

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

Trabajo Final presentado para optar al Grado
de Ingeniero Agrónomo

**DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE GRANOS
POR PLANTA DE MAÍZ SEGÚN HÍBRIDO Y ZONA
DE MANEJO POR PRODUCTIVIDAD**

Alumno:
Malcom David Azcurra Moriena
D.N.I.: 35.472.275

Director:
Ing. Agr. Dr. Gabriel Espósito
D.N.I.: 18.089.325

Co-Directora:
Ing. Agr. Cecilia Cerliani
D.N.I.: 33.328.139

Río Cuarto – Córdoba
Diciembre de 2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Determinación del número de granos por planta de maíz según híbrido y zona de manejo por productividad

Autor: Malcom D. Azcurra Moriena
D.N.I.: 35.472.275

Director: Ing. Agr. Dr. Espósito Gabriel
D.N.I.: 18.089.325

Co-Directora: Ing. Agr. Cecilia Cerliani
D.N.I.: 33.328.139

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión
Evaluadora:

Ing. Agr. Ezequiel Grassi_____

Ing. Agr. Federico Morla_____

Ing. Agr. Dr. Gabriel Espósito_____

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Aprobado por Secretaría Académica: ____/____/____.

Secretario Académico

DEDICATORIA

Le quiero dedicar este trabajo en primer lugar a mis padres, Estela y Beto, quienes sembraron en mí el valor del amor, el esfuerzo y la pasión por lograr este sueño personal.

En segundo lugar quiero agradecerle a mi hermana Noelia, mi abuela Catalina y mi novia Flavia, quienes me acompañaron incondicionalmente durante toda la carrera.

Finalmente le dedico este título a la memoria de mi abuelo Ildo, quien fue y será motivo de inspiración en muchos momentos de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer profunda y sinceramente a:

Mi director y co-directora del Trabajo Final de Grado, Gabriel y Cecilia, por el aporte a mi formación como profesional, el apoyo incondicional y por el valor académico y humano que en ellos se reflejó en todo momento.

Mis compañeros y amigos que colaboraron con en este arduo trabajo, Luciano, Matías, Franco, Angie, Gabriel y Rafa.

La Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto y sus docentes, por brindar la posibilidad de formarme como profesional y ser humano.

Quienes fueron mi inspiración profesional y moral, a los docentes, sacerdotes, empleados y compañeros de la Escuela Agrotécnica Salesiana Ambrosio Olmos.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	IX
SUMMARY	X
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. Caracterización del problema.....	1
I.2. Antecedentes.....	6
I.3. Importancia del trabajo.....	14
I.4. Hipótesis y objetivos.....	14
I.4.a. Hipótesis.....	14
I.4.b. Objetivos.....	14
II. MATERIALES Y MÉTODOS	16
II.1. Descripción del área de estudio.....	16
II.2. Diseño experimental y tratamientos.....	17
II.3. Mediciones en V_{13} , R_3 y R_6	20
II.4. Cálculo de la relación NGP_L frente a TCP_{PC}	21
II.5. Densidad óptima de plantas por híbrido.....	22
II.6. Cálculo de la relación peso de grano frente a la densidad de plantas.....	24
III. RESULTADOS	25
III.1. Relación entre el NGP_L y la TCP_{pc} en las distintas zonas de manejo.....	25
III.2. Evaluación de híbridos sin considerar las zonas de manejo.....	29
III.3. Función de producción del maíz según la densidad de plantas y densidad óptima económica de plantas para cada híbrido.....	31
III.4. Peso de grano frente a la densidad de plantas para cada híbrido.....	33
IV. DISCUSIÓN	36
IV.1. Respuesta de la fijación del NGP_L frente a la TCP_{PC} para el período crítico frente a las distintas zonas de manejo.....	36
IV.2. Comparación entre híbridos sin zonas de manejo.....	36

IV.3. Función de producción del maíz según la densidad de plantas y densidad óptima económica de plantas para cada híbrido.....	37
IV.4. Peso de grano frente a la densidad de plantas para cada híbrido.....	38
V. CONCLUSIÓN.....	40
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Registro mensual de precipitaciones (mm) de la campaña 2013/2014.....	17
Tabla 2. Análisis estadístico de la regresión no lineal para el modelo que se ajusta a la relación entre NGP_L frente a la TCP_{pc} para el híbrido Dekalb DK 692 con zonas de manejo.....	25
Tabla 3. Análisis estadístico de la regresión no lineal para el modelo que se ajusta a la relación entre NGP_L frente a la TCP_{pc} para el híbrido Dekalb DK 7210 con zonas de manejo.....	25
Tabla 4. Matriz de correlación de las estimaciones para el híbrido Dekalb DK 692 con zonas de manejo	26
Tabla 5. Matriz de correlación de las estimaciones para el híbrido Dekalb DK 7210 con zonas de manejo.....	27
Tabla 6. Análisis estadístico de la regresión no lineal para el modelo que se ajusta a la relación entre NGP_L frente a la TCP_{pc} para los híbridos Dekalb DK 692 y DK 7210 sin zonas de manejo.	29
Tabla 7. Matriz de correlación de las estimaciones para los híbridos Dekalb DK 692 y DK 7210 sin zonas de manejo.....	30
Tabla 8. Análisis de regresión no lineal para la función de producción de maíz que se ajusta a los híbridos Dekalb DK 692 y DK 7210 sin zonas de manejo.....	32
Tabla 9. Densidades óptima agronómica y económica ($DOAp$ y $DOEp$ respectivamente) ($plt.ha^{-1}$) y rendimientos esperados (RTO) ($kg.ha^{-1}$) para cada caso y para los híbridos DK 692 y DK 7210.....	33
Tabla 10. Análisis de regresión lineal para la relación peso de grano frente a la densidad de plantas que se ajusta a los híbridos Dekalb DK 692 y DK 7210 sin zonas de manejo.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la Provincia de Córdoba y localización del ensayo a campo.....	16
Figura 2. Representación gráfica del desempeño de los Índices FPI y NCI.....	18
Figura 3. Mapa de zonas de manejo obtenido con el programa QGIS.....	19
Figura 4. NGP_L en función de la TCP_{pc} para el híbrido DK 692 en ambas zonas de manejo.....	28
Figura 5. NGP_L en función de la TCP_{pc} para el híbrido DK 7210 en ambas zonas de manejo...	28
Figura 6. NGP_L en función de la de TCP_{pc} para los híbridos DK 692 y DK 7210.....	31
Figura7. Rendimiento en granos ($kg\ ha^{-1}$) en función de la densidad de plantas (línea verde), densidad óptima económica de plantas (DOEp) (punto azul y rojo, DK 692 y DK 7210 respectivamente), densidad óptima agronómica de plantas (DOAp) (punto negro) y rendimientos esperados para cada caso y para los híbridos DK 692 y DK 7210.....	33
Figura 8. Peso de grano del maíz (g) en función de la densidad de plantas para los híbridos DK 692 y DK 7210.....	35

RESUMEN

Si la ecofisiología explica el proceso de la generación del rendimiento en grano del cultivo de maíz, entonces con la elección de las prácticas de manejo que tiendan a optimizar la calidad ambiental en los momentos decisivos y la elección del genotipo más adecuado a las condiciones, se lograrían máximos rendimientos del cultivo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto genético y ambiental sobre la relación del número de granos por planta (NGP_L) frente a la tasa de crecimiento por planta durante el período crítico (TCP_{PC}) del maíz. Para ello se utilizaron dos híbridos que se presumen con comportamiento diferencial en la estabilidad de rendimiento, sembrados en cinco densidades de plantas crecientes atravesando zonas de manejo (ZM) previamente delimitadas por el programa Management Zone Analyst. Se realizaron mediciones de materia seca de planta entera en V_{13} y R_3 para determinar las diferentes tasas de crecimiento por cada densidad e híbrido, y en R_6 se obtuvo el número junto con el peso individual de granos, para poder realizar la función NGP_L frente a la TCP_{PC} . Luego se calculó la densidad óptima económica y la función de relación entre el peso individual de granos y la densidad de plantas. Se encontró solamente dependencia genética en la relación NGP_L frente a la TCP_{PC} y en la relación peso individual de granos frente a la densidad de plantas. Se concluye que el mejor comportamiento tanto en planteos de rendimiento potencial como en situaciones de adversidad ambiental, el material más moderno tendrá mayores posibilidades de expresar mejor desempeño productivo tanto en estabilidad en diversos escenarios como en potencialidad.

Palabras claves: híbrido, zonas de manejo, densidad de siembra.

SUMMARY

If the ecophysiology explains the process of generating the grain yield of maize, then the choice of management practices that tending to optimize the environmental quality in the decisive moments and the choice of the most suitable genotype to conditions, achieved express the crop yield maximums. But identifying what is the most prevalent factor to driving a crop, it is a very complex task of unveiling. The goal of this study was to evaluate the genetic and environmental effect on the ratio of the kernel set per plant (NGP_L) versus plant growth rate during the critical period (TCP_{PC}) of maize. For this, two hybrids were used that presumed with difference in the behavior performance stability, sown in five increasing densities plants through management zones (ZM), previously defined by the Management Zone Analyst program were used. Measurements of whole plant dry matter in V_{13} and R_3 were performed to determine the different growth rates for each density and hybrid, and the kernel set was obtained in R_6 together with the weight of individual kernel to perform the function against NGP_L versus TCP_{PC} . The optimal economic density and function of relationship between individual kernel weight and plant density was then calculated. Only genotypic dependence was found in the relationship of NGP_L versus TCP_{PC} and the relationship of individual kernel weight ratio versus the density of plants. It concludes that the best performance both at proposals of potential yield and in situations of environmental adversity, the most modern hybrid will have greater opportunities to express better performance in both production stability in various environmental situations and both at potential yield.

Keywords: hybrid, management zones, sowing density.

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Caracterización del problema

La población mundial está creciendo rápidamente y se espera que para el año 2050 sea de alrededor de 10 mil millones de personas. La disponibilidad limitada de tierras arables y recursos de acuíferos, junto con la tendencia global de la disminución de los rendimientos de los cultivos, convierten al siglo XXI en un gran desafío para la alimentación. Según las proyecciones, la producción de alimentos en las tierras utilizadas actualmente debería duplicarse en las próximas dos décadas para satisfacer la demanda de alimentos de la población mundial creciente (Cakmak, 2002).

El maíz es una de las especies cultivadas más productivas, debido a que es una planta C4 con una alta tasa de actividad fotosintética y tiene un alto potencial para la producción de carbohidratos por unidad de superficie por día (Paliwal *et al.*, 2001). Esto es consecuencia de la capacidad que tiene este cultivo para captar la energía solar con sus hojas, junto a las moléculas de CO₂, y a través de la fotosíntesis transformar esa energía en química, la cual es trasladada a toda la planta, especialmente hacia sus frutos llamados cariopse o grano de maíz, tornándose éstos el principal órgano de interés de este cultivo (Andrade *et al.*, 1996).

Esa energía química almacenada en sus granos, es la razón de la gran importancia económica, histórica y social a nivel mundial por su rol alimentario, ya sea como alimento humano o para el ganado, e incluso como fuente de un gran número de productos industriales (Paliwal *et al.*, 2001). Alrededor del 65% de esta producción se utiliza para alimentación animal, ya sea directamente o como parte de alimento procesado. Además, en regiones de América Central y Sudamérica, África, sudeste asiático y China constituye un alimento básico para las personas. El grano de este cereal también tiene una gran cantidad de usos industriales, como por ejemplo la producción de almidón, edulcorantes, alcohol, jarabes, acetona, aceites, entre otros (ILSI, 2006).

También se destaca el rol energético del maíz, tanto de la producción de bioetanol de primera como de segunda generación, a partir de sus granos con alto contenido en almidón, como del resto de la planta con alto contenido en componentes ligno-celulósicos respectivamente (Bragachini *et al.*, 2014). El objetivo de esta producción es reemplazar parte de la energía fósil, reduciendo las emanaciones de dióxido de carbono (CO₂), constituyendo un aporte significativo para el cuidado ambiental (Zahniser, 2006).

A nivel nacional, la producción de maíz constituye un pilar fundamental para el desarrollo de Argentina. La cadena de este cereal contribuye positivamente a la actividad económica y las exportaciones, y tiene un impacto significativo en la generación de empleo, los ingresos fiscales y la sustentabilidad del sistema productivo. Por ejemplo, en el año 2009, las cadenas del trigo y del maíz aportaron 30.000 millones de pesos al producto bruto interno (PBI) (2,9 % del total del PBI), 18.000 millones de pesos a las exportaciones (8,7 % del total de las exportaciones), 12.000 millones de pesos a la recaudación tributaria nacional (3,9 % del total de la recaudación) y 600.000 puestos de trabajo directo e indirecto (4,2 % del total de nuestro país) (FADA, 2010). Cabe acotar que el maíz es el segundo cultivo en importancia en la Región Pampeana Argentina (RPA) (Ferraris y Couretot, 2014), y en la campaña 2013/14, ocupó una superficie cosechada de 4,83 millones de hectáreas a nivel Nacional, 1,67 millones de hectáreas en la Provincia de Córdoba, con rendimientos promedios de 68 qq ha⁻¹ y 70 qq ha⁻¹ respectivamente (SIIA, 2014).

Además, el rendimiento promedio mundial de maíz se ha incrementado en forma constante durante los últimos 90 años (Fischer y Edmeades, 2010). Estos aumentos en el rendimiento se pueden explicar por ganancias genéticas, por mejoras en el manejo de los cultivos y por interacciones entre estas variables. La introducción de híbridos dobles a partir de los años sesenta y la introducción de híbridos simples a partir de los años noventa brindaron la base genética para el incremento sostenido del rendimiento durante las últimas décadas (Valentinuz, 2006). Las mejoras en la agronomía del cultivo hicieron posible la expresión del avance del mejoramiento genético en el rendimiento del cultivo en condiciones de campo.

El incremento, tanto en la densidad de plantas como en la fertilización nitrogenada, fueron dos prácticas de manejo que caracterizaron la mejora agronómica del cultivo de maíz (Duvick y Cassman, 1999). Ambas prácticas fueron adoptadas en forma gradual y creciente a través de las últimas cuatro décadas.

El maíz es uno de los cultivos más sensibles al estrés, sobre todo durante el período pre y pos floración (denominado período crítico), por lo cual saber prevenir posibles estreses en ese momento es de trascendental importancia. El grado de afección del cultivo en este período está directamente relacionado con las prácticas agronómicas empleadas y a la disponibilidad de recursos (luz, agua y nutrientes) para el crecimiento de las plantas (Videla Mensague *et al.*, 2014). Ecofisiológicamente se explica al período crítico del rendimiento de granos del maíz como el lapso de 30 días centrados en la floración del ciclo del cultivo donde se produce la determinación del número de granos por planta y por superficie (Andrade y Sadras, 2000), variable que explica en mayor medida el rendimiento en granos de maíz (Andrade *et al.*, 1999).

A su vez, esta sensibilidad del rendimiento ante la disminución de recursos durante el período crítico, está determinada por la capacidad de fijar granos por planta, dado por la tasa de crecimiento por planta en ese período (TCP_{PC}) que es indicativa de la condición fisiológica de las misma (Andrade *et al.*, 1999; Andrade y Sadras, 2000; Andrade *et al.*, 2002; D`Andrea *et al.*, 2008; Talano *et al.*, 2010).

Cabe acotar que la TCP_{PC} depende de numerosos factores como la temperatura, los niveles de radiación, la disponibilidad de agua y nutrientes y el genotipo (Andrade *et al.*, 2002). Por ende, con distintas densidades de siembra se pueden lograr variaciones en la TCP_{PC} y como consecuencia en el número de granos por planta fijados (NGP_L) en el período crítico, constituyendo el principal factor condicionante de la elección de una densidad de siembra determinada (Satorre *et al.*, 2003).

La densidad de plantas logradas depende principalmente de la densidad de siembra, la cual es una práctica de manejo que determina la capacidad del cultivo para interceptar recursos (Satorre, 1999). Al aumentar la densidad de siembra se produce una disminución en la oferta de los recursos (radiación, agua y nutrientes) por planta y por lo tanto se incrementa la competencia intraespecífica de los mismos (Satorre, 1988). Es por ello, que la regulación de la respuesta del maíz ante cambios en la densidad de siembra es consecuencia directa de la competencia que cada planta realiza por la captura de los recursos productivos (Satorre *et al.*, 2003). Por lo tanto, la elección de la densidad de siembra es un factor de particular importancia ya que el maíz presenta baja estabilidad del rendimiento ante variaciones en la densidad de plantas debido a que tiene una escasa plasticidad de regulación del área foliar y es muy sensible a la disminución de la cantidad de recursos por planta en el período alrededor de floración (Sarlangue *et al.*, 2007). Además, como los recursos son variables entre las diferentes campañas y el espacio a nivel de lote, es necesario definir las relaciones entre la densidad de siembra y el rendimiento para distintas ofertas ambientales (Andrade *et al.*, 1996).

Por otro lado, el rendimiento en granos responde con una curva de tipo óptimo a la densidad de siembra: crece hasta un máximo (densidad óptima agronómica) y a partir de ahí el rendimiento disminuye con mayores o menores densidades. Esto se explica porque en muy bajas densidades el rendimiento puede estar limitado por la baja capacidad del cultivo para cubrir el suelo (captación de radiación) y por el límite en el tamaño potencial de espiga, que no compensa la disminución en el número por planta. Por otro lado, en muy altas densidades el rendimiento también puede verse afectado, ya que la planta de maíz prioriza el crecimiento de órganos apicales (panoja) en detrimento de los axilares (espiga). Por tal motivo en cultivos creciendo bajo severo estrés, la espiga recibe proporcionalmente menos recursos, expresándose en la

menor TCP_{PC} y por ende disminuyendo abruptamente su rendimiento (Karlen y Camp, 1985; Andrade *et al.*, 1996; Tokatlidis y Kountroubas, 2003; Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006; Diez, 2012; Scramuzza *et al.*, 2014).

Otra estrategia de manejo que cambia el escenario ambiental es la fecha de siembra. Es una práctica agronómica que tiene como consecuencia la variación de la temperatura, la radiación y la disponibilidad de agua para el cultivo, y por ende sobre su rendimiento. La disponibilidad hídrica alrededor de floración es la principal limitante productiva. Los antecedentes de sequías reiteradas durante algunas de las últimas campañas en la Región Pampeana Argentina (RPA), como 2007/08, 2008/09 y 2011/12 (Ferraris y Couretot, 2014), produjo como consecuencia el aumento de la superficie de maíz en siembras tardías, a causa de la búsqueda en estabilidad de los rendimientos, ya que maíces de siembra tardía tienen la oportunidad de almacenar agua en el perfil, gracias a un barbecho más prolongado. Asimismo, la floración coincide con una etapa de menor cociente fototermal, pero con menor demanda atmosférica y mayor probabilidad de obtener precipitaciones adecuadas. De esta manera, disminuyen su potencial de rendimiento pero también los desvíos con relación a un rendimiento medio aceptable, es decir que le proporciona estabilidad (Satorre, 2002; Maddonni, 2009).

En la RPA la magnitud y el momento de ocurrencia de las precipitaciones está fuertemente afectado por el fenómeno El Niño – Oscilación Sur (ENSO o ENOS) (Seiler *et al.*, 2008). Cuando ocurre el fenómeno de El Niño, las precipitaciones aumentan desde primavera favoreciendo la siembra de maíces en fecha de siembra temprana (septiembre-principios de octubre). En cambio, en los años con episodio La Niña, las lluvias de primavera disminuyen, tendencia que se acentúa en el mes de diciembre. Las máximas lluvias de verano suelen ocurrir en el período enero-febrero-marzo, coincidiendo con la floración de los maíces tardíos (Ferraris y Couretot, 2014).

Cabe acotar que la fecha de siembra y el fenómeno del ENSO influyen en la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo de maíz, por ende debe cambiarse la recomendación de fertilización. Esto fue demostrado por Espósito *et al.* (2012a), donde maíces tempranos rindieron menos que los sembrados en diciembre a causa de un ajuste inadecuado en la fertilización nitrogenada, como ocurrió en la campaña húmeda 2012/13 en la RPA donde las parcelas con baja fertilización nitrogenada mostraron desvíos negativos, ya que no pudieron expresar su potencial, siendo los maíces tardíos más estables para la misma situación.

Entonces queda en evidencia la influencia que tiene el ambiente en la respuesta del cultivo de maíz para la producción de granos. Pero los sistemas de producción agropecuario, se realizan sobre ambientes que se caracterizan por presentar diferentes grados de variabilidad

temporal y espacial, y por ende en la oferta de los recursos esenciales para el crecimiento y el desarrollo vegetal (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006). Por lo tanto, la agricultura tradicional basada en prácticas que recomiendan la utilización de insumos en base a valores promedio en el tiempo y el espacio, debería ser sustituida por una agricultura que considere esta variación ambiental para optimizar el uso de los insumos en la cantidad que cada punto geográfico soporte según la variabilidad interanual. Esa técnica es la agricultura de precisión o agricultura sitio-específico que se define según Saraiva *et al.* (2000) como una forma integrada de gerenciamiento de la información de los cultivos, basada en la existencia de la variabilidad espacial y temporal de la unidad mínima de manejo en la agricultura tradicional. De esta manera la optimización del uso de insumos a través de la agricultura de precisión podría ser una alternativa ecológica, agronómica y económicamente óptima, es decir que la agricultura de precisión es una forma sustentable de manejar los insumos (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2004). Por ello, un manejo sitio-específico exitoso será aquel en el que los factores limitantes, para una óptima productividad y protección ambiental, puedan ser identificados, caracterizados y manejados en las zonas y momentos apropiados (Mulla y Scheprs, 1997).

A modo de ejemplo, en el sur de la provincia de Córdoba la disponibilidad de recursos se caracteriza por ser altamente variable, tanto espacial como temporalmente (Espósito *et al.*, 2012 b). Este comportamiento se encuentra relacionado con la distribución estacional de las precipitaciones, su variación interanual (Seiler *et al.*, 2008) y aspectos del relieve y del suelo que condicionan el movimiento y el almacenamiento del agua (Cisneros *et al.*, 2012). Por ende, la variabilidad temporal estacional influye en el comportamiento de las distintas fechas de siembra (FS), mientras que la variabilidad espacial lleva a la necesidad de dividir el lote en zonas de igual comportamiento y está influenciada por atributos del relieve como por ejemplo el índice topográfico compuesto (CTI), el cual se relaciona con el movimiento superficial del agua y por ello con el rendimiento (Espósito, 2013). Es por esto que el principal objetivo de la agricultura de precisión es obtener las zonas de manejo definidas por sus factores limitantes del rendimiento, para ser manejadas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas.

Para ello existen diversas herramientas para obtener la información de los atributos que causan la variabilidad intra-lote, como pueden ser desde los conocimientos del propio productor hasta herramientas más objetivas como mapas de suelos, muestreo de grillas, fotografías aéreas, percepción remota o atributos topográficos (Bongiovanni, 2002), de las cuales el mapa de rendimiento según algunos autores (Hörbe *et al.*, 2013), es la mejor herramienta para la delineación de zonas de manejo, ya que el rendimiento del cultivo sería el mejor indicador de la productividad del suelo de las distintas áreas del lote. Teniendo esta información y determinando

cuáles son las variables que tienen mayor efecto en el rendimiento, el siguiente paso lógico es el uso de esa información para crear las zonas de manejo. El análisis de cluster es una de las herramientas estadísticas más utilizadas para la creación de las zonas de manejo, debido a la objetividad y neutralidad del procedimiento. En este sentido, el software “Analizador de Zonas de Manejo” (MZA), está basado en el procedimiento del análisis de clusters no supervisado de medidas “k” difusas. Este programa calcula algunas estadísticas descriptivas para los datos, realiza el análisis de clusters para un rango de zonas de manejo solicitadas y utiliza un par de índices de performance para ayudar a decidir objetivamente el número de zonas de manejo para el lote en estudio (Firdgen *et al.*, 2004).

Para finalizar, el trabajo de agricultura de precisión, una vez obtenido el número de zonas de manejo y los resultados del ensayo con el cultivo, para el caso de densidad variable de semillas en maíz, se obtiene la densidad óptima económica para cada ambiente como recomendación a futuro, también llamado mapa de prescripción (INTA, 2012; Hörbe *et al.*, 2013). Cabe acotar que la densidad variable de semillas es una de las prácticas de manejo que mayor impacto produce sobre el margen bruto, dado que condiciona tanto los costos directos como los rendimientos (Martínez Bologna *et al.*, 2014).

I.2. Antecedentes

A modo de introducir el tema específico de este trabajo final de grado, se citaron los diferentes trabajos realizados con anterioridad por investigadores reconocidos en el ámbito, a fines de generar el contexto para lograr mayor comprensión y establecer la conexión a lo largo de este trabajo. Para ello se centrará a continuación en los dos pilares de este trabajo como lo son la genética y el efecto del ambiente, con el objetivo de comprender la ecofisiología en la formación del rendimiento en granos del cultivo de maíz, pero haciendo hincapié en la relación de fijación de granos por planta (NGP_L) según la tasa de crecimiento individual (TCP_{PC}).

Si la ecofisiología explica el proceso de la generación del rendimiento en grano del cultivo de maíz, se puede decir que con la elección de las prácticas de manejo que tiendan a optimizar la calidad ambiental en los momentos decisivos y la elección del genotipo más adecuado a las condiciones, se lograría expresar el máximo de producción en cada ambiente. Sin embargo, identificar cuál es el factor de mayor incidencia a la hora de manejar un cultivo, es una tarea muy compleja de develar. Para ello, resulta útil discutir sobre la relación entre el NGP_L y la TCP_{PC} en el maíz como punto de partida de la explicación ecofisiológica del rendimiento en grano para el período crítico del mismo. Cabe aclarar que esta capacidad de fijar granos, está dada por

el trasfondo genético del material y la calidad ambiental que posea cada planta, y a la vez la disponibilidad de recursos puede ser regulada por el nivel de estrés a la que está expuesta (luz, agua, nutrientes) provocado por factores bióticos o abióticos, e inclusive antrópicos por la modificación de la densidad de plantas que influye en la competencia intraespecífica (Maddonni y Otegui, 2004).

Según Maddonni y Otegui 2004, el maíz tiene una respuesta particular a la densidad de plantas, con una aguda disminución en el NGP_L y un incremento sustancial en la cantidad de plantas estériles más allá del umbral que maximiza el rendimiento en granos. Esta respuesta al estandar de plantas supra-óptimo deriva del efecto de la disminución de la tasa fotosintética por planta y por ende en la TCP_{PC} y, por otro lado, debido a la jerarquía que establece la panoja sobre el crecimiento de la espiga (dominancia apical). La consecuencia directa de esta respuesta al incremento en la densidad de plantas es el aumento de la variabilidad entre las plantas en varios aspectos fenotípicos (biomasa, peso, intervalo anthesis-floración, NGP_L , etc.), los cuales fueron documentado por Uribe Larrea *et al.* (2002). Cabe acotar que el momento en que se empiezan a establecer las jerarquías en la competencia intra-específica, es desde el estado de plántula en adelante, donde éstas son capaces de detectar sus vecinos a través de señales rojo/rojo-lejano (Maddonni *et al.*, 2002), el cual puede modificar la producción de materia seca e impactar en la morfología de la misma y su posterior rendimiento.

La respuesta al rendimiento en grano del cultivo de maíz es una consecuencia de la calidad ambiental lograda a través de los distintos manejos que se le realicen como se describió anteriormente, pero a la vez es consecuencia de la interacción que un determinado genotipo haga con ese ambiente resultante. Si no hubiera interacciones del genotipo con el ambiente asociadas a los sistemas de producción, la elección de la genética a utilizar sería muy simple, ya que el mejor genotipo en un ambiente en particular, sería el mejor genotipo a lo largo de toda la población de ambientes del sistema. La experiencia demuestra que este escenario es la excepción y no la regla (BASFORD y COOPER, 1998) y que, raramente, se encuentra un “ganador universal” que constituya siempre la mejor opción. Es por esto que conocer cómo se comporta cada genotipo en interacción con un determinado ambiente, es central en el proceso de elección de genotipos (SATORRE *et al.*, 2003).

En cuanto a la influencia genética sobre esta relación genotipo-ambiente, TOLLenaar *et al.* (1992) describieron una curva característica en la capacidad de fijar granos frente a las distintas TCP_{PC} , que varía según el material genético. Esto significa que los parámetros de la fórmula que describe esta relación ecofisiológica podrían ser diferentes entre los distintos híbridos. Por ende,

ante distintos grados de estrés o calidad ambiental que resultan con una TCP_{PC} determinada, pueden influir de manera diferente en los distintos genotipos.

Según De Santa Eduvigis (2010) se han detectado importantes diferencias genéticas frente al comportamiento ante estrés, por lo cual es necesario dilucidar aspectos ecofisiológicos asociados a distintas condiciones ambientales. De esta manera, ante distintos híbridos se observa una relación genotipo-ambiente donde cada material se comporta de manera singular, incluso logrando distinta estabilidad en la TCP_{PC} para iguales condiciones. Otro trabajo, construyó la curva de fijación de granos a través de distintas dosis de riego, como estrategia de obtener las distintas TCP_{PC} y también encontró influencia genética en la relación de fijación de granos de dos materiales del semillero Dekalb, concluyendo en la diferencia en la estabilidad del rendimiento individual (Talano *et al.*, 2010).

Un trabajo similar, (Sarlangue *et al.*, 2007) demostró que tres híbridos de distintos requerimientos de grados días para llegar a madurez fisiológica (ciclo corto, mediano y largo respectivamente) presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los mismos parámetros entre híbridos, para la función de rendimiento en granos por planta (NGP_L por peso individual) frente a la TCP_{PC} , evidenciado en un menor rendimiento en altas TCP_{PC} para el híbrido de ciclo corto. Éste híbrido presentó baja plasticidad en la producción de biomasa y menor partición a granos en altas TCP_{PC} debido a que tuvo baja capacidad para explorar los recursos y un índice de cosecha inferior frente a los híbridos de mayor duración de ciclo.

En el estudio de evolución de crecimiento de plantas en el comienzo de la competencia intra-específica que llevaron a cabo Maddonni y Otegui (2004), explicaron este comportamiento desde el incremento en el coeficiente de variación (CV) de la biomasa por planta, lo cual en baja densidad de plantas, el CV fue menor y mayor en densidades más altas. Este parámetro estadístico puede además revelar la existencia de individuos con diferencia en la habilidad competitiva para el mismo estand de plantas, donde las más grandes son las “dominantes” y las más pequeñas son las “dominadas”. En el comienzo de esta jerarquía en el patrón de crecimiento entre plantas dentro de una densidad, está relacionado a la intensidad de la competencia intra-específica y la respuesta particular que tiene cada genotipo ante los estreses ambientales (indicador de tolerancia o intolerancia al incremento en la densidad de plantas). Híbridos con respuesta contrastante al incremento en densidad de plantas difieren en el estado ontogénico en el cual comienza la competencia intra-específica y el patrón de distribución del tamaño de plantas. Por ende se descubrió que los híbridos tolerantes presentan una competencia intra-específica retrasada en la ontogenia y mayor uniformidad de crecimiento individual de plantas dentro de una densidad determinada. Estos autores encontraron claras evidencias que la

determinación temprana del tipo de plantas (dominantes y dominadas) condiciona el futuro establecimiento de granos. Esto se observa debido a una drástica reducción del NGP_L cuando la TCP_{PC} disminuye por debajo de 2 gramos por planta por día, ya que a bajos valores de TCP_{PC} , las plantas dominadas producen menos granos que las dominantes, con importante reducción en la biomasa en la parte apical de la espiga en el estadio R_3 según la escala fenológica de Ritchie y Hanway (1997). Cabe acotar que la biomasa que obtiene la espiga en este estadio fue significativamente relacionada con la biomasa en V_{13} , el cual conforma el período crítico de definición del rendimiento (Andrade *et. al.*, 1996).

A pesar de las investigaciones realizadas en maíz sobre su respuesta a la densidad, el proceso que controla el comienzo de la interferencia inter-plantas y el establecimiento de las jerarquías entre las mismas dentro de un estand de plantas han sido poco estudiados (Maddonni y Otegui, 2004). El estudio de la variabilidad planta a planta dentro de una densidad de las mismas, sería útil para mejorar el conocimiento en la fisiología del maíz en altas poblaciones de plantas, lo cual es de gran importancia para lograr el aumento del rendimiento en grano en los sistemas de mejoramiento genético.

A modo de introducir la explicación en la mejora genética de los híbridos de maíz, Tokatlidis y Kountroubas (2003) postulan que el rendimiento en grano por unidad de área de los híbridos modernos de maíz es mucho mayor que los híbridos anteriores, como ocurrió en la introducción de híbridos de doble cruzamiento en Estados Unidos cultivados durante el período 1930-1960, que tuvieron una ganancia anual de rendimiento de 65 kg/ha. Desde entonces la aparición de los híbridos de cruzamiento simple ampliaron la ganancia genética anual a 110 kg/ha. Un trabajo similar que explica la respuesta de los genotipos en diferentes densidades de siembras es el de Echarte *et al.* (2000), el cual fue dirigido a diferentes híbridos lanzados desde 1965-93 en Argentina y sembrados en fechas tempranas en la Región Pampeana Argentina, que también coincidió en que la mayor ganancia genética en rendimiento después de la década de 1980 se debió a la introducción de germoplasma estadounidense. Entre las conclusiones que obtuvieron estos dos trabajos fueron que la explicación de la ganancia genética en rendimiento fue por el número de granos ($r=0,95$) más que por el peso ($r=0,28$), e inclusive en algunas densidades el peso individual fue menor para los híbridos más modernos con respecto a los antiguos, y esto está explicado por mayor fijación de grano por unidad de crecimiento por planta, mayor producción de biomasa (Andrade *et al.*, 1996) y mayor índice de cosecha (Echarte y Andrade, 2003).

Coincidiendo con el trabajo anterior, cabe agregar que Luque *et al.* (2006), determinaron que las ganancias genéticas a través de los años de mejoramiento en rendimiento de grano se

asociaron además al aumento de la producción de biomasa post-floración. Las diferencias que determinaron entre los híbridos, surgieron en el inicio del período crítico y fueron evidentes como la mejora de la eficiencia de uso de la radiación, mayor tasa de crecimiento de la planta alrededor de la densidad óptima de plantas, y la mejora en la partición de biomasa para la espiga cercano a la emisión de estigmas. La mejora de la producción de biomasa después de la floración femenina se relacionó con un mayor intercepción de luz, lo que permitió una relación fuente-destino casi constante durante el llenado del grano. Esta tendencia no determinó una compensación entre número de granos y el peso de los mismos.

La densidad de plantas representa el factor de manejo agronómico que más cambió durante las últimas 6 décadas como resultado de la tolerancia de los híbridos modernos a las altas densidades (Tollenaar y Lee, 2002). Además, los híbridos modernos han sido mejorados para soportar estreses como sequía, deficiencia de nitrógeno, esterilidad, suelos anegados, insectos, confinamiento de raíces, muerte prematura y pudrición de tallo. Gran parte del mejoramiento en rendimiento de los híbridos ha sido atribuido a la tolerancia a condiciones estresantes como bajas temperaturas nocturnas durante el período llenado de granos, baja humedad edáfica y competencia por malezas (Tollenaar y Wu, 1999).

Como consecuencia de la tolerancia a altas densidades de plantas, también aumentó la densidad óptima para producir el máximo rendimiento agronómico. Pero en bajas densidades, el rendimiento potencial por planta no sufrió muchos cambios en el período desde 1930 a 1990. Entonces, como consecuencia del mejoramiento en la tolerancia a altas densidades de plantas y la disminución del rendimiento por planta, los híbridos modernos tienen una fuerte dependencia de la densidad para alcanzar rendimientos superiores en un estrecho rango de población de plantas, ya que a partir de esa densidad poblacional se exageran los efectos adversos de productividad y estabilidad en el rendimiento. Si bien los híbridos modernos de maíz tienen una densidad óptima agronómica mayor, es importante analizar los efectos de las altas densidades en la ecofisiología del cultivo. Por ejemplo, cuando ocurren pérdidas de plantas en emergencia debido a diversos factores bióticos y/o abióticos, la compensación por parte de las plantas vecinas a las faltantes, no es suficiente por el bajo potencial productivo individual, por lo cual la productividad por unidad de área decrece, y estas pérdidas se exageran a densidades más altas. Lo mismo ocurre con el aumento de la variabilidad temporal entre plantas a causa de diferencias en la profundidad de siembra o factores que afecten la emergencia, que también disminuyen el rendimiento por superficie a causa de la disminución del uso de recursos por baja capacidad compensatoria de las plantas de mayor tamaño. Otro efecto negativo que se exagera en altas poblaciones de plantas es el aumento de la asincronía floral debido al estrés por menor

disponibilidad de recursos, lo que produce plantas estériles que también disminuyen el rendimiento por superficie (Tokatlidis y Kountroubas, 2003).

Ante estos efectos negativos en altas densidades de plantas, Echarte *et al.* (2000) no encontraron demasiada diferencia en TCP_{PC} entre los diferentes híbridos, pero sí en la cantidad de granos fijados por unidad de TCP_{PC} y por la reducción de la limitante morfogénica a través del mayor número de granos por espiga, siendo mayor en el material más moderno. Cabe acotar que Andrade *et al.* (1999) explican que para una misma densidad de plantas que provocan bajas tasas de crecimiento, el mayor NGP_L se debe a que los híbridos modernos tienen un menor umbral de esterilidad por la mayor pendiente inicial en la relación NGP_L frente a TCP_{PC} , aunque Echarte *et al.* (2000) no lo pudieron discriminar.

Otra característica para el mejoramiento en el desempeño en altas densidades de plantas de los híbridos modernos de maíz, fue atribuida a su capacidad de producir altas tasas fotosintéticas cuando el índice de área foliar (IAF) aumenta debido al incremento en la población de plantas y a la reducción de plantas estériles (Maddonni y Otegui, 2004). Una investigación (Sangoi *et al.*, 2002) sugiere que el primer aspecto con respecto al IAF podría estar relacionado a una arquitectura de la canopia más compacta (plantas más bajas y hojas más erectas), y el segundo aspecto a un balance en la relación entre la panoja y la espiga (reducción de la partición de biomasa al órgano masculino o menor dominancia apical).

En un trabajo realizado por Luque *et al.* (2006), determinaron que la ganancia genética en el rendimiento del cultivo bajo mayor densidad de plantas, se realizó sólo bajo las condiciones de crecimiento mejoradas u óptimas, mientras que las ganancias en el potencial de rendimiento por planta, fue evidente en la misma condición y sin optimización de recursos. Además, Tokatlidis y Kountroubas (2003) concluyeron que programas de mejoramiento genético en maíz apuntaron al desarrollo de componentes a nivel de cultivo como el aumento de la tolerancia al estrés y en la captura y eficiencia de utilización de los recursos, pero no en el rendimiento potencial por planta. Esta tendencia sugiere que la mejora del potencial de rendimiento de grano por planta es una buena opción de mejoramiento genético, lo que puede ayudar a ampliar el límite superior de rendimiento de grano a través de las diferentes densidades de plantas (Luque *et al.*, 2006).

En el escenario contrario de baja densidad de plantas, Echarte *et al.* (2000) observaron mayor diferencia de valores de TCP_{PC} para los híbridos modernos frente a los más antiguos, debido a los mayores valores de NGP_L por unidad de TCP_{PC} y a la vez, la mayor cantidad de granos se explica por el mayor número potencial de granos por espiga debido al mayor número de hileras por espiga y mayor prolificidad. Sin embargo estos autores postulan que

probablemente el mayor NGP_L por unidad de TCP_{PC} en bajas densidades de plantas se debe a la mayor partición de materia seca a espiga.

Otro factor agronómico interesante de evaluar es la fecha de siembra, ya que el cultivo de maíz tiene una estrecha respuesta ecofisiológica ante este manejo agronómico, que también es una herramienta para variar la calidad ambiental para el cultivo. En un estudio publicado por Maddonni (2012) se evaluó una serie de parámetros que influyen en el rendimiento y calidad de grano como: daño por helada, duración del período de emergencia de plántulas, cantidad de precipitaciones a la siembra, totales y su balance al final del período crítico, y por último, probabilidad de golpe de calor en el período crítico y durante el llenado de granos. El objetivo de este estudio fue caracterizar los meses probables de siembra para el cultivo de maíz, según el sitio. Para el caso de la zona de Río Cuarto, Córdoba, resultó ser diciembre el mes con menores limitaciones climáticas para sembrar maíz, lo que le otorga mayor estabilidad en rendimiento, pero no potencialidad. Sin embargo, los maíces tradicionales no transgénicos sembrados en fechas tardías (noviembre-diciembre), son severamente afectados por estreses bióticos como por ejemplo barrenador del tallo (*Diatraea saccharalis*) y “Cogollero” (*Spodoptera frugiperda*) (Wiatrak *et al.*, 2004). Por ello, resulta interesante obtener datos de comportamiento ecofisiológico de este cultivo en siembras tardías variando prácticas de manejo y genotipos.

También, resultan relevantes las conclusiones del trabajo de Cantarero *et al.* (2000) que a su vez relaciona la fecha de siembra con la densidad de plantas. El número de granos por m^2 fue máximo en la mayor densidad en siembras de octubre, pero en siembras tardías lo fue a densidades intermedias. Siembras tardías y altas densidades redujeron el número de espigas por planta y de granos por espiga, pero no afectaron la morfogénesis de espiguillas en la espiga superior. La cantidad de radiación fotosintéticamente activa interceptada durante los 31 días alrededor de floración explica la variación en el número de granos por planta.

Además, Cantarero *et al.* (2000) determinaron que las siembras de diciembre deprimieron el rendimiento. En siembras tempranas es necesario un mayor número de plantas por m^2 para obtener altos rendimientos, pero no en las tardías. Por lo tanto, en Córdoba, el retraso de la fecha de siembra reduce el rendimiento en grano a partir de siembras de diciembre, por menor oferta de radiación solar durante el período crítico de determinación del número de granos. Por lo tanto, la respuesta de la cantidad de granos producidos frente a la densidad de plantas, dependió de la fecha de siembra. El mayor NGP_L , se obtuvo en la más alta densidad de la siembra más temprana (octubre), pero en siembras más tardías los máximos valores se obtuvieron con densidades más bajas. En síntesis, la densidad óptima para lograr el mayor número de granos disminuye a medida que se retrasa la fecha de siembra.

Otro indicador contundente fue que el NGP_L disminuyó con el aumento de la densidad, y esta disminución fue más importante en siembras tardías comparadas con las más tempranas (Cantarero *et al.*, 2000). El ambiente de radiación solar más favorable al que se ve sometido el cultivo en siembras tempranas, permite fijar un mayor número de granos por planta, aún en altas densidades, en las cuales el peso del grano disminuye. Esto podría ser explicado por una baja relación fuente-destino que no permite sostener la demanda de fotoasimilados por grano requeridos para su llenado en altas densidades, lo que determina finalmente su bajo peso. Por el contrario, la siembra tardía (diciembre), dispone de un ambiente lumínico subóptimo y por lo tanto se fija un menor número de granos. Esta situación determinaría una mayor relación fuente-destino que permite a los granos que se fijan en la más alta densidad alcanzar valores de peso por grano similares a los obtenidos en la más baja densidad, e incluso superiores a los logrados en la más alta densidad de la siembra temprana.

Por otro lado, resulta interesante citar el efecto de la disponibilidad de recursos del suelo en la capacidad de fijación de granos por planta, como otra herramienta agronómica a la cual responde el cultivo de maíz. Como en el caso del trabajo realizado por Ledri y Valentinuz (2010), en el cual evaluaron la capacidad de fijación de granos por unidad de TCP_{PC} a través de la utilización de densidades de semilla y dosis de fertilización nitrogenada, ambas de manera creciente con el objetivo de simular diferentes décadas de manejo agronómico, y por ende de disponibilidad de recursos, utilizando cuatro híbridos de trasfondo genético diferentes (templado precoz, templado completo, tropical y tropical por templado). Estos autores encontraron que con el aumento de la densidad y la fertilización, es decir con la mejora agronómica, aumentó la cantidad de granos fijados por unidad de TCP_{PC} .

Si bien los parámetros que definen la curva NGP_L frente a la TCP_{PC} son genotipo dependientes según lo antes dicho, Uhart y Andrade (1995) y D'Andrea *et al.* (2008) demostraron que la disponibilidad de nitrógeno, también cambia los parámetros de la curva, es decir que la variabilidad genotípica en la respuesta NGP_L para la TCP_{PC} es provocada por la disponibilidad de nitrógeno (N), el cual es uno de los componentes del suelo que puede variar entre diferentes zonas de manejo (Yassushi Inamasu *et al.*, 2011). D'Andrea *et al.* (2008) demostraron que esa variabilidad fue principalmente vinculada a los efectos en la partición de biomasa a la espiga más que a la disminución de la concentración de N en ese órgano. Sin embargo, para algunos híbridos de diferentes semilleros y años de lanzamiento, estos efectos difirieron fuertemente por otras condiciones que afectaron el crecimiento, producto de la diferencia climática interanual. Estos resultados indicaron que la disponibilidad de N afecta el patrón de partición de biomasa entre los órganos vegetativos y los reproductivos de algunos

híbridos, porque la concentración de N fue más estable en la espiga que en el resto de la planta. Diferencias genotípicas en partición de biomasa a la espiga fueron documentadas por varios autores (Tollenaar *et al.*, 1992; Echarte *et al.*, 2000; Echarte *et al.*, 2004; Paponov *et al.*, 2005), pero nunca asociado con un estrés abiótico promovido por la disponibilidad de N, como puede ocurrir en diferentes zonas de manejo (ZM).

Por lo tanto, resulta de interés evaluar el efecto genético y ambiental sobre la relación del número de granos por planta frente a la tasa de crecimiento por planta durante el período crítico del maíz.

I.3. Importancia del trabajo

Este trabajo final de grado se encuadra dentro del proyecto de investigación llevado adelante por la Cátedra de Producción de Cereales de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto, cuyo objetivo es generar información local proveniente de ensayos a campo, con el fin de estudiar la relación entre el NGP_L y la TCP_{PC} durante el período crítico del maíz con su dependencia genética y ambiental, para aportar a la comprensión sobre su comportamiento como cultivo extensivo en futuras recomendaciones agronómicas.

I.4. Hipótesis y objetivos

I.4.a. Hipótesis

La relación entre el número de granos por planta y la tasa de crecimiento por planta durante el período crítico del maíz depende principalmente del material genético y en menor medida del ambiente.

I.4.b. Objetivos

General

Evaluar el efecto genético y ambiental sobre la relación del número de granos por planta frente a la tasa de crecimiento por planta durante el período crítico del maíz.

Específicos

1. Analizar la relación entre número de granos por planta en función de la tasa de crecimiento por planta para cada híbrido en las distintas zonas de manejo, para evaluar la dependencia ambiental de esta relación.

2. Analizar la relación entre número de granos por planta en función de la tasa de crecimiento por planta para cada híbrido sin zonas de manejo para evaluar el efecto genético en esta relación

3. Determinar la densidad óptima económica de plantas de maíz para cada híbrido.

4. Analizar la relación entre el peso individual promedio de granos frente a la densidad de plantas para cada híbrido sin zonas de manejo, para evaluar el efecto del peso de granos en esta relación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1. Descripción del área de estudio

El ensayo a campo se realizó en la campaña 2013/14 en un establecimiento ubicado a 28 km al sur oeste de la ciudad de Río Cuarto, dentro del departamento que encabeza dicha ciudad de la Provincia de Córdoba. El establecimiento se encuentra en las coordenadas geográficas $33^{\circ} 18' 56,27''$ de latitud sur y $64^{\circ} 34' 22,78''$ de longitud oeste, a 3 km al sur de la localidad de Las Vertientes.

La ubicación del ensayo se ilustra en la Figura 1.

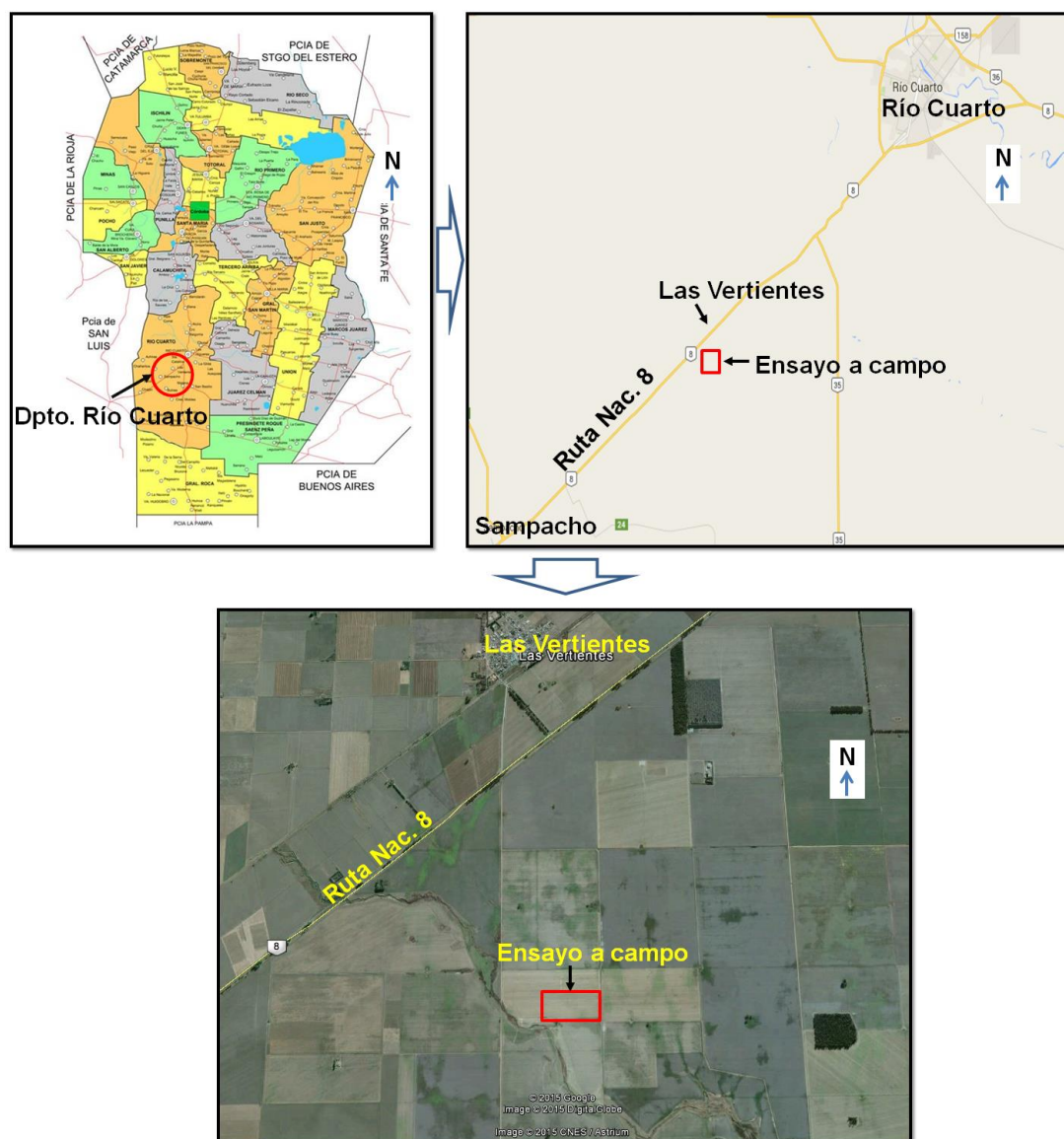


Figura 1. Mapa de la Provincia de Córdoba y localización del ensayo a campo.

Con respecto a la caracterización climática, la zona se describe como templado subhúmedo con invierno seco, presentando un régimen de precipitaciones monzónico, con una media anual de 785 milímetros. El período libre de heladas se extiende por aproximadamente 244 días, ya que la fecha media de primer helada es el 21 de mayo y la fecha media de la última helada es el 11 de septiembre (Georgas y Tassile, 2003). El mes más frío del año es julio, con una temperatura media de 8.5 °C, mientras que el mes más cálido es enero con una temperatura media de 22 °C (Meteorología Agrícola, Facultad de Agronomía y Veterinaria, UNRC).

Las precipitaciones ocurridas en la campaña productiva 2013/2014 en la que se realizó el trabajo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Registro mensual de precipitaciones (mm) de la campaña 2013/2014.

Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Total
0	0	0	54	117	160	126	167	56	33	18	1	732

Cabe aclarar que las precipitaciones fueron alrededor de 50 mm inferiores a los valores medios normales, con un invierno y comienzos de primavera muy secos, pero con buena recuperación a partir de noviembre y en especial durante el período crítico del cultivo sembrado.

De acuerdo a un trabajo realizado por Espósito *et al.* (2012b) en el mismo lote, el suelo correspondiente a la ZM de alta producción (AP) es un Haplustol údico con textura franca limosa a franca, relieve normal, escurrimiento medio y permeabilidad moderada, mientras que el de la ZM de baja producción (BP) es un Haplustol éntico con textura franca arenosa, relieve normal, escurrimiento rápido y permeabilidad moderadamente rápida.

II.2. Diseño experimental y tratamientos

En el ensayo a campo se sembraron los híbridos DK 692 MGRR y DK 7210 MGRR, ambos pertenecientes al semillero Dekalb, el día 11 de diciembre de 2013 a 0,525 cm de espaciamiento entre hileras.

La zonificación del lote se realizó en base a 6 mapas de rendimiento correspondientes todos a distintas campañas de maíz o soja, los cuales fueron previamente analizados con el programa Quantum Gis Wien 2.8.1 (Quantum GIS Development Team, 2011). Dicho procesamiento consistió, en una primera instancia, en la limpieza del mapa de rendimiento del lote completo, esto es, la eliminación de aquellos datos que por diferentes motivos generaban

una distorsión de los datos recolectados, es decir, que eran inconsistentes o incoherentes con la realidad (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer *et al.*, 2006). Luego, se analizó el mapa resultante a través del software “Management Zone Analyst (MZA)” (Mizzou-ARS, 2000) para obtener las zonas de manejo (ZM). Para ello, el programa fracciona al lote en grupos naturales a partir de clasificaciones o número de zonas especificadas mediante un análisis “cluster”, del cual se obtienen el índice de borrosidad (FPI), quien da una medida del grado de dispersión entre ambientes y sus valores pueden variar de 0 a 1. Valores cercanos a 0 indican clases distintas con escasa pertenencia a un mismo grupo mientras que valores cercanos a 1 indican clases distintas con un alto grado de pertenencia al mismo grupo. El programa también calcula el índice de clasificación entrópica normalizada (NCE) quien modela el grado de homogeneidad de las zonas. Valores bajos de éste, indican alto grado de organización y valores altos, bajo grado de organización. A continuación se presenta la Figura 2 con los índices calculados.

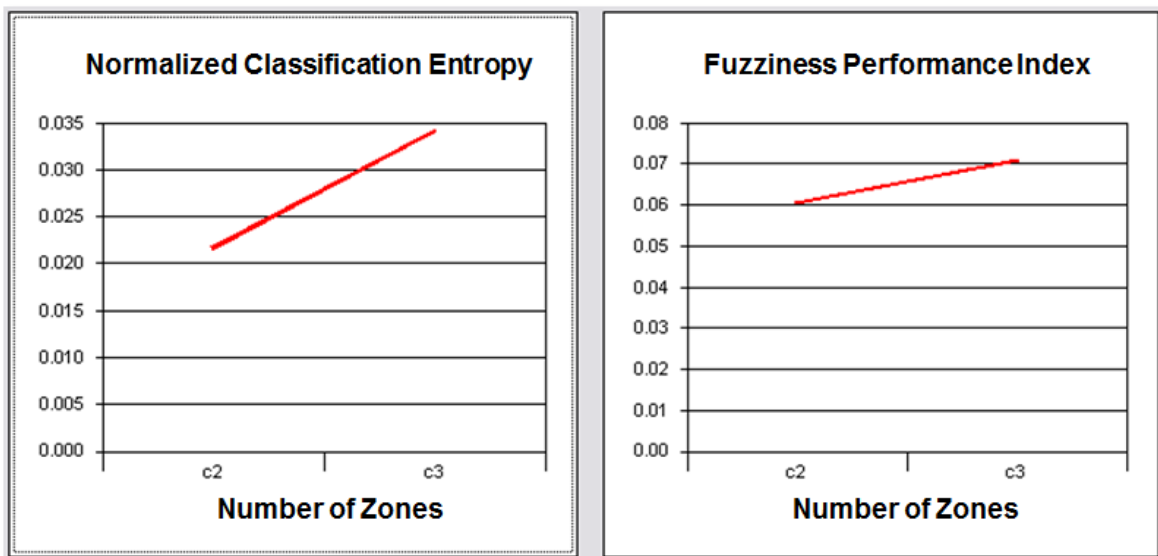


Figura 2. Representación gráfica del desempeño de los Índices FPI y NCE.

La conclusión de la representación gráfica es que el número óptimo de ambientes o zonas de manejo se produce cuando ambos índices están en su mínimo, para este caso, serán 2 zonas de manejo (Fridgen *et al.*, 2004).

El resultado de la zonificación del lote analizado se ilustra en la Figura 3.



Figura 3. Mapa de zonas de manejo obtenido con el programa QGIS.

El tipo de diseño experimental utilizado fue factorial en bloques completamente aleatorizados con un arreglo espacial en parcelas divididas atravesando las zonas de manejo delimitadas previamente, consistiendo los tratamientos en las siguientes franjas a la siembra donde el híbrido fue el factor principal y la densidad el factor secundario:

Híbrido que se presume más estable en el rango de densidades:

1. DK 692; 35.000 plt./ha
2. DK 692; 60.000 plt./ha
3. DK 692; 80.000 plt./ha
4. DK 692; 100.000 plt./ha
5. DK 692; 135.000 plt./ha

Híbrido que se presume menos estable en el rango de densidades:

6. DK 7210; 35.000 plt./ha
7. DK 7210; 60.000 plt./ha
8. DK 7210; 80.000 plt./ha
9. DK 7210; 100.000 plt./ha
10. DK 7210; 135.000 plt./ha

El objetivo de las distintas densidades fue lograr el efecto de competencia intraespecífica para variar la disponibilidad de recursos por planta, y de esta manera lograr diferentes niveles de TCP_{PC} y su influencia genética; y el objetivo de atravesar diferentes zonas de manejo, fue para probar la influencia ambiental en la relación NGP_L entre TCP_{PC} , como lo demostraron D`Andrea *et al.* (2008).

II.3. Mediciones en V_{13} , R_3 y R_6

Para construir la curva de número de granos por planta (NGP_L) frente a la tasa de crecimiento por planta (TCP_{PC}) para los dos híbridos y las distintas zonas de manejo, se determinó la producción de materia seca en los estadios V_{13} y R_3 (Ritchie y Hanway, 1997) que comprenden el período crítico del cultivo (Videla Mensegue *et al.*, 2014). Para esto, se recolectaron 5 muestras por parcela de 5 metros ($2,62 \text{ m}^2$) de longitud por surco con la condición que sean plantas en competencia perfecta, se pesaron en el campo y posteriormente, se tomó una alícuota de una planta, la cual se secó en estufa a 80°C , hasta peso constante.

La tasa del crecimiento del cultivo se determinó de acuerdo a la Ecuación I:

$$TCC (\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}) = \frac{MS R3 - MS V13}{DP} \quad [I]$$

Donde TCC es la tasa de crecimiento del cultivo; MS V_{13} es la materia seca (g m^{-2}) en el estadio V_{13} el cual fue el día 29 de enero del 2014; MS R_3 es materia seca (g m^{-2}) en R_3 el cual fue el día 28 de febrero del mismo año; y DP es la duración en días del periodo comprendido entre V_{13} y R_3 , el cual fue de 30 días.

La tasa de crecimiento por planta se obtuvo como el cociente entre la TCC para cada tratamiento y la densidad de plantas del mismo.

El peso de 100 granos (PG_{100}) se determinó en el estadio R_6 mediante muestreo de 8 repeticiones por tratamiento de 5 metros lineales en cada uno en los cuales se realizó el conteo manualmente de 5 muestras por cada repetición de 100 granos cada una, se pesó cada muestra y se determinó el PG_{100} promedio de cada repetición y luego el promedio por cada tratamiento.

El número de granos (NG) por superficie se determinó también en el estadio R_6 mediante el mismo muestreo de 8 repeticiones que para el caso anterior, donde a partir del PG_{100} promedio por repetición junto con el peso total de la misma, se calculó la cantidad total de granos por repetición correspondiente a $2,62 \text{ m}^2$ y luego se llevó a 1 m^2 de superficie. De esta manera se obtuvo el NG por superficie y el rendimiento para cada repetición y luego el promedio para cada tratamiento que luego se llevó a 1 ha. El número de granos por planta (NGP_L) se calculó como el cociente entre el NG por superficie y la densidad de plantas en cada tratamiento.

II.4. Cálculo de la relación NGP_L frente a TCP_{PC}

Una vez colectados todos los datos se estimó la relación entre el NGP_L y la tasa de crecimiento por planta (TCP_{PC}) mediante el ajuste de la Ecuación II (Andrade *et al.*, 1999).

$$NGP = a + \frac{b}{TCP} \quad [II]$$

Donde a y b son parámetros determinados mediante regresión no lineal con el uso del programa INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2011). NGP corresponde a los números de granos por plantas logrados (NGP_L) y TCP a la tasa de crecimiento por planta en el período crítico de definición del rendimiento para el cultivo de maíz (TCP_{PC}).

Luego la relación ecofisiológica obtenida entre el NGP_L frente a la TCP_{PC} , se calculó para ambos híbridos frente a distintas zonas de manejo, en la cual se obtuvo una función de tipo hiperbólica a través del análisis de regresión no lineal mediante el programa INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2011), descrito por la Ecuación III:

$$NGP_Z = a + \frac{b}{TCP} + c * Z + \frac{d}{Z * TCP} \quad [III]$$

Donde “a” es la máxima cantidad de granos fijados por planta para la mayor tasa de crecimiento por planta que se obtuvo y “b” es la pendiente, ambos son parámetros de la función

sobre la relación ecofisiológica entre NGP_L y TCP_{PC} ; “c” y “d” son los parámetros análogos de la relación ecofisiológica anterior pero asociados al corrimiento por las distintas zonas de manejo (Z). De esta manera se evaluó el efecto ambiental en la capacidad de fijación de granos del cultivo en su período crítico.

A continuación, la misma relación ecofisiológica anterior se aplicó para la comparación entre los dos híbridos que se presumen contrastantes en su comportamiento para fijar número de granos por planta frente a la misma tasa de crecimiento por planta, sin tener en cuenta las zonas de manejo, como lo describe la Ecuación IV:

$$NGP_H = e + \frac{f}{TCP} + g * H + \frac{i}{H * TCP} \quad [IV]$$

donde “e” y “f” son los análogos de “a” y “b” de la ecuación III; “g” e “i” son los parámetros análogos de la relación ecofisiológica anterior pero asociados al corrimiento por los distintos híbridos (H). Para ello se obtuvo una sola función que compara los dos híbridos elegidos sin zonas de manejo, de esta manera se evaluó el efecto genético en la capacidad de fijar granos del cultivo en su período crítico.

Cabe aclarar que tanto Z como H corresponden a un tipo de variable cualitativa con dos categorías representadas como variables “Dummy”, indicadoras o dicotómicas, las cuales sirvieron para identificar categorías o clase a la que pertenecen las observaciones e identificar el efecto de las dos zonas de manejo (Z) o de los dos híbridos (H) según corresponda la Ecuación III o IV respectivamente. Una restricción impuesta a las variables dummy es que su sumatoria debe ser igual a cero, lo que permite detectar el efecto ambiental por las diferentes zonas de manejo, o el efecto genético debido a los diferentes híbridos, para ser evaluados en términos de la interacción con la curva NGP_L frente a la TCP_{PC} y finalmente compararlos con la respuesta media (Bongiovanni, 2002).

II.5. Densidad óptima de plantas por híbrido

Con los datos de rendimiento de cada tratamiento del ensayo se procedió a estimar los parámetros de la ecuación V, la cual relaciona el rendimiento con la densidad de plantas para cada híbrido. De esta manera se determinó la función de producción del cultivo de maíz en relación a la densidad de plantas (Martínez Bologna *et al.*, 2014), donde se obtuvo un polinomio de segundo grado por cada híbrido:

$$\text{RTO} = a + b * D + c * D^2 + d * H + e * H * D + f * H * D^2 \quad [\text{V}]$$

donde RTO es el rendimiento en grano del maíz (kg ha⁻¹), a, b, c, d, e y f, son los parámetros de la ecuación de regresión, D es la densidad de plantas (plantas ha⁻¹), H se refiere a las variables “dummy” para cada híbrido (Martínez Bologna *et al.*, 2014).

Posteriormente, se determinó la función de producción para obtener un óptimo económico de densidad de plantas (DOE_p) o la cantidad de plantas necesarias para alcanzar el máximo retorno económico para cada híbrido (H), a través de una optimización tradicional de la Ecuación V y de la fórmula de margen bruto parcial correspondiente a la Ecuación VI, obteniendo la Ecuación VII como primera derivada de las funciones anteriores (Dillon y Anderson, 1990):

$$\pi = \text{PM} * (a + b * D + c * D^2 + d * H + e * H * D + f * H * D^2) - \text{PS} * D \quad [\text{VI}]$$

$$\text{DOE}_p = \frac{\left(\frac{\text{PS}}{\text{PM}}\right) - b - e * H}{2 * c + 2 * f * H} \quad [\text{VII}]$$

donde π es el retorno económico a la densidad, PM es el precio del Maíz (\$ kg⁻¹), a, b, c, d, e y f, son los parámetros de la ecuación de regresión, D es la densidad de plantas (plantas ha⁻¹), H se refiere a las variables “dummy” para híbrido, y PS: precio de la planta determinado por la relación entre el precio de la semilla con un coeficiente de logro del 90% (\$ planta⁻¹).

La interpretación de esta función tiene como objetivo que el uso de una menor cantidad de insumo estaría sobrepagando ese insumo, y que una mayor cantidad de insumo no alcanzaría a cubrir su costo (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006).

Se determinó el precio para el grano de maíz de 1,1042 \$ kg⁻¹, según el precio promedio mensual del mercado físico de Abril del 2014 (1.415,63 \$ Tn⁻¹), para la Cámara Arbitral de Cereales de Rosario (Pontón, 2014), con un gasto de comercialización y flete del 22%, por lo cual es un precio de venta neto. El precio de las plantas fue de 0,0262 \$ planta⁻¹ y 0,0249 \$ planta⁻¹ para el híbrido DK 7210 MGRR y DK 692 MGRR respectivamente, los cuales se determinaron a través del precio de cada bolsa de 80.000 semillas (DK 7210 MGRR 235,95 U\$S

bolsa⁻¹ y DK 692 MGRR 223,85 U\$\$ bolsa⁻¹), con una cotización del dólar estadounidense correspondiente al promedio del mes de abril según el Banco Central de la República Argentina para comprador/vendedor (Pontón, 2014) de 8,0012 \$ U\$\$⁻¹, y con un coeficiente de logro de implantación estimado del 90%.

El objetivo fue calcular densidad óptima económica de plantas para cada híbrido según la relación de precios entre la planta de ambos genotipos y el grano de maíz.

II.6. Cálculo de la relación peso de grano frente a la densidad de plantas

Con los datos de peso de 100 granos (PG₁₀₀) de cada tratamiento del ensayo se procedió a estimar los parámetros de la Ecuación VIII, la cual relaciona el PG₁₀₀ con la densidad de plantas para cada híbrido, el cual se obtuvo un polinomio de primer grado por cada híbrido (Echarte *et al.*, 2000):

$$PG_{100} = a + b * D + c * H + d * H * D \quad [VIII]$$

donde a, b, c y d son los parámetros de la ecuación de regresión, D es la densidad de plantas (plantas ha⁻¹), H se refiere a las variables “dummy” para cada híbrido (Martínez Bologna *et al.*, 2014).

El objetivo fue evaluar el efecto genético de cada híbrido en la relación del peso de granos frente a la densidad de plantas.

III. RESULTADOS

III.1. Relación entre el NGP_L y la TCP_{pc} en las distintas zonas de manejo.

Los parámetros de la Ecuación I obtenidos mediante el análisis de regresión no lineal para la relación entre el NGP_L frente a la TCP_{pc} para los híbridos Dekalb DK 692 y el Dekalb DK 7210 en las zonas de manejo, se presentan en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Análisis estadístico de la regresión no lineal para el modelo que se ajusta a la relación entre NGP_L frente a la TCP_{pc} para el híbrido Dekalb DK 692 con zonas de manejo.

Híbrido Dekalb DK 692 con zonas de manejo			
Variable	N	R²	
NGP	61	0,52	
Parámetros	Est.	E.E.	p-valor
a	977,37	43,33	<0,0001
b	-867,95	107,43	<0,0001
c	37,40	43,33	0,3917
d	-49,90	107,43	0,6441

NGP: número de granos por planta; N: número de muestras; R²: coeficiente de regresión; Est.: estadístico o valor de los parámetros del modelo; E.E.: error estándar; p-valor: valor de significación “p” para la prueba de hipótesis.

Tabla 3. Análisis estadístico de la regresión no lineal para el modelo que se ajusta a la relación entre NGP_L frente a la TCP_{pc} para el híbrido Dekalb DK 7210 con zonas de manejo.

Híbrido Dekalb DK 7210 con zonas de manejo			
Variable	N	R²	
NGP	50	0,52	
Parámetros	Est.	E.E.	p-valor
a	735,28	24,29	<0,0001
b	-415,52	60,87	<0,0001
c	35,86	24,29	0,1466
d	-81,43	60,87	0,1876

NGP: número de granos por planta; N: número de muestras; R²: coeficiente de regresión; Est.: estadístico o valor de los parámetros del modelo; E.E.: error estándar; p-valor: valor de significación “p” para la prueba de hipótesis.

Como se puede observar en las Tablas 2 y 3, los parámetros que corresponden al corrimiento por zonas de manejo (Z) no fueron estadísticamente significativos, a diferencia de los parámetros de la función central (“a” y “b”), por ende “c” y “d” no se incluyeron en el modelo que describe la fijación del NGP_L frente a la TCP_{PC} de la definición del rendimiento del cultivo de maíz para los híbridos Dekalb DK 692 y el DK 7210, como se expresa en las Ecuaciones IX y X respectivamente.

$$NGP_{Z; DK 692} = 977,37 + \frac{-867,95}{TCP} \quad [IX]$$

$$NGP_{Z; DK 7210} = 735,28 + \frac{-415,52}{TCP} \quad [X]$$

Estas funciones indican que la función del NGP_L dependiente de la TCP_{PC} no está condicionada por las diferentes zonas de productividad del lote.

Para ambos híbridos en el análisis estadístico de regresión no lineal, los valores de R^2 se consideraron con buen ajuste, ya que es un ensayo a campo y tiene mucha influencia la imprevisibilidad ambiental aportada por el clima, el suelo y la historia del lote donde fue emplazado el experimento, y además se considera que la cantidad de datos (valor de N) fue significativo para otorgarle confiabilidad predictiva a ambos modelos.

Además se obtuvo la Matriz de correlación de las estimaciones sobre los distintos parámetros del modelo asignado como se muestra en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4. Matriz de correlación de las estimaciones para el híbrido Dekalb DK 692 con zonas de manejo.

Híbrido Dekalb DK 692 con zonas de manejo				
Parámetros	A	B	C	D
a	1,00			
b	-0,94	1,00		
c	0,05	-0,02	1,00	
d	-0,02	-0,01	-0,94	1,00

Tabla 5. Matriz de correlación de las estimaciones para el híbrido Dekalb DK 7210 con zonas de manejo.

Híbrido Dekalb DK 7210 con zonas de manejo				
Parámetros	A	B	C	D
a	1,00			
b	-0,90	1,00		
c	0,33	-0,40	1,00	
d	-0,40	0,49	-0,90	1,00

Como se puede observar es una matriz que contiene el valor 1 sobre la diagonal principal y los coeficientes de correlación de Pearson entre cada par de variables como elementos fuera de la diagonal principal. El coeficiente de correlación es una medida de la magnitud de la asociación entre dos variables que no depende de las unidades de medida de las variables originales. El signo indica la dirección de la asociación (Balzarini *et al.*, 2008), como es de destacar para ambos híbridos, en los parámetros “a” y “b” se obtuvo una asociación negativa, en cambio para las variables “c” y “d”, no tiene sentido analizar la asociación entre ellas ni de estas con “a” y “b”, ya que “c” y “d” no fueron significativas y corresponden al corrimiento por zonas de manejo (Tabla 4 y 5).

Finalmente se presenta la relación entre NGP_L frente a los de TCP_{pc} para cada híbrido como se muestra a en las Figuras 4 y 5.

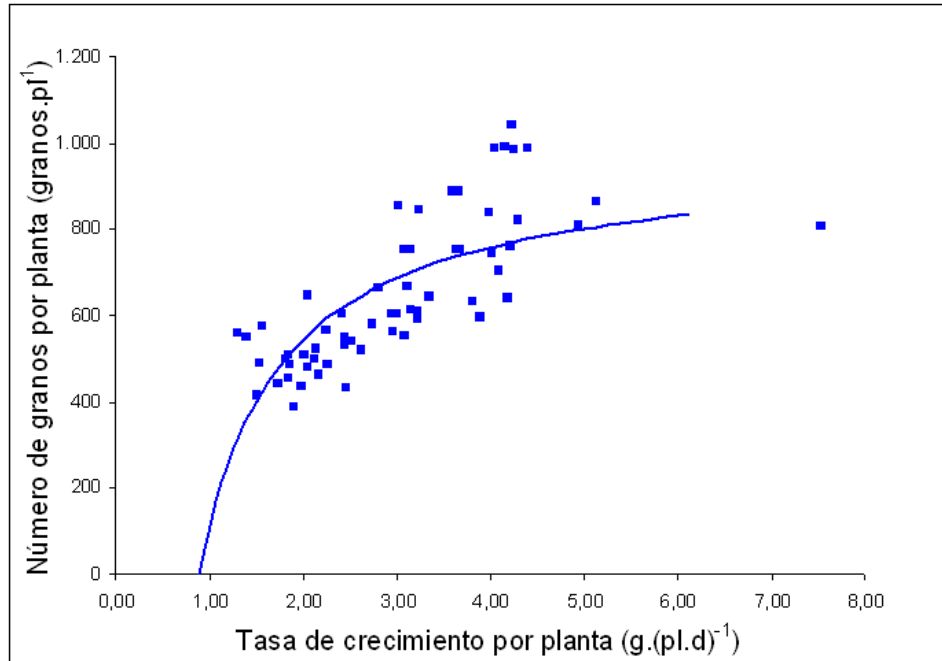


Figura 4. NGP_L en función de la TCP_{pc} para el híbrido DK 692 en ambas zonas de manejo.

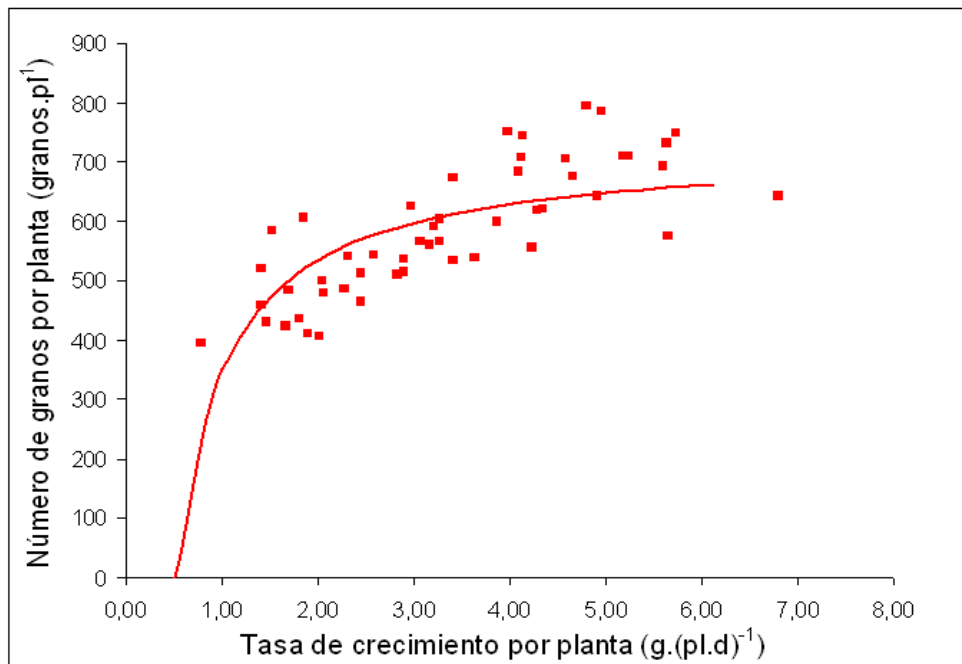


Figura 5. NGP_L en función de la TCP_{pc} para el híbrido DK 7210 en ambas zonas de manejo.

Como se aprecia en las figuras anteriores, los datos se ajustan al modelo planteado. Con respecto a la Matriz de correlación de las estimaciones y a los gráficos obtenidos para cada híbrido, los parámetros “a” y “b” se relacionan negativamente, por lo cual se puede interpretar que cuanto mayor es la altura máxima a la que llega la curva, característica representada por el

parámetro “a”, menor será la pendiente, es decir el valor de “b”. Lo cual indicaría que, mientras mayor sea la capacidad para fijar NGP_L en la máxima TCP_{pc} la curva será más suavizada o decaerá el NGP_L de forma más paulatina a medida que disminuya la TCP_{pc} .

III.2. Evaluación de híbridos sin considerar las zonas de manejo.

En este apartado, se presentan los resultados del análisis estadístico para la relación NGP_L frente a la TCP_{pc} para los híbridos DK 692 y DK 7210 sin considerar las zonas de manejo, según se reflejó en la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis estadístico de la regresión no lineal para el modelo que se ajusta a la relación entre NGP_L frente a la TCP_{pc} para los híbridos Dekalb DK 692 y DK 7210 sin zonas de manejo.

Híbridos sin zona de manejo			
Variable	N	DK 692 R²	DK 7210 R²
NGP	111	0,57	0,61
Parámetros	Est.	E.E.	p-valor
e	848,20	23,69	<0,0001
f	-617,97	57,83	<0,0001
g	-124,79	23,69	<0,0001
i	239,16	57,83	0,0001

NGP: número de granos por planta; N: número de muestras; R²: coeficiente de regresión; Est.: estadístico o valor de los parámetros del modelo; E.E.: error estándar; p-valor: valor de significación “p” para la prueba de hipótesis.

Como se puede observar, todos los parámetros fueron estadísticamente significativos y el valor de R² se considera con buen ajuste por las mismas razones que lo explicado anteriormente. A partir de estos se construyó la función de respuesta con el corrimiento por híbrido como se muestra en la Ecuación XI:

$$NGP_H = 848,20 + \frac{-617,97}{TCP} + (-124,79) * H + \frac{239,16}{H * TCP} \quad [XI]$$

El análisis de los parámetros con respecto al caso anterior, indica que todos los parámetros del modelo fueron estadísticamente significativos, es decir que el material genético

tiene influencia sobre la capacidad de fijar granos por planta a partir de su tasa de crecimiento individual, por lo tanto los híbridos tuvieron comportamiento diferencial en cuanto a la relación NGP_L frente a la TCP_{pc} para los mismos ambientes o zonas de manejo.

También se obtuvo la Matriz de correlación de las estimaciones de los parámetros del modelo, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Matriz de correlación de las estimaciones para los híbridos Dekalb DK 692 y DK 7210 sin zonas de manejo.

Híbridos sin zona de manejo				
Parámetros	E	F	G	I
e	1,00			
f	-0,91	1,00		
g	-0,22	0,25	1,00	
i	0,25	-0,26	-0,91	1,00

Resulta interesante analizar las asociaciones entre los distintos parámetros dentro de cada submodelo, es decir entre “e” y “f” para el submodelo NGP_L frente a la TCP_{pc} donde las asociaciones son negativas; y entre “g” e “i” para el submodelo para el corrimiento por los dos híbridos, donde también presentan una asociación negativa, teniendo el mismo comportamiento que para el caso anterior. A su vez hay una asociación negativa entre los parámetros análogos para cada submodelo, ya que se corresponde con la variable “dummy” de cada híbrido (H) que es un factor igual a 1 donde el signo negativo o positivo define para qué híbrido se corresponde la función, de esta manera se cancelan los signos para ambos híbridos, quedando siempre positivo.

Por último, se analizó la relación obtenida a partir de los datos del ensayo, para la relación NGP_L frente a la TCP_{pc} para los híbridos DK 692 y DK 7210 para la misma zona de manejo, como se muestra en la Figura 6:

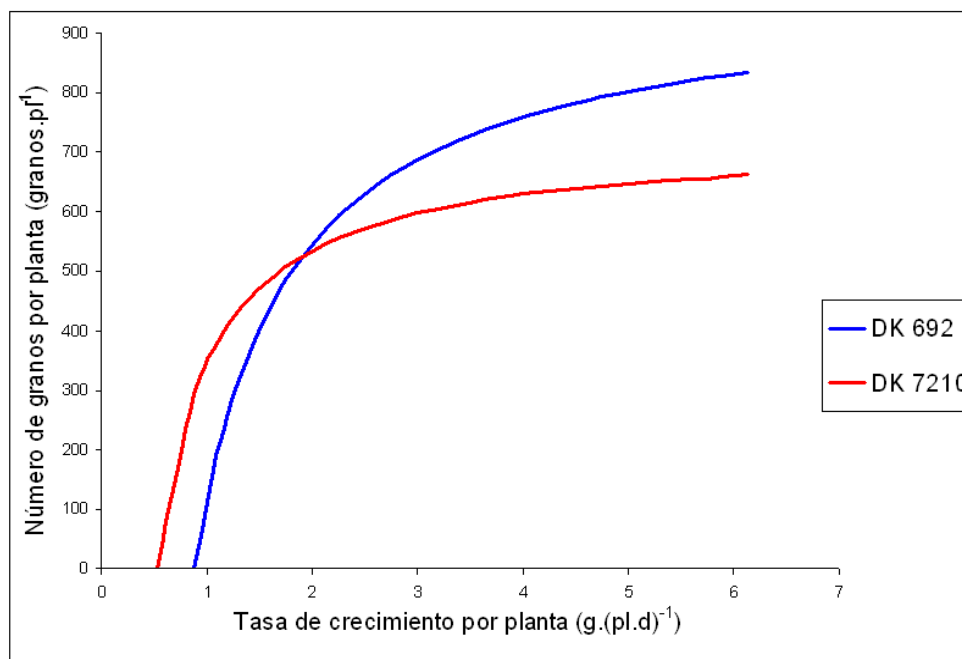


Figura 6. NGP_L en función de la de TCP_{pc} para los híbridos DK 692 y DK 7210.

Se puede observar que el híbrido más recientemente liberado al mercado (DK 7210) posee un menor umbral de esterilidad, es decir el menor valor de TCP_{pc} que no fija ningún grano por planta. En cambio el híbrido DK 692 tiene un mayor valor del techo de fijación de granos por planta, es decir el valor de NGP_L para la máxima TCP_{pc} . A su vez la pendiente de la curva es mayor para el híbrido DK 7210, presentando una curva más suave el material contrario, lo que da una idea de la sensibilidad o respuesta a la densidad de plantas, siendo el de mayor pendiente el que responde en mayor medida a la densidad, por lo cual resulta interesante evaluar estos materiales a nivel de cultivo con la función de producción de maíz según el estand de plantas.

III.3. Función de producción del maíz según la densidad de plantas y densidad óptima económica de plantas para cada híbrido.

Para calcular la densidad óptima económica de plantas se realizó el análisis estadístico del modelo de respuesta del rendimiento del maíz dependiente de la densidad de plantas para evaluar si difiere entre híbridos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8, con el objetivo de encontrar los valores de los parámetros que explican la función de producción.

Tabla 8. Análisis de regresión no lineal para la función de producción de maíz que se ajusta a los híbridos Dekalb DK 692 y DK 7210 sin zonas de manejo.

Rendimiento con híbrido			
Variable	N	R²	
RTO	110	0,8	
Parámetros	Est.	E.E.	p-valor
a	4.985,3	419,11	<0,0001
b	0,13	0,01	<0,0001
c	-6,4E-07	5,9E-08	<0,0001
g	409,76	419,11	0,3305
e	-0,01	0,01	0,4643
f	3,3E-08	5,9E-08	0,5780

RTO: rendimiento de granos de maíz; N: número de muestras; R²: coeficiente de regresión; Est.: estadístico o valor de los parámetros del modelo; E.E.: error estándar; p-valor: valor de significación “p” para la prueba de hipótesis.

Como puede apreciarse en la Tabla 8 los parámetros correspondientes al corrimiento por híbrido no fueron estadísticamente significativos, lo cual significa que la función de producción de grano de maíz dependiente de la densidad de plantas no es afectada por el material genético como se muestra en la Figura 7. A partir de estos parámetros se estableció la función de respuesta del maíz a la densidad de plantas como se muestra en la Ecuación 9.

$$\text{RTO}_{\text{DK 692; DK 7210}} = 4.985,3 + 0,13 * D + (-6,4E-07) * D^2 \quad \text{[XII]}$$

A continuación se presentan los resultados de las densidades óptimas agronómica y económicas obtenidas a partir de la Ecuación 9 y sus derivadas correspondientes.

Tabla 9. Densidades óptima agronómica y económica (DOAp y DOEp respectivamente) (plt. ha^{-1}) y rendimientos esperados (RTO) (kg. ha^{-1}) para cada caso y para los híbridos DK 692 y DK 7210.

Variable	DK 692	DK 7210
DOAp	101.563	
RTO	11.587	
DOEp	83.962	83.011
RTO	11.389	11.367

Y finalmente se obtuvo la curva parabólica típica de la función de respuesta de la producción de granos de maíz según la densidad de plantas como se muestra en la Figura 7.

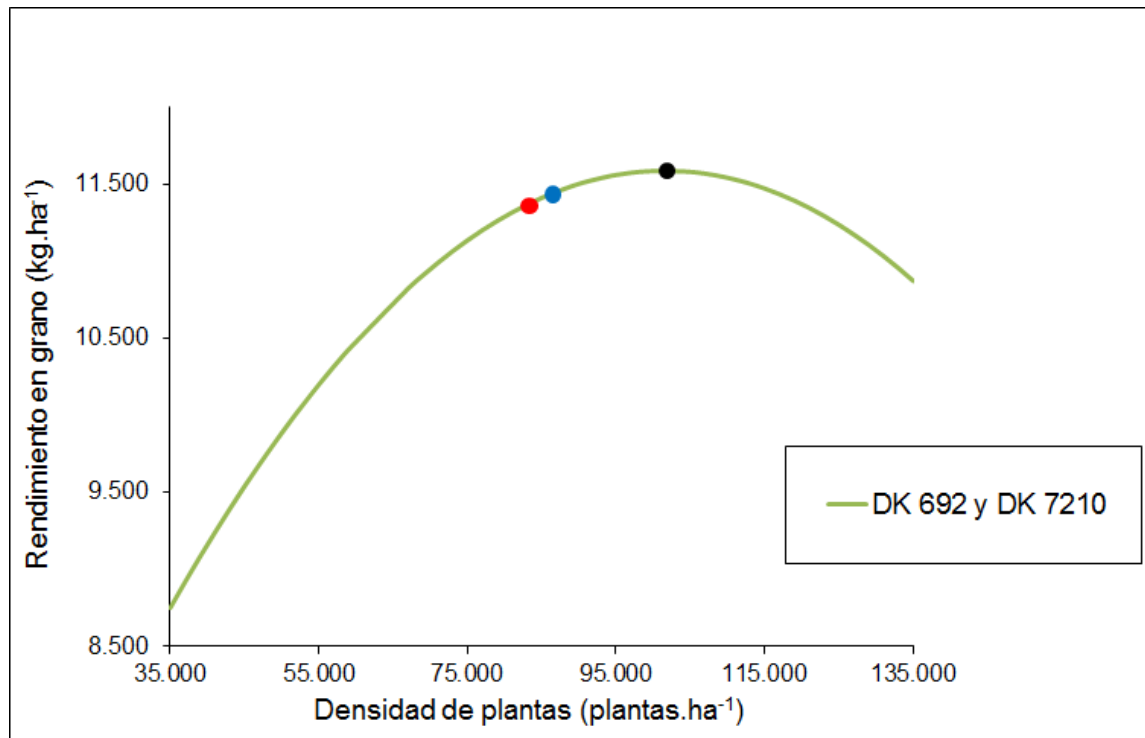


Figura 7. Rendimiento en granos (kg ha^{-1}) en función de la densidad de plantas (línea verde), densidad óptima económica de plantas (DOEp) (punto azul y rojo, DK 692 y DK 7210 respectivamente), densidad óptima agronómica de plantas (DOAp) (punto negro) y rendimientos esperados para cada caso y para los híbridos DK 692 y DK 7210.

Como se puede observar, la densidad óptima económica de plantas para ambos híbridos fueron menores a la densidad óptima agronómica de plantas, ya que esta última no tiene en cuenta el retorno económico que genera la producción de grano de maíz, por lo que una mayor densidad quizás no alcance a cubrir los costos o al menos no sería la óptima, además de que la mayor cantidad de plantas no generaría aumentos significativos en el rendimiento (Tabla 9). Por

otro lado la densidad óptima económica entre híbridos fue diferente, ya que el material DK 7210 tiene mayor costo por unidad, por lo que una mayor densidad generaría un retorno por debajo del óptimo.

III.4. Peso de grano frente a la densidad de plantas para cada híbrido.

Debido a que no se presentó influencia del material genético en la función de producción del maíz como se esperaba por la respuesta positiva del efecto híbrido en la relación NGP_L frente a la TCP_{pc} , se evaluó la incidencia del otro componente del rendimiento, el comportamiento del peso de grano en función de la densidad. Para lo cual se realizó el análisis estadístico de regresión lineal el cual se puede observar en la Tabla 9.

Tabla 10. Análisis de regresión lineal para la relación peso de grano frente a la densidad de plantas que se ajusta a los híbridos Dekalb DK 692 y DK 7210 sin zonas de manejo.

Peso de grano con híbrido			
Variable	N	DK 692 R²	DK 7210 R²
PG₁₀₀	134	0,49	0,72
Parámetros	Est.	E.E.	p-valor
a	27,08	0,37	<0,0001
b	-6,1E-05	4,2E-06	<0,0001
c	-2,3E-05	4,2E-06	<0,0001
e	2,38	0,37	<0,0001

PG₁₀₀: peso de grano; N: número de muestras; R²: coeficiente de regresión; Est.: estadístico o valor de los parámetros del modelo; E.E.: error estándar; p-valor: valor de significación “p” para la prueba de hipótesis.

Se observó que los parámetros correspondientes al corrimiento por híbrido fueron significativos, lo cual significa que la función de peso de grano de maíz dependiente de la densidad de plantas es afectada por el material genético. En función de los valores de los parámetros obtenidos en el análisis anterior se construyó la Ecuación XIII que refleja con un alto valor de ajuste ($R^2 = 0,72$) el modelo que explica en gran medida la relación entre peso de grano y densidad de plantas.

$$PG_{DK\ 692;\ DK\ 7210} = 27,08 + (-6,1E-05) * D + -2,3E-05 * H * D + (-2,38) * H \quad [XIII]$$

Finalmente se presenta en la Figura 8 la respuesta del peso de grano para cada híbrido según la función obtenida anteriormente.

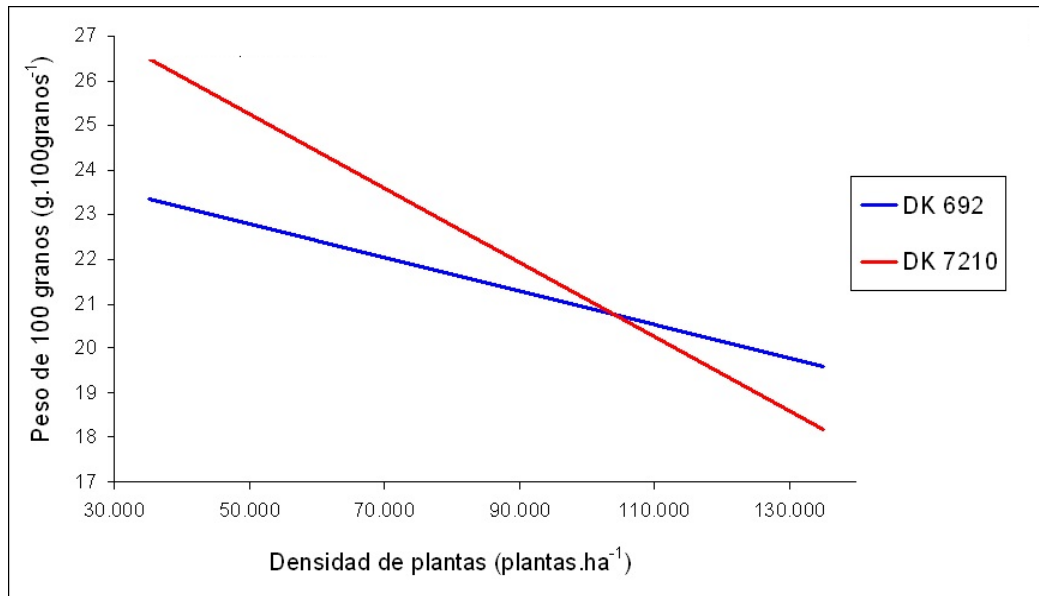


Figura 8. Peso de grano del maíz (g) en función de la densidad de plantas para los híbridos DK 692 y DK 7210.

En la Figura 8 se puede observar una menor pendiente para el híbrido considerado más antiguo (DK 692) según su momento de liberación al mercado, lo que agrónomicamente significa que el peso del grano se mantiene más estable en un amplio rango de densidad de plantas frente al material más moderno (DK 7210) quien disminuye fuertemente con el aumento de la densidad de plantas, siendo estas tendencias estadísticamente diferentes entre sí como se mencionó anteriormente.

IV. DISCUSIÓN:

IV.1. Respuesta de la fijación del NGP_L frente a la TCP_{pc} para el período crítico frente a las distintas zonas de manejo.

La respuesta del NGP_L frente a TCP_{pc} encontrada coincide con lo hallado en estudios previos por otros autores (Andrade *et al.*, 1996, 1999, 2002; Maddonni y Otegui, 2004; Satorre *et al.*, 2003; D'Andrea *et al.*, 2008; Talano *et al.*, 2010).

Las diferencias edáficas entre zonas de manejo, deberían explicar diferencias en productividad. La mayor capacidad de retención hídrica y la mejor capacidad nutricional del suelo de la zona AP (alta producción) le ofrecen al cultivo de maíz una mejor condición de crecimiento de la biomasa aérea y radical que se traducen en un mayor rendimiento (Espósito *et al.* 2012b).

Sin embargo, los resultados del análisis estadístico con respecto a los parámetros que corresponden al corrimiento por las zonas de manejo ("C" y "D"), los cuales no fueron estadísticamente significativos para los materiales (DK 692 y DK 7210), lo que agrónomicamente significa que la función de fijación del NGP_L dependiente de la TCP_{pc} para ambos híbridos no difiere por la variabilidad ambiental, en contraposición a lo demostrado por D'Andrea *et al.* (2008), quienes demostraron la existencia de la variabilidad genética en la respuesta sobre la relación NGP_L y TCP_{pc} promovida por la disponibilidad de nitrógeno, es decir por una de las propiedades que cambiaría con las distintas zonas de productividad.

Además, es posible que por menor cociente fototermal, producto de la fecha de siembra tardía (Maddonni, 2009), puede disminuir las diferencias en las respuestas de las plantas por no expresar su potencial en rendimiento individual y por ende enmascarar las posibles diferencias que se produzcan entre ambientes diferentes.

IV.2. Comparación entre híbridos sin zonas de manejo.

Como afirman diversos autores, la relación NGP_L dependiente de la TCP_{pc} está fuertemente influenciada por el material genético, determinando el formato de la curva por el cambio del valor de los parámetros que componen la Ecuación XI (Andrade *et al.*, 1996, 1999, 2002; Maddonni y Otegui, 2004; Satorre *et al.*, 2003; D'Andrea *et al.*, 2008; Talano *et al.*, 2010).

Se observó que el híbrido más moderno (DK 7210) tiene mayor capacidad para fijar granos cuando la TCP_{pc} es baja debido a una alta competencia, al igual que lo observado por Echarte *et al.* (2000), típico de los planteos de alto rendimiento por utilización de densidades más altas frente a los planteos convencionales. De la misma manera, frente a estrés por falta de agua o baja fertilidad del suelo que disminuyan la calidad ambiental (Andrade *et al.*, 2002), debido a su menor umbral de esterilidad para fijar granos (Tokatlidis y Kountroubas, 2003), se esperaría que el DK 7210 pueda sostener más el rendimiento frente al DK 692.

Por otra parte, se evidencia la ganancia en tolerancia para altas densidades debido al mejoramiento genético para aumentar el rendimiento en grano, a través de la disminución del número de plantas estériles y el aumento de NGP_L (Duvick, 2005). Entonces, si bien el híbrido DK 7210 no expresa su potencial de fijación de granos en baja competencia o alta calidad ambiental, depende más de la densidad de siembra que el material DK 692, por lo que para obtener mayores rendimientos para el material más nuevo, sólo se logrará con mayores densidades, típico de planteos de alta producción bajo riego y fertilización balanceada. Andrade *et al.* (1999) explica que para esta misma densidad de plantas que provocan bajas tasas de crecimiento, el mayor NGP_L se debe a que los híbridos modernos tienen un menor umbral de esterilidad por la mayor pendiente inicial en la relación NGP_L frente a TCP_{PC} .

Pero en el caso extremo, cuando las tasas de crecimiento son altas, es decir que las condiciones por diversos factores son muy benévolas, el material más antiguo (DK 692) presenta mayor potencial de expresión de su genotipo en términos de fijación de número de granos por planta, por lo cual el techo morfogénico de fijación de granos es mayor (Echarte *et al.*, 2000; Tokatlidis y Kountroubas, 2003).

IV.3. Función de producción del maíz según la densidad de plantas y densidad óptima económica de plantas para cada híbrido.

La respuesta del rendimiento en grano de maíz por superficie según la densidad de plantas obtenida fue del tipo parabólica o también llamado de tipo óptima (Andrade *et al.*, 1996; Tollenaar y Wu, 1999; Echarte *et al.*, 2000; Bavec y Bavec, 2001; Sangoi *et al.*, 2002; Tokatlidis y Kountroubas, 2003; Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006; Diez, 2012; Scaramuzza *et al.*, 2014).

Comparando con el análisis anterior donde hubo diferencia estadísticamente significativa entre híbridos para la relación NGP_L frente a la TCP_{pc} , no fue suficiente para expresarlo en el rendimiento por superficie al igual que Talano *et al.* (2010), es decir que no se

encontró una dependencia en el material genético para la respuesta de la función de producción de granos de maíz como rendimiento por hectárea dependiente de la densidad de plantas, y por ende la densidad de plantas óptima económica fue la misma para ambos híbridos. En contraposición, los hallazgos de Tokatlidis y Kountroubas (2003) demostraron no sólo lo contrario, sino que además los híbridos más modernos tienen una densidad óptima agronómica más alta y en un rango más estrecho que sus antecesores. Un factor que puede explicar la falta de respuesta por genotipo, es la menor calidad ambiental en el período crítico debido a la fecha de siembra tardía (Maddonni, 2009), donde cada híbrido posiblemente no expresó su potencial. Otro factor podría ser la compensación por peso individual de granos, donde el híbrido que produjo mayor número de granos obtendría una compensación por menor peso y viceversa el otro híbrido, por lo cual resulta de interés analizar este parámetro.

IV.4. Peso de grano frente a la densidad de plantas para cada híbrido.

Si bien el número de granos por planta es el componente mayoritario del rendimiento, fue necesario evaluar el peso individual (Echarte *et al.*, 2000) ante la falta de evidencia estadística de la respuesta del parámetro numérico cuando se llevó a nivel de cultivo.

La disminución en la densidad de plantas produce incrementos en el peso del grano, pero el cultivo de maíz tiene escasa posibilidad de ajustes en el rendimiento a través de esta característica (Andrade *et al.*, 1996). Sin embargo, en la explicación del efecto híbrido en la relación de NGP_L frente a la TCP_{pc} que no se tradujo en la función de producción por la densidad de plantas, puede estar explicada por el peso de granos. Es por ello que se coincidió con lo expuesto por Borrás *et al.* (2009), quien dice que existe una amplia variabilidad genética en el peso de granos como consecuencia de diferencias en las tasas de crecimiento de los mismos o duración del periodo efectivo de llenado. Entonces, en la condición de estrés ya sea por alta competencia a causa de la alta densidad de plantas o por mala calidad ambiental donde en la relación NGP_L frente a la TCP_{pc} mostró mejor comportamiento el DK 7210, mostrando un umbral de esterilidad inferior, el material DK 692 en las misma condición extrema presentó mayor peso de grano. Por el otro lado, en la condición opuesta de bonanza a causa de una densidad de plantas baja o excesiva calidad ambiental, en la relación NGP_L frente a la TCP_{pc} mostró mejor comportamiento el híbrido más antiguo (DK 692) para el techo morfogenético de fijación de granos por planta a la máxima tasa de crecimiento por planta, pero en forma contraria el híbrido DK 7210 en la misma condición obtuvo mayor peso de grano. Por lo cual se cree que hay una compensación en el peso de grano para la misma condición de oferta ambiental que

anula el efecto híbrido (genotípico) de la relación NGP_L frente a la TCP_{pc} que se traslada a la función de producción por hectárea de maíz dependiente de la densidad de plantas. Esto concuerda con Tokatlidis y Kountroubas (2003) ya que los híbridos modernos mejoraron su rendimiento debido a la mayor dependencia de la densidad de plantas que de la productividad individual, como es el caso del peso de grano que es inferior, lo que le otorga menor estabilidad en el rendimiento al híbrido más moderno y mayor dependencia de la densidad de plantas logradas. Otra explicación podría ser debido a la mayor estabilidad en el peso de granos del DK 692 que produjo una compensación al menor número de granos, concordando con lo postulado por Espósito *et al.* (2015). Caso inverso para el DK 7210 donde produjo mayor estabilidad en la función por NGP_L , es decir más estabilidad en el número de granos, lo que explica la compensación en ambos híbridos, lo cual concuerda con lo postulado por Talano *et al.* (2010).

Por otro lado, los resultados obtenidos concuerdan en parte con lo demostrado por Echarte *et al.* (2000), ya que en sus resultados el híbrido más moderno obtuvo menor peso individual de granos en todas las densidades, frente a este trabajo donde sólo se obtuvo menor peso a mayores densidades.

V. CONCLUSIÓN

Se confirmó que el análisis de la cantidad de granos producidos por planta (NGP_L) en relación a la tasa de crecimiento individual (TCP_{PC}) en el período crítico de definición del rendimiento, es un excelente método que representa la capacidad biológica que tiene el cultivo de maíz y permite explicar el rendimiento en granos. Además, se vio el potencial que tiene esta relación ecofisiológica como parámetro para determinar los componentes que expliquen las consecuencias del mejoramiento genético que se realizó sobre este cultivo en las últimas casi 3 décadas, el cual se concluye que fue debido al aumento de la estabilidad de rendimiento y en el mayor número de granos por unidad de tasa de crecimiento en condiciones adversas.

Por otro lado, se confirmó el efecto genético en la relación entre el NGP_L frente a la TCP_{PC} y no se encontró la influencia del efecto ambiental debido a las diferentes zonas de manejo, por lo cual para esta fecha de siembra, lote y año en particular, la función de producción individual de granos está explicada por la genética y no por el ambiente. Además cabe destacar el efecto de la fecha de siembra como posible causa de la falta de respuesta a los diferentes ambientes, debido al menor cociente fototermal. A su vez, también se encontró dependencia genética en la relación del peso individual de granos en función de la densidad de siembra.

Luego el análisis a nivel de lote o de cultivo en rendimiento por hectárea no se expresó la diferencia genética, por lo cual también se cree que puede haber efecto de atenuación debido a la compensación por peso de grano, donde cada material tuvo la respuesta contraria respecto de esta variable frente al número de granos, enmascarando las diferencias genotípicas en el rendimiento por superficie. Otra posibilidad es que retraso de fecha de siembra atenuó las diferencias genéticas.

También se destacó al material más antiguo por obtener mayor estabilidad en el peso de granos y al más recientemente liberado al mercado por traducir su estabilidad en el número de granos. Dado que el componente numérico es el que explica en mayor medida el rendimiento, se concluye que el mejor comportamiento en planteos de alta producción, es decir más intensivos, a la vez que en situaciones de adversidad ambiental, lo tendrá el material más moderno, por lo cual tiene mayores posibilidades de expresar mejor desempeño productivo tanto en estabilidad en diversos escenarios como en potencialidad.

Cabe aclarar que las conclusiones y los parámetros obtenidos son válidos para la situación ambiental del año en que se realizó el ensayo. No obstante, sería necesario calibrar las

ecuaciones propuestas en un amplio rango de condiciones ambientales, a los fines de disponer de modelos de respuesta sitio específica sensibles a la variabilidad temporal interanual.

Por último, se postula que este tipo de profundizaciones ayudan a justificar y entender las prácticas agronómicas de elección de genotipos, densidad de siembra, fecha de siembra y ajuste por ambiente desde la profundización en la ecofisiología del cultivo como herramienta clave de entendimiento de la generación del rendimiento.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE F. H.; A. G. CIRILO; S. A. UHART; M. E. OTEGUI. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz*. 1ra ed. Ed. La Barrosa, Balcarce, Buenos Aires, Argentina. p: 227-253.
- ANDRADE F. H.; C. VEGA; S. UHART; A. CIRILO; M. CANTARERO; O. VALENTINUZ. 1999. Kernel number determination in maize. *Crop Sci.* 39: 453-459.
- ANDRADE F. H. y V. O. SADRAS, 2000. *Bases para el manejo del Maíz, el Girasol y la Soja*. Ed. Médica Panamericana S. A., Buenos Aires, Argentina. p: 61-96.
- ANDRADE F. H.; L. ECHARTE; R. RIZZALLI; A. DELLA MAGGIORA; M. CASANOVAS. 2002. Kernel number predictions in maize under nitrogen or water stress. *Crop Sci.* 42: 1173-1179.
- BALZARINI M. G.; L. GONZALEZ; M. TABLADA; F. CASANOVES; J. A. DI RIENZO; C.W. ROBLEDO. 2008. Infostat. Manual del Usuario, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina. p: 142-148.
- BASFORD K. E. and M. COOPER. 1998. Genotype x environment interactions and some considerations of their implications for wheat breeding in Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 49: 153-174.
- BAVEC F. and M. BAVEC. 2001. Effect of maize plant double row spacing on nutrient uptake, leaf area index and yield. *Rost. Vyroba* 47: 135-140.
- BONGIOVANNI, R. 2002. Spatial Econometric Approach to the Economics of Site Specific Nitrogen Management and Corn Production. **PhD Dissertation, Department of Agricultural Economics, Purdue University**. West Lafayette, United States. p: 1-7.
- BONGIOVANNI, R. and J. LOWENBERG-DEBOER. 2004. Precision Agriculture and Sustainability. *Precision Agriculture* 5: 358-387.
- BONGIOVANNI, R. and J. LOWENBERG-DEBOER. 2006. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur. En: *Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura sustentable*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) – PROCISUR. Montevideo, Uruguay. Cap. 1, p: 16-22, Cap. 3, p: 45-55, Cap. 4. P: 68-80 y Cap. 9. p: 171-184.

- BORRÁS L.; C. ZINSEKMEIER; M. LYNN SENIOR; M. E. WESTAGE; M. G. MUSZYNSKI. 2009. Characterization of Grain-Filling Patterns in Diverse Maize Germplasm. *Crop Sci.* 49: 999-1009.
- BRAGACHINI M.; M. BRAGACHINI; F. SÁNCHEZ; M. MATHIER. 2014. Novedades en maquinaria para cosecha de biomasa para bioenergía en el Farm Progress Show 2014. 24° Viaje de capacitación técnica a Estados Unidos – INTA / COOVAECO. **13° Curso Internacional de Agricultura de Precisión y expo de Máquinas Precisas.** Manfredi-Córdoba, Argentina. p: 267-275.
- CAKMAK I. 2002. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways. *Plant and Soil* 247: 3-24.
- CANTARERO M. G.; S. F. LUQUE; O. J. RUBIOLLO. 2000. Efecto de la época de siembra y la densidad de plantas sobre el número de granos y el rendimiento de un híbrido de maíz en la región central de Córdoba (Argentina). *Agriscientia* 17: 3-10.
- CISNEROS J.; C. CHOLAKY; A. CANTERO GUTIÉRREZ; J. GONZÁLEZ; M. REYNERO; A. DIEZ; L. BERGESIO. 2012. *Erosión hídrica: principios y técnicas de manejo*. 1^{ra} ed. Ed. UniRío, Río Cuarto, Argentina. p: 11-60.
- D'ANDREA K. E.; M. E. OTEGUI; A. G. CIRILO. 2008. Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Research* 105: 228-239.
- DE SANTA EDUVIGES J. M. 2010. *Potencial de rendimiento y tolerancia a sequía en híbridos de maíz*. Tesis de Maestría. Fac. de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar Del Plata, Mar del Plata, Argentina. 103p.
- DI RIENZO J. A.; F. CASANOVES; M. G. BALZARINI; L. GONZALEZ; M. TABLADA y C. W. ROBLEDO. 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- DIEZ, E. 2012. *Relación entre la fracción de cubierta vegetal verde y el óptimo económico de la fertilización nitrogenada en maíz*. Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. p: 18-28.
- DILLON J. and J. ANDERSON. 1990. *The Analysis of Response in Crop and Livestock Production*. Ed. Pergamon Press, New York, United States. 122p.
- DUVICK D. N. and K. G. CASSMAN 1999. Post-green revolution trends in yield potential of temperate maize in the North-Central United States. *Crop Sci.* 39: 1622-1630.

- DUVICK D. N. 2005. Genetic progress in yield of United States maize (*Zea mays* L.). *Maydica* 50: 193-202.
- ECHARTE L.; S. LUQUE; F. H. ANDRADE; V. O. SADRAS; A. CIRILO; M. E. OTEGUI; C. R. C. VEGA. 2000. Response of maize kernel number to plant density in Argentinean hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Research* 68: 1-8.
- ECHARTE, L. and F.H. ANDRADE, 2003. Harvest index stability of Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Res.* 82: 1–12.
- ECHARTE L.; F. H. ANDRADE; C. R. C. VEGA; M. TOLLENAAR. 2004. Kernel number determination in Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Crop Sci.* 44: 1654-1661.
- ESPÓSITO G.; R. ROBLEDO; M. BONGIOVANNI; M. RUFFO; E. DIEZ; G. BALBOA. 2012a. Análisis del efecto año sobre la dosis variable de nitrógeno en maíz. **XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo “Latinoamérica unida protegiendo sus suelos”**. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. p: 1-6.
- ESPÓSITO G.; G. BALBOA; C. CASTILLO; R. BALBOA; A. DEGIOANNI. 2012b. Fecha de siembra y fertilización variable de maíz sobre Haplustoles de Córdoba. **XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo “Latinoamérica unida protegiendo sus suelos”**. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina. p: 1-6.
- ESPÓSITO G. 2013. *Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME)*. Tesis Doctoral. Fac. de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Córdoba, Ciudad de Córdoba, Córdoba, Argentina. p: 77-79.
- ESPÓSITO, G.; G. BALBOA; C. CERLIANI; R. BALBOA; C. CASTILLO. 2015. *Rendimiento potencial de maíz: el cultivo de maíz en San Luís*. 1^{ra} ed. Ed. INTA Centro Regional La Pampa, INTA Anguil. San Luís, Argentina. p: 32-52.
- FADA. 2010. El maíz y el trigo como motores del desarrollo argentino, Propuesta de política pública. *Fundación Agropecuaria para el Desarrollo de Argentina*. Río Cuarto, Argentina. p: 1-4.
- FERRARIS G. N. y L. A. COURETOT. 2014. Elección de ambientes, rendimiento y fertilización de maíz según fecha de siembra. **13º Curso Internacional de Agricultura de Precisión y expo de Máquinas Precisas**. Manfredi- Córdoba, Argentina. p: 117-124.

- FISCHER R.A. and G.O. EDMEADES 2010. Breeding and cereal yield progress. *Crop Sci.* 50: 85-98.
- FRIDGEN J. J.; N. R. KITCHEN; K. A. SUDDUTH; S. T. DRUMMOND; W. J. WIEBOLD; C. W. FRAISSE. 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. *Agronomy Journal* 96: 100-108.
- HÖRBE T. A. N.; T. J. C. AMADO; A. O. FERREIRA; P. J. ALBA. 2013. Optimization to management zones in Southern Brazil. *Precision Agric.* 14: 450-465.
- INTA. 2012. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. *Proyecto Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas – Red de Agricultura de Precisión – Boletín de actualización Técnica N° 10*. Manfredi, Argentina. p: 1-6.
- ILSI. 2006. Instituto Internacional de Ciencias de la Vida. *Maíz y nutrición*. Series de informes especiales, Volumen II. Capital Federal, Argentina. p: 3-8.
- KARLEN D. L. and G. M. CAMP. 1985. Row spacing, plant population, and water management effects on corn in the Atlantic Coastal Plain. *Agronomy Journal* 77: 393-398.
- LEDRI F. y O. VALENTINUZ. 2010. Respuesta en crecimiento y rendimiento de híbridos modernos de maíz a las mejoras agronómicas (1970-2000). **Actualización Técnica N° 2 – MAÍZ, GIRASOL Y SORGO**. Paraná, Entre Ríos, Argentina. p: 43-50.
- LUQUE S. F.; A. G. CIRILO; M. E. OTEGUI. 2006. Genetic gains in grain yield and related physiological attributes in Argentine maize hybrids. *Field Crops Research*. 95: 383–397.
- MADDONNI G. A.; M. E. OTEGUI; B. ANDRIEU; M. CHELLE; J. J. CASAL. 2002. Maize leaves turn away from neighbors. *Plant Physiol.* 130: 1181–1189.
- MADDONNI G. A. and M. E. OTEGUI. 2004. Intra-specific competition in maize: early establishment of hierarchies among plants affects final kernel set. *Crops Research* 85: 1–13.
- MADDONNI G. A. 2009. Fecha de siembra como estrategia de manejo de agua en maíz. **XVII Congreso Aapresid**. Rosario, Santa Fe, Argentina. p: 5-195.
- MADDONNI G. A. 2012. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural región of Argentina—a probabilistic approach. *Theor. Appl. Climatol.* 107: 325-345.
- MARTÍNEZ BOLOGNA G.; S. CASTRO; C. CERLIANI; G. BALBOA; R. NAVILLE; G. ESPÓSITO. 2014. Densidad de siembra de maíz asociada a la variabilidad espacial del suelo. **XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. II Reunión Nacional**

- “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas”**. Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. p: 1-6.
- MIZZOU-ARS. 2000. Management Zone Analyst Version 1.0.1. University of Missouri-Columbia & Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture. United States.
- MULLA, D. J. and J. S. SCHEPRS. 1997. Key processes and propieties for site-specific soil and crop management. The state of site-specific management for agriculture. Madison, United States. p: 1-18.
- PALIWAL R.L.; G. GRANADOS; H. R. LAFITTE; A. D. VIOLIC; J. P. MARATHÉE. 2001. *El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción*. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Roma, Italia. Cap.1. p: 1-23.
- PAPONOV I. A.; P. SAMBO; G. SCHULTE AUF’M ERLEY; T. PRESTERL; H. H. GEIGER; C. ENGELS. 2005. Kernel set in maize gonotypes differing in nitrogen use efficiency in response to resource availability around flowering. *Plant soil* 272: 101-110.
- PONTÓN R. T. 2014. En: *Anuario Estadístico 2014*. Bolsa de Comercio de Rosario, Dirección de Informaciones y Estudios Económicos. Rosario, Argentina. p: 8-44.
- QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. 2011. Quantum GIS (Geographic Information System) 2.8.1-Wien. Open Source Geospatial Foundation Project. Free Software Foundation, Inc. Boston, United States.
- RITCHIE W. and J. HANWAY. 1997. How a corn plant develops. Special Report N° 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames. Iowa: 21p.
- SANGOI L.; M. A. GRACIETTI; C. RAMPAZZO; P. BIANCHETTI. 2002. Response of Brazilian maize hybrids from different eras to changes in plant density. *Field Crops Res.* 79: 39–51.
- SARAIVA, A. M.; C. E. CUGNASCA; A. R. HIRIKAWA. 2000. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. Agricultura de precisão. Viçosa, MG. p: 108-145.
- SARLANGUE T.; F. H. ANDRADE; P. A. CALVIÑO; L. C. PURCELL. 2007. Why Do Maize Hybrids Respond Differently to Variations in Plant Density?. *American Society of Agronomy.* 99: 984–991.
- SATORRE, E. H. 1988. *The competitive ability of spring cereals*. PhD Thesis, University of Reading, United Kingdom. p: 58-72.

- SATORRE, E. H. 1999. Plant density and distribution as modifiers of growth and yield. En: E. H. Satorre, y G. A. Slafer (eds.), *Wheat: Ecology and Physiology of yield determination*. The Haworth Press, Inc. New York, London, Oxford. p: 141-159.
- SATORRE E. H. 2002. Bases funcionales de la producción del cultivo de maíz. Su aporte a la economía sostenible. En: *Guía Dekalb del cultivo de maíz*. Servicios y Marketing Agropecuario. Capital Federal, Argentina. p: 14-19.
- SATORRE, E. H; R. L. BENECHÉ ARNOLD; G. A. SLAFER; E. B. DE LA FUENTE; D. J. MIRALLES; M. E. OTEGUI; R. SAVIN. 2003. *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*. 1^{ra} ed. Ed. Facultad de Agronomía, Buenos Aires, Argentina. p: 135-153; 279; 288-292.
- SCARAMUZZA F.; A. MÉNDEZ; D. VILLARROEL; J. P. VÉLEZ. 2014. Ventajas del sistema de corte por línea en siembra sobre el rendimiento y el margen bruto de maíz. **13° Curso Internacional de Agricultura de Precisión y expo de Máquinas Precisas**. Manfredi- Córdoba, Argentina. p: 197-202.
- SEILER R.; A. M. WEHBE; M. VINOCUR; E. L. TARASCONI. 2008. Efectos del cambio climático y de la variabilidad climática sobre la producción agropecuaria: impactos y adaptación. **XII Reunión Argentina de Agrometeorología**. San Salvador de Jujuy, Jujuy, Argentina. p: 83-84.
- SIIA. 2014. Series de información sobre siembra, cosecha, producción y rendimiento. *Sistema integrado de Información Agropecuaria*. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la República Argentina. Capital Federal, Argentina. p: 1-5.
- TALANO, P; G. ESPÓSITO; G. BALBOA. 2010. Diferencias en el comportamiento ecofisiológico de híbridos modernos de maíz frente al estrés hídrico. **IX Congreso Nacional de Maíz. I Simposio Nacional de Sorgo**. Rosario, Santa Fe, Argentina. p: 142-143.
- TOKATLIDIS I. S. and S. D. KOUNTROUBAS. 2003. A review of maize hybrids' dependence on high plant populations and its implications for crop yield stability. *Field Crops Research*. 88: 103-114.
- TOLLENAAR M.; L. M. DWYER; W. STEWART. 1992. Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Science* 32: 432-438.
- TOLLENAAR M. and J. WU. 1999. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. *Crop Sci*. 39: 1597-1604.

- TOLLENAAR M. and E. A. LEE. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crop Res.* 75: 161–169.
- UHART S. A. and F. H. ANDRADE. 1995. Nitrogen deficiency in maize I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Sci.* 35: 1376-1883.
- URIBELARREA M.; J. CÁRCOVA; M. E. OTEGUI; M. E. WESTGATE. 2002. Pollen production, pollination dynamics, and kernel set in maize. *Crop Sci.* 42: 1910-1918.
- VALENTINUZ O.R. 2006. *Maíz: bases para la construcción de rendimientos altos y estables.* Actualización técnica de Maíz, INTA EEA Paraná, Serie Extensión. Cap. 41. p: 14-18.
- VIDELA MENEGUE H.; A. CANALE; S. MUÑOZ. 2014. Evaluación de diferentes densidades de plantas de maíz en siembras tempranas en ambientes contrastantes del Territorio Sudeste de Córdoba. **13° Curso Internacional de Agricultura de Precisión y expo de Máquinas Precisas.** Manfredi- Córdoba, Argentina. p: 261-266.
- WIATRAK P. J.; D.L. WRIGHT; J.J. MAROIS; R. SPRENKEL. 2004. Corn hybrids for late planting in the southeast. *Agron. J.* 96: 1118–1124.
- YASSUSHI INAMASU R.; J. DE MENDOÇA NAIME; Á. VILELA DE RESENDE; L. H. BASSOI; A. C. DE CAMPOS BERNARDI. 2011. *Agricultura de preciação: Um Novo Olhar.* 1ª ed. Ed. Cubo, São Carlos, Brasil. p: 194-200.
- ZAHNISER, S. 2006. “U.S.-Mexico Agricultural Trade During the NAFTA Era”. **Presentation for “North American Agriculture: Assessing NAFTA at 12”.** United States Department of Agriculture (USDA), Economic Research Service. Sacramento, California, United States. P: 14-44.