de asincronía floral (ASF), mediante la diferencia entre DFF y DFM.

### 3.4 Variables morfológicas

**Altura de mazorca y de planta.** Estas variables se registraron con base en el Manual de Descriptores para Maíz (IBPGR, 1991), cuando las plantas alcanzaron su altura máxima, a dos plantas de la parcela útil. La altura de mazorca se midió desde el ras del suelo hasta el nudo de la mazorca superior, y la altura de planta desde el ras del suelo a la base de la espiga.

**Tamaño y orientación de la hoja.** Estas variables se determinaron en la fase II (2017). Las mediciones se hicieron en tres estratos de cada planta: el estrato superior fueron las tres hojas más cercanas a la espiga; el estrato medio, las tres hojas cercanas a la mazorca; y el estrato inferior, las tres hojas más cercanas al suelo. Las variables respuesta medidas fueron: ángulo de inserción de la hoja, longitud de la lámina foliar, y longitud al cuelgue de la lámina foliar, las cuales se utilizaron para determinar un valor de orientación de la hoja o LOV por sus siglas en inglés “Leaf Orientation Value”, mediante la Ecuación 1 propuesta por (Ku *et al.*, 2010); los resultados se presentaron en promedio por estrato.

$$LOV = \sum \frac{(90 - \theta) \times \left(\frac{Lf}{LL}\right)}{n} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde: n = número de hojas medidas (3 por estrato);  $\theta$  = ángulo de la hoja; Lf = distancia de la lígula al punto de cuelgue; LL= longitud de la lámina foliar.

El ángulo de inserción de la hoja se registró con la ayuda de la aplicación Clinometer® instalada en un teléfono móvil iPhone 4S™. Esta variable se definió desde la vertical del tallo a la lígula de la lámina foliar. La longitud de la lámina foliar (LL) fue la distancia desde la lígula al ápice de la lámina, y su longitud al cuelgue (Lf) como la distancia desde la lígula al punto en que la lámina cambia de orientación. Adicionalmente se registró el ancho de la parte media de la lámina foliar.

### 3.5 Variables fisiológicas

**Intercambio de gases.** Con un equipo portátil para medir fotosíntesis Li-6400® (LICOR, Inc., USA) se midió la tasa instantánea de fotosíntesis (A), la concentración interna de CO<sub>2</sub> (C<sub>i</sub>), la conductancia estomática (g<sub>s</sub>) y la tasa de transpiración (E) en hojas maduras a la altura de la mazorca. En la Fase I del 2016, las mediciones se realizaron entre los 85 y los 138 dds, y en la Fase II del 2017 se hicieron entre los 65 y los 100 dds, en ambos años entre las 11:00 y las 14:00 horas para asegurar una radiación fotosintéticamente activa mayor a 1500 fotones m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire fue de entre 400 y 420 pm.

**Índice de área foliar (IAF).** Esta variable se midió en la etapa de floración con un analizador de dosel vegetal LAI 2200C® (LICOR, Inc., USA) para estimar el IAF por parcela. Para medir el IAF en una parcela se realizaron dos lecturas con el equipo arriba del dosel y cuatro lecturas por debajo del mismo, a nivel del suelo y en forma diagonal entre los surcos intermedios. El sensor (lente) fue cubierto con un filtro de 45° para evitar el efecto de sombra de la persona que mide. Con los datos registrados el propio instrumento calculó un índice de área foliar promedio por parcela.

**Radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI).** Esta variable se midió en la etapa de floración con un sensor lineal LI-1500® (LICOR, Inc., USA). En cada parcela se hizo una medición por arriba del dosel para obtener la radiación fotosintéticamente activa incidente (RFA<sub>i</sub>), y posteriormente dos mediciones al ras del suelo para obtener la cantidad de RFA que penetraba a través del dosel (RFA<sub>s</sub>). Para las mediciones al ras de suelo, el sensor se colocó de forma diagonal entre los surcos de la parcela. Los datos se reportaron en porcentaje de intercepción de radiación (Ecuación 2).

$$\text{Porcentaje de intercepción de la radiación (\%RFAI)} = \frac{\text{RFA}_s}{\text{RFA}_i} \times 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

### 3.6 Distribución de biomasa

A la cosecha, se seleccionaron dos plantas de la parcela útil y se separaron sus órganos (laminas, grano, olote, tallo, brácteas, vainas y espiga). Posteriormente cada órgano se colocó en bolsas de papel y se secaron en una estufa a 70 °C por 72 horas. Los datos de la materia seca se reportaron en porcentaje de acumulación de biomasa en cada órgano con respecto al peso total de la planta.

### 3.7 Prolificidad y mazorcas dañadas

**Prolificidad.** Una vez que los arquetipos alcanzaron la madurez fisiológica del grano, se contó el número final de plantas en los surcos intermedios y las plantas con dos o más mazorcas. La prolificidad (Ecuación 3) se calculó a partir del número final de plantas.

$$P = 1 + \frac{\text{No. de plantas con doble mazorca}}{\text{No. de plantas a cosecha}} \quad (\text{Ec. 3})$$

**Porcentaje de mazorcas dañadas por parcela.** Para cuantificar la severidad del daño por aves invasoras se obtuvo la proporción del número de mazorcas con daño de ave con respecto al total de mazorcas por parcela y se reportaron en porcentaje.

### 3.8 Características de la mazorca

A las 10 mazorcas seleccionadas de cada combinación arquetipo x densidad se les midió individualmente longitud de mazorca (LMAZ), diámetro de mazorca (DMAZ), número de hileras por mazorca (HIL), número de granos por hilera (GHIL), diámetro de olote (DOL) y peso de grano (PGR), con base en los descriptores diseñados para maíz (IBPGR, 1991); el número de granos por mazorca (NGR) se determinó con el producto HIL x GHIL.

### 3.9 Componentes del rendimiento y rendimiento por unidad de superficie

**Peso individual de grano.** Se midió en cuatro muestras de 100 granos de cada tratamiento (combinación arquetipo por densidad de siembra), mediante el peso registrado con una balanza analítica Sartorius modelo 1474 con precisión de  $\pm 0.1$  mg (Sartorius® Alemania). Posteriormente el resultado se dividió entre cien para obtener el peso individual de grano y se reportó en miligramos.

**Número de granos por superficie.** Se calculó con la relación del peso de grano por planta, el peso individual de grano y la densidad de población (Ecuación 4)

$$NGR \text{ ha}^{-1} = \frac{PGR}{PIG} \times DP \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:  $NGR \text{ ha}^{-1}$  = número de granos por superficie; PGR = peso de grano por planta; PIG = peso individual de grano; DP = densidad de población.

**Rendimiento por unidad de superficie.** El rendimiento se determinó con el producto del peso de grano por planta (PGR) y la densidad de población (Ecuación 5).

$$Rend (t \text{ ha}^{-1}) = PGR \times DP \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde: Rend = rendimiento de grano; PGR = peso de grano por planta; DP = densidad de población.

### 3.8 Estimación del daño de aves en mazorcas

Se generó un modelo para estimar el peso de grano de la mazorca en función de varios parámetros de la misma: diámetro, longitud, diámetro del olote, peso del olote, y densidad del grano. Con este modelo se estimó el peso del grano de una mazorca con daños, en función de los parámetros antes descritos.

Para estimar el volumen de la mazorca y del grano, se seleccionaron 51 mazorcas completas para el año 2016, y 27 mazorcas para el 2017 del híbrido comercial HS2. A cada mazorca se le midió

diámetro de mazorca, longitud de mazorca, diámetro de olote, peso de olote y peso de grano. Posteriormente se estimó un volumen de mazorca y un volumen de grano con las ecuaciones 6 y 7 respectivamente.

$$VMAZ = LMAZ \times \pi \times (rMAZ)^2 \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde: LMAZ= longitud de mazorca;  $\pi$  = constante pi; rMAZ= radio de la mazorca.

$$VGR = VMAZ - (LMAZ \times \pi \times (rOL)^2) \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde: VMAZ= volumen de mazorca; LMAZ=longitud de mazorca;  $\pi$  = constante pi; rOL=radio de olote.

**Densidad de grano.** La densidad de grano se calculó utilizando un cubo de 125 cm<sup>3</sup> (5 cm por lado), se llenó al ras con una muestra de grano y se pesó en una balanza analítica Sartorius modelo 1474 con precisión de  $\pm 0.1$  mg (Sartorius® Alemania). La densidad se calculó con la relación de volumen y peso de grano como se muestra en la Ecuación 8.

$$\text{Densidad de grano} = \frac{\text{Peso de grano dentro del cubo}}{\text{Volumen del cubo}} \quad (\text{Ec. 8})$$

**Determinación del modelo matemático.** Se obtuvieron dos modelos matemáticos, uno para el volumen de mazorca y otro para el volumen de grano. Para estandarizarlos a todo tipo de grano se multiplicó al volumen de mazorca y de grano por la densidad del grano y el peso de grano por mazorca se estandarizó a 8 % de humedad.

Con estos datos se hizo una regresión lineal ajustada al origen (0,0) tomando como variable dependiente la relación Volumen x Densidad, y como variable independiente al peso de grano de mazorca estandarizado a 8 % de humedad.

Para validar el modelo matemático para estimar el peso de grano, se utilizaron los datos de LMAZ, DMAZ y PGR obtenidos en el análisis de componentes del rendimiento. Los pesos estimados de las dos ecuaciones del modelo (usando VMAZ y VGR) se compararon contra el peso de grano de cada mazorca estandarizado a 8 % de humedad.

### 3.9 Análisis estadístico

El diseño experimental establecido en campo fue de parcelas divididas con tres bloques (repeticiones); la parcela grande fue densidad de siembra, y la parcela chica el arquetipo. Para el análisis estadístico se utilizó un análisis de parcelas divididas con bloques al azar, mediante un análisis de varianza (ANOVA) y una prueba de comparación de medias de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) con el paquete estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2008). Se realizó un análisis de supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas y se transformaron los datos necesarios para cumplir con los mismos. Los resultados se reportan en su escala original.

En el caso de LOV, al modelo anterior se le agregó el efecto de estratos, como un factor anidado en cada arquetipo. Los resultados de características de la mazorca y peso individual de grano se analizaron como un diseño factorial 2 x 15 en la Fase I, y como un factorial 2 x 9 en la Fase II, debido a que se midieron con base en muestras aleatorias.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Variables agronómicas

#### 4.1.1 Número de plantas por surco

Los eventos adversos que ocurrieron en la Fase I (2016) complicaron la conducción del experimento. El principal factor de impacto fueron las granizadas que ocurrieron desde etapas tempranas del ciclo de crecimiento del maíz que dañaron severamente el área foliar (Figura 1), un factor imprevisto en esta investigación; es bien conocido que la granizada es un factor de estrés abiótico impredecible en tiempo e intensidad y puede causar daño a las plantas en cualquier momento (Tartachnyk y Blanke, 2002).



**Figura 1.** Efecto de daño por granizo a lo largo del ciclo de cultivo de maíz en el año 2016.

El análisis de varianza (Cuadro 2) indicó que hubo efecto significativo de la densidad en el número de plantas por surco en ambos años (75 % y 98 %); en cambio, el arquetipo tuvo efecto significativo sólo en la primera fase, y la interacción D x A no tuvo efecto significativo en ambas fases experimentales.

**Cuadro 2.** Sumas de Cuadrados (SC) del número de plantas intermedias.

<b>Año</b>	<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>Plantas por surco</b>
<b>2016</b>	Bloque (B)	2	20
	Densidad (D)	1	1725 (75) *
	Error PG	2	43
	Arquetipo (A)	14	443 (19) *
	D x A	14	132 (6)
	Error PCH	56	487
	CV (%)		17
<b>2017</b>	Bloque (B)	2	0.86
	Densidad (D)	1	1360.02 (98.9) *
	Error PG	2	5.68
	Arquetipo (A)	8	7.75 (0.6)
	D x A	8	6.40 (0.5)
	Error PCH	32	21.3
	CV (%)		5.83

PG = parcelas grandes; PCH = parcelas chicas; FV = fuente de variación; GL = grados de libertad; \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ ; Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

Un objetivo del experimento en campo fue evaluar dos densidades de siembra contrastantes, una baja de 62,500 plantas  $ha^{-1}$  y un alta de 125,000 plantas  $ha^{-1}$ , pero ello no fue posible en la Fase I (2016) debido a fallas variables en la densidad entre parcelas que causaron alta dispersión en el número de plantas por parcela (Cuadro 3). En la densidad baja se alcanzó un promedio de 13 plantas por surco y de 22 en la densidad alta, aproximadamente, cuando se esperaban 15 y 30 respectivamente. Entre genotipos también se encontró una amplia variación con valores que fluctuaron desde 14 hasta 21 plantas por surco.

**Cuadro 3.** Comparación de medias para el número de plantas por surco de la Fase I para los factores arquetipo (A) y densidad (D).

Arquetipo	Número de plantas por surco		
	DB	DA	Media
L13	11.0	17.7	14.3 bc
L14	11.3	23.3	17.3 a,c
L39	10.0	17.3	13.7 c
L63	14.3	20.3	17.3 a,c
L71	14.7	24.0	19.3 a,c
L95	14.3	25.7	20.0 ab
L104	13.0	22.7	17.8 a,c
L126	10.7	17.3	14.0 bc
L129	12.3	21.7	17.0 a,c
L145	13.7	19.7	16.7 a,c
L177	14.3	19.3	16.8 a,c
L334	13.7	20.7	17.2 a,c
VDulce	15.0	26.0	20.5 a
HS2	15.0	26.7	20.8 a
L(LE <sub>3</sub> x LE <sub>6</sub> ) <sub>Fn</sub>	13.7	26.0	19.8 ab
<b>Media densidad</b>	<b>13.1 Y</b>	<b>21.9 X</b>	

Letras minúsculas iguales no tienen diferencias significativas entre arquetipos (Tukey, 0.05). DB y DA = densidad baja y alta, respectivamente. Letras mayúsculas (X-Y) iguales indican que no hay diferencias significativas entre densidades ( $p \leq 0.05$ ).

En la Fase II (2017) hubo un promedio de 9 plantas por surco en la densidad baja y de 19 en la densidad alta (Cuadro 4), que son valores muy cercanos a los esperados de 10 plantas por surco para la densidad baja y de 20 para la densidad alta. Es decir, en 2017 se logró un establecimiento exitoso de las densidades de siembra esperadas, y por tanto un ambiente homogéneo entre parcelas.

**Cuadro 4.** Comparación de medias de Tukey del número de plantas por surco entre densidades de la Fase II.

Densidad	Plantas/surco
DB	08.98 b
DA	19.02 a

Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). DB y DA = densidad baja y alta, respectivamente. Promedio de nueve arquetipos evaluados para cada densidad.

#### 4.1.2 Floración

Las variables de floración repercuten directamente en el rendimiento final de grano, debido a que la sincronía entre los días a floración masculina y femenina define la fertilidad de cada planta y el número de granos por mazorca. De acuerdo con Zaidi *et al.* (2016), el periodo entre los días a floración masculina (DFM) y femenina (DFF), también llamado asincronía floral (ASF), es de 2 a 3 días en condiciones óptimas de cultivo, aunque este intervalo tiende a alargarse bajo condiciones de estrés.

En la Fase I (2016) las variables de floración (DFM, DFF y ASF) fueron afectadas principalmente por el arquetipo (97.90, 97.51 y 90.99 % de la SC de tratamientos), cuando el factor densidad tuvo una contribución mínima (no significativa) a la variación y la interacción D x A afectó significativamente a los días a floración masculina y a la asincronía floral (Cuadro 5).

En la Fase II del 2017 (Cuadro 5) las tres variables de floración fueron afectadas en mayor proporción por el arquetipo (98.72, 86.95 y 52.99 %), factor que tuvo efecto significativo sobre DFM Y DFF, pero no en ASF, mientras que los factores densidad (D) e interacción D x A no tuvieron efecto significativo en estas variables.

En otros estudios, Rossini *et al.* (2012) encontraron que la ASF es afectada tanto por el arquetipo como por la densidad, y que DFM y DFF no son afectadas por ningún factor de variación, mientras que Boomsma *et al.* (2009) afirmaron que la ASF es afectada significativamente por la densidad (D), el arquetipo (A) y la interacción D x A.

**Cuadro 5.** Sumas de Cuadrados (SC) de las variables de floración.

<b>Año</b>	<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>DFM</b>	<b>DFF</b>	<b>ASF</b>
<b>2016</b>	Bloque (B)	2	0.42	2	1.09
	Densidad (D)	1	0.18 (0.01)	1 (0.04)	0.28 (0.04)
	Error PG	2	5.49	5	1.49
	Arquetipo (A)	14	2332.49 (97.9) **	2197 (97.51) **	634.82 (90.99) **
	D x A	14	51.16 (2.15) *	55 (2.45)	62.56 (8.97) *
	Error PCH	56	57.92	130	116.09
	CV (%)		1	2	22
<b>2017</b>	Bloque (B)	2	57 *	43	3
	Densidad (D)	1	2 (0.13)	101 (3.52)	74 (11.63)
	Error PG	2	2	45	36
	Arquetipo (A)	8	1714 (98.72) **	2502 (86.95) **	335 (52.99)
	D x A	8	20 (1.15)	274 (9.53)	224 (35.38)
	Error PCH	32	655.04	1340.59	765.56
	CV (%)		5	7	62

PG = parcelas grandes; PCH = parcelas chicas; FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad, DFM = días a floración masculina; DFF = días a floración femenina; ASF = asincronía floral; \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ . Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

En La Fase I hubo una amplia variación en los días a floración (Cuadro 6) con valores de 76 a 97 días para DFM y de 86 a 101 días para DFF; el arquetipo más precoz fue L39 y el más tardío L63. En cuanto a asincronía floral, los resultados variaron entre 2 y 11 días, donde el arquetipo con la menor ASF fue L63 y los de mayor ASF fueron L104 y L126.

En la Fase II de 2017 (Cuadro 6) los DFM oscilaron entre los 77 días para el arquetipo más precoz (L13) y los 98 días para el más tardío (PG133), mientras que la floración masculina de los demás arquetipos variaron entre 85 y 87 días. Los DFF oscilaron de 81 (L13) a 104 días (PG133) y fueron consistentes con los DFM. La asincronía floral (ASF) varió desde 4 (L13) a casi 12 días (L126).

**Cuadro 6.** Comparación de medias de las variables de floración para el factor arquetipo.

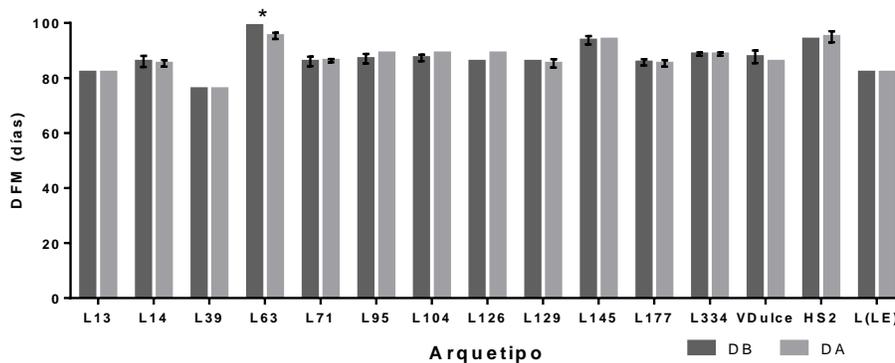
<b>Año</b>	<b>Arquetipo</b>	<b>DFM</b>	<b>DFF</b>	<b>ASF</b>
<b>2016</b>	L13	82 f	87 de	5 d,f
	L14	86 e	89 de	3 ef
	L39	76 g	86 e	10 ab
	L63	97 a	99 a	2 f
	L71	86 de	94 c	8 bc
	L95	88 cd	93 c	5 d,f
	L104	88 cd	99 a	11 a
	L126	87 c,e	99 ab	11 a
	L129	86 e	90 d	4 ef
	L145	94 b	101 a	7 cd
	L177	86 e	93 c	8 bc
	L334	89 c	96 bc	7 cd
	VDULCE	87 c,e	94 c	7 b,d
	HS2	95 b	100 a	6 c,e
	L(LE <sub>3</sub> x LE <sub>6</sub> ) <sub>F<sub>n</sub></sub>	82 f	88 de	6 c,e
<b>2017</b>	L13	77 a	81 a	4 a
	L63	93 a	101 a	7 a
	L71	85 a	91 a	5 a
	L95	86 a	92 a	6 a
	L126	88 a	100 a	12 a
	L145	88 a	98 a	11 a
	VDulce	87 a	97 a	10 a
	HS2	92 a	101 a	9 a
	PG133	98 a	105 a	7 a

Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). DFM = días a floración masculina; DFF = días a floración femenina, ASF = asincronía floral. Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

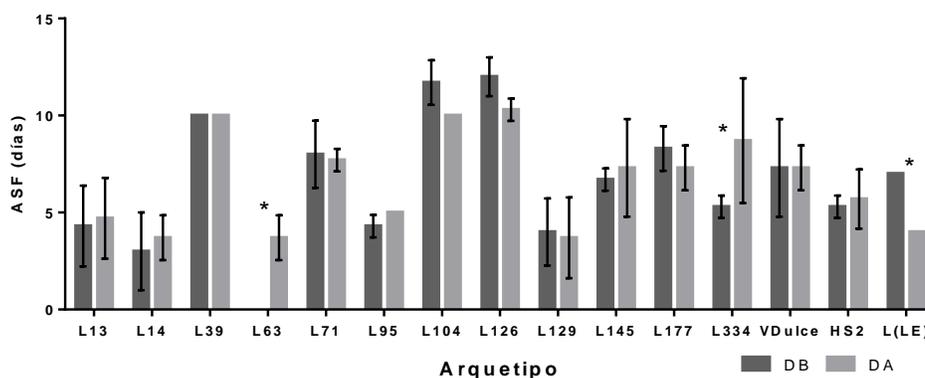
En la Fase I (2016) los días a floración masculina de todos los genotipos mostraron un comportamiento similar entre densidades, con excepción del arquetipo L63 que presentó una floración más tardía en la densidad baja que en la densidad alta (Figura 2). En ese año, la asincronía floral mostró una fuerte interacción D x A (Figura 3). Los arquetipos L63 y L(LE<sub>6</sub> x LE<sub>3</sub>)<sub>F<sub>n</sub></sub> tuvieron mayor ASF en la densidad alta, mientras que el arquetipo L334 lo presentó en la densidad baja; en los demás arquetipos no hubo diferencias en los días de ASF al aumentar el número de plantas por superficie. Lo anterior contradice lo establecido por Sharifi y Namvar (2016) quienes afirman que

la densidad de siembra aumenta significativamente a la ASF, probablemente porque no incluyeron suficiente diversidad genética.

Varios autores afirman que tanto DFM (Baron *et al.*, 2006; Carrera y Cervantes, 2006) como ASF (Robles *et al.*, 2012; Rossini *et al.*, 2016) no son afectados significativamente por la interacción genotipo x ambiente, por lo que es probable que el efecto de la interacción D x A en la primera fase se haya debido principalmente al efecto del granizo porque redujo más la población de plantas en la densidad alta que en la densidad baja.



**Figura 2.** Comparación de medias entre la interacción D x A para los días a floración masculina (DFM). DB y DA = densidad baja y alta respectivamente; \* = indica diferencias significativas (Tukey, 0.05) entre densidades, para cada arquetipo.



**Figura 3.** Comparación de medias entre la interacción D x A para la asincronía floral (ASF). DB y DA = densidad baja y alta respectivamente; \* = indica diferencias significativas (Tukey, 0.05) entre densidades para cada arquetipo.

## 4.2 Variables morfológicas

### 4.2.1 Altura de la mazorca y altura de planta

La altura de planta y de mazorca son atributos importantes de la arquitectura de la planta que influyen en el incremento histórico del rendimiento de maíz (Zhou *et al.*, 2016), la tolerancia a altas densidades de siembra y en la resistencia del acame (Li, X *et al.*, 2016). En este estudio ambas variables fueron afectadas en mayor proporción por el factor arquetipo en ambas fases experimentales (Cuadro 8); el análisis de varianza indicó que solamente en la primera fase, la interacción D x A tuvo efectos significativos.

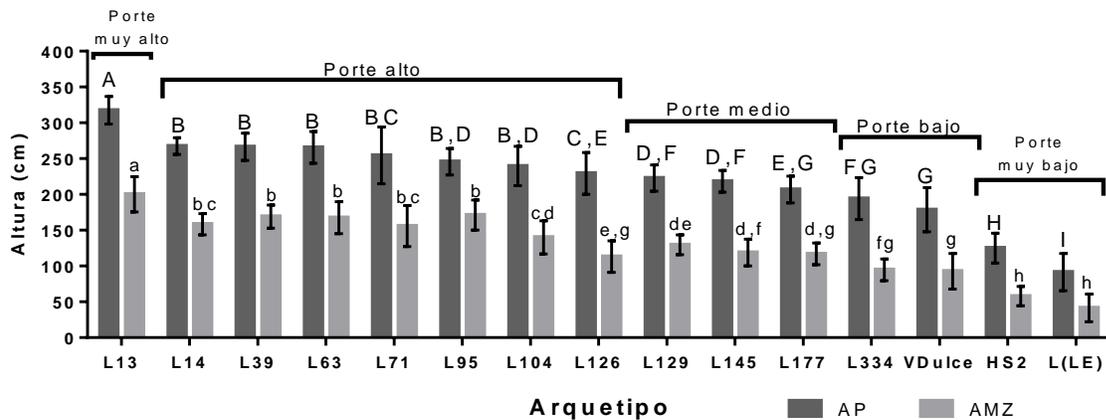
**Cuadro 7.** Sumas de Cuadrados (SC) de las variables morfológicas.

Año	FV	GL	AMZ	AP
2016	Bloque (B)	2	614	690
	Densidad (D)	1	238 (0.1)	1656 (0.3)
	Error PG	2	206	2326
	Arquetipo (A)	14	328270 (95.6) **	556687 (96.1) **
	D x A	14	14836 (4.3) *	20993 (3.6) *
	Error PCH	146	50579	70190
	CV (%)		14	10
2017	Bloque (B)	2	4530	5140
	Densidad (D)	1	2750 (2.0)	5677 (2.3)
	Error PG	2	3358	3829
	Arquetipo (A)	8	131952.67 (95.4) **	231844 (95.6) **
	D x A	8	3673 (2.7)	5056 (2.1)
	Error PCH	86	32508.31	33972.31
	CV (%)		17	10

PG = parcelas grandes; PCH = parcelas chicas; FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; AMZ = altura de mazorca; AP = altura de planta; \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ ; Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

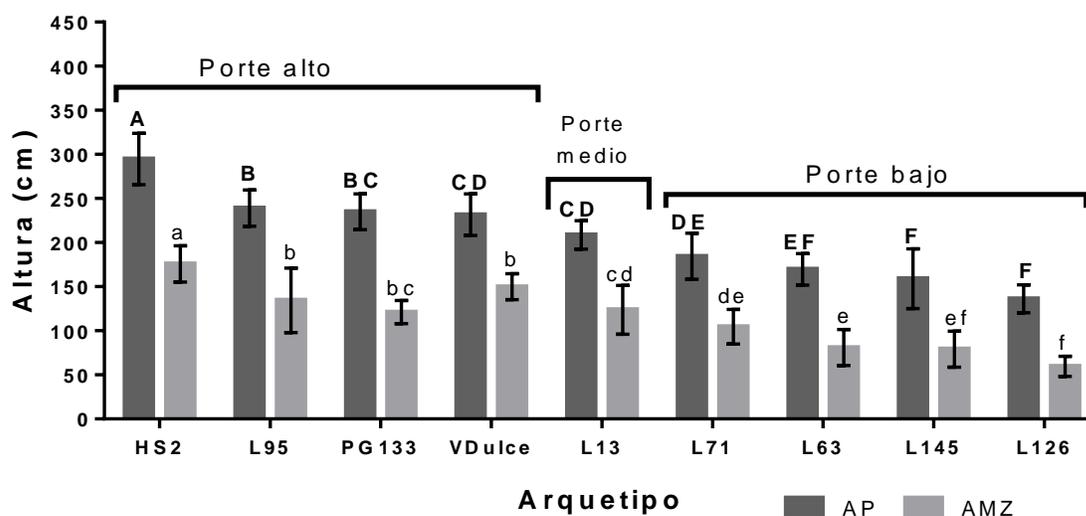
La Guía Técnica para la Descripción Varietal de Maíz (SNICS, 2014), clasifica a las plantas de maíz con base en su altura (porte) como: muy bajo ( $\leq 130$  cm), bajo (131 – 190 cm), medio (191 – 220 cm), alto (221 – 300 cm) y muy alto ( $> 300$  cm).

De acuerdo con lo anterior, en la Fase I de 2016 (Figura 4) hubo una amplia variación en altura de planta entre arquetipos, desde 91 (L39) a 318 cm (HS2). Se identificaron dos arquetipos de porte muy bajo (L39 y L126), dos de porte bajo (L63 y L145), tres de porte medio (L14, L71 y L129), siete de porte alto (L13, L95 y L104, L177, L334, VDulce y L(LE<sub>3</sub> x LE<sub>6</sub>)<sub>Fn</sub>), y uno de porte muy alto (HS2).



**Figura 4.** Comparación de medias entre arquetipos para la altura de mazorca (AMZ) y altura de la planta (AP) de la primera fase experimental (2016). Medias con distintas letras mayúsculas indican diferencias significativas para altura de planta (Tukey, 0.05). Medias con distintas letras minúsculas indican diferencias significativas (Tukey, 0.05) para altura de mazorca. Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

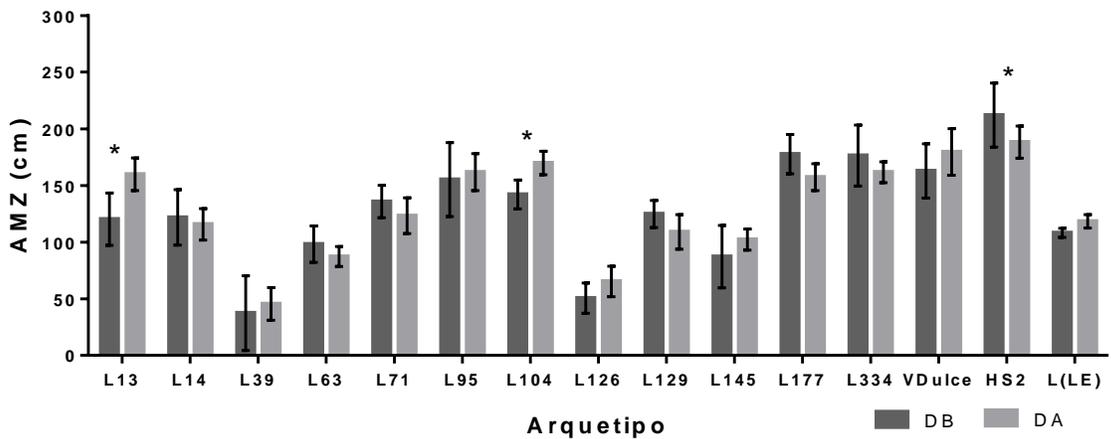
En la Fase II del 2017 (Figura 5) se tuvieron plantas con altura de planta desde los 136 cm (L126) a 294 cm (HS2), con cuatro arquetipos de porte bajo (L63, L71, L126 y L145), uno de porte medio (L13) y cuatro de porte alto (L95, VDulce, PG133 y HS2). El arquetipo más bajo fue L126 y el más alto HS2, con una diferencia de 158 cm. En este año no hubo plantas de portes tan extremos como en el año anterior; sin embargo, el arquetipo HS2 fue nuevamente el más alto que todos los demás ( $p < 0.05$ ), mientras que el arquetipo L126, clasificado anteriormente como muy bajo presentó mayor altura durante este ciclo.



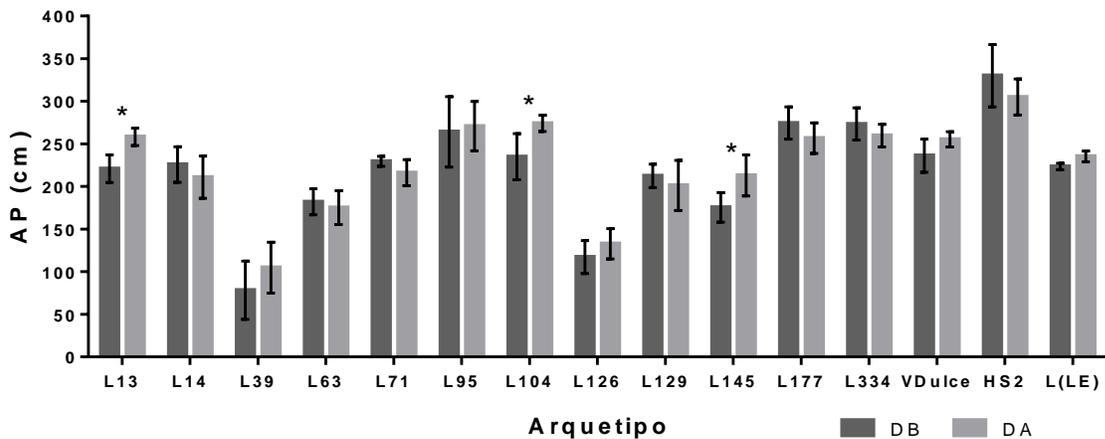
**Figura 5.** Comparación de medias entre arquetipos para la altura de mazorca (AMZ) y altura de la planta (AP) de la segunda fase experimental (2017). Medias con distintas letras mayúsculas indican diferencias significativas para altura de planta (Tukey, 0.05). Medias con distintas letras minúsculas indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). para altura de mazorca. Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

En cuanto a la interacción D x A para altura de mazorca en la Fase I (Figura 6) sólo los arquetipos L13, L104 y HS2 presentaron diferencias significativas entre densidades; en los primeros dos arquetipos (L13 y L104) se registró mayor AMZ en la densidad alta, mientras que HS2 presentó mayor altura en la densidad baja.

En cuanto a la interacción D x A para altura de planta en la Fase I, la comparación de medias (Figura 7) indicó que sólo los arquetipos L13, L104 y L145 presentaron diferencias significativas entre densidades ( $p < 0.05$ ), donde todas registraron mayor altura de planta en la densidad alta.



**Figura 6.** Comparación de medias entre la interacción D x A para la altura de la mazorca (AMZ). DB y DA = densidad baja y alta, respectivamente; \* = indica diferencias significativas (Tukey, 0.05). entre densidades para cada arquetipo.



**Figura 7.** Comparación de medias entre la interacción D x A para altura de planta (AP). DB y DA = densidad baja y alta, respectivamente; \* = indica diferencias significativas (Tukey, 0.05) entre densidades para cada arquetipo.

Estudios recientes afirman que no existe un efecto significativo de la interacción D x A para las altura de planta, y establecen también que existe un incremento significativo de la altura de planta debido a las adaptaciones morfológicas que la planta realiza para adaptarse al estrés de una alta

densidad (Zamir *et al.*, 2011; Novacek *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2017; Khan *et al.*, 2017), por lo que el comportamiento no homogéneo en la altura de planta de la primera fase experimental puede deberse al efecto del granizo y a la existencia de huecos entre parcelas debido a la falta de plantas.

#### 4.2.2 Tamaño y orientación de la hoja (LOV)

Estas variables se registraron solamente en la Fase II para obtener información cuantitativa que describiera mejor a cada arquetipo, pues a pesar de observarse diferencias visibles en la orientación de las hojas, esto no se reflejaba en cambios en el ángulo de inserción al aumentar la densidad de siembra, tal como se observa en las Figuras (8-16).



**Figura 8.** Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L126 en la densidad baja (izquierda) y la densidad alta (derecha).



**Figura 9.** Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L63 en la densidad baja (izquierda) y la densidad alta (derecha).



**Figura 10.** Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L145 en la densidad baja (izquierda) y la densidad alta (derecha).



**Figura 11.** Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L71 en la densidad baja (izquierda) y la densidad alta (derecha).



**Figura 12.** Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L13 en la densidad baja (izquierda) y la densidad alta (derecha).



**Figura 13.** Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo L95 en la densidad baja (izquierda) y la densidad alta (derecha).



**Figura 14.** Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo VDulce en la densidad baja (izquierda) y la densidad alta (derecha).



**Figura 15.** Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo PG133 en la densidad baja (izquierda) y la densidad alta (derecha).



**Figura 16.** Aspecto en campo en la segunda fase experimental (2017) del arquetipo HS2 en la densidad baja (izquierda) y la densidad alta (derecha).

El análisis de varianza (Cuadro 10) demostró que el ángulo de inserción de la hoja, grado de cuelgue y LOV dependieron principalmente del factor arquetipo (A), mientras que las variables de tamaño de hoja (largo y ancho de la lámina foliar) dependieron en mayor proporción del factor estrato anidado en arquetipo (A/Estrato). Una vez más, el factor densidad tuvo una contribución mínima a la variación y afectó al grado de cuelgue (Lf/LL) y al LOV, mientras que el factor arquetipo (A) tuvo efecto altamente significativo ( $p \leq 0.01$ ) en todas las variables de orientación de la hoja, y la interacción D x A sólo tuvo efecto significativo en el ancho de la lámina foliar. El factor estrato anidado en arquetipo (A/Estrato) tuvo efecto significativo para todas las variables (Cuadro 8), lo cual significa que las variables de orientación de la hoja de maíz cambian significativamente a través del dosel.

**Cuadro 8.** Sumas de Cuadrados (SC) de las variables de tamaño y orientación de la hoja en la Fase II (2017)

FV	GL	Ángulo	LL	Ancho	Lf/LL	LOV
Bloque (B)	2	317.46 *	434.13 *	2.87	0.070	675.8 *
Densidad (D)	1	1.11 (0.01)	24.04 (0.06)	4.44 (1.24)	0.080 (1.38) *	343.28 (0.74) *
Error PG	2	21.74	447.87	4.56	0.001	4.67
Arquetipo (A)	8	9766.73 (85.77) **	10307.21 (25.00) **	115.92 (32.49) **	3.190 (55.00) **	30892.09 (66.25) **
D x A	8	284.38 (2.50)	918.33 (2.23)	18.09 (5.07) *	0.060 (1.03)	244.85 (0.53)
A/Estrato	18	1335.41 (11.73) *	29975.13 (72.71) **	218.38 (61.20) **	2.470 (42.59) **	15147.35 (32.49) **
Error PCH	122	4429.2	8305.4	129.44	1.55	9107.22
CV (%)		26	10	12	20	23

PG = parcelas grandes; PCH = parcelas chicas; FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; A/Estrato = estrato anidado en arquetipo; LL = longitud de la lámina foliar; Lf/LL = grado de cuelgue de la hoja; LOV = valor de orientación de la hoja. \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ ; Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

El aumento de la densidad de siembra provocó una disminución significativa ( $p \leq 0.05$ ) en el grado de cuelgue de la hoja (Cuadro 9) y por tanto un aumento significativo en el LOV, pero no tuvo efecto significativo en el tamaño (largo y ancho de la lámina foliar) ni en el ángulo de inserción de la hoja. Es decir, al aumentar la densidad de siembra las plantas modifican su orientación (Lf/LL y LOV) sin alterar su ángulo de inserción, por lo que es conveniente usar al grado de cuelgue de las hojas o al LOV como criterio de selección para el mejoramiento genético, tal como lo recomiendan Pepper *et al.* (1977).

**Cuadro 9.** Comparación de medias entre densidades para las características de la hoja en 2017.

Densidad	Ángulo °	LL (cm)	Ancho (cm)	Lf/LL	LOV
<b>DB</b>	23.40 a	83.62 a	9.10 a	0.54 b	36.80 b
<b>DA</b>	23.56 a	84.40 a	8.77 a	0.58 a	39.72 a

LL = longitud de la lámina foliar; Lf/LL = grado de cuelgue; LOV = valor de orientación de la hoja. Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). DB y DA = densidad alta y baja, respectivamente; Valores promedio de nueve arquetipos evaluados.

En cuanto a las diferencias entre arquetipos (Cuadro 10), el ángulo de inserción de la hoja varió de 12 ° (L63) a 34° (L71), y su tendencia permitió clasificar dos grupos de arquetipos: los que tuvieron hojas erectas con ángulos entre los 12 y 17 grados, y los de hojas semi-erectas con ángulos entre 27 y 34 grados. Los arquetipos con hojas erectas fueron L63, L126, L145 y PG133, mientras que los de hojas semi-erectas fueron L13, L71, L95, VDulce y el híbrido testigo HS2.

El tamaño de hoja (largo y ancho de lámina foliar) tuvo una amplia variación, con arquetipos de hojas largas y anchas como HS2, arquetipos de hojas de medianas y angostas (como L95), y arquetipos con hojas cortas y angostas (como L63).

Es importante remarcar que una hoja tiene un menor grado de cuelgue cuando el valor de la relación (Lf/LL) es más cercano a uno, y que la orientación de la hoja (LOV) tiende a ser más erecta cuando el valor es más cercano a cien. Al respecto, estas dos variables tuvieron un comportamiento inversamente proporcional, ya que los arquetipos con el menor grado de cuelgue tuvieron el mayor LOV, cuyos valores oscilaron de 0.40 (L95) a 0.82 (L63) para el grado de cuelgue, y valores de 26.11 (VDulce) a 63.95 (L63) para LOV.

Los arquetipos clasificados como de hojas semi-erectas (L13, L71, L95, VDulce y HS2) presentaron grados de cuelgue menores de 0.51 y de LOV menores de 30, mientras que los de

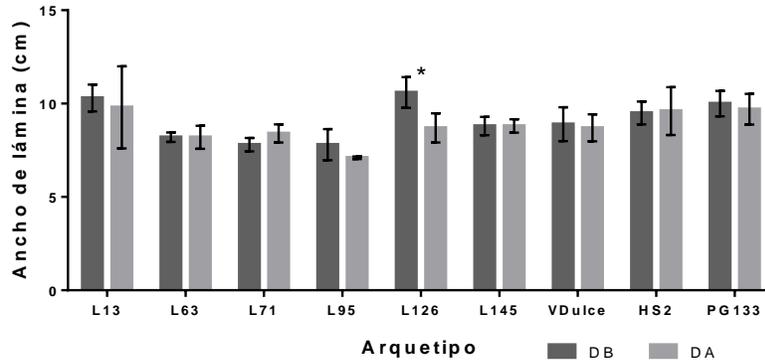
hojas erectas (L63, L126, L145 y PG133) presentaron grados de cuelgue mayores de 0.60 y LOV mayores de 49. Por tanto, se infiere que el ángulo de inserción de la hoja influye también en la orientación de la hoja.

**Cuadro 10.** Comparación de medias de las características de la hoja entre arquetipos.

Arquetipo	Ángulo	LL	Ancho	Lf/LL	LOV
L13	31.88 ab	77.50 cd	10.02 a	0.51 cd	30.67 c
L63	12.43 c	76.23 cd	8.24 cd	0.82 a	63.95 a
L71	34.42 a	79.67 cd	8.07 cd	0.43 d	24.28 c
L95	27.87 b	81.29 cd	7.42 d	0.40 d	24.21 c
L126	17.36 c	74.19 d	9.63 ab	0.69 b	49.91 b
L145	15.76 c	83.64 bc	8.81 bc	0.67 b	50.31 b
VDulce	29.63 ab	95.39 a	8.81 bc	0.44 c	26.11 c
HS2	26.63 b	96.77 a	9.57 ab	0.44 c	28.06 c
PG133	15.35 c	91.41 ab	9.83 ab	0.62 bc	46.84 b

LL = longitud de la lámina foliar; Lf/LL = grado de cuelgue; LOV = valor de orientación de la hoja; Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

De acuerdo con el análisis de varianza (Cuadro 8), la interacción D x A fue significativa para el ancho de la lámina foliar. Solamente el arquetipo L126 (Figura 17) presentó hojas más anchas en la densidad baja, lo cual concuerda en parte con lo establecido por Gou *et al.* (2017) quienes a pesar de que no reportaron efecto significativo de la interacción D x A para esta variable, encontraron que el ancho de la lámina foliar disminuye significativamente con el aumento en el número de plantas por superficie.



**Figura 17.** Comparación de medias entre la interacción D x A para el ancho de la lámina foliar. DB y DA = baja y alta, respectivamente; \* = indica diferencias significativas (Tukey, 0.05). entre densidades para cada arquetipo.

En cuanto a las correlaciones (Cuadro 11) entre variables de orientación y tamaño de las hojas, el LOV tuvo una alta correlación positiva con el grado de cuelgue de la hoja (0.97\*\*) y una alta correlación negativa con el ángulo de inserción de la hoja (-0.73\*\*). El ángulo de la hoja tuvo una correlación negativa (-0.53\*\*) con el grado de cuelgue, lo que muestra que el ángulo de la hoja afecta significativamente la orientación de la hoja, aunque en menor proporción que el grado de cuelgue de la misma.

Los resultados anteriores concuerdan con los reportados por Li *et al.* (2015a) quienes encontraron una correlación de 0.51 entre el largo y ancho de lámina, y una correlación negativa (-0.81) entre el ángulo de inserción de la hoja y el LOV.

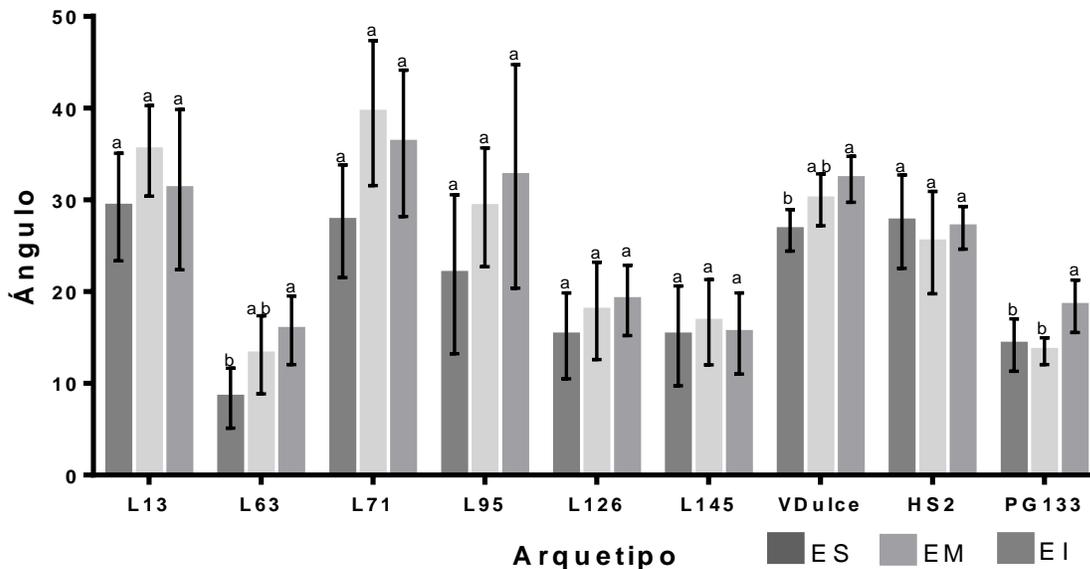
**Cuadro 11.** Análisis de correlación de Pearson de las variables de tamaño y orientación de la hoja (LOV).

	Ángulo	Largo	Ancho	Lf/LL
<b>Largo</b>	0.11			
<b>Ancho</b>	-0.13	0.40**		
<b>Lf/LL</b>	-0.57**	-0.41**	0.10	
<b>LOV</b>	-0.73**	-0.37**	0.11	0.97**

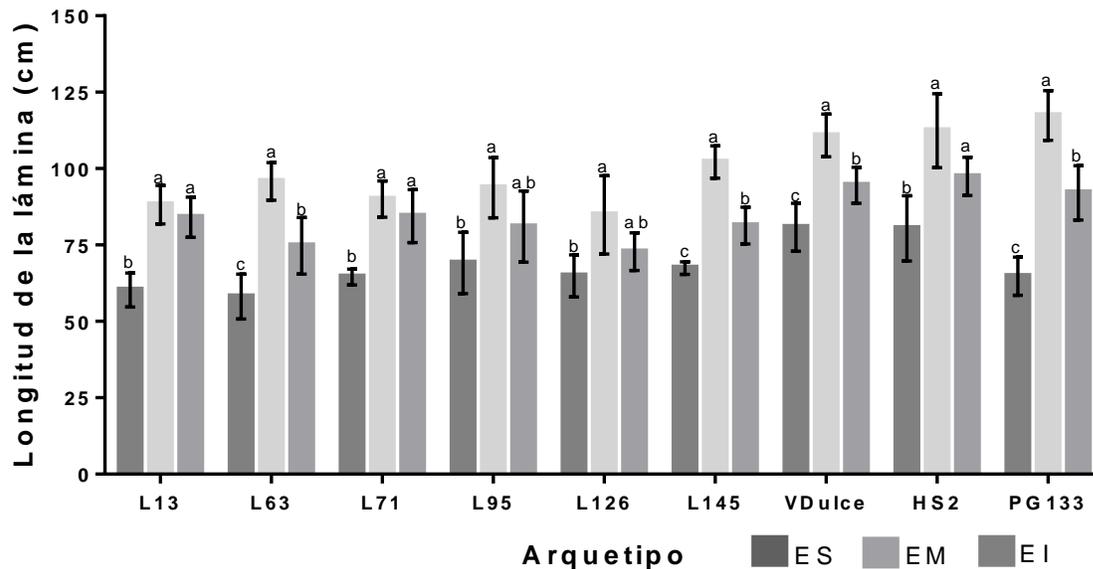
\*\*; Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística (Tukey, 0.05). LL = longitud de la lámina foliar; Lf/LL = grado de cuelgue; LOV = valor de orientación de la hoja.

La comparación de medias entre estratos para el ángulo de inserción de la hoja (Figura 18) indicó que, de manera general, los arquetipos presentaron menor ángulo de inserción de la hoja en el estrato superior que en el resto de la planta. El arquetipo L63, el cual tiene una arquitectura tipo “piña” y el arquetipo PG133, ambos de hojas erectas, presentaron diferencias significativas en su ángulo de inserción entre estratos donde el estrato inferior fue el que presentó un mayor valor, mientras que los estratos superior y medio presentaron ángulos similares entre sí. El arquetipo VDulce, clasificado como de hojas semi-erectas, presentó una tendencia similar a la de los aquí mencionados.

La comparación de medias entre estratos para la longitud de lámina foliar (Figura 19) indicó que, de manera general, los arquetipos presentaron mayor largo de lámina en el estrato medio. La mayoría de los arquetipos de hojas semi-erectas L13, L71, L95 y HS2 no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los estratos superior y medio. Los arquetipos de hojas erectas L63, L145 y PG133 presentaron diferencias significativas a lo largo de los tres estratos, con la siguiente tendencia  $EM > EI > ES$ , mientras que el arquetipo L126 a pesar de presentar la misma tendencia, no mostró diferencias estadísticas entre el estrato medio y el estrato inferior.

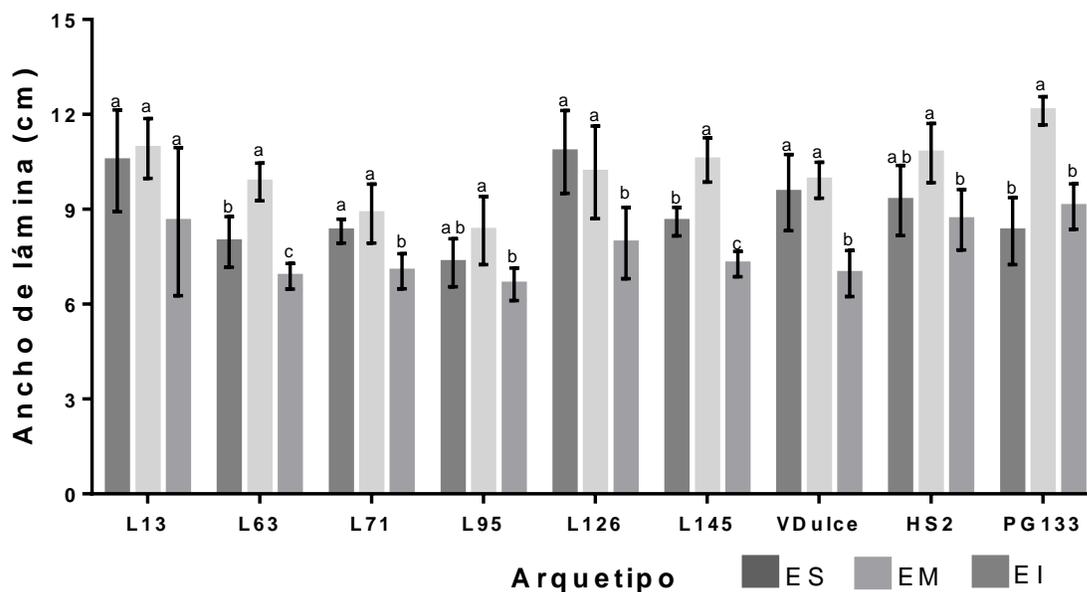


**Figura 18.** Medias de ángulo de inserción de la hoja para el estrato superior, medio e inferior de cada arquetipo. ES = estrato superior; EM = estrato medio; EI = estrato inferior. El estrato superior corresponde a las tres hojas superiores, el estrato medio a las tres hojas cercanas a la mazorca, y el estrato inferior a las tres hojas inferiores en mejor estado. Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).



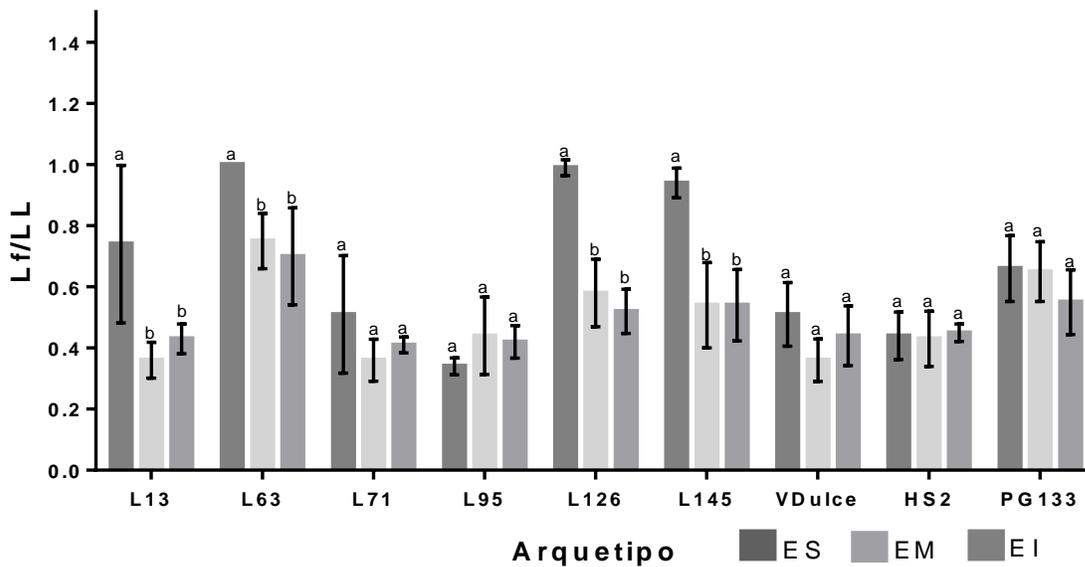
**Figura 19.** Medias de longitud de la hoja para el estrato superior, medio e inferior de cada arquetipo. ES = estrato superior; EM = estrato medio; EI = estrato inferior. El estrato superior corresponde a las tres hojas superiores, el estrato medio a las tres hojas cercanas a la mazorca, y el estrato inferior a las tres hojas inferiores en mejor estado. Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

En cuanto al comportamiento del ancho de lámina foliar a través de estratos (Figura 20) los resultados mostraron que sólo los arquetipos L63 y PG133, ambos de hojas erectas, tuvieron diferencias significativas entre estratos con hojas más anchas en el estrato medio (EM), mientras que los demás arquetipos no presentaron mucha dispersión para esta variable.



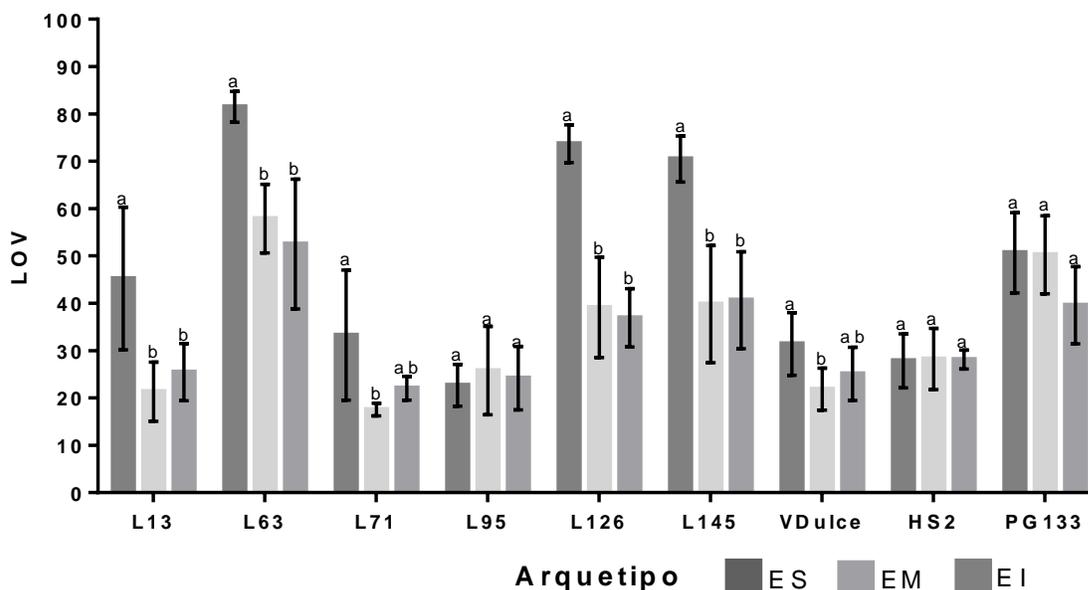
**Figura 20.** Medias del ancho de lámina foliar para el estrato superior, medio e inferior de cada arquetipo. ES = estrato superior; EM = estrato medio; EI = estrato inferior. El estrato superior corresponde a las tres hojas superiores, el estrato medio a las tres hojas cercanas a la mazorca, y el estrato inferior a las tres hojas inferiores en mejor estado. Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

La comparación de medias entre estratos para el grado de cuelgue de la hoja (Figura 21) indicó que, de manera general, el menor grado de cuelgue se encontró en el estrato superior. La mayoría de los arquetipos clasificados como de hojas erectas (L63, L126 y L145) presentaron diferencias significativas entre el estrato superior y los estratos medio e inferior, al igual que el arquetipo L13 calificado como de hojas semi-erectas. Los demás arquetipos no presentaron diferencias significativas en el grado de cuelgue entre estratos.



**Figura 21.** Medias del grado de cuelgue de la hoja para el estrato superior, medio e inferior de cada arquetipo. ES = estrato superior; EM = estrato medio; EI = estrato inferior. El estrato superior corresponde a las tres hojas superiores, el estrato medio a las tres hojas cercanas a la mazorca, y el estrato inferior a las tres hojas inferiores en mejor estado. Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

El valor de orientación de la hoja (Figura 22) presentó un comportamiento similar al del grado de cuelgue de la hoja, dado que los arquetipos L13, L63, L126 y L145 fueron los únicos que presentaron diferencias significativas para esta variable entre el estrato superior y los estratos medio e inferior. Los arquetipos de hojas semi-erectas, a excepción de L13, no presentaron diferencias significativas en la orientación de la hoja entre estratos.



**Figura 22.** Medias del LOV del estrato alto, medio y bajo para cada arquetipo. EA = estrato alto; EM = estrato medio; EB = estrato bajo. El estrato alto corresponde a las tres hojas superiores, el estrato medio a las tres hojas cercanas a la mazorca, y el estrato bajo a las tres hojas inferiores en mejor estado. Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

## 4.3 Variables fisiológicas

### 4.3.1 Intercambio de gases

Aunque se ha demostrado que el mejoramiento genético por medio de la selección de características morfológicas de plantas de maíz ha contribuido al reciente aumento del rendimiento y la resistencia a condiciones adversas como sequía y altas densidades de siembra, ello no se ha reflejado en incremento de la tasa fotosintética por unidad de área como resultado de estas prácticas. Sin embargo, se ha conseguido aumentar la duración de la fotosíntesis debido al aumento del ciclo de crecimiento (Richards, 2000), por lo que se considera que el aumento de la fotosíntesis del dosel es esencial para aumentar el rendimiento y afrontar las demandas futuras (Zhu *et al.*, 2012).

El análisis de varianza (Cuadro 12) indicó que en la Fase I (2016) los componentes del intercambio de gases fueron influenciados en mayor proporción por el factor arquetipo, con excepción del Ci que tuvo mayor influencia de la interacción D x A. En la Fase II del 2017, donde no hubo daño foliar, todas las variables del intercambio gaseoso fueron principalmente influenciadas por el factor arquetipo.

En 2016 todos los componentes del intercambio gaseoso fueron afectados significativamente por el arquetipo (A) y por la interacción D x A, mientras que el factor densidad afectó sólo a la transpiración (E). En 2017, las variables fueron afectadas únicamente por el arquetipo (A), por lo que es claro que el efecto de la interacción D x A en la primera fase se debió al daño foliar ocasionado por el granizo y no por el tratamiento de densidad de población (*i. e.*, el número de plantas por unidad de superficie).

**Cuadro 12.** Sumas de Cuadrados (SC) de los componentes del intercambio gaseoso.

Año	FV	GL	A	gs	Ci	E
2016	Bloque (B)	2	105	0.01	32583 *	16
	Densidad (D)	1	62 (1.7)	0.01 (2.3)	308 (0.2)	22 (7.6) *
	Error PG	2	29	0.01	878	1
	Arquetipo (A)	14	2565 (71.6) **	0.27 (62.8) **	51115 (37.0) *	179 (61.7) **
	D x A	14	955 (26.7) *	0.15 (34.9) *	86683 (62.8) *	89 (30.7) *
	Error PCH	56	1121	0.23	100257	122
	CV (%)		22	37	29	25
2017	Bloque (B)	2	379	0.11	12170	195.3
	Densidad (D)	1	29 (1)	0.01 (1.3)	201 (0.7)	0.5 (0.3)
	Error PG	2	14	3.20E-03	47	0.6
	Arquetipo (A)	8	1561 (79) *	0.62 (78.5) **	19551 (72.7) *	133.0 (77.8) **
	D x A	8	381 (19)	0.16 (20.3)	7137 (26.5)	37.5 (21.9)
	Error PCH	146	6194	2.41	122122	503.4
	CV (%)		17	31	19	19

GL = grados de libertad; PG = parcela grande; PCH = parcela chica; A = tasa fotosintética; gs = conductancia estomática; Ci = concentración interna de CO<sub>2</sub>; E = transpiración; \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$  Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

El comportamiento de las variables de intercambio gaseoso entre densidades fue contrastante en las dos fases experimentales estudiadas, 2016 y 2017 (Cuadro 13). La tasa de fotosíntesis

instantánea (A) aumentó casi al doble en 2017 donde las plantas no presentaron daño foliar, muy similar a lo ocurrido con la conductancia estomática (gs). Los valores de concentración interna de CO<sub>2</sub> (Ci) variaron poco entre un año y otro, y la transpiración aumentó 44 % en 2017. Lo anterior concuerda con lo reportado por Tartachnyk y Blanke (2002), quienes encontraron que en condiciones simuladas de granizo se reduce 33 % la tasa fotosintética de hojas de manzana.

**Cuadro 13.** Comparación de medias de componentes del intercambio gaseoso entre densidades.

<b>Año</b>	<b>Densidad</b>	<b>A</b>	<b>gs</b>	<b>Ci</b>	<b>E</b>
<b>2016</b>	<b>DB</b>	19.39 a	0.16 a	148.71 a	5.48 b
	<b>DA</b>	21.06 a	0.18 a	145.01 a	6.46 a
<b>2017</b>	<b>DB</b>	39.02 a	0.42 a	156.31 a	9.77 a
	<b>DA</b>	38.19 a	0.40 a	154.12 a	9.66 a

A = tasa fotosintética; gs = conductancia estomática; Ci = concentración interna de CO<sub>2</sub>; E = transpiración; Medias con distintas letras indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ). DB y DA = densidad baja y alta respectivamente. Los valores presentados son el promedio de 15 arquetipos en 2016 y de nueve arquetipos en 2017.

Entre arquetipos (Cuadro 14) se encontró diversidad genética en expresión fisiológica en ambos años, sobre todo en el 2016 (Fase I), con líneas de altas tasas de fotosíntesis (A) y de transpiración (E), como L63 y L145, que también tuvieron altos valores de conductancia estomática (gs). En la Fase II (2017) destacaron las líneas L95 y L126 también en A y E, con valores iguales o superiores al testigo HS2.

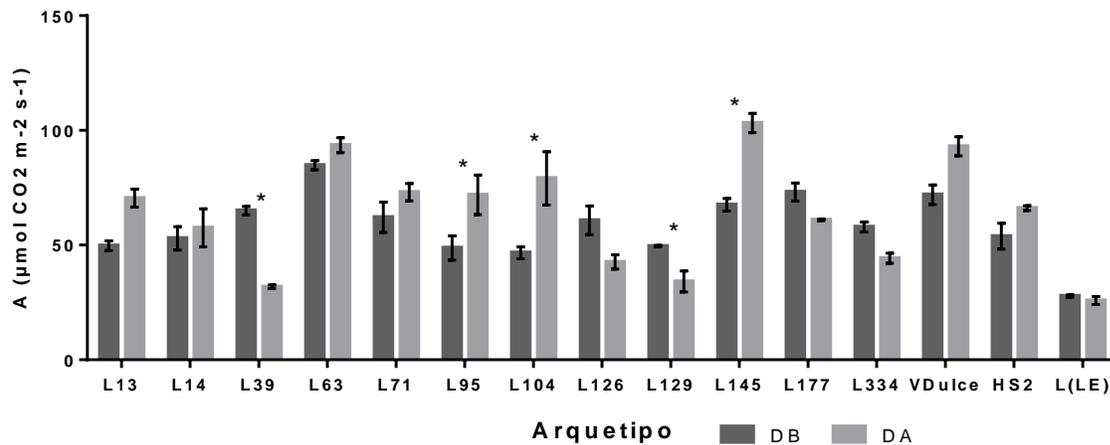
Algunos investigadores han reportado valores similares en las variables de intercambio de gases en maíz. Liu *et al.* (2012) encontraron que la tasa instantánea de fotosíntesis promedio en maíz se encuentra en un rango de 23-33  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , la conductancia estomática en el rango de 0.09-0.23  $\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , el Ci de 91 a 154  $\text{mmol CO}_2 \text{ mol}^{-1}$  y la transpiración entre 1.57 y 4.04  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , mientras que Yan *et al.* (2017) reportaron una A en maíz de 34 a 36.85  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

**Cuadro 14.** Comparación de medias de los componentes del intercambio gaseoso entre arquetipos.

<b>Año</b>	<b>Arquetipo</b>	<b>A</b>	<b>gs</b>	<b>Ci</b>	<b>E</b>
<b>2016</b>	L13	20.03 b,d	0.16 a,e	142.60 ab	4.87 bc
	L14	18.41 cd	0.15 a,e	138.39 ab	5.46 bc
	L39	16.14 de	0.12 c,e	114.30 ab	4.60 bc
	L63	29.72 a	0.23 a,c	129.36 ab	7.33 ab
	L71	22.53 a,d	0.26 ab	197.21 a	7.36 ab
	L95	20.11 b,d	0.18 a,e	156.53 ab	6.17 ab
	L104	20.96 a,d	0.21 a,d	166.41 ab	6.90 ab
	L126	17.24 de	0.15 a,e	164.78 ab	5.50 bc
	L129	13.94 de	0.10 de	126.10 ab	4.45 bc
	L145	28.46 ab	0.27 a	158.92 ab	8.89 a
	L177	22.35 a,d	0.15 a,e	107.92 b	5.74 bc
	L334	17.03 de	0.14 b,e	146.34 ab	5.62 bc
	VDulce	27.51 a,c	0.22 a,d	123.93 ab	7.30 ab
	HS2	20.00 b,d	0.20 a,e	180.07 ab	6.29 ab
L(LE <sub>3</sub> x LE <sub>6</sub> ) <sub>Fn</sub>	8.94 e	0.08 e	149.98 ab	3.04 c	
<b>2017</b>	L13	33.4 bc	0.31 b	138.6 c	8.3 bc
	L63	33.2 c	0.32 b	141.4 bc	8.1 c
	L71	39.8 abc	0.41 ab	152.4 a,c	9.8 a,c
	L95	40.5 a	0.44 ab	158.5 a,c	10.0 ab
	L126	42.9 a	0.52 a	174.3 a	10.7 a
	L145	39.8 abc	0.43 ab	157.9 a,c	10.2 a
	VDulce	39.2 abc	0.40 ab	153.9 a,c	9.5 a,c
	HS2	38.9 abc	0.46 ab	168.2 ab	10.3 a
	PG133	39.7 abc	0.41 ab	151.9 a,c	10.6 a

Medias con distintas letras indican diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) por año. A= tasa fotosintética; gs = conductancia estomática; Ci = concentración interna de CO<sub>2</sub>; E = transpiración. Las medias presentadas son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

La comparación de medias de la interacción D x A para la tasa instantánea de fotosíntesis (A) (Figura 23) indicó que sólo los arquetipos L39, L95, L104, L129 y L145 presentaron diferencias significativas entre densidades de siembra, con una tendencia general, con a excepción de L39, de lograr mayor A en la densidad alta; las variables conductancia estomática (gs) y transpiración (E) tuvieron un comportamiento similar a la variable A.



**Figura 23.** Comparación de medias entre la interacción D x A para la tasa instantánea de fotosíntesis (A). DB y DA = densidad baja y alta respectivamente; \* = indica diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre densidades para cada arquetipo. Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

El análisis de correlación efectuado únicamente con los resultados de la Fase II del 2017 (Cuadro 15) indicó que la fotosíntesis instantánea (A) tuvo una alta correlación positiva (0.86\*\*) con la conductancia estomática (gs) y con la transpiración (E). La gs se relacionó, además, positivamente (0.78\*\*) con la concentración interna de CO<sub>2</sub> y la transpiración (0.73\*\*).

**Cuadro 15.** Análisis de correlación de Pearson de las variables de intercambio gaseoso

	A	gs	Ci
gs	0.86 **		
Ci	0.44 **	0.78 **	
E	0.79 **	0.73 **	0.36 **

A = tasa instantánea de fotosíntesis; gs = conductancia estomática; Ci = concentración interna de CO<sub>2</sub>; E = transpiración.; \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ .

### 4.3.2 IAF y RFAI

El índice de área foliar (IAF) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI) son parámetros que ayudan a caracterizar la estructura del dosel, y son esenciales para el uso eficiente

de la radiación y la eficiencia del aparato fotosintético, por lo que indirectamente influyen en el rendimiento final del grano en maíz (Montemayor *et al.*, 2006).

El análisis de varianza (Cuadro 16) indicó que en la Fase I (2016) el factor arquetipo (A) tuvo mayor influencia en ambas variables, aunque en grado significativo afectó únicamente al IAF; en cambio, los factores densidad (D) y la interacción D x A no tuvieron efecto significativo para ninguna de las variables. Estos resultados concuerdan con los reportados por Gou *et al.* (2017) quienes encontraron que el aumento de la densidad de siembra tiene mayor efecto en el IAF que en la RFAI.

**Cuadro 16.** Sumas de Cuadrados (SC) de índice de área foliar (IAF).

<b>Año</b>	<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>IAF</b>	<b>RFAI</b>
<b>2016</b>	Bloque (B)	2	5.6	3790
	Densidad (D)	1	1.5 (9.2)	267 (5)
	Error PG	2	4.1	477
	Arquetipo (A)	14	12.4 (75.7) *	3191 (58)
	D x A	14	2.5 (15.1)	2031 (37)
	Error PCH	56	13.7	217.87
	CV (%)		21.58	18.72
<b>2017</b>	Bloque (B)	2	0.47	0.02
	Densidad (D)	1	21.06 (44.3) *	0.28 (27)
	Error PG	2	0.21	0.04
	Arquetipo (A)	8	20.17 (42.4) **	0.61 (59) **
	D x A	8	6.36 (13.4) *	0.15 (14) *
	Error PCH	32	5.49	0.18
	CV (%)		13.03	8.78

FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; PG = parcela grande; PCH = parcela chica; IAF = índice de área foliar; RFAI = radiación fotosintéticamente activa interceptada; \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ ; Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

De acuerdo con Smith (2004), la manipulación de la densidad de siembra es la práctica que tiene mayor impacto en el índice de área foliar y por consiguiente en la intercepción de la radiación. En el presente estudio se encontró que el aumento de la densidad de siembra no produjo efectos significativos en las variables IAF y RFAI en la Fase I (2016), resultado atribuible a que las plantas

presentaron severo daño foliar y a la falta de competencia completa en las parcelas por al mal establecimiento de las densidades de siembra.

En la Fase II (2017) el IAF aumentó significativamente en la densidad alta, mientras que el RFAI a pesar de presentar un aumento no logró ser significativo; además se observó un aumento considerablemente mayor en el IAF de la densidad alta con respecto al de la Fase I.

**Cuadro 17.** Comparación de medias entre densidades para el índice de área foliar (IAF) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI).

<b>Año</b>	<b>Densidad</b>	<b>IAF</b>	<b>RFAI</b>
<b>2016</b>	DB	2.16 a	76.88 a
	DA	2.42 a	80.42 a
<b>2017</b>	DB	2.55 b	77.33 a
	DA	3.80 a	91.64 a

IAF = índice de área foliar; RFAI = radiación fotosintéticamente activa interceptada. Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05); DB y DA = densidad baja y alta, respectivamente. Los valores presentados son el promedio de 15 arquetipos en 2016 y de nueve arquetipos en 2017.

Los arquetipos que presentaron mayor IAF tuvieron también mayor RFAI (Cuadro 18), lo cual concuerda con Xue *et al.* (2016), quienes encontraron que a mayor IAF mayor es el porcentaje de intercepción de la radiación.

En la Fase I (2016) se detectó poca variación en el IAF, con valores de 1.60 (L129) a 2.79 (L126). En la Fase II (2017), en el que hubo ausencia de daños adversos, se registró mayor dispersión con valores de 2.41 (L95) a 4.06 (PG133). Además se observó un aumento considerable de esta variable para la mayoría de los arquetipos establecidos en ambas fases; por ejemplo, el arquetipo L145 tuvo un IAF de 2.74 en la primera fase y de 3.74 en la segunda, por lo que fue evidente que el daño por granizo y la falta de plantas por surco tuvo un efecto negativo en el IAF por parcela.

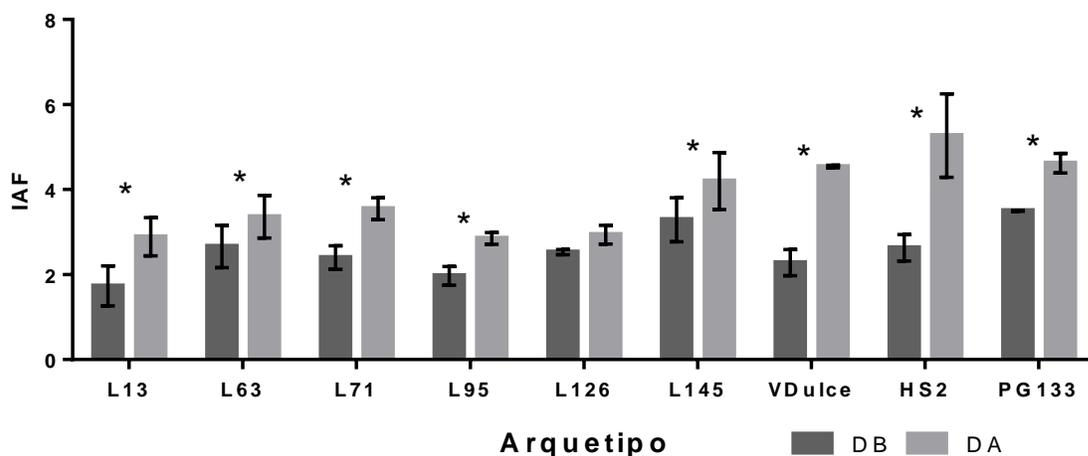
El RFAI en la Fase I (2016) osciló entre 68 y 89 % y no presentó diferencias significativas entre arquetipos. En la Fase II (2017) hubo una variación similar con RFAI de 67 a 95 %, donde los arquetipos L13, L63 y L126 tuvieron la menor intercepción. Al respecto, los arquetipos L63 y L126 son plantas de porte bajo y hojas erectas por lo que su arquitectura es ideal para las altas densidades, mientras que el arquetipo L13 en ambas fases experimentales tuvo un desarrollo precoz y una arquitectura muy compacta con pocas hojas y muy separadas, lo cual al parecer tuvo un efecto negativo en su IAF y por tanto en la RFAI.

**Cuadro 18.** Comparación de medias entre arquetipos para el índice de área foliar (IAF) y la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI).

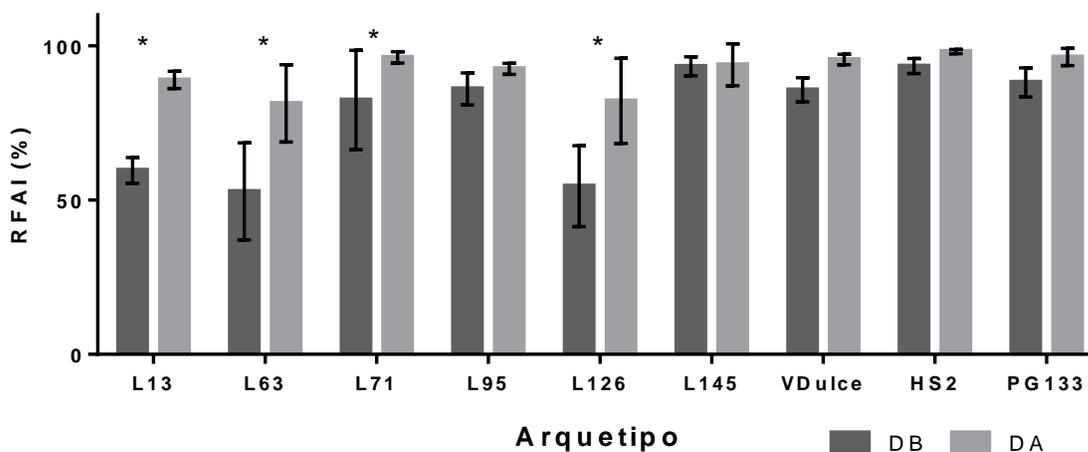
<b>Año</b>	<b>Arquetipo</b>	<b>IAF</b>	<b>RFAI (%)</b>
<b>2016</b>	L13	1.83 ab	68.22 a
	L14	2.44 ab	77.00 a
	L39	2.02 ab	79.58 a
	L63	2.47 ab	79.18 a
	L71	2.35 ab	75.23 a
	L95	2.14 ab	70.62 a
	L104	2.72 a	89.70 a
	L126	2.79 a	81.38 a
	L129	1.60 b	72.28 a
	L145	2.74 a	83.58 a
	L177	2.00 ab	77.47 a
	L334	2.08 ab	78.57 a
	VDulce	2.60 ab	89.17 a
	HS2	2.74 ab	83.55 a
L(LE <sub>3</sub> x LE <sub>6</sub> ) <sub>Fn</sub>	1.89 ab	77.02 a	
<b>2017</b>	L13	2.31 d	74.23 b
	L63	3.01 bcd	67.07 b
	L71	2.98 bcd	89.30 a
	L95	2.41 d	89.22 a
	L126	2.74 cd	68.33 b
	L145	3.74 ab	93.57 a
	VDulce	3.41 abc	90.62 a
	HS2	3.95 a	95.77 a
	PG133	4.06 a	92.23 a

Letras iguales no tienen diferencias significativas entre densidades (Tukey, 0.05); IAF = índice de área foliar; RFAI = radiación fotosintéticamente activa interceptada. Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

Durante la Fase II, hubo efecto significativo de la interacción DxA en las variables IAF y RFAI (Figura 24); en particular, el IAF del arquetipo L126 no tuvo un aumento significativo en la densidad alta a diferencia de los demás arquetipos. En cuanto a la RFAI (Figura 25), se observó que los arquetipos considerados como de porte alto y medio alto no presentaron un cambio significativo para esta variable, mientras que los arquetipos de porte medio y bajo tuvieron un aumento considerable de RFAI en la densidad alta.



**Figura 24.** Comparación de medias entre la interacción D x A para el índice de área foliar (IAF); DB y DA = densidad baja y alta respectivamente; \* = indica diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre densidades para cada arquetipo.



**Figura 25.** Comparación de medias entre la interacción D x A para la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAI); DB y DA = densidad baja y alta respectivamente; \* = Indica diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre densidades para cada arquetipo.

#### **4.4 Distribución de biomasa en la planta**

Como es conocido, el rendimiento final de grano depende de variables morfológicas (altura de planta, orientación de la hoja), de variables fisiológicas (IAF, RFAI y fotosíntesis) y de la capacidad de la planta para movilizar los fotoasimilados hacia el órgano de interés, en este caso la mazorca (Long *et al.*, 2015).

En este estudio el análisis de varianza (Cuadro 19) indicó que las variables de distribución de biomasa en las dos fases experimentales del 2016 y 2017, dependieron en mayor medida del arquetipo. Durante 2016 hubo diferencias significativas entre densidades para la distribución de biomasa en grano, vainas, tallo y espigas, y las diferencias arquetípicas afectaron a todas las variables de biomasa con excepción del porcentaje de olote, y la interacción D x A solamente afectó al porcentaje de biomasa en brácteas. En 2017 brió que el factor densidad afectó la distribución de biomasa en grano, vainas y tallo, el factor arquetipo afectó a todas las variables, mientras que la interacción D x A no tuvo efecto significativo sobre ninguna de ellas.

**Cuadro 19.** Sumas de Cuadrados (SC) de las variables de distribución de biomasa en planta.

<b>Año</b>	<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>% Grano</b>	<b>% Olote</b>	<b>% Láminas</b>	<b>% Vainas</b>	<b>% Brácteas</b>	<b>% Tallo</b>	<b>% Espiga</b>
<b>2016</b>	Bloque (B)	2	74	5	7	7	8	22	0.01
	Densidad (D)	1	1911 (44) *	15 (8)	47 (12)	37 (24) *	18 (2)	816 (27) *	3.26 (12) *
	Error PG	2	14	3	11	2	42	3	0.15
	Arquetipo (A)	14	1807 (42) **	104 (57)	276 (73) **	89 (59) *	587 (64) *	2004 (65) *	18.84 (69) **
	D x A	14	594 (14)	63 (35)	55 (15)	26 (17)	313 (34) *	246 (8)	5.32 (19)
	Error PCH	56	1583	238	251	139	638	796	14.88
	CV (%)		13	28	24	20	26	17	55
<b>2017</b>	Bloque (B)	2	16	3.53	4	2	48	23	0.87
	Densidad (D)	1	1634 (41) *	0.01 (0.01)	104 (27)	41 (29) *	11 (2)	702 (29) *	0.48 (2)
	Error PG	2	28	3.49	21	1	48	46	0.94
	Arquetipo (A)	8	1896 (47) *	135.72 (83.44) **	229 (59) **	68 (48) *	508 (76) **	1294 (54) *	21.62 (84) **
	D x A	8	462 (12)	26.92 (16.55)	55 (14)	33 (23)	149 (22)	384 (16)	3.54 (14)
	Error PCH	32	1186	57.54	137	100	267	929	12.08
	CV (%)		18	19	20	19	22	23	59

FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ . Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

El aumento de la densidad de siembra tuvo efecto significativo en la distribución de biomasa a grano, vainas, brácteas, tallo y espiga. En ambas fases experimentales hubo diferencias estadísticas en el porcentaje de biomasa acumulados en grano, vainas y tallo, mientras que el porcentaje de biomasa distribuido en la espiga sólo fue significativo en la Fase I del 2016.

La asignación de biomasa al grano, también conocida como índice de cosecha (IC), es un factor importante para el mejoramiento genético, ya que un alto IC es una característica ideal del arquetipo de maíz, y que este parámetro se mantenga estable en altas densidades de siembra es aún más importante (Tollenaar *et al.*, 1997). En el presente estudio, el IC fue mayor en la densidad baja lo cual concuerda con lo reportado por Li *et al.* (2015b), quienes encontraron que al aumentar la densidad de población hay menor índice de cosecha.

La distribución de biomasa en olote, láminas y brácteas no tuvo muchas diferencias entre densidades, lo cual concuerda en parte con Carpici *et al.* (2010), quienes encontraron que el aumento gradual de la densidad de siembra eleva el porcentaje de acumulación en tallo y disminuye la distribución hacia el grano, mientras que la distribución en hojas no varía mucho.

**Cuadro 20.** Comparación de medias de y su distribución de biomasa entre densidades.

Año	Densidad	% Grano	% Olote	% Láminas	% Vainas	% Brácteas	% Tallo	% Espiga
2016	DB	44.45 a	7.81 a	7.92 a	7.18 b	12.57 a	19.32 b	0.75 b
	DA	35.23 b	6.99 a	9.37 a	8.46 a	13.46 a	25.35 a	1.13 a
2017	DB	40.29 a	6.92 a	9.16 a	8.58 b	13.77 a	20.33 b	0.95 a
	DA	29.29 b	6.89 a	11.93 a	10.33a	12.88 a	27.54 a	1.14 a

Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de 15 arquetipos en 2016 y de nueve arquetipos en 2017.

En ambas fases, 2016 y 2017, la mayor parte de la biomasa se ubicó en el grano, con porcentajes en la primera fase entre 30 y 47 %, y en la segunda fase entre 25 y 44 %. (Cuadro 33). En Fase I (2016) el arquetipo de porte muy bajo L39 fue el que presentó mayor porcentaje de IC y los de menor IC fueron L14 y L177, mientras que los demás arquetipos presentaron IC de entre 36 y 40 %.

En 2017 los arquetipos que presentaron las peores características de mazorca (L63 y L71) fueron los que tuvieron el menor IC, mientras que el arquetipo que presentó las mejores características de mazorca (PG133) tuvo el mayor IC. Se encontró también que L71 a pesar de tener una prolificidad

alta (1.52) no presentó un alto IC debido a que sus mazorcas eran pequeñas y con poco peso de grano. En cambio, el arquetipo híbrido PG133 que obtuvo el mayor IP (1.73) y las mazorcas más grandes y de mayor peso, también presentó el mayor IC. Uno de los arquetipos que sobresalió en ambas fases experimentales, a pesar de tener porte bajo, fue la línea endogámica L145 porque presentó mazorcas grandes y de buen peso, y un IC de cerca del 41 % en los dos años.

El tallo fue el órgano que presentó mayor acumulación de biomasa después del grano. En la Fase I (2016) los resultados oscilaron entre 10 (L39) y 30 (L177) %, y en 2017 variaron entre 16 (PG133) y 33 (L13) %. En ambas fases experimentales, L13 fue de los arquetipos que presentaron mayor porcentaje de acumulación en tallo y uno de los menores IC. En cambio, el arquetipo híbrido PG133 tuvo el mayor IC y la menor asignación de biomasa en tallo, a pesar de estar clasificado como planta de porte alto.

Las brácteas fueron el tercer órgano con mayor acumulación de biomasa y osciló entre 9 y 18 % en 2016, y entre 10 y 16 % en 2017. Estos resultados no coincidieron con los obtenidos en la prolificidad, ya que el arquetipo L13 tuvo mayor acumulación en brácteas en comparación con los demás arquetipos y una prolificidad baja de alrededor de 1.3. Una vez más, los arquetipos híbridos con mayor IC (PG133 y HS2) asignaron poca biomasa a las brácteas, lo que evidencia que tienen una mejor eficiencia en la conversión y movilidad de fotoasimilados hacia la mazorca, y no a sus brácteas.

La distribución de biomasa en vainas foliares y olote fue menor de 10 %, con poca variación entre arquetipos. La espiga fue el órgano que recibió la menor cantidad de biomasa en todos los arquetipos, con porcentajes menores de 1.4 en la mayoría de los casos; sin embargo, el arquetipo L126 tuvo un porcentaje considerablemente mayor al de los demás arquetipos con 2.3 % en 2016 y de 2.6 % en 2017. De acuerdo con Sangoi y Salvador (1998), una espiga grande es una característica indeseable para el arquetipo de maíz debido a que sombrea más al dosel, y menos radiación es transmitida a través del dosel.

**Cuadro 21.** Comparación de medias entre arquetipos para las variables de distribución de biomasa.

<b>Año</b>	<b>Arquetipo</b>	<b>% Grano</b>	<b>% Olote</b>	<b>% Láminas</b>	<b>% Vainas</b>	<b>% Brácteas</b>	<b>% Tallo</b>	<b>% Espiga</b>
<b>2016</b>	L13	36.3 abc	7.6 a	6.5 bc	7.3 ab	15.1 abc	26.6 abc	0.7 bc
	L14	30.1 c	7.7 a	10.0 ab	8.5 ab	16.3 ab	26.0 abcd	1.4 ab
	L39	47.0 a	9.5 a	7.5 abc	5.7 b	18.8 a	10.2 e	1.3 abc
	L63	40.8 abc	7.8 a	10.5 ab	9.1 a	12.3 abc	18.5 d	1.0 bc
	L71	41.9 a	7.9 a	9.2 ab	8.0 ab	13.3 abc	18.7 d	1.0 bc
	L95	41.6 a	7.0 a	8.3 abc	8.1 ab	9.2 c	25.1 abcd	0.7 bc
	L104	40.1 abc	6.8 a	9.5 ab	6.9 ab	9.6 bc	26.2 abcd	0.8 bc
	L126	39.3 abc	8.2 a	10.2 ab	9.6 a	11.3 bc	19.01 cd	2.3 a
	L129	37.9 abc	7.1 a	4.5 c	8.4 ab	13.9 abc	27.4 ab	0.8 bc
	L145	41.7 a	7.3 a	10.1 ab	7.8 ab	11.0 bc	21.1 bcd	0.9 bc
	L177	30.7 bc	6.2 a	7.5 abc	8.9 ab	15.9 abc	30.0 a	0.8 bc
	L334	44.8 a	7.3 a	7.5 abc	6.7 ab	11.4 bc	21.8 bcd	0.5 bc
	VDulce	40.3 abc	6.1 a	11.1 a	7.8 ab	12.5 abc	21.1 bcd	1.0 bc
	HS2	43.8 a	5.3 a	9.8 ab	6.6 ab	11.2 bc	23.0 abcd	0.3 c
L(LE <sub>3</sub> x LE <sub>6</sub> ) <sub>Fn</sub>	41.4 ab	9.2 a	7.5 abc	8.0 ab	13.4 abc	20.1 bcd	0.4 bc	
<b>2017</b>	L13	25.5 d	6.93 a,c	7.1 d	10.41 a	15.67 ab	33.19 a	1.24 b
	L63	31.1 b,d	8.61 a	13.01 ab	10.96 a	14.3 b	21.61 bc	0.45 b
	L71	26.2 cd	8.93 a	8.31 cd	9.64 ab	20.63 a	24.96 a,c	1.28 b
	L95	36.0 a,d	4.93 cd	9.21 b,d	9.82 ab	10.39 b	28.63 ab	1.02 b
	L126	34.7 a,d	7.72 ab	12.12 a,c	9.89 ab	12.97 b	20.02 bc	2.57 a
	L145	41.0 ab	7.39 a,c	11.14 a,c	9.37 ab	10.44 b	19.56 bc	1.09 b
	VDulce	36.8 a,d	5.36 b,d	9.14 b,d	9.57 ab	12.7 b	25.48 a,c	0.94 b
	HS2	37.3 a,c	4.25 d	11.74 a,c	8.69 ab	11.69 b	25.81 a,c	0.49 b
	PG133	44.4 a	8.07 a	13.18 a	6.76 b	11.16 b	16.12 c	0.33 b

Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

## 4.5 Análisis de prolificidad a través de densidades

### 4.5.1 Prolificidad (P)

La prolificidad es la propiedad que tiene el maíz de desarrollar más de una mazorca en la misma planta (Tinca *et al.*, 2015). En el presente estudio el análisis de varianza (Cuadro 22) indicó que en 2016 el factor arquetipo tuvo mayor influencia en la P, y que esta variable fue afectada significativamente por todos los factores de variación. En la Fase II (2017) la densidad (D) y el arquetipo (A) tuvieron un efecto similar en la P, mientras que la interacción D x A tuvo una contribución mínima sobre la variación. Los factores densidad y arquetipo tuvieron efecto significativo sobre esta variable, lo cual concuerda con lo establecido por Rodríguez *et al.* (2015), quienes en un estudio similar encontraron que la prolificidad es afectada por la densidad y el arquetipo, pero no por la interacción D x A.

**Cuadro 22.** Sumas de Cuadrados (SC) de la prolificidad (P).

<b>Año</b>	<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>Prolificidad</b>
<b>2016</b>	Bloque (B)	2	0.01
	Densidad (D)	1	0.76 (21) *
	Error PG	2	0.01
	Arquetipo (A)	14	2.4 (67) **
	D x A	14	0.43 (12) **
	Error PCH	56	0.34
	CV (%)		5.8
<b>2017</b>	Bloque (B)	2	0.02
	Densidad (D)	1	1.09 (48) *
	Error PG	2	0.01
	Arquetipo (A)	8	1.07 (47) *
	D x A	8	0.11 (5)
	Error PCH	32	0.36
	CV (%)		7.41

FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; PG = parcela grande; PCH = parcela chica. \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ . Entre paréntesis se anota la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

El aumento de la densidad de siembra (Cuadro 23) disminuyó significativamente la prolificidad en ambas fases experimentales. También Cervantes-Ortíz *et al.* (2013) reportaron una disminución significativa en el número de mazorcas por planta al aumentar la densidad de siembra de 60,000 a 90,000 plantas por hectárea.

**Cuadro 23.** Comparación de medias de Tukey entre densidades para la prolificidad.

<b>Año</b>	<b>Densidad</b>	<b>Prolificidad</b>
<b>2016</b>	DB	1.43 a
	DA	1.24 b
<b>2017</b>	DB	1.57 a
	DA	1.29 b

Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de 15 arquetipos en 2016 y de nueve arquetipos en 2017.

En la Fase I (2016) se registró una amplia variación en la prolificidad, con arquetipos de 1.1 (L129, L39) a 1.6 (HS2) planta por mazorca; aunque la mayoría de los arquetipos tuvieron entre 1.3 y 1.4 mazorcas por planta. En la Fase II (2017) la P varió de 1.26 (L126) a 1.73 (PG133), y al igual que en el año anterior la mayoría de ellos produjeron entre 1.3 y 1.4 mazorcas por planta. El comportamiento de esta variable en los dos años fue similar, con poca variación entre un año y otro.

**Cuadro 24.** Comparación de arquetipos en la prolificidad (P).

<b>Año</b>	<b>Arquetipo</b>	<b>Prolificidad</b>
<b>2016</b>	L13	1.29 cd
	L14	1.31 cd
	L39	1.13 ef
	L63	1.26 c,e
	L71	1.59 a
	L95	1.30 cd
	L104	1.52 ab
	L126	1.27 c,e
	L129	1.07 f
	L145	1.41 bc
	L177	1.24 de
	L334	1.58 a
	VDULCE	1.32 cd
	HS2	1.60 a
	L(LE <sub>3</sub> x LE <sub>6</sub> ) <sub>Fh</sub>	1.17 d,f
<b>2017</b>	L13	1.36 cd
	L63	1.32 cd
	L71	1.52 bc
	L95	1.32 cd
	L126	1.26 d
	L145	1.40 bcd
	VDulce	1.38 bcd
	HS2	1.57 ab
	PG133	1.73 a

Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

#### **4.5.2 Porcentaje de mazorcas dañadas por parcela**

Un cultivo establecido en campo abierto es susceptible a cambios drásticos en el ambiente, y a plagas que afectan a la planta a lo largo de su desarrollo. Una de las plagas que ha afectado en años recientes la producción agrícola en el campo experimental del Campus Montecillo del Colegio de

Postgraduados es la invasión de varias parvadas de aves (pericos, gorriones, etc.), los cuales se alimentan de granos inmaduros o aún no cosechados de cultivos como sorgo, trigo, amaranto y maíz, lo que reduce el rendimiento económico de los mismos.

En el presente estudio, efectuado durante las estaciones de crecimiento de 2016 y 2017, se tuvo un daño considerable en la calidad de mazorcas (Figura 26).



**Figura 26.** Daño de aves en mazorca inmadura de maíz.

El análisis de varianza (Cuadro 25) indicó que en 2016 el factor arquetipo (A) contribuyó en 48 % a la variación en daño a la mazorca, mientras que el factor densidad (D) contribuyó en 38 %; en este caso todos los tratamientos afectaron significativamente a esta variable. En 2017 el factor arquetipo (A) fue el que claramente tuvo mayor influencia en el daño de mazorca (89 %), mientras que los factores densidad (D) y la interacción D x A tuvieron una contribución mínima a la variación; en esta Fase II el daño de mazorca fue afectado significativamente únicamente por la densidad (D) y el arquetipo (A).

**Cuadro 25.** Sumas de Cuadrados (SC) del porcentaje de daño de mazorca por parcela.

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>% de daño</b>
<b>Bloque (B)</b>	2	536
<b>Densidad (D)</b>	1	9174 (38) *
<b>Error PG</b>	2	246
<b>Arquetipo (A)</b>	14	11823 (48) **
<b>D x A</b>	14	3403 (14) *
<b>Error PCH</b>	56	3663
<b>CV (%)</b>		13.97
<b>Bloque (B)</b>	2	949
<b>Densidad (D)</b>	1	903 (5) *
<b>Error PG</b>	2	23
<b>Arquetipo (A)</b>	8	17525 (89) **
<b>D x A</b>	8	1337 (7)
<b>Error PCH</b>	32	5065
<b>CV (%)</b>		50.74

FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad; PG = parcela grande; PCH = parcela chica. \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ . Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

El aumento en la densidad de siembra provocó una reducción significativa en el porcentaje de daño por aves invasoras en ambas fases experimentales (Cuadro 26), atribuible a que en la densidad alta las plantas se encontraban más juntas y evitaban que las aves entraran libremente a la parte central de la parcela, por lo que la mayoría del daño se localizó en las orillas de las mismas. En cambio, en las parcelas de densidad baja el daño fue más severo y se detectó a lo largo de la parcela.

**Cuadro 26.** Comparación de medias entre densidades para el porcentaje de daño de mazorcas por parcela.

<b>Año</b>	<b>Densidad</b>	<b>Porcentaje de daño</b>
<b>2016</b>	DB	67.98 a
	DA	47.79 b
<b>2017</b>	DB	28.88 a
	DA	20.71 b

Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05); DB y DA = densidad baja y alta respectivamente. Los valores presentados son el promedio de 15 arquetipos en 2016 y de nueve arquetipos en 2017.

En 2016, los arquetipos con mayor daño fueron L13, L177 y L(LE<sub>3</sub> x LE<sub>6</sub>)<sub>Fn</sub>, y los menos dañados L145, L63 y HS2 (Cuadro 35). En 2017 el arquetipo que presentó mayor daño de mazorca fue el más precoz (L13), en contraste con el arquetipo con el menor daño (PG133) que además fue el arquetipo más tardío. No obstante, el híbrido HS2 también tuvo floración tardía pero fue uno de los arquetipos que registraron mayor daño mazorca. En general, los arquetipos con el mayor daño fueron los más precoces mientras que los menos dañados presentaron floración tardía.

Al respecto, en un experimento llevado a cabo en el campo experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Muñoz-Jiménez y Alcántara-Carbajal (2017) encontraron que el daño de mazorcas por causa de las aves invasoras puede alcanzar un nivel de 23 %, y además demostraron que la localización del experimento también juega un papel importante en el daño ocasionado por las aves, pues a mayor proximidad de los nidos es mayor el daño que pueden causar. En este caso, ambos experimentos se establecieron muy cerca de las palmeras que sirven de nido a todas estas aves invasoras.

**Cuadro 27.** Comparación de medias entre arquetipos para el porcentaje de daño de mazorcas por parcela.

<b>Año</b>	<b>Arquetipo</b>	<b>% de daño</b>
<b>2016</b>	L13	77.3 a
	L14	59.0 bcd
	L39	72.5 ab
	L63	49.1 cde
	L71	59.5 bc
	L95	59.5 bc
	L104	61.4 abc
	L126	46.3 cde
	L129	58.4 bcd
	L145	36.4 e
	L177	73.1 ab
	L334	50.4cde
	VDulce	52.9 cde
	HS2	42.6 de
L(LE <sub>3</sub> x LE <sub>6</sub> ) <sub>Fn</sub>	69.8 ab	
<b>2017</b>	L13	64.3 a
	L63	10.7 cd
	L71	24.4 bcd
	L95	41.9 ab
	L126	10.6 cd
	L145	11.1 cd
	VDulce	28.5 bc
	HS2	28.3 bc
	PG133	3.5 d

Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

#### **4.6 Características de la mazorca**

Las características de mazorca fueron afectadas por el daño registrado en ambas fases experimentales (2016 y 2017), de modo que para la medición al momento de la cosecha se eligieron las mazorcas completas de mayor tamaño en cada tratamiento (*i.e.*, de cada combinación de arquetipo x densidad de siembra).

En este contexto, el análisis de varianza para estas variables (Anexo 1-3) reveló que las mazorcas muestreadas en la densidad alta tuvieron mayor tamaño y peso de grano que las de la densidad baja, lo cual es contrario a lo reportado anteriormente en el apartado de distribución de biomasa por planta, donde se encontró que el peso de grano por planta fue mayor en la densidad baja. Por ello se consideró que los resultados referentes a características morfológicas de las mazorcas, no son representativos ni confiables.

#### **4.7 Componentes del rendimiento**

El rendimiento de grano por planta está determinado principalmente por el número de granos por mazorca y por el peso individual de grano, los cuales son altamente influenciados por el aumento en la densidad de siembra (Shi *et al.*, 2016).

El análisis de varianza del número de granos por superficie (Cuadro 28) indicó que en la Fase I (2016) el número de granos por superficie dependió en similar proporción de la densidad de siembra (40.07 %) y del arquetipo (45.2 %), y que la interacción D x A tuvo una contribución mínima a la variación. En la Fase II (2017), el factor arquetipo fue el que tuvo mayor influencia en esta variable (56.3 %).

En 2016 el número de granos por superficie fue afectado significativamente ( $p \leq 0.05$ ) por los tres factores de variación (A, D, y D x A), mientras que en 2017 el efecto de la densidad de siembra fue significativo ( $p \leq 0.06$ ) y el arquetipo tuvo un efecto altamente significativo ( $p \leq 0.0001$ ), mientras que la interacción D x A no fue significativa.

**Cuadro 28.** Sumas de Cuadrados (SC) del número de granos por superficie.

<b>Año</b>	<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>Número de granos por superficie (NGR m<sup>-2</sup>)</b>
<b>2016</b>	<b>Bloque (B)</b>	2	466,6621
	<b>Densidad (D)</b>	1	77,607,962 (40.07) *
	<b>Error PG</b>	2	945,359
	<b>Arquetipo (A)</b>	14	8,6326,231 (45.2) **
	<b>D x A</b>	14	26,895,426 (14.1) *
	<b>Error PCH</b>	146	154,450,464
	<b>CV (%)</b>		37
<b>2017</b>	<b>Bloque (B)</b>	2	4,312,842
	<b>Densidad (D)</b>	1	52,498,044 (33.7) * <sup>1</sup>
	<b>Error PG</b>	2	6286,805 (56.3)
	<b>Arquetipo (A)</b>	8	87,774,715 (10.0) **
	<b>D x A</b>	8	15,513,144
	<b>Error PCH</b>	86	133,149,938
	<b>CV (%)</b>		51

FV = fuente de variación; GL = grados de libertad. \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.001$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ ; \*<sup>1</sup> = Significancia estadística con  $p \leq 0.06$ . Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

El análisis de varianza para el peso individual de grano (Cuadro 29) indicó que en ambas fases experimentales (2016 y 2017) el factor arquetipo fue el que tuvo mayor influencia sobre esta variable (94.1 y 88.5 %, respectivamente). En 2016 el peso individual de grano fue afectado únicamente por el arquetipo; en 2017 fue afectado por los tres factores de variación (D, A y D x A).

**Cuadro 29.** Sumas de Cuadrados (SC) del peso individual de grano.

<b>Año</b>	<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>Peso individual de grano (mg)</b>
<b>2016</b>	<b>Densidad (D)</b>	1	918.75 (0.1)
	<b>Arquetipo (A)</b>	14	1013403.45 (94.1) **
	<b>D x A</b>	14	62507.3 (5.8)
	<b>CV (%)</b>		17
<b>2017</b>	<b>Densidad (D)</b>	1	10551.2 (3.5) **
	<b>Arquetipo (A)</b>	8	267582.36 (88.5) **
	<b>D x A</b>	8	24087.81 (8.0) **
	<b>CV (%)</b>		7

FV = fuente de variación; GL = grados de libertad. \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.001$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ ; \*<sup>1</sup> = Significancia estadística con  $p \leq 0.06$ . Entre paréntesis se anota la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

El aumento de la densidad de siembra provocó en ambos años (2016 y 2017) un aumento significativo en el número de granos por superficie, mientras que el peso individual de grano fue significativamente menor en la densidad alta sólo en la Fase II (2017).

Lo anterior concuerda Xu *et al.*, 2017, quienes afirman que a pesar de que el número de granos por mazorca es menor en la densidad alta, el número de granos por superficie es considerablemente mayor debida al aumento en el número de mazorcas por unidad de superficie, mientras que Sharma *et al.* (2017) afirman que el peso de 100 semilla disminuye considerablemente con el aumento de la densidad de siembra.

**Cuadro 30.** Comparación de medias del número de granos por mazorca y peso de 100 semillas para el factor densidad.

<b>Año</b>	<b>Densidad</b>	<b>Número de granos por superficie (NGR m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Peso individual de grano (mg)</b>
<b>2016</b>	DB	2,122 b	312.3 a
	DA	3,435 a	308.8 a
<b>2017</b>	DB	1,739 b	338.0 a
	DA	3,133 a	313.8 b

Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05); DB y DA = densidad baja y alta, respectivamente. Los valores presentados son el promedio de 15 arquetipos en 2016 y de nueve arquetipos en 2017.

En 2016 se detectó una amplia variación en el número de granos por superficie, con valores desde 1,648 (L14) a 4,044 granos  $m^{-2}$  (HS2). En 2017 los resultados oscilaron de 1,600 (L13 y L71) a 4,489 granos  $m^{-2}$  (PG133), pero a mayoría de los arquetipos presentaron valores de entre 1,600 a 2,500 granos  $m^{-2}$ ; además se observó un decremento considerable de esta variable para la mayoría de los arquetipos establecidos en ambos años; por ejemplo, el arquetipo L145 tuvo 3,496 granos  $m^{-2}$  en 2016 y de 2,576 granos  $m^{-2}$  en 2017, lo cual se atribuye al escaso contraste entre las densidades establecidas en el año 2016.

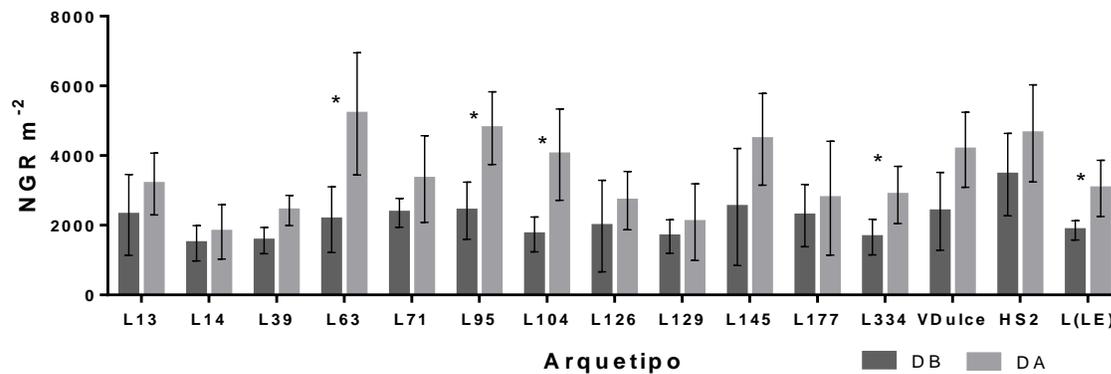
El peso individual de grano (PIG) en 2016 osciló entre 237 (L63) y 443 (HS2), donde la mayoría de las líneas presentó PIG menor a 300 mg. En 2017 hubo menor dispersión en los resultados de esta variable, con medias que oscilaron desde 248 (L63) a 427 mg por grano (HS2). Al igual que en 2016, la mayoría de las líneas, con excepción de L145, presentaron PIG menores a 300 mg.

**Cuadro 31.** Comparación de medias del número de granos por mazorca para los factores Arquetipo (A) e interacción D x A.

<b>Año</b>	<b>Arquetipo</b>	<b>Número de granos por superficie (NGR m<sup>-2</sup>)</b>	<b>Peso individual de grano (mg)</b>
<b>2016</b>	L13	2,740 d,g	282.3 d,f
	L14	1,648 i	362.7 b
	L39	1,992 g,i	275.6 d,f
	L63	3,678 ab	237.3 g
	L71	2,842 c,f	268.7 e,g
	L95	3,601 a,c	278.7 d,f
	L104	2,883 b,f	303.2 cd
	L126	2,341 f,i	265.6 fg
	L129	1,883 hi	298.9 de
	L145	3,496 a,d	300.8 de
	L177	2,529 e,h	273.0 d,f
	L334	2,266 f,i	436.2 a
	VDulce	3,283 a,e	335.0 bc
	HS2	4,044 a	443.0 a
L(LE <sub>3</sub> x LE <sub>6</sub> ) <sub>Fn</sub>	2,455 e,i	297.9 d,f	
<b>2017</b>	L13	1,605 d	277.9 c
	L63	2,405 cd	248.7 d
	L71	1,624 d	291.4 c
	L95	2,174 cd	290.3 c
	L126	1,904 cd	279.3 c
	L145	2,576 bc	338.8 b
	VDulce	1,755 cd	358.6 b
	HS2	3,391 b	427.2 a
	PG133	4,489 a	421.1 a

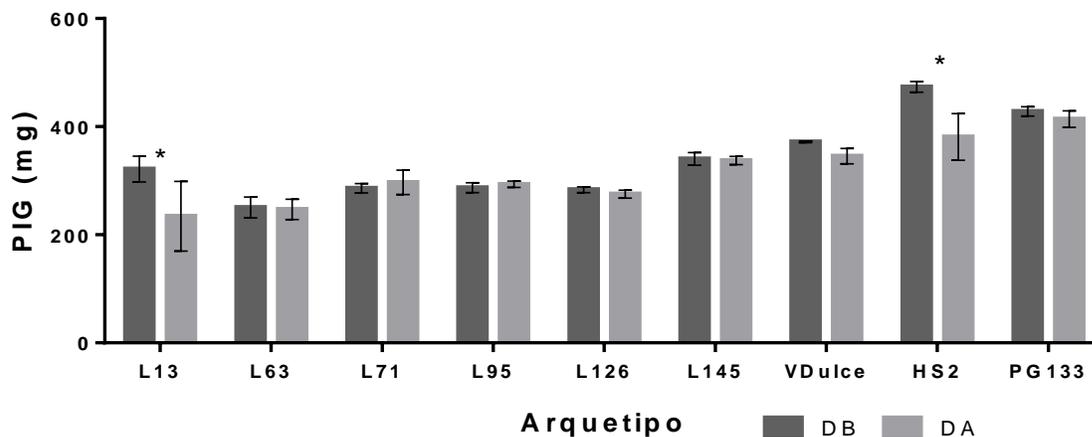
Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Letras mayúsculas indican diferencias entre arquetipos. Letras minúsculas indican diferencias de la interacción D x A. Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

En cuanto a la interacción D x A de 2016, de manera general se notó un aumento en el número de granos por superficie con el aumento de la densidad de siembra, aunque esta diferencia sólo fue significativa en arquetipos endogámicos (L63, L95, L104, L334 y L(LE<sub>3</sub> x LE<sub>6</sub>)<sub>Fn</sub>) (Figura 27).



**Figura 27.** Comparación de medias entre la interacción D x A para número de granos por superficie; NGR m<sup>-2</sup> = número de granos por metro cuadrado; DB y DA = densidad baja y alta, respectivamente; \* = indica diferencias significativas (Tukey, 0.05) entre densidades para cada arquetipo.

En 2017 durante la Fase II, la interacción D x A en el peso individual de grano se debió a que sólo los arquetipos L13 y HS2 tuvieron un decremento considerable para esta variable (Figura 28).



**Figura 28.** Comparación de medias entre la interacción D x A para el peso individual de grano; PIG = peso individual de grano; DB y DA = densidad baja y alta, respectivamente; \* = indica diferencias significativas (Tukey, 0.05) entre densidades para cada arquetipo.

#### 4.8 Rendimiento por unidad de superficie

De acuerdo con Long *et al.* (2006), el rendimiento potencial, el cual es el máximo rendimiento alcanzable bajo condiciones óptimas de temperatura, agua, suelo y nutrientes, está determinado por el producto de la energía luminosa disponible, la eficiencia en su captura y la eficiencia en la conversión de la misma en biomasa aprovechable (índice de cosecha).

En los dos años de estudio aquí efectuados, el rendimiento de grano por unidad de superficie dependió en similar proporción del arquetipo (A) y de la densidad (D), y fue afectado significativamente por los tres factores (D, G y D x A), en concordancia con lo reportado por Hernández *et al.* (2014) quienes al evaluar una serie de híbridos sometidos a tres densidades de siembra encontraron que el rendimiento de grano se vio afectado por el arquetipo, la densidad y la interacción D x A.

**Cuadro 32.** Sumas de Cuadrados (SC) del rendimiento.

<b>Año</b>	<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>Rendimiento por unidad de superficie</b>
<b>2016</b>	<b>Bloque (B)</b>	2	104.2
	<b>Densidad (D)</b>	1	1524.3 (27.5) *
	<b>Error PG</b>	2	29.6
	<b>Arquetipo (A)</b>	14	3634.5 (65.5) **
	<b>D x A</b>	14	392.3 (7.1)
	<b>Error PCH</b>	146	3352.9
	<b>CV (%)</b>		37
<b>2017</b>	<b>Bloque (B)</b>	2	74.6
	<b>Densidad (D)</b>	1	423.8 (13.8) * <sup>1</sup>
	<b>Error PG</b>	2	68.6
	<b>Arquetipo (A)</b>	8	2384.4 (77.4) **
	<b>D x A</b>	8	272.9 (8.9)
	<b>Error PCH</b>	86	1773.6
	<b>CV (%)</b>		55

FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad. \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ . Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos. Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

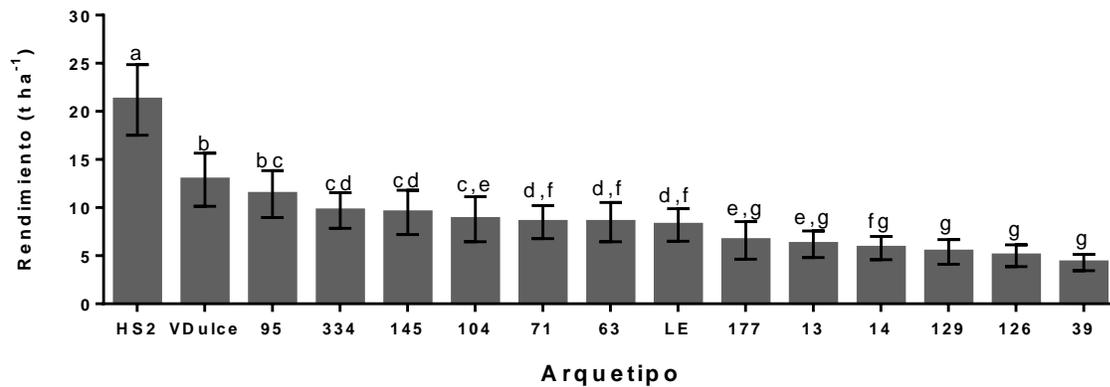
La comparación de medias entre densidades (Cuadro 33) indicó que en ambos años el rendimiento fue significativamente mayor en la densidad alta, lo cual concuerda con lo reportado por Shi *et al.* (2016).

**Cuadro 33.** Comparación de medias de rendimiento para el factor densidades.

Año	Densidad	Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )
2016	DB	6.9 b
	DA	10.7 a
2017	DB	6.3 b
	DA	10.3 a

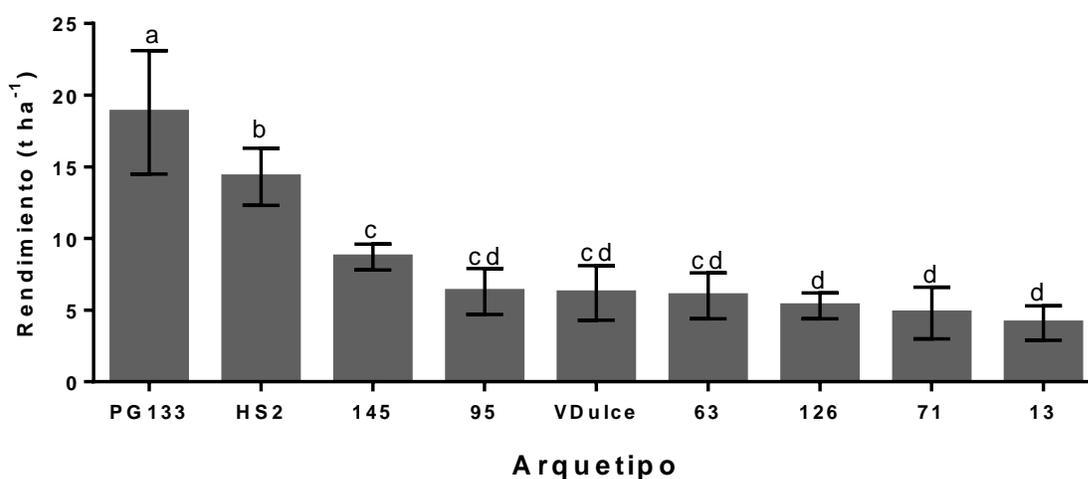
Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05); DB y DA = densidad baja y alta respectivamente. Los valores presentados son el promedio de 15 arquetipos en 2016 y de nueve arquetipos en 2017.

El rendimiento de grano registrado en 2016 (Figura 29) osciló entre 4.3 (L39) y 21.2 t ha<sup>-1</sup>, año en el que los arquetipos con el mayor rendimiento fueron los testigos HS2 y VDulce los cuales tuvieron alta prolificidad y el mayor número de granos por superficie; en este mismo año los arquetipos de menor rendimiento fueron las líneas endogámicas L39 y L129 que tuvieron baja prolificidad y un número de granos por superficie considerablemente menor al de los híbridos testigos que poseen heterosis.



**Figura 29.** Comparación de medias entre arquetipos para rendimiento de grano de la primera fase experimental (2016). Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

En 2017 (Figura 30) el rendimiento osciló entre 4.1 (L13) y 18.8 (PG133) t ha<sup>-1</sup>, y al igual que en la fase anterior los arquetipos con el mayor rendimiento fueron los testigos híbridos (HS2 y PG133), aunque una de las líneas endogámicas (L145) destacó por presentar rendimientos mayores de 8.7 t ha<sup>-1</sup>. Cabe mencionar que el rendimiento de algunos arquetipos como el HS2 parece ser considerablemente mayor en 2016; sin embargo, es importante mencionar que los resultados que aquí se reportan son el promedio de las dos densidades de siembra y que en 2016 la diferencia entre densidades de siembra establecidas en campo no fue tan contrastante ni homogénea como lo fue en 2017. Es decir, son más confiables los datos del 2017.



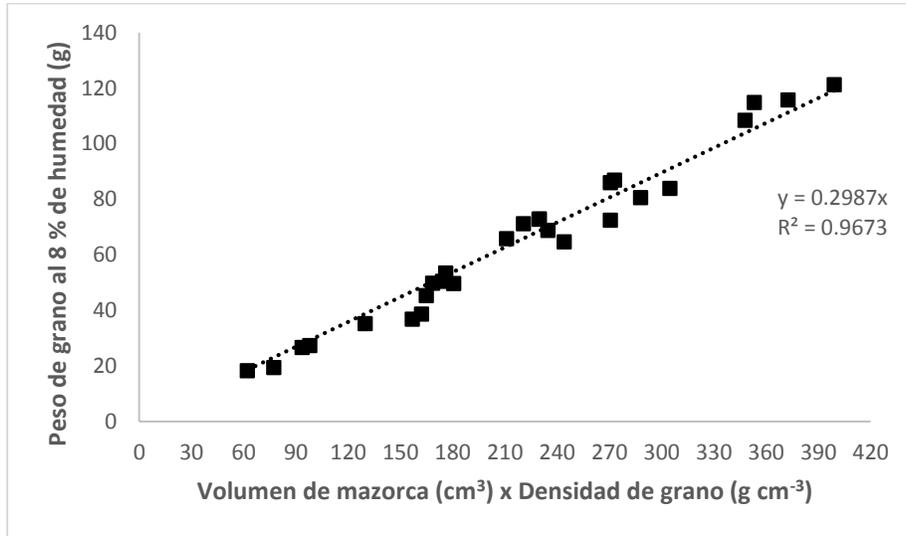
**Figura 30.** Comparación de medias entre arquetipos para rendimiento de grano de la segunda fase experimental (2017). Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de dos densidades de siembra (62,500 y 125,000 plantas/ha).

#### 4.9 Estimación del daño de aves en mazorcas

##### Modelo de estimación de peso de mazorca

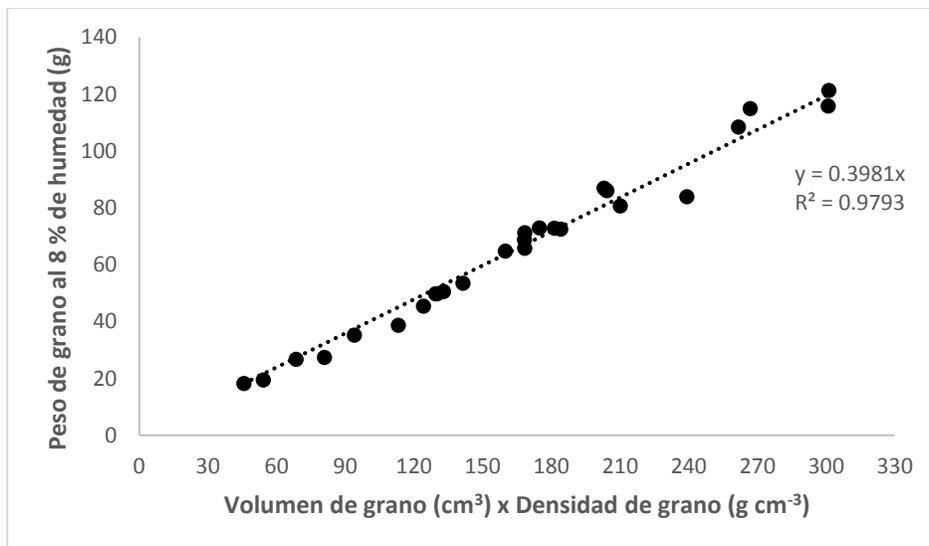
Para evaluar cuantitativamente la pérdida de rendimiento de grano por mazorca causada por aves, se planteó la opción de encontrar una relación lineal entre el peso de grano y el volumen de mazorca. El primer modelo evaluado estima el peso de grano a 8 % de humedad mediante el

volumen de mazorca multiplicado por la densidad de grano, dio como resultado la ecuación lineal  $y = 0.2987x$  con un ajuste de 96.7 % (Figura 31).



**Figura 31.** Modelo de estimación de peso grano con base en el volumen de mazorca.

El segundo modelo evaluado que estima también el peso de grano a 8 % de humedad, pero con base en el volumen de grano multiplicado por la densidad de grano, dio como resultado la ecuación lineal  $y = 0.3981x$  con un ajuste de 97.9 % (Figura 32).



**Figura 32.** Modelo de estimación de peso grano usando volumen de grano.

## Validación del modelo

Para la validación del modelo se utilizaron mazorcas de tres arquetipos: el híbrido HS2 (Figura 33), el cual se utilizó en la obtención de los modelos, el híbrido PG133 (Figura 34) que tuvo granos similares a los de HS2, y la línea endogámica L63 (Figura 35) que fue el arquetipo que tuvo los granos más pequeños. Con estas tres variantes arquetípicas se procuró representar la diversidad genética para asegurar que el modelo pudiera ajustarse a todo tipo de grano.



**Figura 33.** Mazorcas sanas (parte superior) y dañadas (parte inferior) del arquetipo HS2.



**Figura 34.** Mazorcas sanas del arquetipo PG133.



**Figura 35.** Mazorcas sanas (parte superior) y dañadas (parte inferior) del arquetipo L63.

En la validación del modelo con HS2 (Cuadro 34), se encontró que con el uso del volumen de mazorca se estimaron valores de rendimiento muy similares a los observados, mientras que con el volumen de peso de grano el rendimiento de grano resultó subestimado, en todos los casos. Con el arquetipo PG133 (Cuadro 35), ambos modelos tuvieron un mejor ajuste que con HS2, aunque el modelo basado en volumen de mazorca produjo datos más aproximados a los datos observados.

La validación con el arquetipo L63 (Cuadro 36) mediante el volumen de grano produjo rendimientos menores que los observados, mientras que los rendimientos estimados con el volumen de mazorca fueron más cercanos a los observados.

En resumen, al estimar el peso de grano con el volumen de mazorca se lograron valores más similares a los observados en mazorcas sin daño, por lo que es factible usar este modelo para ajustar el peso de grano de mazorca cuando es dañada por aves como en este estudio. Además, el volumen de mazorca es más fácil y rápido de medir que el volumen de grano, lo que refuerza la elección del modelo basado en volumen de mazorca. Además, se concluye que estos modelos matemáticos sencillos permiten estimar adecuadamente la pérdida de rendimiento por daño ocasionado por este tipo de aves.

**Cuadro 34.** Estimación del peso de grano de mazorcas del arquetipo HS2.

Arquetipo	DS	VMAZ	VGR	DGR	VMAZ x D	VGR x D	PGR (8%)	PEST VMAZ	PEST VGR
HS2	DB	343.82	262.53	0.72	247.55	189.02	86.69	98.55	186.49
HS2	DB	411.17	302.83	0.72	296.04	218.04	117.01	117.85	215.11
HS2	DB	249.78	168.09	0.72	179.84	121.02	59.24	71.60	119.40
HS2	DB	152.52	108.87	0.72	109.81	78.39	37.85	43.72	77.34
HS2	DB	298.41	234.52	0.72	214.85	168.85	97.21	85.53	166.59
HS2	DB	207.98	154.75	0.72	149.75	111.42	64.31	59.61	109.93
HS2	DB	232.35	183.57	0.72	167.29	132.17	70.72	66.60	130.40
HS2	DB	232.59	168.32	0.72	167.47	121.19	69.84	66.67	119.57
HS2	DB	193.20	128.88	0.72	139.11	92.79	41.96	55.38	91.55
HS2	DB	158.41	104.58	0.72	114.05	75.29	48.16	45.40	74.29
HS2	DA	425.80	313.96	0.77	327.87	241.75	127.95	130.52	238.51
HS2	DA	357.59	267.22	0.77	275.34	205.76	105.24	109.61	203.01
HS2	DA	427.60	334.19	0.77	329.25	257.32	134.40	131.08	253.87
HS2	DA	315.23	248.78	0.77	242.73	191.56	109.06	96.63	188.99
HS2	DA	327.11	229.92	0.77	251.87	177.04	106.30	100.27	174.67
HS2	DA	332.79	247.39	0.77	256.25	190.49	109.00	102.01	187.94
HS2	DA	240.03	148.45	0.77	184.83	114.31	86.89	73.58	112.78
HS2	DA	311.90	232.48	0.77	240.16	179.01	92.46	95.61	176.61
HS2	DA	316.79	236.98	0.77	243.93	182.47	57.39	97.11	180.03
HS2	DA	259.80	186.29	0.77	200.05	143.44	81.33	79.64	141.52

DS = densidad de siembra; DB y DA = densidad baja y alta respectivamente; VMAZ = volumen de mazorca; VGR = volumen de grano; DGR = densidad de grano; PGR (8%) = peso de grano a 8% de humedad; PEST VMAZ = peso estimado por el modelo de volumen de mazorca; PEST VGR = peso estimado usando el modelo de peso de grano.

**Cuadro 35.** Estimación del peso de grano de mazorcas del arquetipo PG133.

Arquetipo	DS	VMAZ	VGR	DGR	VMAZ x D	VGR x D	PGR (8%)	PEST VMAZ	PEST VGR
PG133	DB	481.13	301.29	0.74	356.03	222.96	143.35	138.14	114.85
PG133	DB	523.27	339.96	0.74	387.22	251.57	170.50	150.24	129.58
PG133	DB	501.79	304.30	0.74	371.33	225.18	149.47	144.07	115.99
PG133	DB	453.29	284.38	0.74	335.44	210.44	124.89	130.15	108.40
PG133	DB	474.17	322.20	0.74	350.88	238.43	136.18	136.14	122.81
PG133	DB	391.59	259.14	0.74	289.78	191.76	101.36	112.43	98.78
PG133	DB	373.92	219.71	0.74	276.70	162.59	105.30	107.36	83.75
PG133	DB	367.17	223.00	0.74	271.70	165.02	116.10	105.42	85.00
PG133	DB	351.51	230.22	0.74	260.12	170.37	98.06	100.93	87.76
PG133	DB	357.59	230.15	0.74	264.62	170.31	113.92	102.67	87.73
PG133	DA	400.59	269.40	0.70	280.42	188.58	108.06	108.80	97.14
PG133	DA	382.71	250.08	0.70	267.90	175.05	117.00	103.94	90.17
PG133	DA	440.88	281.22	0.70	308.62	196.85	125.38	119.74	101.40
PG133	DA	404.36	280.16	0.70	283.05	196.12	116.83	109.82	101.02
PG133	DA	434.36	294.09	0.70	304.05	205.86	127.24	117.97	106.04
PG133	DA	336.45	216.12	0.70	235.52	151.29	92.81	91.38	77.93
PG133	DA	344.64	195.59	0.70	241.25	136.91	99.48	93.60	70.52
PG133	DA	352.99	228.49	0.70	247.10	159.94	103.67	95.87	82.39
PG133	DA	321.23	203.03	0.70	224.86	142.12	90.44	87.25	73.21
PG133	DA	323.54	191.18	0.70	226.48	133.83	98.30	87.87	68.94

DS = densidad de siembra; DB y DA = densidad baja y alta respectivamente; VMAZ = volumen de mazorca; VGR = volumen de grano; DGR = densidad de grano; PGR (8%) = peso de grano a 8% de humedad; PEST VMAZ = peso estimado por el modelo de volumen de mazorca; PEST VGR = peso estimado usando el modelo de peso de grano.

**Cuadro 36.** Estimación del peso de grano de mazorcas del arquetipo L63.

Arquetipo	DS	VMAZ	VGR	DGR	VMAZ x D	VGR x D	PGR (8%)	PEST VMAZ	PEST VGR
63	DB	210.32	133.06	0.69	145.12	91.81	71.54	56.31	47.29
63	DB	154.66	89.37	0.69	106.71	61.66	61.64	41.40	31.76
63	DB	128.41	75.66	0.69	88.60	52.21	49.81	34.38	26.89
63	DB	94.95	59.26	0.69	65.51	40.89	34.67	25.42	21.06
63	DB	111.41	55.27	0.69	76.87	38.14	34.33	29.83	19.65
63	DB	151.02	75.77	0.69	104.20	52.28	30.15	40.43	26.93
63	DB	135.94	70.77	0.69	93.80	48.83	39.92	36.39	25.15
63	DB	109.33	48.52	0.69	75.44	33.48	32.74	29.27	17.24
63	DB	129.33	46.05	0.69	89.24	31.77	24.40	34.62	16.37
63	DB	106.97	39.56	0.69	73.81	27.29	17.04	28.64	14.06
63	DA	195.25	111.09	0.73	142.53	81.10	61.30	55.30	41.77
63	DA	236.95	143.32	0.73	172.97	104.62	82.50	67.11	53.89
63	DA	178.82	105.05	0.73	130.54	76.69	46.57	50.65	39.50
63	DA	248.46	138.76	0.73	181.38	101.30	67.88	70.37	52.18
63	DA	147.16	86.50	0.73	107.43	63.15	40.87	41.68	32.53
63	DA	124.69	69.48	0.73	91.02	50.72	43.47	35.32	26.13
63	DA	137.26	87.09	0.73	100.20	63.58	38.71	38.88	32.75
63	DA	157.34	97.38	0.73	114.86	71.09	53.21	44.57	36.62
63	DA	234.00	139.19	0.73	170.82	101.61	47.84	66.28	52.34
63	DA	156.18	99.64	0.73	114.01	72.74	41.42	44.24	37.47

DS = densidad de siembra; DB y DA = densidad baja y alta respectivamente. VMAZ = volumen de mazorca; VGR = volumen de grano; DGR = densidad de grano; PGR (8%) = peso de grano a 8% de humedad; PEST VMAZ = peso estimado por el modelo de volumen de mazorca; PEST VGR = peso estimado usando el modelo de peso de grano.

## 5. DISCUSIÓN GENERAL

La caracterización morfológica de los arquetipos de maíz evaluados en el presente estudio estuvo determinada en primer lugar por la altura de planta (porte), el ángulo de inserción de la hoja y las características de la misma. Por medio del análisis del comportamiento de las hojas a través del dosel (estratos) se determinó que las variables ancho de lámina, LOV y grado de cuelgue (Lf/LL) son las que mejor permiten describir al arquetipo y diferenciarlo de los demás.

En las variables fisiológicas se encontró que el aumento en la densidad de siembra aumenta de grado significativo el tamaño del aparato fotosintético (IAF), pero sin modificar la eficiencia de intercepción de la radiación (porcentaje de RFAI interceptado) ni tampoco a la capacidad fotosintética (tasa instantánea máxima de fotosíntesis).

En la distribución de biomasa se descubrió que el aumento en la densidad de plantas por unidad de superficie afectó principalmente a la proporción de biomasa acumulada en grano, es decir al índice de cosecha que resultó significativamente mayor en la densidad baja de 62,500 plantas/ha, además de incrementar el porcentaje de biomasa asignada al tallo y a vainas, lo cual se asocia con el aumento (no significativo) en altura de planta en la densidad alta. Los arquetipos testigos (VDulce, HS2 y PG133) presentaron altos índices de cosecha en ambos años experimentales (2016 y 2017), aunque las líneas endogámicas L95 y L145 obtuvieron un índice de cosecha similar.

El análisis de daños causados por aves invasores reveló que el daño fue considerablemente mayor en la densidad baja porque en estas condiciones las aves tienen mayor alcance de las mazorcas por estar las plantas más espaciadas, además de que los arquetipos con mayor daño de aves fueron las de mayor precocidad, en ambos años de estudio.

Se confirmó también que a pesar de que el aumento de la densidad de siembra provocó una disminución significativa en el peso de individual de grano (solo en 2017), así como de la prolificidad y del número de granos por mazorca (Anexo 1), el efecto global del aumento de la densidad produjo una ganancia significativa en el rendimiento final de grano. Estos resultados están en concordancia con lo establecido por Xu *et al.* (2017), quienes afirman que el aumento en rendimiento de grano en altas densidades de población se debe al aumento en el número de mazorcas por superficie, y no es afectado por el decremento de la prolificidad. Debido a ello el balance del número de granos por superficie es considerablemente mayor en la densidad alta, a pesar de presentar menor número de granos por mazorca.

## 6. CONCLUSIONES

El aumento de la densidad de plantas eleva de manera considerable al rendimiento de grano, así como al índice de área foliar de los arquetipos, además de reducir el daño de mazorcas ocasionado por aves invasoras. Los arquetipos que presentaron mejor adaptación a las altas densidades de siembra fueron HS2, L145 y VDulce en la evaluación del 2016, y HS2, PG133, VDulce y la línea endogámica L145 en el año 2017.

Los arquetipos que presentaron el mejor rendimiento de grano en la alta densidad de población fueron los híbridos HS2 y PG133, en especial PG133, la variedad Dulce y dos líneas endogámicas L95 y L145, y todos ellos coincidieron en tener índices de área foliar elevados ( $> 3.4$ , excepto L95), altos valores de radiación interceptada ( $> 89\%$ ), producir mayor cantidad de granos por mazorca y por superficie ( $> 4700$  granos por  $m^2$ ), y granos más grandes ( $> 339$  mg por grano, excepto L95). Si bien los híbridos HS2 y PG133 tuvieron un desempeño considerablemente superior en rendimiento que los demás arquetipos estudiados, las líneas endogámicas L95 y L145 que sin tener heterosis demostraron poseer alta eficiencia fisiológica en IAF, A y RFAI, así como buena prolificidad, por lo que tienen potencial como líneas progenitoras para la generación de nuevas variedades mejoradas de maíz.

## LITERATURA CITADA

- Ando, K., R. Grumet, K. Terpstra and J. D. Kelly. 2007. Manipulation of plant architecture to enhance crop disease control. *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 26: 1-8.
- Andrivon, D., C. Giorgetti, A. Baranger, A. Calonnec, P. Cartolaro, R. Faivre, S. Guyader, P.-E. Lauri, F. Lescourret and L. Parisi. 2013. Defining and designing plant architectural ideotypes to control epidemics? *European Journal of Plant Pathology* 135: 611-617.
- Awal, M., H. Koshi and T. Ikeda. 2006. Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* 139: 74-83.
- Baron, V., H. Najda and F. Stevenson. 2006. Influence of population density, row spacing and hybrid on forage corn yield and nutritive value in a cool-season environment. *Canadian Journal of Plant Science* 86: 1131-1138.
- Barros, R., R. Faria, L. Tuffi Santos, A. Azevedo and J. Governici. 2017. Physiological Response of Maize and Weeds in Coexistence. *Planta Daninha* 35: 1-8.
- Bonilla, M. N. 2009. Manual de recomendaciones del cultivo de maíz. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA). Costa Rica. pp. 1-9.
- Boomsma, C. R., J. B. Santini, M. Tollenaar and T. J. Vyn. 2009. Maize morphophysiological responses to intense crowding and low nitrogen availability: An analysis and review. *Agronomy Journal* 101: 1426-1452.
- Carpici, E. B., N. Celik and G. Bayram. 2010. Yield and quality of forage maize as influenced by plant density and nitrogen rate. *Turkish Journal of Field Crops* 15: 128-132.
- Carrera, V., José Alfredo and S. T. Cervantes. 2006. Respuesta a densidad de población de cruces de maíz tropical y subtropical adaptadas a Valles Altos. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 331-338.
- Casal, J. J. 2013. Photoreceptor signaling networks in plant responses to shade. *Annual Review of Plant Biology* 64: 403-427.
- Cervantes-Ortíz, F., J. Covarrubias-Prieto, J. A. Rangel-Lucio, A. D. Terrón-Ibarra, M. Mendoza-Elos and R. E. Preciado-Ortiz. 2013. Densidad de población y fertilización nitrogenada en la producción de semilla híbrida de maíz. *Agronomía Mesoamericana* 24: 101-110.
- Cruz, O. 2013. Manual para el cultivo de maíz en Honduras. DICTA "Published on the Internet:" <http://www.dicta.hn/files/2013,-Manual-cultivo-de-maiz--G.pdf>. 2013.
- Cui, H., J. J. Camberato, L. Jin and J. Zhang. 2015. Effects of shading on spike differentiation and grain yield formation of summer maize in the field. *International Journal of Biometeorology* 59: 1189-1200.
- Da Silva, D., L. Han, R. Faivre and E. Costes. 2014. Influence of the variation of geometrical and topological traits on light interception efficiency of apple trees: sensitivity analysis and metamodelling for ideotype definition. *Annals of Botany* 114: 739-752.
- Dann, M. and D. Leister. 2017. Enhancing (crop) plant photosynthesis by introducing novel genetic diversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 372: 1-9.
- De la Cruz-Lázaro, E., H. Córdova-Orellana, M. Estrada-Botello, J. Mendoza-Palacios, A. Gómez-Vázquez and N. Brito-Manzano. 2009. Rendimiento de grano de genotipos de maíz sembrados bajo tres densidades de población. *Universidad y Ciencia* 25: 93-98.
- Deras, F. H. 2014. Guía técnica: El cultivo de maíz. CENTA "Published on the Internet:" <http://repiica.iica.int/docs/b3469e/b3469e.pdf>. 2014.

- Di Rienzo, J., F. Casanoves, M. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada and C. Robledo. 2008. InfoStat software estadístico, versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Donald, C. 1968. The design of a wheat ideotype. *Euphytica* 17: 385-403.
- Ehleringer, J. R., T. E. Cerling and B. R. Helliker. 1997. C4 photosynthesis, atmospheric CO<sub>2</sub>, and climate. *Oecologia* 112: 285-299.
- FAO-AMIS. 2018. (Food and Agriculture Organization, Agricultural Management Information System Statistics). 2018. World Total Cereals at a glance. <http://statistics.amis-outlook.org/data/index.html>. (Febrero, 2018).
- FAO. 2015. (Food and Agriculture Organization). Perspectivas por sectores principales. Producción de cultivos. <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/004/y3557s/y3557s04.pdf>. Consulta (Noviembre, 2017).
- FAOSTAT. 2018. (Food and Agriculture Organization Statistics). Cultivos. <http://ref.data.fao.org/es/web/guest/dataset?entryId=29920434-c74e-4ea2-beed-01b832e60609&tab=about>. (Febrero 2018).
- Foyer, C. H., A. V. Ruban and P. J. Nixon. 2017. Photosynthesis solutions to enhance productivity. *Philosophical Transactions of the Royal Society*
- Gong, F., X. Wu, H. Zhang, Y. Chen and W. Wang. 2015. Making better maize plants for sustainable grain production in a changing climate. *Frontiers in Plant Science* 6: 1-6.
- Gou, L., J. Xue, B. Qi, B. Ma and W. Zhang. 2017. Morphological Variation of Maize Cultivars in Response to Elevated Plant Densities. *Agronomy Journal* 109: 1443-1453.
- Hashemi, A. M., S. J. Herbert and D. H. Putnam. 2005. Yield response of corn to crowding stress. *Agronomy Journal* 97: 839-846.
- Hernández, F., A. Amelong and L. Borrás. 2014. Genotypic differences among Argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agronomy Journal* 106: 2316-2324.
- Huang, S., Y. Gao, Y. Li, L. Xu, H. Tao and P. Wang. 2017. Influence of plant architecture on maize physiology and yield in the Heilonggang River valley. *The Crop Journal* 5: 52-62.
- IBPGR. 1991. Descriptors for Maize. International Board for Plant Genetic Resources, CIMMYT "Published on the Internet:" [http://archive-ecpgr.cgiar.org/fileadmin/biodiversity/publications/pdfs/104\\_Descriptors\\_for\\_maize.Descriptores\\_para\\_maiz.Descripteurs\\_pour\\_le\\_mais-cache=1415188810.pdf](http://archive-ecpgr.cgiar.org/fileadmin/biodiversity/publications/pdfs/104_Descriptors_for_maize.Descriptores_para_maiz.Descripteurs_pour_le_mais-cache=1415188810.pdf). 1991.
- INEGI. 1997. El maíz en el estado de México Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. p. 8.
- Intagri. 2018. El Índice de Área Foliar (IAF) y su Relación con el Rendimiento del Cultivo de Maíz. "Published on the Internet:" <https://www.intagri.com/articulos/cereales/el-indice-de-area-foliar-iaf>. 2018.
- Iqbal, N., A. Masood and N. Khan. 2012. Analyzing the significance of defoliation in growth, photosynthetic compensation and source-sink relations. *Photosynthetica* 50: 161-170.
- Kato, T. A. 2005. Cómo y dónde se originó el maíz. *Investigación y Ciencia* 347: 68-75.
- Khan, Z. H., S. K. Khalil, F. Shah, A. Iqbal, F. Ali, I. Badshah Islam and M. Ali. 2017. Plant density and nitrogen doses can affect growth of sweet corn. *Fresenius Environmental Bulletin* 26: 3872-3879.
- Ku, L., W. Zhao, J. Zhang, L. Wu, C. Wang, P. Wang, W. Zhang and Y. Chen. 2010. Quantitative trait loci mapping of leaf angle and leaf orientation value in maize (*Zea mays* L.). *Theoretical and Applied Genetics* 121: 951-959.

- Laurila, H. A., P. Mäkelä, J. Kleemola and J. Peltonen. 2012. A comparative ideotype, yield component and cultivation value analysis for spring wheat adaptation in Finland. *Agricultural and Food Science* 21: 384-408.
- Li, C., Y. Li, Y. Shi, Y. Song, D. Zhang, E. S. Buckler, Z. Zhang, T. Wang and Y. Li. 2015a. Genetic control of the leaf angle and leaf orientation value as revealed by ultra-high density maps in three connected maize populations. *Plos One* 10: 1-13.
- Li, J., R. Xie, K. Wang, B. Ming, Y. Guo, G. Zhang and S. Li. 2015b. Variations in maize dry matter, harvest index, and grain yield with plant density. *Agronomy Journal* 107: 829-834.
- Li, X., Z. Zhou, J. Ding, Y. Wu, B. Zhou, R. Wang, J. Ma, S. Wang, X. Zhang and Z. Xia. 2016. Combined linkage and association mapping reveals QTL and candidate genes for plant and ear height in maize. *Frontiers in plant science* 7: 833.
- Liu, G., P. Hou, R. Xie, B. Ming, K. Wang, W. Xu, W. Liu, Y. Yang and S. Li. 2017a. Canopy characteristics of high-yield maize with yield potential of 22.5 Mgha<sup>-1</sup>. *Field Crops Research* 213: 221-230.
- Liu, J., J. Huang, H. Guo, L. Lan, H. Wang, Y. Xu, X. Yang, W. Li, H. Tong and Y. Xiao. 2017b. The conserved and unique genetic architecture of kernel size and weight in maize and rice. *Plant physiology* 175: 774-785.
- Liu, T., L. Gu, S. Dong, J. Zhang, P. Liu and B. Zhao. 2015. Optimum leaf removal increases canopy apparent photosynthesis, <sup>13</sup>C-photosynthate distribution and grain yield of maize crops grown at high density. *Field Crops Research* 170: 32-39.
- Liu, T., F. Song, S. Liu and X. Zhu. 2011. Canopy structure, light interception, and photosynthetic characteristics under different narrow-wide planting patterns in maize at silking stage. *Spanish Journal of Agricultural Research* 9: 1249-1261.
- Liu, T., F. Song, S. Liu and X. Zhu. 2012. Light interception and radiation use efficiency response to narrow-wide row planting patterns in maize. *Australian Journal of Crop Science* 6: 506.
- Long, S. P., A. Marshall-Colon and X.-G. Zhu. 2015. Meeting the global food demand of the future by engineering crop photosynthesis and yield potential. *Cell* 161: 56-66.
- Long, S. P., X. G. ZHU, S. L. Naidu and D. R. Ort. 2006. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, Cell & Environment* 29: 315-330.
- Luque, S. F., A. G. Cirilo and M. E. Otegui. 2006. Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. *Field Crops Research* 95: 383-397.
- Lynch, J. P. 2013. Steep, cheap and deep: an ideotype to optimize water and N acquisition by maize root systems. *Annals of Botany* 112: 347-357.
- Maddonni, G. and M. Otegui. 2006. Intra-specific competition in maize: Contribution of extreme plant hierarchies to grain yield, grain yield components and kernel composition. *Field Crops Research* 97: 155-166.
- Martre, P., B. Quilot-Turion, D. Luquet, M.-M. O.-S. Memmah, K. Chenu and P. Debaeke. 2015. Model-assisted phenotyping and ideotype design. *Crop Physiology (Second Edition)*. Elsevier. pp. 349-373.
- Mock, J. and R. Pearce. 1975. An ideotype of maize. *Euphytica* 24: 613-623.
- Montemayor, T., José Alfredo, A. Zermeño González, J. Olague Ramirez, R. Aldaco Nuncio, M. Fortis Hernández, E. Salazar Sosa, J. C. Rodríguez Rios and C. Vázquez-Vázquez. 2006. Efecto de la densidad y estructura del dosel de maíz en la penetración de la radiación solar. *Phyton (Buenos Aires)* 75: 47-53.
- Muñoz-Jiménez, J. L. and J. L. Alcántara-Carbajal. 2017. La cotorra argentina (*Myiopsitta monachus*) en el Colegio de Postgraduados: ¿una especie invasiva? *Huitzil* 18: 38-52.

- Njoka, E., M. Muraya and M. Okumu. 2005. Plant density and thinning regime effect on maize (*Zea mays*) grain and fodder yield. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 44: 1215-1219.
- Novacek, M., S. Mason, T. Galusha and M. Yaseen. 2013. Twin rows minimally impact irrigated maize yield, morphology, and lodging. *Agronomy Journal* 105: 268-276.
- Ortas, L. 2008. Cultivo del maíz: fisiología y aspectos generales. "Published on the Internet:" <https://rdu-demo.unc.edu.ar/bitstream/handle/123456789/703/Agrigan%20bolet%C3%ADn%207.pdf?sequence=1>. 2008.
- Ospina, R. J. G. 2015. Manual Técnico del Cultivo de Maíz Bajo Buenas Prácticas Agrícolas Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural "Published on the Internet:" <http://conectarural.org/sitio/sites/default/files/documentos/MANUAL%20DEL%20CULTIVO%20DE%20%20MAIZ.pdf>. 2015.
- Paliwal, R. L. 2001. El maíz en los trópicos: Mejoramiento y producción. FAO "Published on the Internet:" <http://www.fao.org/docrep/003/x7650s/x7650s00.htm>. 2001.
- Parisi, L., L. Jamar, M. Lateur, F. Laurens and P.-E. Lauri. 2014. Adapting apple ideotypes to low-input fruit production agro-ecosystems. *Organic Farming, Prototype for Sustainable Agricultures*. Springer. pp. 131-148.
- Parry, M. A., M. Reynolds, M. E. Salvucci, C. Raines, P. J. Andralojc, X.-G. Zhu, G. D. Price, A. G. Condon and R. T. Furbank. 2010. Raising yield potential of wheat. II. Increasing photosynthetic capacity and efficiency. *Journal of experimental botany* 62: 453-467.
- Pendleton, J., G. Smith, S. Winter and T. Johnston. 1968. Field Investigations of the Relationships of Leaf Angle in Corn (*Zea mays* L.) to Grain Yield and Apparent Photosynthesis 1. *Agronomy Journal* 60: 422-424.
- Peng, S., G. S. Khush, P. Virk, Q. Tang and Y. Zou. 2008. Progress in ideotype breeding to increase rice yield potential. *Field Crops Research* 108: 32-38.
- Pepper, G., R. Pearce and J. Mock. 1977. Leaf orientation and yield of maize. *Crop Science* 17: 883-886.
- Perego, A., M. Sanna, A. Giussani, M. E. Chiodini, M. Fumagalli, S. R. Pilu, M. Bindi, M. Moriondo and M. Acutis. 2014. Designing a high-yielding maize ideotype for a changing climate in Lombardy plain (northern Italy). *Science of the Total Environment* 499: 497-509.
- Pierik, R. and M. De Wit. 2013. Shade avoidance: phytochrome signalling and other aboveground neighbour detection cues. *Journal of Experimental Botany* 65: 2815-2824.
- Richards, R. 2000. Selectable traits to increase crop photosynthesis and yield of grain crops. *Journal of experimental botany* 51: 447-458.
- Righini, R. and H. Grossi Gallegos. 2005. Análisis de la correlación entre la radiación fotosintéticamente activa y la radiación solar global en San Miguel, provincia de Buenos Aires. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 9: 11.01-11.04.
- Robles, M., I. A. Ciampitti and T. J. Vyn. 2012. Responses of maize hybrids to twin-row spatial arrangement at multiple plant densities. *Agronomy Journal* 104: 1747-1756.
- Rodríguez, F. I., A. González Huerta, D. d. J. Pérez López and M. Rubí Arriaga. 2015. Efecto de cinco densidades de población en ocho cultivares de maíz sembrados en tres localidades del Valle de Toluca, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6: 1943-1955.

- Rossini, M., G. Maddonni and M. Otegui. 2011. Inter-plant competition for resources in maize crops grown under contrasting nitrogen supply and density: Variability in plant and ear growth. *Field Crops Research* 121: 373-380.
- Rossini, M., G. Maddonni and M. Otegui. 2012. Inter-plant variability in maize crops grown under contrasting N $\times$  stand density combinations: Links between development, growth and kernel set. *Field Crops Research* 133: 90-100.
- Rossini, M., G. Maddonni and M. Otegui. 2016. Multiple abiotic stresses on maize grain yield determination: Additive vs multiplicative effects. *Field crops research* 198: 280-289.
- Rötter, R. P., F. Tao, J. G. Höhn and T. Palosuo. 2015. Use of crop simulation modelling to aid ideotype design of future cereal cultivars. *Journal of Experimental Botany* 66: 3463-3476.
- SAGARPA. 2017. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. Atlas agroalimentario. "Published on the Internet:" <https://www.gob.mx/siap/prensa/atlas-agroalimentario-2017>. 2017.
- Salazar, A. H. C. and G. M. M. Godínez. 2008. El Maíz y sus Usos Estratégicos *In: de-León C. and Montessoro R. R.s (eds.). El cultivo de maíz. Temas selectos. . Editorial Colegio de Postgraduados. México. pp. 35-47.*
- Sanchez, P. 1976. *Properties and Management of Soils in the Tropics*. New York. 618 pp.
- Sangoi, L. 2001. Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. *Ciência Rural* 31: 159-168.
- Sangoi, L. and R. J. Salvador. 1998. Maize susceptibility to drought at flowering: a new approach to overcome the problem. *Ciência Rural* 28: 699-706.
- Sarlangue, T., F. H. Andrade, P. A. Calviño and L. C. Purcell. 2007. Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agronomy Journal* 99: 984-991.
- Sarlikioti, V., P. H. De Visser, G. Buck-Sorlin and L. Marcelis. 2011. How plant architecture affects light absorption and photosynthesis in tomato: towards an ideotype for plant architecture using a functional–structural plant model. *Annals of Botany* 108: 1065-1073.
- Semenov, M. A. and P. Stratonovitch. 2015. Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Climate Research* 65: 123-139.
- Sharifi, R. S. and A. Namvar. 2016. Plant density and intra-row spacing effects on phenology, dry matter accumulation and leaf area index of maize in second cropping. *Biologija* 62: 46-57.
- Sharma, D., G. S. Sanghera, P. Sahu, P. Sahu, M. Parikh, B. Sharma, P. Chaudhari and B. K. Jena. 2013. Tailoring rice plants for sustainable yield through ideotype breeding and physiological interventions. *African Journal of Agricultural Research* 8: 5004-5019.
- Sher, A., A. Khan, L. Cai, M. Ahmad, U. Asharf and S. Jamoro. 2017. Response of maize grown under high plant density; performance, issues and management—a critical review. *Advances in Crop Science and Technology* 5: 1-8.
- Shi, D.-Y., Y.-H. Li, J.-w. Zhang, L. Peng, Z. Bin and S.-T. Dong. 2016. Increased plant density and reduced N rate lead to more grain yield and higher resource utilization in summer maize. *Journal of Integrative Agriculture* 15: 2515-2528.
- SIAP. 2018. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera "Published on the Internet:" <https://www.gob.mx/siap/>. 2018.
- Smith, C. W. 2004. *Corn: origin, history, technology, and production*. John Wiley & Sons.
- SNICS, S. N. d. I. y. C. d. S. 2014. Guía Técnica para la Descripción Varietal de Maíz (*Zea mays* L.). "Published on the Internet:" <http://snics.sagarpa.gob.mx/dov/Documents/GUIAS/Maiz.pdf>. 2014.

- Song, Y., Y. Rui, G. Bedane and J. Li. 2016. Morphological characteristics of maize canopy development as affected by increased plant density. *PloS One* 11: 1-10.
- Stewart, D., C. Costa, L. Dwyer, D. Smith, R. Hamilton and B. Ma. 2003. Canopy structure, light interception, and photosynthesis in maize. *Agronomy Journal* 95: 1465-1474.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 2010. *Plant physiology* 5th Ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates.
- Tanaka, A. and J. Yamaguchi. 2014. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz. 4 ed. Colegio de Postgraduados.
- Tartachnyk, I. and M. M. Blanke. 2002. Effect of mechanically-simulated hail on photosynthesis, dark respiration and transpiration of apple leaves. *Environmental and Experimental Botany* 48: 169-175.
- Testa, G., A. Reyneri and M. Blandino. 2016. Maize grain yield enhancement through high plant density cultivation with different inter-row and intra-row spacings. *European Journal of Agronomy* 72: 28-37.
- Tinca, E., I. Has and A. Copâdean. 2015. Prolificacy Study of Maize (*Zea mays* L.) Inbred Lines and Hybrids on ARDS-Turda. *Bulletin of the University of Agricultural Sciences & Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Agriculture* 72: 547-550.
- Tiwari, T. P., R. M. Brook, P. Wagstaff and F. L. Sinclair. 2012. Effects of light environment on maize in hillside agroforestry systems of Nepal. *Food Security* 4: 103-114.
- Tokatlidis, I., V. Has, V. Melidis, I. Has, I. Mylonas, G. Evgenidis, A. Copandean, E. Ninou and V. Fasoula. 2011. Maize hybrids less dependent on high plant densities improve resource-use efficiency in rainfed and irrigated conditions. *Field Crops Research* 120: 345-351.
- Tokatlidis, I., M. Koutsika-Sotiriou and E. Tamoutsidis. 2005. Benefits from using maize density-independent hybrids. *Maydica* 50: 9.
- Tokatlidis, I. S. 2013. Adapting maize crop to climate change. *Agronomy for Sustainable Development* 33: 63-79.
- Tokatlidis, I. S. 2017. Crop adaptation to density to optimise grain yield: breeding implications. *Euphytica* 213: 92.
- Tollenaar, M., A. Aguilera and S. P. Nissanka. 1997. Grain yield is reduced more by weed interference in an old than in a new maize hybrid. *Agronomy Journal* 89: 239-246.
- Truong, S. K., R. F. McCormick, W. L. Rooney and J. E. Mullet. 2015. Harnessing genetic variation in leaf angle to increase productivity of *Sorghum bicolor*. *Genetics* 201: 1229-1238.
- Turgut, I., A. Duman, U. Bilgili and E. Acikgoz. 2005. Alternate row spacing and plant density effects on forage and dry matter yield of corn hybrids (*Zea mays* L.). *Journal of Agronomy and Crop Science* 191: 146-151.
- Turrent, F., R. Leyva, A. Espinoza, R. Garza, R. Moreno and R. Aveldaño. 1992. Manual de diagnóstico recomendación para el cultivo de maíz en el Estado de México. Provincias agronómicas de riego, de muy buena y de buena productividad. Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Centro de Investigaciones Región Centro. Campo Experimental Valle de México. Chapingo, Estado de México.
- Winter, S. and A. Ohlrogge. 1973. Leaf Angle, Leaf Area, and Corn (*Zea mays* L.) Yield 1. *Agronomy Journal* 65: 395-397.
- WOC. 2018. World of Corn. "Published on the Internet:" <http://www.worldofcorn.com/#world-corn-production>. 2018.

- Xu, W., C. Liu, K. Wang, R. Xie, B. Ming, Y. Wang, G. Zhang, G. Liu, R. Zhao and P. Fan. 2017. Adjusting maize plant density to different climatic conditions across a large longitudinal distance in China. *Field Crops Research* 212: 126-134.
- Xue, J., L. Gou, Y. Zhao, M. Yao, H. Yao, J. Tian and W. Zhang. 2016. Effects of light intensity within the canopy on maize lodging. *Field Crops Research* 188: 133-141.
- Yan, P., J. Pan, W. Zhang, J. Shi, X. Chen and Z. Cui. 2017. A high plant density reduces the ability of maize to use soil nitrogen. *PloS One* 12: 1-12.
- Yi, X., H. Chen, C. Wang, L. Rong and C. Huang. 2016. Primary study on ideotype of hybrid rice in southeast Guangxi. *Journal of Southern Agriculture* 47: 196-200.
- Zaidi, P., M. Zaman-Allah, S. Trachsel, K. Seetharam, J. Cairns and M. Vinayan. 2016. Phenotyping for Abiotic Stress Tolerance in Maize: Heat Stress. A field manual.
- Zamir, M., A. Ahmad, H. Javeed and T. Latif. 2011. Growth and yield behaviour of two maize hybrids (*Zea mays* L.) towards different plant spacing. *Cercetări Agronomice în Moldova* 44: 33-40.
- Zelitch, I. 2012. Photosynthesis, photorespiration, and plant productivity. Elsevier.
- Zhang, Q., L. Zhang, J. Evers, W. van der Werf, W. Zhang and L. Duan. 2014. Maize yield and quality in response to plant density and application of a novel plant growth regulator. *Field Crops Research* 164: 82-89.
- Zhou, Z., C. Zhang, Y. Zhou, Z. Hao, Z. Wang, X. Zeng, H. Di, M. Li, D. Zhang and H. Yong. 2016. Genetic dissection of maize plant architecture with an ultra-high density bin map based on recombinant inbred lines. *BMC genomics* 17: 178.
- Zhu, X.-G., Q. Song and D. R. Ort. 2012. Elements of a dynamic systems model of canopy photosynthesis. *Current opinion in plant biology* 15: 237-244.
- Zsögön, A., T. Cermak, D. Voytas and L. E. P. Peres. 2017. Genome editing as a tool to achieve the crop ideotype and de novo domestication of wild relatives: case study in tomato. *Plant Science* 256: 120-130.



## ANEXO

**Anexo 1.** Sumas de cuadrados (SC) de las características de la mazorca. Entre paréntesis se anotan la proporción de las SC de cada factor con respecto a la SC de tratamientos.

Año	FV	GL	DMAZ	LMAZ	HIL	GHIL	DOL	PGR	PMAZ
<b>2016</b>	Densidad (D)	1	8 (0.2)	26 (3.3) *	0.2 (0.01)	0.2 (0.01) *	1 (0.04)	6203 (1.6) *	7502 (1.6) *
	Arquetipo (A)	14	4142 (93.1) **	676 (84.5) **	2855.1 (98.06) *	2855.1 (98.06) *	2134 (93.76) **	366168 (93.4) **	433675 (92.9) **
	D x A	14	298 (6.7) *	98 (12.3) *	56.2 (1.93)	56.2 (1.93) *	141 (6.20)	19754 (5.0) *	25702 (5.5) *
	Error	270	3035	738	1003	4262	1576	168284	213339
	C.V. (%)		8	11	12	14	10	22	21
<b>2017</b>	Densidad (D)	1	72 (1.8) *	2 (0.3)	12 (3.2)	238 (6.4) *	3 (0.2)	4617 (1.1) *	5163 (0.8) *
	Arquetipo (A)	7	3490 (87.4) **	672 (90.2) **	251 (63.8) **	3290 (88.7) **	1648 (97.2) **	388698 (92.8) **	595548 (93.7) **
	D x A	7	431 (10.8) *	71 (9.5) *	130 (33.1) *	183 (4.9)	45 (2.6)	25574 (6.1) *	34891 (5.5) *
	Error	139	2424	503	836	2399	900	124693	175681
	CV (%)		9	14	15	16	10	28	28

FV = fuentes de variación; GL = grados de libertad. DMAZ = diámetro de mazorca; LMAZ = longitud de mazorca; HIL = número de hileras por mazorca; GHIL = número de granos por hilera. DOL = diámetro de olote; PGR = peso de grano; PMAZ = peso de mazorca; \*\*: Significancia estadística con  $p \leq 0.01$ ; \* Significancia estadística con  $p \leq 0.05$ ;

**Anexo 2.** Comparación de medias de Tukey de arquetipos para las características de la mazorca.

<b>Año</b>	<b>Arquetipo</b>	<b>DMAZ</b>	<b>LMAZ</b>	<b>HIL</b>	<b>GHIL</b>	<b>DOL</b>	<b>PGR</b>	<b>PMAZ</b>
<b>2016</b>	L13	39.84 f,h	14.68 b,d	14.7 c,f	28.5 c,e	21.80 d,f	101.37 e,g	115.88 ef
	L14	43.02 c,f	12.80 ef	12.0 gh	26.7 de	24.32 b,d	97.77 e,g	115.71 ef
	L39	39.36 g,i	14.05 c,e	15.3 c,e	20.7 f	23.37 c,e	68.18 h	80.75 g
	L63	48.01 a	14.05 c,e	24.8 a	26.1 de	27.86 a	119.75 c,e	138.41 c,e
	L71	37.73 hi	14.73 bc	13.3 e,g	28.4 c,e	20.93 ef	83.61 gh	96.41 fg
	L95	41.00 e,h	12.91 d,f	16.0 bc	27.3 c,e	19.93 f	103.86 e,g	114.54 ef
	L104	42.65 d,g	13.98 c,f	16.4 bc	27.1 de	21.48 ef	116.71 c,e	134.31 c,e
	L126	44.08 b,e	14.78 bc	17.5 b	28.8 b,e	25.72 a,c	113.48 d,f	132.63 de
	L129	43.13 c,f	12.25 f	13.5 d,g	25.1 e	24.23 b,d	87.58 f,h	102.31 fg
	L145	46.50 a,c	16.00 ab	17.6 b	31.4 bc	26.23 ab	140.35 bc	162.94 bc
	L177	41.68 e,g	12.65 ef	15.4 cd	25.4 de	20.13 f	95.75 e,g	109.16 e,g
	L334	47.58 ab	14.88 bc	13.0 f,h	29.6 b,d	28.29 a	147.15 b	172.27 b
	VDulce	46.06 a,d	14.25 b,e	15.3 c,e	27.1 de	24.15 b,d	134.97 b,d	152.10 b,d
	HS2	48.91 a	17.58 a	16.0 bc	35.8 a	22.14 d,f	219.55 a	242.53 a
L(LE <sub>3</sub> x LE <sub>6</sub> ) <sub>Fn</sub>	36.18 i	17.18 a	11.2 h	32.9 ab	20.12 f	95.84 e,g	114.33 ef	
<b>2017</b>	L63	41.0 d	11.7 c	18.1 a	20.1 d	27.2 bc	54.2 e	68.1 e
	L71	38.4 d	12.9 c	14.1 c	21.9 d	22.7 de	66.3 e	79.0 e
	L95	39.4 d	12.3 c	15.2 c	23.2 cd	20.9 e	75.5 de	86.1 de
	L126	41.3 cd	12.0 c	16.0 a,c	21.1 d	24.7 cd	64.9 e	83.8 de
	L145	47.5 b	15.0 b	17.8 ab	27.2 bc	28.1 b	120.7 c	148.5 c
	VDulce	45.3 bc	12.8 c	15.6 bc	22.9 d	24.1 d	99.3 cd	114.2 cd
	HS2	47.5 b	16.1 b	16.1 ab	30.0 b	24.5 d	160.0 b	186.8 b
	PG133	53.1 a	18.0 a	15.3 c	34.3 a	31.9 a	206.8 a	257.1 a

DMAZ = Diámetro de mazorca; LMAZ = longitud de mazorca; HIL = Número de hileras por mazorca; GHIL = Número de granos por hilera. DOL = Diámetro de olate; PGR = Peso de grano; PMAZ = Peso de mazorca. Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05).

**Anexo 3.** Comparación de medias para las características de la mazorca.

<b>Año</b>	<b>Arquetipo</b>	<b>DMAZ</b>	<b>LMAZ</b>	<b>HIL</b>	<b>GHIL</b>	<b>DOL</b>	<b>PGR</b>	<b>PMAZ</b>
<b>2016</b>	DB	42.88 a	14.15 b	15.44 a	27.45 b	23.33 a	110.51 b	127.28 b
	DA	43.22 a	14.75 a	15.49 a	28.64 a	23.43 a	119.61 a	137.29 a
<b>2017</b>	DB	43.6 b	13.8 a	15.8 a	23.84 b	25.4 a	102.3 b	124.0 b
	DA	44.9 a	14.0 a	16.3 a	26.35 a	25.6 a	111.9 a	133.8 a

DMAZ = diámetro de mazorca; LMAZ = longitud de mazorca; HIL = número de hileras por mazorca; GHIL = número de granos por hilera. DOL = diámetro de olote; PGR = peso de grano; PMAZ = peso de mazorca; NUMGR = número de granos por mazorca. Medias con distintas letras indican diferencias significativas (Tukey, 0.05). Los valores presentados son el promedio de 15 arquetipos en 2016 y de nueve arquetipos en 2017.