

TRABAJO FINAL PARA OPTAR POR EL TITULO DE
**Especialista en Producción de Semillas de Cereales, Oleaginosas y
Forrajeras**



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**Efecto de la densidad de siembra sobre el número, peso y calibre
de semillas en líneas endocriadas de maíz**

NICOLÁS FASSIO

DIRECTOR: Ing. Agr. Dra. Brenda L. Gambin

CO-DIRECTOR: Ing. Agr. Ms.Sc. M. Florencia Genovese

2017

*Efecto de la densidad de siembra sobre el número, peso y calibre de semillas en líneas
endocriadas de maíz*

Nicolás Fassio

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Rosario

Este Trabajo Final es presentado como parte de los requisitos para optar al grado académico de Especialista en Producción de Semillas de Cereales, Oleaginosas y Forrajeras de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentado para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. El mismo contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Campo Experimental de la firma KWS Argentina SA situado en la localidad de Zavalla, Santa Fe, durante el período comprendido entre Septiembre del 2015 y Julio del 2016, bajo la dirección de la Ing. Agr. Dra. Brenda L. Gambin.

Ing. Agr. Nicolás Fassio

Ing. Agr, Dra. Brenda L. Gambin

Ing. Agr., Ms. Sc. M. Florencia Genovese

Defendida:de 2017

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo incondicional.

A mi directora Dr. Brenda Gambin por todo su apoyo y sus aportes durante este trabajo.

A el Ing. Agr. Alberto Vignolo y a la Ms. Sc. Florencia Genovese por incentivar me, ayudarme y guiarme en todo el camino de mi especialización.

A todos mis compañeros de KWS que me ayudaron con los trabajos de campo y planta de procesamiento.

A la Dr. Raquel Benavidez y el Dr. Carlos Gosparini por crear un ámbito amigable de aprendizaje y por su disposición.

Abreviaturas y Símbolos

DAP: Fosfato diamónico

N: Nitrógeno

nlme: linear and nonlinear mixed effects models

P: Fósforo

P1: Muestra número 1 (previo al calibrado)

P2: Muestra número 2 (porción de cada calibre)

PMS: Peso de mil semillas (previo al calibrado)

PMSp: Peso de mil semillas ponderado (luego del calibrado, sin el descarte)

Vol: Volumen

Resumen

La densidad de siembra es una de las prácticas a campo de manejo más importante a la hora de lograr un uso eficiente de los recursos en la producción de semillas de maíz. Existen numerosos trabajos que muestran el comportamiento de híbridos a la densidad; sin embargo, poco se conoce del efecto de la densidad de siembra sobre el rendimiento neto medido como número de bolsas de semillas por hectárea en líneas endocriadas y particularmente sobre el calibre. En el presente trabajo se estudió el impacto de la densidad sobre el número, peso de mil semillas (PMS) y calibre en cuatro líneas elite utilizadas como madres progenitoras de híbridos de maíz. Las líneas se sembraron a 7, 9, 11 y 13 pl m⁻² en la localidad de Zavalla, Santa Fe, en dos fechas de siembra y bajo las mismas condiciones que un lote de producción de semillas híbridas. El bulk desgranado se dividió en 4 tamaños y estos a su vez se subdividieron en chatos y redondos, dando como resultado 8 calibres comerciales y el descarte (superior + inferior). Las variables analizadas fueron rendimiento bruto (kg ha⁻¹), descarte, rendimiento neto (bolsas ha⁻¹), PMS y calibre.

Se encontraron diferencias entre líneas para todas las variables. Aumentos en la densidad de siembra provocaron un aumento del rendimiento bruto y neto, y una disminución del PMS y del calibre. Se detectó una fuerte asociación entre el PMS y el calibre, donde PMS de entre 250 y 300 g minimizaron el porcentaje de descarte y al mismo tiempo incrementaron la proporción de los calibres más buscados por los productores. La densidad que maximizó el rendimiento neto fue alta y similar en todas las líneas (*ca.* entre 11 y 13 pl m⁻²), pero el planteo que logró maximizar en conjunto rendimiento neto y calibre sólo coincidió en dos de las líneas evaluadas, particularmente aquellas que mostraron altos porcentajes de calibres de mayor tamaño. Para las líneas que muestran mayor proporción de calibres más pequeños, el aumento del rendimiento neto con la densidad implica obtener semillas de menor calidad. Los resultados del presente trabajo tienen implicancias en la producción de semillas. Se provee información sobre el PMS que logra maximizar la calidad en términos de calibre, y la importancia de la densidad para lograr optimizar la cantidad de bolsas por ha y su calidad. Esto, a su vez, dependerá de cada línea particular, demostrando que se debe adecuar el manejo a la genética.

Abstract

Stand density effect on seeds number, weight and size/shape in maize inbred lines

Maize stand density is an important management practice in order to achieve an efficient use of resources in seed production. While stand density effects on yield and yield components have been studied in hybrids, little is known about stand density effects on inbred lines, particularly on seed size and shape. The present study is focused on the impact of stand density on seed number, thousand kernel weight (TKW), seed size and shape in four inbred lines currently used as female parents in commercial seed production. Lines were sown at 7, 9, 11 y 13 pl m⁻² in Zavalla, Santa Fe. Trials were conducted at two sowing dates following commercial seed production management. After threshing, seeds were divided into 4 sizes and each of them classified in flat and round, resulting in 8 commercial seed sizes and the discard (including superior and inferior). Analyzed traits were grain yield (kg ha⁻¹), discard, net yield (bags ha⁻¹), TKW, seed size and shape.

Significant differences were found among inbreds for all traits. Increasing the stand density increased grain yield and net yield, and decreased TKW and seed size. A strong relationship between TKW and seed size was found, showing that TKW ranging between 250 and 300 g minimized the percentage of discard and maximized the proportion of the seed size desirable for farmers. The stand density that maximized the net yield was high and similar for all lines (*ca.* between 11 and 13 pl m⁻²). Although this, the stand density that maximize both net yield and a high proportion of desirable seed size was the same in only two of the evaluated lines, particularly those that showed high percentages of large sizes. For lines showing greater proportion of smaller sizes, increasing the net yield with stand density produced lower quality seeds. Present results have important implications for seed production. It provides information on the TKW that maximizes the seed quality in terms of size, and the importance of the stand density to optimize the amount of bags ha⁻¹ and its quality. This will depend on each line, demonstrating that stand density management should be adapted to particular genotypes.

Índice:

Agradecimientos.....	III
Abreviaturas y Símbolos	IV
Resumen	V
Abstract	VI
Índice:	VII
Lista de Figuras	VIII
Lista de Tablas.....	VIII
Introducción.....	9
Hipótesis.....	12
Objetivo	12
Materiales y Métodos	13
Sitio experimental.....	13
Diseño experimental.....	13
Manejo del cultivo	13
Mediciones y estimaciones.....	14
Análisis de datos.....	16
Resultados.....	17
Caracterización climática	17
Efecto de la línea y la densidad de siembra sobre el rendimiento, el descarte y el PMS	18
Efecto de la línea y la densidad de siembra sobre el calibre de la semilla	21
Densidad óptima que maximiza bolsas por ha y calidad	25
Discusión	28
Conclusiones.....	31
Bibliografía.....	32

Lista de Figuras

Fig. 1. Esquema de calibrado.	15
Fig 2. Interacción línea x densidad para el porcentaje de descarte.	19
Fig 3. Porcentaje de descarte en función del peso de mil semillas (PMS).	20
Fig 4. Rendimiento neto (bolsas ha^{-1}) en función del rendimiento bruto (a), el porcentaje de descarte (b) y el peso de mil semillas ponderado (b).	20
Fig 5. Porcentaje de calibre en función de la línea (a) y de la densidad de siembra (b).	23
Fig 6. Porcentaje de la forma en función de la línea (a) y de la densidad de siembra (b).	23
Fig 7. Porcentaje de cada calibre en función del peso de mil semillas (PMS).....	24
Fig 8. Proporción de cada tamaño de calibre y rendimiento neto en bolsas ha^{-1} en función de la densidad de siembra para línea 1 (a), 4 (b), 8 (c) y 10 (d)	26
Fig 9. Rendimiento neto en bolsas ha^{-1} y rendimiento de cada calibre en bolsas ha^{-1} en función de la densidad de siembra para la línea 1 (a), 4 (b), 8 (c) y 10 (d)	27

Lista de Tablas

Tabla 1. Registro de temperatura media del aire y precipitaciones acumuladas mensuales en la localidad de Zavalla.	17
Tabla 2. Efecto de la línea y la densidad de siembra sobre el rendimiento, el descarte y el peso de mil semillas ponderado (PMSP)	18
Tabla 3. Efecto de la línea y la densidad de siembra sobre el calibre de la semilla.	22

Introducción

El maíz es el cultivo de mayor producción del mundo (<https://www.ers.usda.gov>, acceso 2017). Durante la campaña 2015/16 la producción nacional de maíz fue de 29 millones de toneladas, lo que lo posiciona como el segundo cultivo a nivel nacional en cuanto a superficie y volumen. Para la campaña 2016/17 se evidencia un incremento en el área cultivada alcanzando las 4,6 millones de hectáreas (30% más en comparación con la campaña 2015/16), por lo que se espera un incremento en el volumen total de producción.

En Argentina, como en muchos otros países, se inicia el uso masivo de híbridos simples desde la década de 90. El maíz híbrido explota el fenómeno de “heterosis” o “vigor híbrido”, que se caracteriza por la superioridad genética de la descendencia respecto del promedio de los padres para las características consideradas (Cubero, 2003). La obtención de híbridos simples comprende dos fases. La primera consiste en la creación de líneas puras o endocriadas para las características de interés a través de sucesivas autofecundaciones. La segunda consiste en el cruzamiento de esas líneas para comprobar su aptitud combinatoria, la cual determinará las mejores combinaciones para crear los híbridos. Una vez determinada la mejor cruce, se procede a la producción de semilla. Para ello, una de estas líneas es utilizada como hembra y otra como macho. Por regla general, la línea usada como macho tiene como característica principal la mayor producción de polen en volumen y tiempo, mientras que la línea usada como hembra tiene como objetivo principal la mayor productividad de semilla. Además, en el parental femenino es deseable un buen comportamiento para vuelco, uniformidad de emergencia de estigmas, buena excerción de la panoja, protandria marcada y buen comportamiento frente al despanojado (Beck, 2002).

El tamaño y la forma de la semilla son determinados por características genéticas de la línea hembra, del ambiente durante el desarrollo de los individuos y el llenado de granos, tales como temperatura, disponibilidad de agua y fertilidad del suelo (Egli, 1998). La ubicación de la semilla en la espiga también determina su tamaño y forma. Su desarrollo secuencial desde la base a la punta afecta la capacidad de competir por fotosintatos disponibles y por espacio, a la vez que genera un rango de madurez de la semilla. El resultado es la obtención de semillas de distintos tamaños y formas; grandes y redondas en la base de la espiga, chatas en el centro, y pequeñas y redondas en la punta (Wych *et al.*, 1988). Esto, sumado a que en Argentina se encuentra generalizado el uso de sembradoras a placa, hace indispensable el proceso de

calibrado de semilla, el cual consiste en dividir el bulk desgranado por su tamaño, medido en ancho y alto y, en algunos casos, por longitud.

Como la unidad de venta es un número fijo de semillas (80.000 semillas/bolsa), los calibres de mayor tamaño tienen la desventaja de formar bolsas de alto peso, lo que eleva los costos de procesamiento, almacenamiento y logística. Por otro lado, la semilla de menor tamaño no es la más buscada por los productores, debido a la asociación de este tipo de semilla con un menor vigor, motivo por el cual pueden tener descuentos de hasta un 20% (Alberto Vignolo, KWS Argentina SA, comunicación personal 2017). Las evidencias a nivel nacional indican que el calibre más buscado por los productores es de tamaño intermedio (calibre 2 en base a los estándares utilizados), preferentemente redondos. A pesar de ello, no hay evidencias de que el menor tamaño de la semilla afecte negativamente el vigor. Nafziger (1992) realizó ensayos con semillas de diferentes calibres y no obtuvo diferencias significativas en el rendimiento final de grano. Graven y Carter (1990) evaluaron el efecto del calibre de semilla en condiciones de labranza convencional y de labranza cero, presentándose menor emergencia, crecimiento inicial y rendimiento final de grano en el sistema de labranza cero. No obstante, las semillas con distintas formas y tamaños respondieron igual dentro de cada sistema.

En la producción de maíz commodity los componentes principales del rendimiento son el número de granos por unidad de superficie y el peso promedio individual. El rendimiento de un cultivo puede entonces explicarse como el producto de ambos (Cárcova *et al.*, 2004). El número de granos por unidad de superficie es el componente de rendimiento que más varía con cambios en el ambiente o manejo (Claassen y Shaw, 1970; Hall *et al.*, 1981; Fischer y Palmer, 1984). Dentro de las prácticas de manejo, la elección de la densidad de siembra es fundamental para maximizar el número de granos en un ambiente particular. Esto es muy importante particularmente en maíz dada su baja capacidad de compensación. Lo mismo es evidente en producción de semilla híbrida, donde el rendimiento se expresa en bolsas hectárea⁻¹, es decir, el número de semillas producidas por unidad de superficie.

La respuesta del rendimiento del maíz a la densidad presenta un comportamiento de tipo óptimo (Karlen y Camp, 1985; Tollenaar, 1992). El rendimiento por planta disminuye con el incremento en la densidad, aunque el rendimiento del cultivo aumenta hasta un máximo (densidad óptima) a partir del cual aumentos posteriores en la densidad de plantas producen reducciones en el rendimiento por planta más que proporcionales al aumento en el número de

plantas. El mismo comportamiento se observa para número de granos por planta. Si bien un aumento en la densidad disminuiría el número de granos por planta debido a un aumento de la competencia, la reducción sería compensada y superada por el aporte de nuevas espigas, determinando una mayor cantidad de granos por unidad de superficie (Echarte *et al.*, 2000). Este aumento en el número de granos por unidad de superficie ante incrementos en la densidad de plantas no es lineal y existe un punto de inflexión a partir del cual el número de granos por unidad de superficie cae por esterilidad de espigas. Esto puede diferir para los distintos genotipos (Russell, 1968; Hernández *et al.*, 2014), y es por ello que la densidad óptima es una práctica de manejo que debería definirse dependiendo del ambiente y el genotipo.

Además del rendimiento, existen otras características de la producción de semillas que se modifican al variar la densidad. Aumentos de la densidad son beneficiosos ya que disminuyen la probabilidad de generación de macollos, los cuales difieren en floración respecto al vástago principal alargando el periodo de despanojado, como así su complejidad ya que son de menor tamaño. Una desventaja del aumento de la densidad es la generación de individuos de menor biomasa y menor anclaje, eventualmente aumentando las probabilidades de vuelco. De darse vuelco, esto dificulta las tareas de despanojado y cosecha ya que pueden confundirse los surcos hembras con los surcos machos (Smith y Beltrán, 2004).

La producción de semilla híbrida de maíz presenta costos elevados por varias razones. Entre ellas, se puede mencionar el hecho que se realiza en lotes alquilados con riego artificial, se requiere una gran cantidad de mano de obra para llevar a cabo el despanojado y purificación (roguing) de la línea hembra, y donde el potencial de rendimiento de las líneas endocriadas es bajo y no se cosecha el total de la superficie sembrada. Todos estos aspectos determinan la importancia de un manejo eficiente de los recursos en producción de semillas.

Las líneas endocriadas, al igual que los híbridos, son diferentes genéticamente entre ellas por lo que cada una produce un número de granos particular, con un peso y calibre determinados. Conocer cómo la densidad de siembra modifica el número de semillas, así como su peso y calibre para diferentes líneas utilizadas como hembra es importante a la hora de definir la densidad de siembra óptima. Como fuera indicado previamente, esta información es clave hacia un uso más eficiente de los recursos.

Hipótesis

La densidad de siembra que maximiza la cantidad de semilla producida por unidad de superficie con características óptimas de peso y calibre difiere entre líneas endocriadas de maíz.

Objetivo

Estudiar el impacto de la densidad de siembra sobre el número, peso y calibre de semillas en cuatro líneas utilizadas como madres progenitoras de híbridos de maíz.

Materiales y Métodos

Sitio experimental

El experimento se llevó a cabo durante la campaña 2015/16 en el Campo Experimental de la empresa KWS Argentina SA, situado en la localidad de Zavalla (33° 2'2,44"S - 60°52'32,64"O), provincia de Santa Fe. El suelo corresponde a un Argiudol Típico/Vértico, de textura franco limosa complejo 70% Serie Roldán y 30% serie Gelly (INTA, 1983).

Diseño experimental

Se utilizó un diseño de bloques completos aleatorizados (DBCA) con tres repeticiones. Las unidades experimentales (parcelas) constaron de cuatro sucos por 5 metros de largo cada uno. Los experimentos se realizaron en dos fechas de siembra (septiembre y octubre) a fin de explorar dos ambientes de crecimiento.

En cada experimento, los tratamientos consistieron en cuatro líneas endocriadas (línea 1, 4, 8 y 10) con distintas características de interés para la empresa, y cuatro densidades de siembra: 7, 9, 11 y 13 pl m⁻². Los tratamientos (16) resultaron de la combinación factorial de línea x densidad.

Las líneas difieren en largo del ciclo, siendo las líneas 4 y 10 de ciclo más largo que las líneas 1 y 8. La línea 10 a la vez pertenece a un grupo heterótico distinto que las líneas 1, 4 y 8.

Manejo del cultivo

Para la preparación de la cama de siembra se realizó una labranza reducida con rastra de discos y rastra de dientes sobre un rastreo de soja. El primer experimento se sembró el 11 de septiembre de 2015, considerada como fecha óptima para la zona (Cirilo y Andrade, 1994), mientras que el segundo experimento se sembró el 15 de octubre de 2015. Los surcos se marcaron con una sembradora a 0,52 m y luego se sobre-sembró manualmente con bastón sembrador empleándose 2 semillas por golpe. Para lograr las densidades propuestas, se utilizaron cintas guías con marcas a distintas distancias según la densidad buscada, indicando el punto exacto donde colocar la semilla. En el estado fenológico V2 (Ritchie y Hanway, 1982) se ralearon los dobles golpes, garantizando la densidad.

El ensayo se condujo de acuerdo con la forma habitual de manejo de un lote de producción comercial de semillas, con el fin de extrapolar sus resultados a la producción en

gran escala. En el momento de la siembra se fertilizó con 52 kg ha⁻¹ de P y 11 kg ha⁻¹ de N en forma de DAP en el surco y en V6 con 100 kg ha⁻¹ de N en forma de urea al voleo. Se realizó el monitoreo de enfermedades, plagas y malezas y su control cuando fue necesario.

En el estado VT (Ritchie y Hanway, 1982) se extrajeron las panojas (“despanojado”) de todas las plantas de los dos surcos centrales, simulando una práctica esencial para la producción de semillas. Con el fin de homogenizar esta tarea se cortó el tallo de manera que todas las plantas tuvieran la misma cantidad de hojas (dos hojas) por encima de la inflorescencia femenina. No se despanojaron los dos surcos externos de cada parcela, con el objetivo de utilizarlos como polinizadores, asegurándose provisión de polen tanto en cantidad como en el momento requerido.

Los experimentos se cosecharon con aproximadamente 30% de humedad en grano, comprobando que se hubiera alcanzado la madurez fisiológica, definida como 75% de línea de leche (Hunter *et al.*, 1991). Se cosecharon tres metros de los dos surcos centrales, evitando los extremos de las parcelas, y se tomó registro del número de plantas totales y de espigas primarias y secundarias cosechadas, las cuales se embolsaron por separado. Se utilizaron bolsas de red que permitieron un activo intercambio de aire entre el interior y exterior de las mismas. El material embolsado se colocó en una secadora experimental, donde se redujo el contenido de humedad desde el valor de cosecha hasta un 13% en promedio. La muestra de cada parcela se desgranó por separado con una desgranadora estática experimental.

Mediciones y estimaciones

Sobre cada muestra se efectuaron las siguientes determinaciones:

- Rendimiento bruto (kg ha⁻¹): una vez desgranadas las espigas se tomó el peso de cada muestra. Como no todas las espigas se secaron de igual manera, se tomó el valor de humedad de cada muestra secada y desgranada y se ajustó el peso de todas a un valor de 14,5%. El rendimiento fue expresado en kg ha⁻¹ teniendo en cuenta la superficie cosechada (3,12 m²).
- Peso de mil semillas (PMS): se calculó a partir del peso de dos muestras de 100 semillas y ajustándose a una humedad de 14,5%. El PMS fue expresado en gramos (g).
- Calibre: para el calibrado se utilizaron zarandas de prueba imitando el proceso a gran escala. Se partió de 1 kg de muestra (P1). En primer lugar, se separó a la semilla por tamaño con zarandas de orificios circulares, yendo de mayor tamaño a menor. Los tamaños utilizados fueron 24/64, 22/64, 20/64, 18/64 y 16/64, en ese orden. Las semillas retenidas por la primera zaranda y las que atravesaron la última zaranda constituyeron los descartes superior e inferior,

respectivamente. Las semillas que fueron retenidas por la zaranda 22/64 se denominan calibre 1, las de la zaranda 20/64, calibre 2, las correspondientes a 18/64, calibre 3 y por último para 16/64, calibre 4. A cada porción se la sometió a un segundo zarandeo con las denominadas “zarandas de tajo”, que poseen orificios oblongos, zaranda 3/4 x 13.5/64 para los calibres 1 y 2 y la zaranda 3/4 x 13/64 para los calibres 3 y 4, respectivamente. De esta manera se obtuvieron sobre la zaranda las semillas redondas y por debajo, las semillas de tipo chato.

Resultaron así 8 calibres para cada muestra (Fig.1). Se obtuvo el peso de cada uno de los diez estratos mencionados (P2), y por la relación P2/P1 se obtuvo el porcentaje de cada calibre.

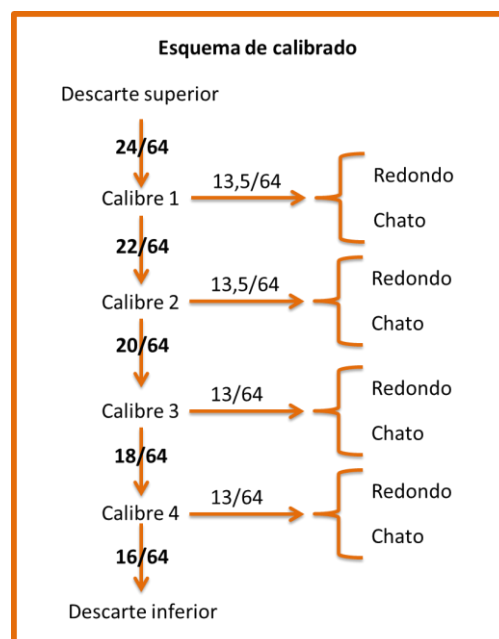


Fig. 1. Esquema de calibrado.

- Peso de mil semillas ponderado (PMSP): se calculó como el promedio ponderado del PMS de cada calibre y su porcentaje del total de la muestra. Para ello se homogeneizó la muestra de cada calibre, se las dividió en tres sub-muestras de 50 semillas y se las pesó por separado.
- Rendimiento neto (bolsas ha⁻¹): obtenido después de descontar el descarte al rendimiento bruto. A este valor se lo dividió por el PMS para obtener el número de semillas por hectárea. Por último, se calculó la cantidad de bolsas ha⁻¹ considerando que cada bolsa contiene 80000 semillas.

Análisis de datos

Los datos fueron analizados en conjunto ajustando modelos lineales mixtos (paquete nlme; Pinheiro *et al.*, 2016) en R (R Core Team 2016, version 3.3.0). Para las diferentes variables analizadas (rendimiento bruto, descarte, rendimiento neto, PMS y calibres), el modelo consideró a la línea, densidad y su interacción (línea x densidad) como efectos fijos, mientras que la fecha y el bloque anidado dentro de fecha fueron considerados como efectos aleatorios. Los modelos fueron ajustados usando el método de máxima verosimilitud restringida (Zuur *et al.*, 2009).

Se chequearon los supuestos de normalidad mediante el test de Shapiro-Wilk y homogeneidad para los residuales estandarizados con análisis gráficos (Zuur *et al.*, 2009). Se detectó heterogeneidad de varianza a nivel de línea, densidad e interacción dependiendo de la variable, por lo que, cuando fue necesario, los modelos consideraron una estructura para modelar estas varianzas usando VarIdent (Zuur *et al.*, 2009). Los modelos con y sin varianza fueron comparados usando el test de cociente de verosimilitud. Las comparaciones múltiples entre medias se realizaron usando la función predictmeans en R (Luo *et al.*, 2014).

Resultados

Caracterización climática

Durante la campaña 2015/16 se registraron temperaturas medias inferiores para los meses de octubre y marzo, mientras que en los meses de diciembre, enero y febrero las temperaturas medias fueron entre 1 y 2°C superiores a la media histórica (1973/2014), los meses de septiembre y noviembre no difirieron de los valores históricos (Tabla 1).

Tabla 1. Registro de temperatura media del aire y precipitaciones acumuladas mensuales en la localidad de Zavalla.

		Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Campaña	Temp. Med. (°C)	14	16	20	25	25	24	20
2015-2016	Precipitaciones (mm)	13	113	119	77	108	279	65
Valores	Temp. Med. (°C)	14	17	20	23	24	23	21
históricos	Precipitaciones (mm)	47	105	104	119	116	118	116

Si bien los valores de precipitaciones para el mes de septiembre fueron inferiores a los históricos, en agosto fue ampliamente superior al promedio histórico, por lo que se sembró con un perfil totalmente recargado. En los meses de diciembre, enero y marzo las precipitaciones fueron levemente inferiores a las históricos, mientras que para los meses restantes fueron superiores (Tabla 1). Sólo se registró una precipitación de más de 70 mm en febrero y en los demás meses se observaron precipitaciones de menor magnitud y distribuidas en el tiempo.

Las precipitaciones acumuladas fueron de 448 mm para la primer fecha de siembra y de 676 mm para la segunda. Dado el perfil de lluvias los experimentos no requirieron riego.

Efecto de la línea y la densidad de siembra sobre el rendimiento, el descarte y el PMS

El rendimiento bruto en kg ha⁻¹ difirió significativamente entre líneas ($p < 0,01$) y entre densidades ($p < 0,001$; Tabla 2), mientras que no hubo interacción línea x densidad. La producción de la línea 4 fue un 11% mayor que la línea 10. La densidad de 7 pl m⁻² rindió hasta un 24% menos que las demás densidades, mientras que no hubo diferencias en rendimiento bruto entre 9, 11 y 13 pl m⁻².

Tabla 2. Efecto de la línea y la densidad de siembra sobre el rendimiento bruto, descarte, rendimiento neto y el peso de mil semillas ponderado (PMSp).

Tratamiento	Rendimiento bruto (kg ha ⁻¹)	Descarte (%)	Rendimiento neto (bolsas ha ⁻¹)	PMSp (g)
1	5419	5,6	273	233
4	5983	6,2	285	247
8	5623	3,0	264	257
10	5339	4,6	201	314
7	4618	4,8	198	277
9	5791	4,4	264	264
11	6093	4,6	281	260
13	5862	5,7	279	251
Línea	** (569) †	*** (0,9)	*** (28)	*** (7)
Densidad	*** (562)	* (1)	*** (28)	*** (7)
Línea x Densidad	ns	*** (1,9)	ns	ns

† *, **, *** significativo al $p < 0,05$, $0,01$ y $0,001$. ns= no significativo a un nivel de probabilidad de 0.05. El valor entre paréntesis representa la mínima diferencia significativa (LSD) al 0.05.

El porcentaje de descarte presentó diferencias significativas entre líneas ($p < 0,001$; Tabla 2) y densidades ($p < 0,01$), aunque hubo interacción línea x densidad ($p < 0,001$; Tabla 2). La línea 10 obtuvo el mayor porcentaje de descarte cuando se expuso a la menor densidad de siembra (7 pl m⁻²) y se redujo con el aumento de la densidad (Fig. 2). Las líneas 1 y 4 presentaron los máximos valores de descarte a la mayor densidad evaluada, que se redujeron con la reducción de la densidad (Fig. 2). Esta reducción fue más evidente para la línea 4. La línea 8, por el contrario, no mostró cambios en el porcentaje de descarte al cambiar la densidad (Fig. 2).

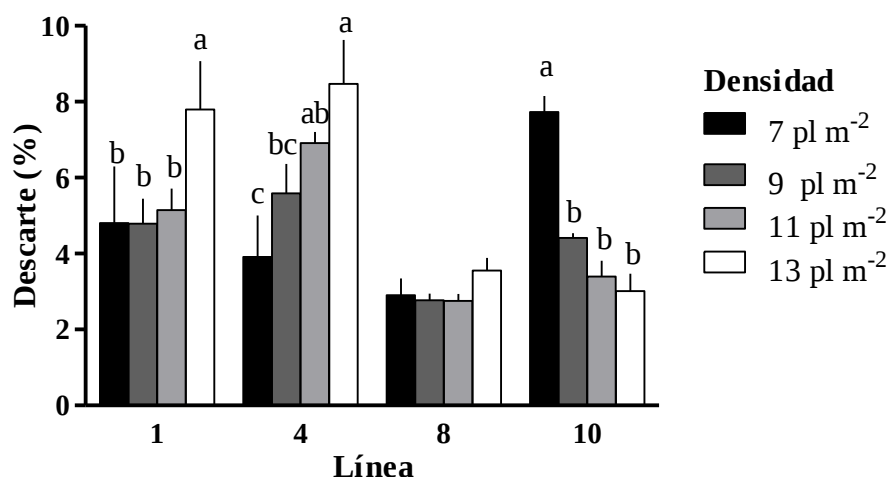


Fig 2. Interacción línea x densidad para el porcentaje de descarte.

El rendimiento neto (*i.e.* rendimiento después de descontar el descarte) en bolsas ha⁻¹ difirió significativamente entre líneas ($p < 0,001$) y entre densidades ($p < 0,001$; Tabla 2). Las líneas 1, 4 y 8 obtuvieron un rendimiento significativamente mayor (24-29%) que la línea 10. El planteo de 7 pl m⁻² rindió entre un 25 y 30% menos que las demás densidades. No se encontró significancia para la interacción evaluada ($p > 0,05$; Tabla 2).

El PMSp varió significativamente entre líneas ($p < 0,001$; Tabla 2) y entre densidades ($p < 0,001$; Tabla 2). La línea 1 obtuvo el PMSp más bajo seguida de la línea 4 y luego 8. La línea 10 mostró el mayor PMSp. El PMSp se redujo al aumentar la densidad. La densidad de 7 pl m⁻² mostró el mayor PMS, mientras que el planteo de 13 pl m² evidenció el menor PMSp. No se encontraron diferencias entre las densidades de 9 y 11 pl m⁻². No se detectó interacción línea x densidad ($p > 0,05$).

El porcentaje de descarte mostró asociación con el PMS (Fig. 3). El porcentaje de descarte aumentó en forma exponencial con PMS menores a 250 g (descarte inferior), mientras que lo mismo ocurrió con pesos mayores a 300 g (descarte superior). Semillas entre 250 y 300 g minimizaron el descarte (Fig. 3). Las líneas 1 y 4 se caracterizaron por tener un PMS bajo y por lo tanto una mayor cantidad de descarte inferior, aunque la línea 4 siempre mostro una mayor cantidad de descarte a iguales PMS que la línea 1 (Fig. 3). La línea 8 mostró un PMS más estable y cercano a los 250 g, por lo que el descarte fue bajo. La línea 10 mostró un PMS alto y valores elevados de descarte superior.

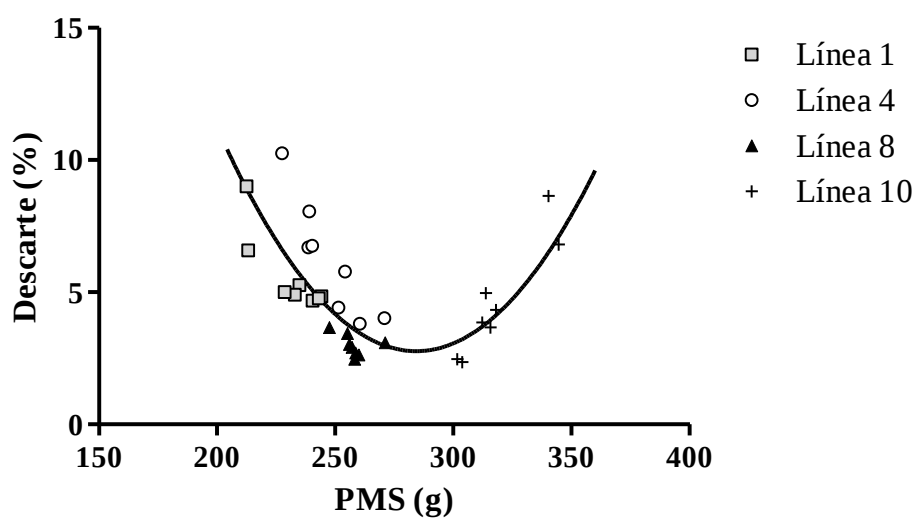


Fig 3. Porcentaje de descarte en función del peso de mil semillas (PMS).

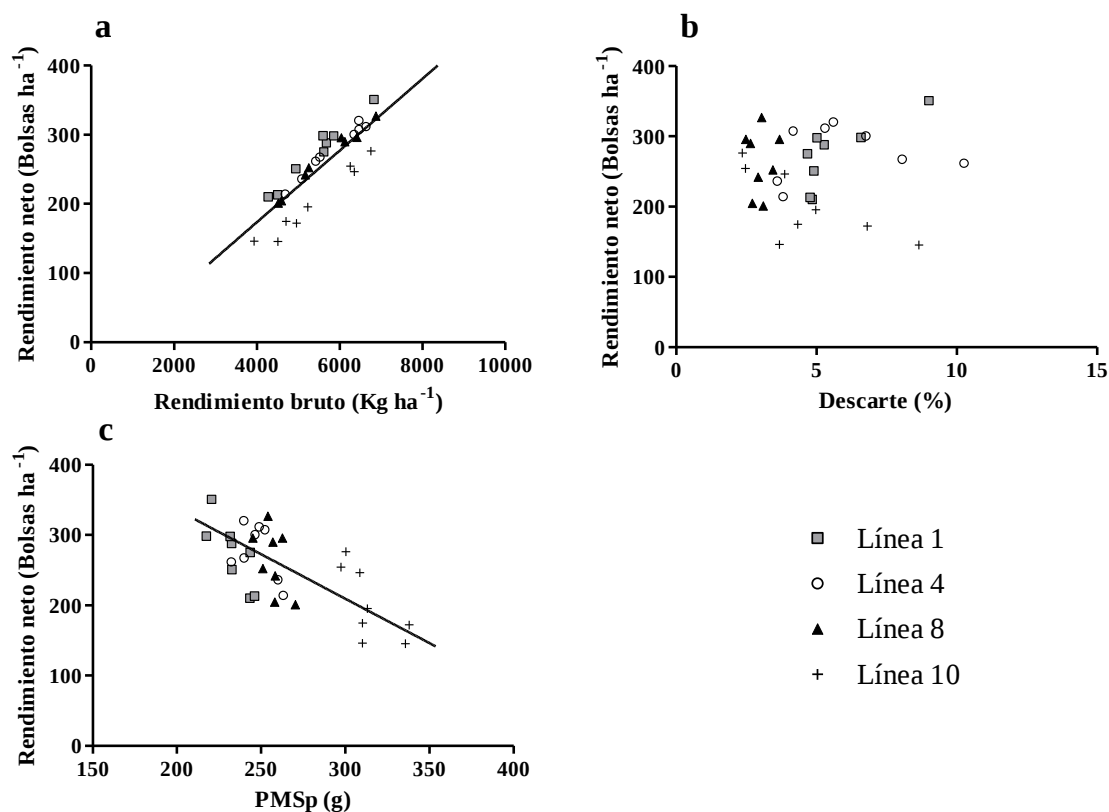


Fig 4. Rendimiento neto (bolsas ha⁻¹) en función del rendimiento bruto (a), el porcentaje de descarte (b) y el peso de mil semillas ponderado (b).

Al graficar el conjunto de datos, se puede observar que un mayor número de bolsas por ha se logra maximizando el rendimiento bruto o minimizando el PMS (Fig. 4). El porcentaje de descarte no mostró relación con el número de bolsas por ha (Fig. 4).

Efecto de la línea y la densidad de siembra sobre el calibre de la semilla

Para el calibre 1, tanto en la forma chata como redonda, se encontraron diferencias significativas entre líneas ($p < 0,001$; Tabla 3). En la sección de chatos, la línea 10 produjo hasta 20 veces más de este calibre que las líneas 1 y 4, mientras que la línea 8 también se diferenció pero sólo produciendo hasta 4 veces más. En la sección de redondos, sólo se diferenció la línea 10, produciendo hasta 22 veces más que el resto de las líneas. Para este calibre en ambas formas también hubo efecto densidad ($p < 0,05$; Tabla 3). Las densidades de 7 y 9 pl m⁻² produjeron más proporción de chatos que las densidades más elevadas. En cambio, sólo la densidad de 7 pl m⁻² se diferenció produciendo una mayor proporción de redondos. En ambos casos no se encontró interacción significativa línea x densidad ($p > 0,05$; Tabla 3).

La proporción de calibre 2, tanto chato como redondo, varió entre líneas ($p < 0,001$; Tabla 3), mientras que no hubo efecto densidad ($p > 0,05$). La línea 8 fue la de mayor producción de este calibre chato, seguida por la línea 10, 4 y la 1. En cuanto a la forma redonda, sólo se diferenció la línea 10 produciendo hasta un 250% más que el resto de las líneas. No se encontraron diferencias significativas para la interacción línea x densidad ($p > 0,05$).

La proporción de calibre 3 presentó interacción línea x densidad para la forma redonda ($p < 0,001$; Tabla 3). Las líneas 4 y 8 no difirieron en la producción de redondo 3 al modificar la densidad. La línea 1 disminuyó la proporción de este calibre al aumentar la cantidad de plantas por superficie diferenciándose el planteo de 13 pl m⁻² de los de 7 y 9 pl m⁻². Por otro lado, la línea 10 aumentó el porcentaje de este calibre al sembrar 9 o más pl m⁻². En cuanto a la proporción de este calibre en su forma chata se encontraron diferencias significativas entre línea y densidades ($p < 0,001$). La línea 10 produjo hasta 9 veces menos semillas chatas que el resto de las líneas. La proporción de este calibre se maximizó con 11 pl m⁻². No se encontró interacción para este calibre en su forma chata ($p > 0,05$).

Tabla 3. Efecto de la línea y la densidad de siembra sobre el calibre de la semilla.

	Calibre (%)							
	Chatos				Redondos			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1	0,7	9,2	28,5	19,3	0,7	8,2	18,5	9,0
4	1,1	12,5	27,3	17,7	1,3	9,1	16,1	8,6
8	2,4	22,8	30,1	9,8	1,3	8,8	14,8	6,3
10	13,5	19,2	3,9	0,5	17,0	29,4	10,7	1,1
7	5,4	15,6	20,7	8,6	7,4	16,2	15,3	5,2
9	4,9	16,9	23,0	11,8	4,3	13,6	14,7	6,3
11	3,8	16,6	23,8	12,3	4,1	12,6	15,4	6,6
13	3,5	14,7	22,2	14,6	4,4	13,1	14,7	7,0
Línea	*** (0,9) †	*** (2,7)	*** (2,8)	*** (2,8)	*** (1,8)	*** (2,7)	*** (2)	*** (0,8)
Densidad	* (1,1)	ns	*** (2,8)	*** (2,8)	*** (2,1)	ns	ns	*** (0,8)
Línea x Densidad	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*** (3,8)	ns

† *, **, *** significativo al $p < 0,05$, $0,01$ y $0,001$. ns= no significativo a un nivel de probabilidad de 0.05 . El valor entre paréntesis representa la mínima diferencia significativa (LSD) al 0.05 .

Dentro del calibre 4 se detectaron diferencias significativas entre líneas ($p<0,001$) y densidades ($p<0,001$; Tabla 3) para ambas formas de semilla con el mismo patrón de producción. Las líneas 1 y 4 mostraron las mayores proporciones tanto de chato como redondo, mientras que la línea 10 fue la de menor producción en ambos casos, siendo la diferencia entre estos grupos mayor en la forma aplanada. El genotipo 8 se diferenció de los dos grupos anteriores, produciendo la mitad del porcentaje de las líneas 1 y 4 para semilla chata y un 25% menos de semilla redonda. La producción de semilla chata aumentó al incrementar la densidad, diferenciándose el planteo de 7 pl m⁻² del resto, al mismo tiempo se diferenciaron la densidad de 9 y 13 pl m⁻². En cuanto a la producción de semilla redonda, sólo se diferenciaron la menor y la mayor densidad estudiada, encontrándose una mayor proporción de este calibre a 13 pl m⁻². No se encontró interacción línea x densidad ($p>0,05$; Tabla 3).

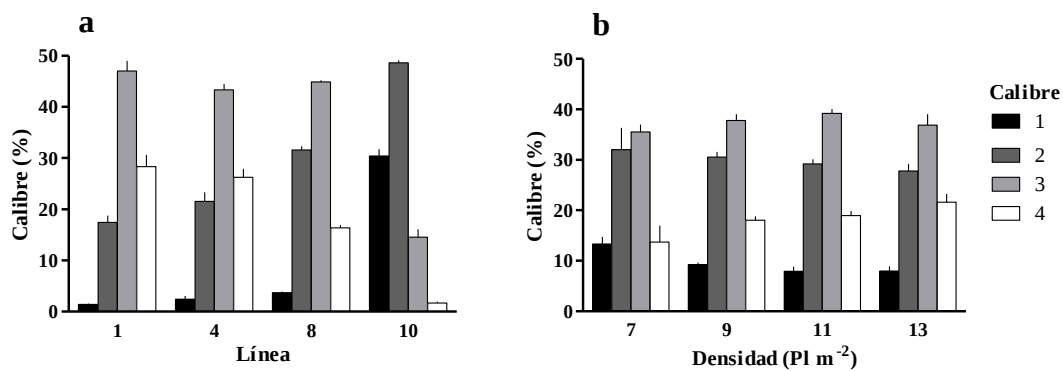


Fig 5. Porcentaje de calibre en función de la línea (a) y de la densidad de siembra (b).

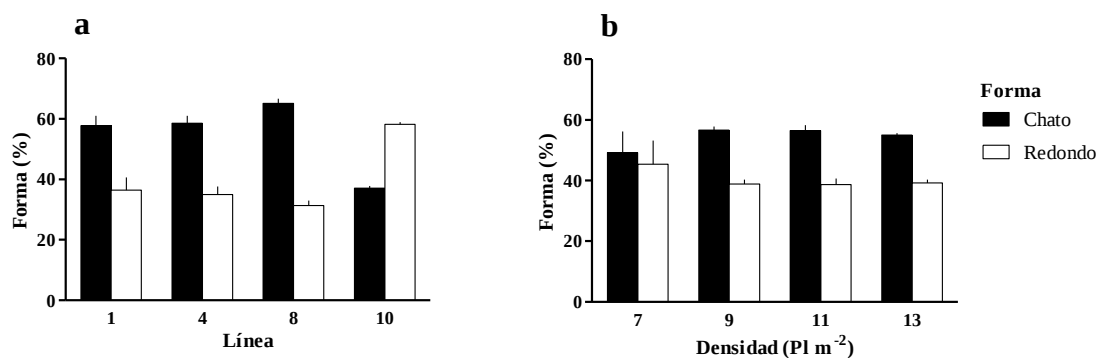


Fig 6. Porcentaje de la forma en función de la línea (a) y de la densidad de siembra (b).

En resumen, las distintas líneas se diferenciaron en la composición del calibre que produjeron. Las líneas 1, 4 y 8 se concentraron en el calibre 3, y se diferenciaron en el segundo calibre en importancia, el cual fue el tamaño 4 para la línea 1 y 4 y el 2 para la línea 8. La línea 10 fue la más contrastante, ya que se concentró en el calibre 2 con un gran aporte del 1 (Fig. 5a). Esta línea además se diferenció en la forma, siendo la única que mostró en su mayoría semilla redonda, mientras que en las demás líneas predominó la semilla de forma chata (Fig. 6a). En cuanto a las densidades, aumentos de densidad provocaron un descenso de la proporción de calibres 1 y 2, mientras que al mismo tiempo se incrementó el calibre 4 (Fig. 5b). Respecto a la forma de la semilla, existió un aumento de semilla chata al aumentar la densidad de 7 a 9 pl m⁻², manteniéndose constante al continuar incrementando la densidad (Fig. 6b).

La Fig. 7 muestra como varía las proporciones de los 4 tamaños de semilla estudiados en función del PMS. Los pesos más bajos (<250 g) corresponden a un alto porcentaje de calibres pequeños (3 y 4). Al incrementarse el PMS disminuye la proporción de semilla de menor tamaño, siendo esta disminución más evidente para el calibre 4 y aumentan las proporciones de calibre 2 y 1. Entre 250 y 300 g se puede observar que se minimizan conjuntamente los calibres extremos (1 y 4) y se logran altos porcentajes de calibres intermedios (2 y 3). Todas las curvas graficadas tienen valores superiores de r^2 a 0.8, demostrando la fuerte relación entre el PMS y el calibre.

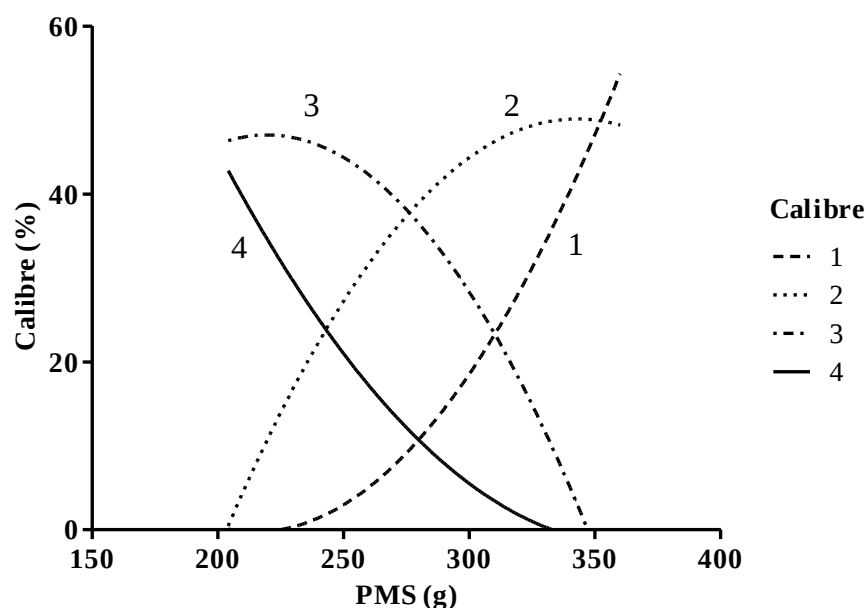


Fig 7. Porcentaje de cada calibre en función del peso de mil semillas (PMS).

Densidad óptima que maximiza bolsas por ha y calidad

A fin de determinar el impacto de la densidad sobre el rendimiento neto y la calidad del calibre, la Fig. 8 muestra en conjunto y para cada línea la respuesta del rendimiento en bolsas ha^{-1} y del calibre a la densidad.

La línea 1 maximiza el rendimiento neto en bolsas ha^{-1} al exponerla a la mayor densidad evaluada, pero a su vez, disminuye la calidad de su calibre, debido al gran aumento del calibre 4 y a la reducción del calibre 2 (Fig. 8a).

La línea 4 muestra una respuesta de tipo óptimo para rendimiento neto con un máximo entre 11 y 13 pl m^{-2} . En cuanto al calibre, como en la tendencia general disminuyen los porcentajes de los calibres 2 y 3 y aumenta el 4 al incrementar la densidad (Fig. 8b).

El genotipo 8 tiene una respuesta de tipo óptimo para rendimiento neto, con la mayor productibilidad de semillas en densidades cercanas a 11 pl m^{-2} . Aumentos de la densidad de siembra redujeron la proporción de calibre 2 y aumentaron el calibre 4, sin embargo, en la densidad óptima para rendimiento, la línea 8 tiene un alto porcentaje de calibre 2 y 3 (Fig. 8c).

La línea 10 maximizó su rendimiento neto en valores cercanos a 11 pl m^{-2} , densidad en la cual reduce el porcentaje del calibre 1 e incrementa el calibre 2 al compararla con menores stands de plantas, por lo que densidades cercanas a 11 pl m^{-2} maximiza tanto el rendimiento como la calidad del calibre producido (Fig. 8d).

La Fig. 9 contiene la misma información que la Fig.8, pero a diferencia de esta, muestra el rendimiento en bolsas ha^{-1} por calibre. Se puede apreciar que el aumento de rendimiento al aumentar la densidad de siembra se da por el incremento de calibres menores (3 y 4), mientras que al mismo tiempo se mantiene o disminuye levemente el rendimiento de los calibres mayores (1 y 2).

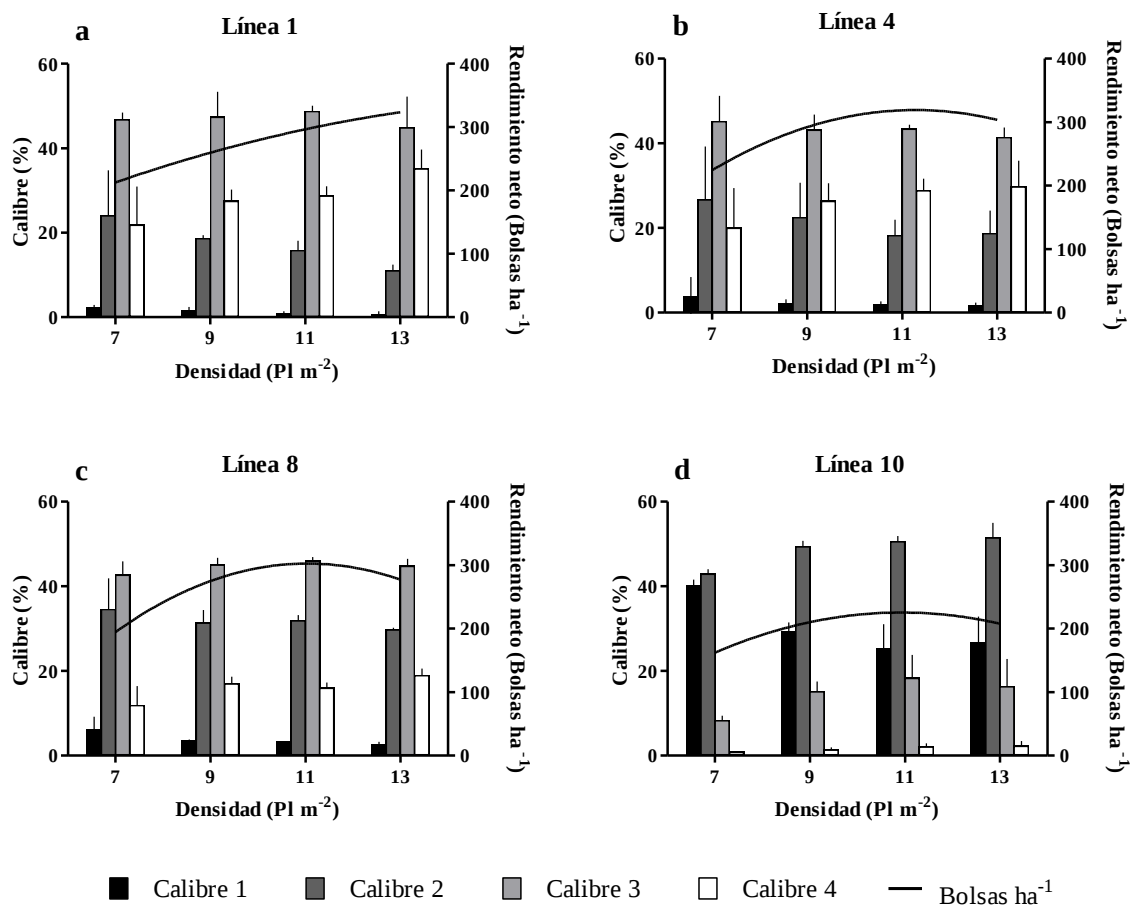


Fig 8. Proporción de cada tamaño de calibre y rendimiento neto en bolsas ha⁻¹ en función de la densidad de siembra para línea 1 (a), 4 (b), 8 (c) y 10 (d).

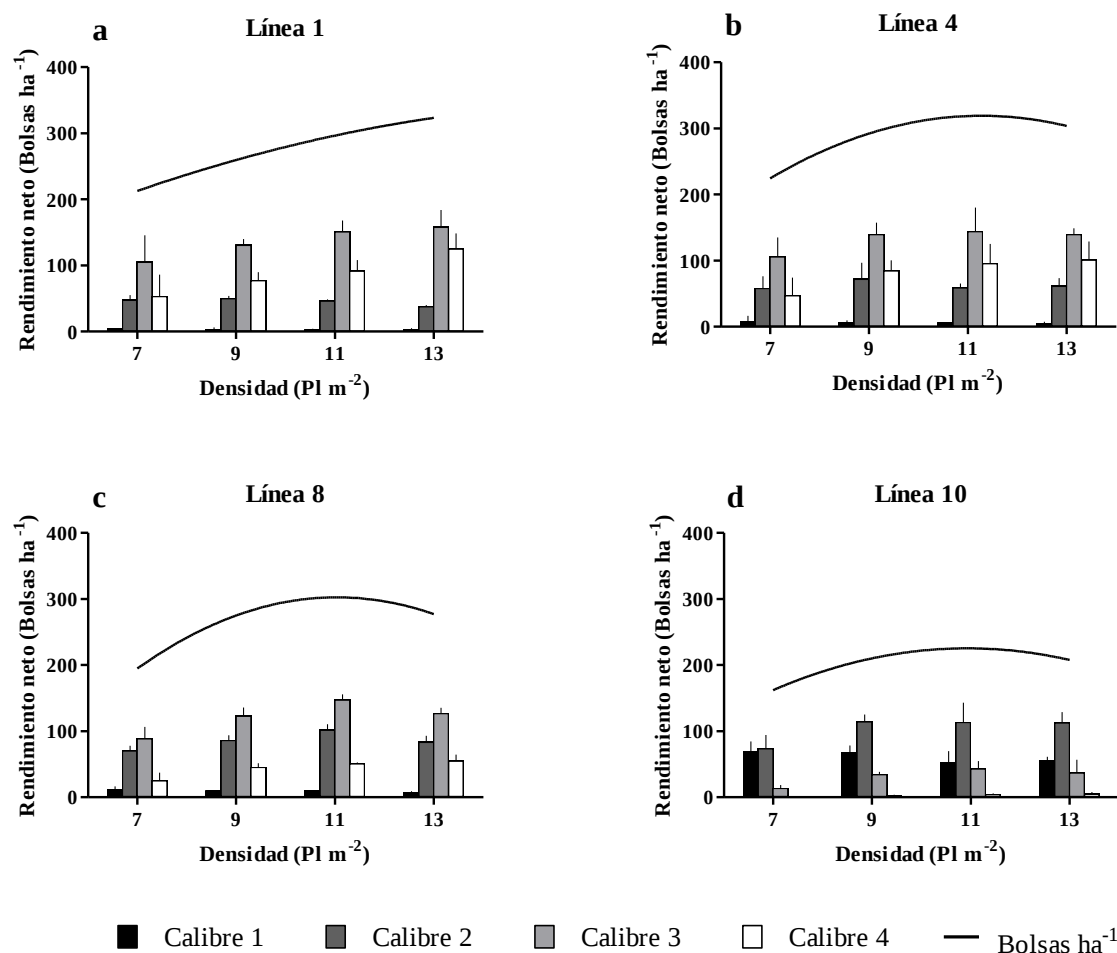


Fig 9. Rendimiento neto en bolsas ha⁻¹ y rendimiento de cada calibre en bolsas ha⁻¹ en función de la densidad de siembra para la línea 1 (a), 4 (b), 8 (c) y 10 (d).

Discusión

Un eficiente uso de los recursos en la producción de semillas es importante debido a los altos costos de producción. Una de las prácticas de manejo que impacta fuertemente en la producción de semillas es la densidad de siembra, particularmente en maíz (Echarte *et al.*, 2000). El impacto de la densidad sobre el rendimiento en híbridos o líneas ha sido estudiado previamente (Sarlangue *et al.*, 2007; Hernández *et al.* 2014; Amelong *et al.*, 2017), pero poco se sabe del impacto sobre la calidad de la semilla producida en términos de calibre. Este trabajo muestra que líneas comerciales de interés varían ampliamente en su rendimiento, PMS, porcentaje de descarte y calibre, y que la densidad impacta fuertemente en todas estas variables.

La respuesta del rendimiento neto en función de la densidad mostrada en el presente trabajo sigue la típica respuesta de tipo curvilínea evidenciada en esta especie cuando se comparan diferentes genotipos y ambientes (Fig. 8; Karlen y Camp, 1985; Tollenaar, 1992; Echarte *et al.*, 2000). Esta respuesta históricamente ha determinado que el manejo de la densidad se defina en función del ambiente, siendo mayor en ambientes de mejor productividad (Al Kaisi y Yin, 2003; Berzsenyi y Tokatlidis, 2012). Más recientemente se ha demostrado que el manejo de la densidad también tiene que depender del genotipo, particularmente del híbrido, ya que los híbridos comerciales responden distinto al aumento en la presión de plantas (Sarlangue *et al.*, 2007; Hernández *et al.*, 2014). Más reciente aún se ha extendido esta idea al nivel de líneas, ya que líneas endocriadas elites han mostrado variación en densidad óptima (Amelong *et al.*, 2017). Los resultados de este trabajo confirman estas diferencias entre genotipos, ya que la línea 1 sugiere una mayor densidad óptima que las líneas 4, 8 y 10 (Fig. 8). Esto demuestra la importancia de conocer la respuesta a la densidad para cada línea particular.

El aumento de la densidad provoca una reducción del PMS, en concordancia con estudios previos (Hernández *et al.*, 2014; Echarte *et al.*, 2000). Esta reducción del PMS conlleva a un aumento o reducción del descarte dependiente de la línea (Fig. 3). Un aumento del descarte inferior es evidente en las líneas de menor PMS cuando su peso cae por debajo de los 250 g, como las líneas 1 y 4. Una reducción del descarte superior se evidencia en líneas de mayor PMS, como la línea 10 que evidencia PMS de 350 g en la menor densidad. La línea 8, que concentra su PMS alrededor de los 250 mg casi independientemente de la densidad,

mostró porcentajes de descarte mínimos. Estos resultados muestran que el descarte se minimiza con PMS de entre 250 y 300 g, y que genotipos que logran estabilidad del PMS alrededor de estos valores minimizan el descarte.

Los genotipos se diferenciaron en la composición del calibre que produjeron, estableciéndose diferencias significativas entre líneas para todos los calibres analizados. Diferencias genotípicas en calibre han sido descritas previamente (Pinnisch *et al.*, 2012). Las líneas 1, 4 y 8 produjeron en su mayoría semilla chata, pero las dos primeras se concentraron en tamaños 3 y 4, mientras que la línea 8 en el calibre 3 seguido por el 2. La línea 10 fue diferente al resto ya que produjo una mayor cantidad de semilla redonda y concentrada en los calibres 1 y 2. Esta línea, además, fue la que obtuvo el menor rendimiento en bolsas ha^{-1} , lo que deja en evidencia su menor número de granos. Tanto la forma de la espiga como de la semilla y el número de granos tiene un importante componente genético y es conocido que distintos grupos heteróticos producen semilla de distinto calibre (Hallauer *et al.*, 2001), a su vez, es sabido que la forma de la semilla depende en parte del espacio físico disponible en la espiga para crecer (Gambin *et al.*, 2007), por lo que es probable que línea 10 muestre semilla de alto peso y mayormente redonda no solo debido a que pertenece a un grupo heterótico diferente, sino también por su menor número de granos. Una reducción de la densidad aumenta la proporción de semilla redonda, lo que también es acorde a esta hipótesis. Estas respuestas sugieren que es difícil maximizar el número de bolsas por ha con semillas de forma redonda, actualmente preferida por los productores.

La reducción del PMS con el aumento de la densidad trae como consecuencia una progresiva disminución de los calibres de mayor tamaño a la vez que aumenta el porcentaje de los más pequeños (Fig. 7). Esto puede ser contraproducente o no dependiendo de la línea en cuestión. Para las líneas 1 y 4, el aumento de la densidad aumentó la proporción de semillas de calibre 4; es decir, aumentó la proporción del calibre menos buscado por los productores a pesar de aumentar el rendimiento neto. Por el contrario para la línea 10, el aumento de la densidad redujo la proporción del calibre 1 y aumentó la proporción de calibre 2; es decir, se redujo el tamaño de semilla de mayor costo logístico y además se aumentó el calibre más buscado por el mercado. Estos resultados dan indicios de que conociendo el PMS y el calibre de mayor proporción es posible estimar el impacto que va a tener la densidad sobre el calibre en líneas que no fueron consideradas en este estudio.

Al intentar definir la densidad óptima en términos de ambos, bolsas ha^{-1} y calibre, sólo la línea 10 alcanzó el máximo rendimiento y calidad a una misma densidad, simplificando la elección de la densidad óptima. La línea 8 sigue un patrón similar, debido a que fue la línea que menos modificó su calibre al variar la densidad, por lo que a la densidad óptima para bolsas ha^{-1} muestra una buena proporción de calibres 2 y relativamente bajo porcentaje de calibre 4. Las líneas 1 y 4 se presentaron problemáticas, debido a que la densidad óptima para rendimiento neto es opuesta a la calidad del calibre: la mejor proporción de calibre 2 se encontró en la densidad más baja (7 pl m^{-2}), mientras que el máximo rendimiento en las densidades más altas ($11 \text{ a } 13 \text{ pl m}^{-2}$). Aumentar la densidad en estas líneas implica un aumento de producción en bolsas de calibres más pequeños.

A fin de evaluar el impacto de la densidad en el total de bolsas ha^{-1} de diferente calibre, la Fig. 9 muestra la misma información que la Fig. 8 pero en bolsas ha^{-1} . Se aprecia que el aumento de la densidad en las líneas 1 y 4 reduce mínimamente la cantidad de bolsas ha^{-1} del calibre 2 como consecuencia del aumento del rendimiento, y se observa un aumento importante en el número de bolsas ha^{-1} de calibre 3 y sobre todo del 4. Debido a que estos calibres son menos atractivos para los productores, pueden tener descuentos de hasta el 20%, por lo que el incremento en rinde será en bolsas con un menor margen. Como la cantidad de recursos invertidos es similar con ambos planteos, sembrando a mayor densidad se obtendrían mayores beneficios.

Conclusiones

Este trabajo muestra que líneas comerciales de interés varían ampliamente en su rendimiento, PMS, porcentaje de descarte y calibre, y que la densidad impacta fuertemente en todas estas variables.

Existió una fuerte relación entre el PMS tanto con el porcentaje de descarte como con el calibre, donde pesos de entre 250 y 300 g minimizaron la proporción de descarte y al mismo tiempo incrementaron los calibres más buscados por los productores.

La densidad que maximizó el rendimiento neto en general es alta y similar en todas las líneas (*ca.* entre 11 y 13 pl m⁻²), pero el planteo que logra maximizar en conjunto rendimiento neto y calibre coincide en aquellas líneas que muestran altos porcentajes de calibres de mayor tamaño. Para las líneas que muestran mayor proporción de calibres más pequeños, el aumento del rendimiento neto con la densidad implica obtener semillas de menor calidad. Los resultados del presente trabajo son de gran utilidad en la producción de semillas.

Bibliografía

- Al-Kaisi MM, Yin X. 2003. Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agronomy Journal* 95: 1475-1482.
- Amelong A, Hernández F, Novoa AD, Borrás L. 2017. Maize Stand Density Yield Response of Parental Inbred Lines and Derived Hybrids. *Crop Science* 57: 32-39.
- Beck DL. 2002. Management of hybrid maize seed production.
- Berzsenyi Z, Tokatlidis IS. 2012. Density dependence rather than maturity determines hybrid selection in dryland maize production. *Agronomy Journal* 104: 331-336.
- Cárcova J, Borrás L, Otegui M. 2004. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en maíz. En: Producción de granos. Bases funcionales para su manejo: 133-163.
- Cirilo AG, Andrade FH. 1994. Sowing date and maize productivity: II. Kernel number determination. *Crop Science* 34: 1044-1046.
- Claassen MM, Shaw RH. 1970. Water deficit effects on corn. I. Grain components. *Agronomy Journal* 62: 652-655.
- Cubero JI. 2003. Introducción a la Mejora Genética Vegetal. 2da Ed. Mundi Prensa. Madrid.
- Echarte L, Luque S, Andrade FH, Sadras VO, Cirilo A, Otegui ME y Vega CRC. 2000. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Research* 68: 1-8.
- Egli DB. 1998. Seed biology and the yield of grain crops. CAB international.
- Ers.usda.gov. (2017). USDA ERS. Corn and Other Feed Grains. [online] Disponible en: <https://www.ers.usda.gov/topics/crops/corn/> [Acceso 2017].
- Fischer KS, Palmer AFE. 1984. Tropical maize. CIMMYT No. CIS-753.
- Gambin BL, Borrás L, Otegui ME. 2007. Is maize kernel size limited by its capacity to expand? *Maydica* 52: 431.
- Graven LM, Carter PR. 1990. Seed size/shape and tillage system effect on corn growth and grain yield. *Journal of Production Agriculture* 3: 445-452.
- Hall AJ, Lemcoff JH, Trapani N. 1981. Water stress before and during flowering in maize and its effects on yield, its components, and their determinants. *Maydica* 26: 19-38.
- Hallauer AR. 2001. Specialty corns. 2da Ed. CRC Press.

- Hernández F, Amelong A, Borrás L. 2014. Genotypic differences among Argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agronomy Journal* 106: 2316-2324.
- Hunter JL, TeKrony DM, Miles DF, Egli DB. 1991. Corn seed maturity indicators and their relationship to uptake of carbon-14 assimilate. *Crop Science* 31: 1309–1313.
- INTA. 1983. Carta de suelos de la República Argentina. Instituto de Suelos, Buenos Aires. Hoja 3360-20 y 21, Arroyo Seco - San Nicolás de los Arroyos.
- Karlen DL, Camp CR. 1985. Row spacing, plant population, and water management effects on corn in the Atlantic Coastal Plain. *Agronomy Journal* 77: 393-398.
- Luo D, Ganesh S, Koolgaard J. 2014. Predictmeans: Calculate predicted means for linear models. R package version 0.99. <https://CRAN.R-project.org/package=predictmeans>.
- Nafziger ED. 1992. Seed size effects on yields of two corn hybrids. *Journal of Production Agriculture* 5: 538-540.
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S, Sarkar D, R Core Team. 2016. nlme: Linear and nonlinear mixed effects models. R package version 3.1-127. <http://CRAN.R-project.org/package=nlme> (verified 20/09/2016).
- Pinnisch R, Mowers R, Trumpy H, Walejko R, Bush D. 2012. Evaluation of maize (*Zea mays* L) inbred lines for yield component traits and kernel morphology. *Maydica* 57: 1-5.
- R Core Team 2016. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ritchie S, Hanway JJ. 1982. How a corn plant develops. Iowa State Univiversity. Technol. Spec. Rep., 48 p
- Russell J. 1968. Testcrosses of one- and two-ear types of Corn Belt maize inbreds. I. Performance at four plant stand densities. *Crop Science* 8: 244-247.
- Sarlangue T, Andrade FH, Calviño PA, Purcell LC. 2007. Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density? *Agronomy Journal* 99: 984-991.
- Smith CW, Betrán J. 2004. Corn: origin, history, technology, and production (Vol. 4). John Wiley & Sons.
- Tollenaar M. 1992. Is low plant density a stress in maize? *Maydica* 37:305-311.
- Wych RD, Sprague GF, Dudley JW. 1988. Production of hybrid seed corn. Corn and corn improvement. Third edition. 565-607.
- Zuur AF, Leno EN, Walker NJ, Saveliev AA, Smith GM. 2009. Mixed effect models and extentions in ecology with R. Springer, New York.