



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMIA Y VETERINARIA**

Tesis para acceder al título de Magister en Ciencias Agropecuarias

**RELACIÓN ENTRE EL NÚMERO DE GRANOS Y LA TASA DE
CRECIMIENTO POR PLANTA DE MAÍZ, Y SUS IMPLICANCIAS
SOBRE LA DENSIDAD ÓPTIMA AGRONÓMICA**

Ing. Agr. Cecilia Cerliani

Director: Ing. Agr. Dr. Gabriel P. Esposito

Río Cuarto, Mayo de 2019

JURADO

Dr. Ing. Agr. Nahuel R.
Peralta

Bayer Crop Science

Firma:.....

Aclaración:.....

MSc. Ing. Agr.
Oscar Giayetto

Facultad de Agronomía y Veterinaria
Universidad Nacional de Río Cuarto

Firma:.....

Aclaración:.....

MSc. Ing. Agr.
Guillermo A. Cerioni

Facultad de Agronomía y Veterinaria
Universidad Nacional de Río Cuarto

Firma:.....

Aclaración:.....

DEFENSA ORAL Y PÚBLICA

Lugar: Universidad Nacional de Río Cuarto. Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

Fecha: Lunes 13 de mayo de 2019.

Calificación:.....

DEDICATORIA

A mi hija, Ana Sofía

A mi marido, Federico

A mi madre, Marta

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer, a todas aquellas personas que me han acompañado y facilitado su apoyo, consejo y ánimo a lo largo de este proceso, sin las cuales no hubiera sido posible lograr este objetivo.

En primer lugar agradecer a mi director de tesis Gabriel Esposito, por ofrecerme sus conocimientos y experiencia y alentarme en mi formación como docente e investigadora.

Mi más sincero agradecimiento para Rafael Naville por toda su ayuda durante la realización de mi trabajo de tesis, no solo en el trabajo de campo, sino también por cubrirme las espaldas para poder finalizar este trabajo.

Hago extensivos estos agradecimientos a todos los que me dieron una mano con el trabajo de campo. A todos los compañeros, tesistas y alumnos ayudantes de la cátedra de Producción de Cereales.

A los evaluadores de este trabajo de tesis Nahuel Peralta, Oscar Giayetto y Guillermo Cerioni, por el interés que han puesto en este trabajo de investigación, por todas las importantes sugerencias aportadas.

Agradezco a la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto por permitirme realizar esta maestría, por brindarme el espacio físico y humano para su realización.

Además, me gustaría darles las gracias a todos los que no estuvieron directamente involucrados en la tesis, pero que me acompañaron durante toda esta etapa. Un agradecimiento especial a mi mamá, Marta, por estar siempre presente con total entrega. Ha sido una indudable referencia y guía durante estos años. También un agradecimiento a mis hermanos que siempre estuvieron y estarán a mi lado. Y a mis abuelos, Ana María, “Cholo”, Matilde y Juan Carlos por acompañarme siempre. Especialmente Juan Carlos que siempre creyó, en mi capacidad.

Por último a mi marido Federico, que además de brindarme sus conocimientos y experiencias, me dio su apoyo incondicional, paciencia, comprensión y amor. Por estar todos estos años al lado mío alentándome a seguir adelante y ayudándome para no desistir. Por su inmensa paciencia en lo académico y profesional. Espero poder seguir creciendo juntos tanto profesional como personalmente.

Finalmente a la persona que hoy completa mi ser, a mi hija Ana Sofía, porque con su cariño, ternura y sonrisa me dio la fuerza para terminar esta etapa que culmina con la tesis.

¡Gracias!

RESUMEN

La productividad del maíz se ha incrementado en los últimos años como consecuencia del mejoramiento genético, nuevas prácticas de manejo y su interacción. Entre las prácticas, la elección de la densidad de siembra es crucial. La relación entre el rendimiento y la densidad es del tipo óptimo, con un valor de densidad (DOA) en el cual el rendimiento es máximo. Esto se explica por la relación no lineal que existe entre el número de granos por planta (NGP) y la tasa de crecimiento individual (TCP) durante el periodo V_{13} - R_3 (crítico). La densidad determina la cantidad de recursos por planta y afecta la TCP, dado que no es conocida la relación entre la DOA y la TCP se propuso: Analizar el efecto de la interacción genotipo: ambiente en la relación de número de granos fijados y la TCP durante el periodo crítico del maíz y sus implicancias sobre la DOA. Para ello se llevaron a cabo 3 experimentos en Córdoba (2013/14). Se sembraron los híbridos DK 7210 VT3P y DK 692 VT3P, con 5 densidades (40000 a 150000 semillas ha^{-1}) en dos zonas de manejo por experimento. En el periodo crítico se evaluó la materia seca por planta. A cosecha, se determinó el rendimiento y el NGP. Se estimó la relación entre TCP y NGP, y entre TCP y densidad. La DOA se estimó con la función de respuesta del rendimiento a la densidad. Finalmente se calculó el rendimiento correspondiente con la DOA, y la TCP_{DOA} , el NGP_{DOA} , el peso de 1000 granos ($P1000_{DOA}$) y la producción por planta en la DOA (PP_{DOA}). Los resultados mostraron que la relación entre la TCP y NGP, no fue modificada por el ambiente, pero sí por el genotipo. Además, se encontró una relación exponencial negativa entre la TCP y la densidad, la cual al igual que la relación entre rendimiento y densidad, varió entre genotipos y ambientes. Tanto la DOA, como el NGP_{DOA} fueron afectadas únicamente por el sitio, variando entre 70.616 y 101.074 $p\ ha^{-1}$, la primera variable, y entre 507 y 604 granos p^{-1} , la segunda. Por su parte el rendimiento fue modificado estadísticamente por el sitio y la zona de manejo, el menor rendimiento fue de 7.344 y el mayor de 11.512 $kg\ ha^{-1}$. Finalmente, se encontró que dentro del rango de TCP_{DOA} , la relación entre TCP_{DOA} y NGP_{DOA} fue lineal, y que este rango fue de 2,74 a 4,81 $g\ d^{-1}$, sin embargo, la producción por planta no fue modificada por ninguno de los factores bajo estudio, debido a la compensación realizada a través del peso de los granos. Estos resultados indican que independientemente del ambiente cuando una planta crece en su DOA, la producción individual se mantiene constante; lo cual resulta de gran interés en la prescripción de densidad de siembra.

Palabras Claves: maíz, tasa de crecimiento por planta, densidad, rendimiento

SUMMARY

Relationship between kernel number and plant growth rate in maize, and its implications about optimum plant density

Maize crop yield has recently increased because of genetic improvement, new management practices and their interaction. Among these practices, the choice of sowing density is crucial. The relationship between yield and plant density is optimal with a density value (OPD) in which the yield is maximum. This is explained by the non-linear relationship between the kernel number per plant (KNP) and the plant growth rate (PGR) during critical period (V13-R3 stages). Plant density determines the amount of resources per plant and affects the PGR. Relationship between the OPD and PGR is not known, thus was proposed: Analyze the effect of interaction genotype: environment in relation to kernel number set and PGR during the critical period and its implications on the OPD. For this, 3 experiments in Córdoba province (2013/14) were carried out. Hybrids DK 7210 VT3P and DK 692 VT3P were sowing, with five densities (40000 to 150000 seeds ha⁻¹) in two management zones per experiment. In the critical period, dry matter was evaluated. At harvest, yield and KNP were determined. The relationship between PGR and NGP, and PGR and density was estimated. OPD was estimated with the yield response function to density. Finally, the corresponding yield with the OPD, and the PGR_{OPD}, the NGP_{OPD}, the weight of 1000 kernels (P1000_{OPD}) and the production per plant in the OPD (PP_{OPD}) was calculated. The results showed that the relationship between PGR and NGP was not modified by the environment, but by the genotype. In addition, a negative exponential relationship between PGR and density was found which, like the relationship between yield and density, varied between genotypes and environments. Both OPD and NGP_{OPD} ranged from 70,616 to 101,074 p ha⁻¹ (OPD), and from 507 to 604 kernels p⁻¹(NGP_{OPD}) and were affected only by the site. On the other hand, the crop yield was modified by the site, the management zone, the lowest yield was 7344, and the highest was 11,512 kg ha⁻¹. Eventually, it was found that within the range of PGR_{OPD}, the relationship between PGR_{OPD} and NGP_{OPD} was linear, and that this range was 2.74 to 4.81 g d⁻¹. However, the production per plant was not modified by any of the factors under study due to the compensation made through the kernel weight. These results indicate that regardless of the environment when a plant grows in its OPD, individual production remains constant; which is of great interest in the sowing density prescription.

Key Words: maize, plant growth rate (PGR), plant optimum density (OPD), yield

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTE TRABAJO DE TESIS	xii
INTRODUCCIÓN	1
HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	6
Hipótesis	6
Objetivo General	6
Objetivos Específicos	6
MATERIALES Y MÉTODOS	7
Descripción de los sitios experimentales	7
Observaciones y determinaciones	11
Diseño experimental y análisis estadístico	15
Análisis e interpretación de los resultados:	16
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
Condiciones meteorológicas durante el estudio	17
Análisis de las propiedades químicas del suelo	21
Relación entre la tasa de crecimiento por planta y el número de granos por planta	22
Relación entre densidad y tasa de crecimiento por planta	30
Relación entre rendimiento y densidad de plantas.	38
Densidad óptima agronómica, tasa de crecimiento por planta, número de granos y rendimiento, peso de 1000 granos y producción por planta, correspondientes con la densidad óptima agronómica.	41
CONCLUSIONES	52
BIBLIOGRAFIA	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades químicas del suelo en los distintos sitios experimentales, las zonas de manejo (AP y BP), y las profundidades (0 a 20 cm y de 20 a 40 cm) evaluadas.....	21
Tabla 2. Ecuación ajustada entre números de granos por planta y tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico en cada sitio y zona de manejo para el híbrido DK 7210VT3P y ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona.	23
Tabla 3. Ecuación ajustada entre números de granos por planta y tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico en cada sitio y zonas de manejo para el híbrido DK 692 VT3P y ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona.	25
Tabla 4. Ecuación de regresión exponencial ajustada entre tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico y la densidad de plantas en cada sitio y zona de manejo para el híbrido DK 7210VT3P y ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona.	30
Tabla 5. Ecuación de ajuste de regresión exponencial entre la tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico y la densidad de plantas en cada sitio y zona de manejo para el híbrido DK 692 VT3P y ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona.	33
Tabla 6. Densidad óptima agronómica (DOA), tasas de crecimiento por planta (TCP_{DOA}), número de granos (NGP_{DOA}), rendimiento de maíz (Rt_{DOA}), peso de 1000 granos ($P1000_{DOA}$) y producción por planta (PP_{DOA}) correspondientes a la densidad óptima agronómica en cada sitio y zona de manejo para ambos híbridos evaluados (DK 7210 VT3P y DK 692 VT3P).....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de las regiones naturales Córdoba (Agencia Córdoba Ambiente, 2013) y ubicación de los sitios experimentales.	7
Figura 2. Temperaturas máximas (línea llena), mínimas (línea punteada), para la campaña 2013/14 en Pueblo Italiano.	17
Figura 3. Precipitaciones decádicas (barras) y acumuladas (líneas) para la campaña 2013/14 y normal 1935/2017 en Pueblo Italiano.	18
Figura 4. Temperaturas máximas (línea llena), mínimas (línea punteada), para la campaña 2013/14 en Las Vertientes.	19
Figura 5. Precipitaciones decádicas (barras) y acumuladas (líneas) para la campaña 2013/14 y normal 1974/1993 en Las Vertientes.	19
Figura 6. Temperaturas máximas (línea llena), mínimas (línea punteada) y precipitaciones (barras), para la campaña 2013/14 en Chaján.	20
Figura 7. Precipitaciones decádicas (barras) y acumuladas (líneas) para la campaña 2013/14 y normal 2000/2018 en Chaján.	20
Figura 8. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en el sitio Chaján en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).	23
Figura 9. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en el sitio Las Vertientes en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).	24
Figura 10. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en el sitio Pueblo Italiano en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).	24
Figura 11. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 692 VT3P en el sitio Chaján en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).	26
Figura 12. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 692 VT3P en el sitio Las Vertientes en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).	26
Figura 13. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 692 VT3P en el sitio Pueblo Italiano en la zona de alta producción	

(azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).....	27
Figura 14. Relación entre el número de granos por planta (granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$), para los híbridos DK 692 VT3P (bordó) y DK 7210 VT3P (verde) en todos los sitios y zonas evaluadas.	28
Figura 15. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Pueblo Italiano.	31
Figura 16. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Las Vertientes.	31
Figura 17. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Chaján.	32
Figura 18. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en los distintos sitios experimentales y zonas de manejo.	32
Figura 19. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 692 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Pueblo Italiano.	34
Figura 20. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 692 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Las Vertientes.	34
Figura 21. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 692 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Chaján.	35
Figura 22. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 692 VT3P en todos los sitios experimentales y zonas de manejo.	35
Figura 23. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), en la zona de alta (líneas verdes) y baja producción (líneas bordó) para el híbrido DK 7210 VT3P (línea llena) y para el híbrido DK 692 VT3P (línea punteada) en la localidad de Pueblo Italiano.	37
Figura 24. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), en la zona de alta (líneas verdes) y baja producción (líneas bordó) para el híbrido DK 7210 VT3P (línea llena) y para el híbrido DK 692 VT3P (línea punteada) en la localidad de Las Vertientes.	37
Figura 25. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), en la zona de alta (líneas verdes) y baja producción (líneas bordó) para el híbrido DK 7210 VT3P (línea llena) y para el híbrido DK 692 VT3P (línea punteada) en la localidad de Chaján.	38

Figura 26. Relación entre Rendimiento (kg ha^{-1}) y densidad de plantas (p ha^{-1}) del híbrido DK 692 VT3P para ambas zonas de manejo en A. Pueblo Italiano, B. Las Vertientes y C. Chaján.	39
Figura 27. Relación entre Rendimiento (kg ha^{-1}) y densidad de plantas (p ha^{-1}) del híbrido DK 7210 VT3P para ambas zonas de manejo en A. Pueblo Italiano, B. Las Vertientes y C. Chaján.	40
Figura 28. Relación entre tasa de crecimiento por planta (g d^{-1}) y los sitios para ambos híbridos.	44
Figura 29. Relación entre la DOA (p ha^{-1}) y el Rt_{DOA} (kg ha^{-1}) para el híbrido A- DK 7210 VT3P y B- DK 692 VT3P.	46
Figura 30. Relación entre TCP_{DOA} (g d^{-1}) y la DOA (p ha^{-1}), para el híbrido A- DK 7210 VT3P y B- DK 692 VT3P.	47
Figura 31. Relación entre NGP_{DOA} (granos p^{-1}) y la DOA (p ha^{-1}) para el híbrido A- DK 7210 VT3P y B- DK692VT3P.	48
Figura 32. Relación entre el NGP_{DOA} (granos p^{-1}) y la TCP_{DOA} (g d^{-1}) para el híbrido A- DK 7210 VT3P y B- DK 692 VT3P.	49
Figura 33. Relación entre $\text{P1000}_{\text{DOA}}$ (g) y el NGP_{DOA} (g p^{-1}) para ambos genotipos.	51

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado	Unidad	
TCP	Tasa de Crecimiento por planta	$g\ d^{-1}$	
NGP	Numero de granos por planta	granos p^{-1}	
TCP_{DOA}	Tasa de Crecimiento por planta que crece en su DOA	$g\ d^{-1}$	
NGP_{DOA}	Numero de granos por planta que crece en su DOA	granos p^{-1}	
DOA	Densidad Optima Agronómica	$p\ ha^{-1}$	$p\ m^{-2}$
PP_{DOA}	Producción por planta que crece en su DOA		
$P1000_{DOA}$	Peso de 1000 granos de plantas que crece en su DOA		
	Rendimiento	$kg\ ha^{-1}$	
	Densidad de plantas	$p\ ha^{-1}$	$p\ m^{-2}$
PI	Pueblo Italiano		
LV	Las Vertientes		
CH	Chaján		

PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTE TRABAJO DE TESIS

En Revistas con Referato

Cerliani, C.; Esposito, G.; Morla, F. D.; Balboa, G.; Naville, R. "Relación entre la densidad óptima agronómica y el número de granos por planta en maíz (*Zea mays* L.)". *European Scientific Journal*, 14 num.9 (2018): 29 - 45.

Presentaciones a reuniones científicas internacionales

Cerliani, C.; Esposito, G.; Morla, F.D.; Naville, R.A. "Generación de prescripciones de densidad variable a escala de lote en el sur de la provincia de Córdoba (Argentina)". En Primer Congreso Latinoamericano de Agricultura de Precisión (CLAP 2018), Chile: Universidad Técnica Federico Santa María. INACAP. 2018.

Cerliani, C.; Bossio, N.; Naville, R.; Romanini, I.; Balboa, G.; Esposito, G. Effect of corn seeding rate on agronomic optimum nitrogen rate. Proceedings 7th World Congress on Conservation Agriculture. Rosario. 1 - 4 de August. ISSN 2527-2055.: 146. 2017

Presentaciones a reuniones científicas nacionales

Esposito, G.; **Cerliani, C.;** Naville, R. Densidad óptima de siembra en maíz y su interacción con la oferta nitrogenada. XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 15 al 18 de mayo. Tucumán. 2018

Cerliani, C.; R. Naville; G. Balboa; A. Ruiz; G. Martines Bologna; N. Bossio; G. Esposito. Importancia de la interacción nitrógeno-densidad en la dosificación de N. Simposio de Fertilidad. International Plant Nutrition Institute. Rosario. Resúmenes.:142-147.2017

Cerliani, C.; M. Gomez; R. Naville; G. Balboa Y G. Espósito. Densidad de siembra óptima de maíz (*Zea mays* L.) ajustada por zonas de manejo. X Congreso Argentino de Maíz. AIANBA y EEA INTA Pergamino, 3 al 5 de septiembre, Rosario, Argentina. 2014.

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los principales cultivos a nivel mundial, siendo en 2014 el cultivo que más producción obtuvo (1.037.791.518 t), secundado por el arroz (296.313.807 t) y el trigo (308.779.343 t). Desde el punto de vista del área cosechada, para el mismo año, se ubicó en segundo lugar, luego del trigo, con una superficie de 184.800.969 ha. Sin embargo, debido a su mayor rendimiento promedio, que fue de 5.615,7 kg ha⁻¹, hizo que fuese el cultivo con mayor producción (FAO, 2017).

En Argentina, este cereal es el cultivo que ocupa el segundo lugar en área sembrada con 6.904.538 ha en la campaña 2015/16 en las que se obtuvo un rendimiento promedio de 7.443 kg ha⁻¹ lo cual permitió alcanzar una producción de 39.792.854 t (MAGYP, 2017). A nivel regional, en el Departamento Río Cuarto, esta tendencia se repite, ubicándose el maíz en segunda posición luego de la soja (BCCBA, 2017).

En las últimas 10 campañas agrícolas, en Argentina, la producción de maíz se incrementó en un 175%, como resultado del aumento de la superficie sembrada (126%) y del rendimiento promedio obtenido (26%) (MAGYP, 2017).

El rendimiento del maíz ha aumentado 6 veces desde 1939 hasta la actualidad, atribuyéndose un 60% de este aumento al mejoramiento genético. El rendimiento es el resultado de la acumulación de materia seca y su partición a granos, los principales aportes del mejoramiento genético fueron la permanencia verde visual, funcional de las hojas y los cambios en la relación entre el número de granos por planta (NGP) y la tasa de crecimiento por planta (TCP) durante el periodo crítico para la definición del rendimiento (Lee y Tollenaar, 2007).

Tollenaar y Lee (2011), indican que el 40 % restante del incremento del rendimiento se atribuye a cambios en las prácticas de manejo que se realizan sobre este cultivo. Dentro de estas prácticas se destaca el incremento de la densidad de siembra, uso de fertilizantes, mejoras en el control de malezas y otras adversidades bióticas, y ajustes en la fecha de siembra.

La función de respuesta del rendimiento a la densidad de siembra puede describirse en tres fases, un incremento lineal a densidades muy bajas, un incremento parabólico en densidades intermedias y una tendencia parabólica negativa en altas densidades (Duncan 1958; Tollenaar, 1992, Andrade *et al.* 1996, Sarlengue *et al.*, 2007).

En bajas densidades, aumentos en el número de plantas generan incrementos lineales del rendimiento. En consecuencia, el rendimiento del grano es proporcional al número de plantas por unidad de área. Con mayores densidades, comienza la competencia entre las plantas, pero el rendimiento por unidad de área continuará aumentando cuando el aumento en el número de plantas por unidad de área sea mayor que la disminución en el rendimiento por planta. Finalmente, el rendimiento comienza a disminuir porque la disminución en el rendimiento de grano por planta es mayor que el aumento en el número de plantas por unidad de superficie (Tollenar y Lee, 2011).

Existe, por lo tanto, un valor de densidad en el cual se produce el máximo rendimiento, dicho valor se conoce como densidad óptima agronómica (DOA), y alrededor de este valor la respuesta del rendimiento a la densidad puede describirse matemáticamente como un polinomio de segundo orden (Sarlungue *et al.*, 2007; Tollenar y Lee, 2011).

Esta función cuadrática también ha sido empleada para determinar la densidad óptima económica (DOE), es decir aquella que genera el máximo retorno económico por semilla utilizada (Dillon y Andreson, 1990).

La forma cuadrática de respuesta del rendimiento a la densidad de plantas se explica, por la relación que existe entre el número de granos por planta (NGP) y la tasa de crecimiento por planta (TCP) durante el periodo crítico (± 15 días alrededor de floración); que en esta especie presenta una respuesta del tipo inversa mientras que en otros cultivos dicha relación es lineal (Andrade *et al.*, 1999).

En condiciones hídricas y nutricionales no limitantes, la relación entre NGP y TCP se caracteriza por presentar un valor umbral que indica la mínima TCP necesaria para producir al menos un grano, y otro valor de TCP a partir del cual incrementos en la misma no significan aumentos en el NGP (Andrade *et al.*, 1999).

Por lo tanto, en densidades muy altas la competencia intraespecífica hace que disminuya drásticamente la TCP, llegando incluso a valores menores que al umbral mínimo para producir granos, resultando en una planta estéril. Por el contrario, si la densidad es muy baja, la tasa de crecimiento individual es alta, pero debido a limitaciones morfogénicas del maíz, la falta de plantas no es compensada por una mayor producción individual (Andrade *et al.*, 1999; Sarlungue *et al.*, 2007). Esto pone de manifiesto la estrecha relación que existe entre la densidad y la TCP, ya que cambios en la primera modifican la TCP y por ende el rendimiento del cultivo. Si la relación entre el NGP y el TCP depende solamente del genotipo, y si la DOA coincide con una producción individual constante, podrían realizarse recomendaciones de densidad de siembra según el genotipo. Lo que resultaría de gran

interés, ya que en la actualidad no existen modelos de recomendación que permitan ajustar la densidad de siembra. Como se mencionó anteriormente esta práctica es una de las de mayor impacto sobre el rendimiento del cultivo de maíz.

ANTECEDENTES

Estudios realizados por Andrade *et al.* (2002), muestran que la relación entre el NGP y la TCP no se modifica por variaciones en la disponibilidad de recursos ya que los efectos directos sobre el número de granos que puede tener un estrés hídrico y/o nutricional, son pequeños o están correlacionados con el efecto del estrés sobre la TCP. De este modo, la relación entre la TCP durante el periodo crítico y el NGP depende exclusivamente del genotipo. Sin embargo, D'Andrea *et al.* (2008), encontraron que una diferente oferta de nitrógeno en determinados genotipos modificó esta relación.

Diversos autores han demostrado que es la genética el principal factor que modifica la relación entre TCP y NGP, dado que los híbridos actuales toleran mayor densidad que los antiguos, y por lo tanto presentan una mayor densidad óptima agronómica (Echarte y Andrade, 2003; Tollenaar y Lee, 2011; Di Matteo *et al.*, 2016). Esta mayor tolerancia a la densidad está asociada a un menor aborto de granos y menor número de plantas estériles (Echarte y Andrade, 2003), por la capacidad de estos híbridos de fijar granos a inferiores tasas de crecimiento por planta que los híbridos más antiguos (Echarte *et al.*, 2013).

Por lo tanto, estas características del maíz determinan que sea necesario ajustar la DOA para cada híbrido según la disponibilidad de recursos. Puesto que en densidades muy altas la competencia intraespecífica hace que disminuya drásticamente la tasa de crecimiento por planta, llegando incluso a valores menores que el valor umbral para la producción de granos, obteniéndose una planta estéril. Por el contrario, si la densidad es muy baja, la tasa de crecimiento individual es alta, pero debido a limitaciones morfogénicas la falta de plantas no es compensada por una mayor producción individual (Edmeades y Daynard, 1979; Andrade *et al.*, 1999; Sarlengue *et al.*, 2007).

La tasa de crecimiento por planta depende de los recursos limitantes de la producción (radiación, agua, nutrientes) que cada individuo disponga (Kurt y Satorre, 2003). Aumentos o disminuciones de estos recursos modifican la tasa de crecimiento, pero no la relación entre el NGP y TCP (Andrade *et al.*, 2002).

Por otro lado, la disponibilidad de recursos varía espacialmente, tanto a escala regional como de lote (Espósito, 2013), como consecuencia de la variación topográfica y de

las propiedades físicas y químicas de los suelos. La variabilidad del suelo emerge de complejas interacciones entre factores naturales (material parental, topografía, clima y actividad de organismos), y antrópicos o de manejo (labranza, fertilización, aplicación de enmiendas, etc.) (Echeverría y García, 2014).

Algunas propiedades de suelo como textura, contenido de materia orgánica, pH y nutrientes poco móviles tienen patrones de variabilidad relativamente estáticos; mientras que otras, como la humedad, temperatura y nutrientes móviles, poseen patrones dinámicos (Bouma y Finke, 1993).

La región suroeste de la provincia de Córdoba se caracteriza por presentar una alta heterogeneidad ambiental, encontrándose distintas aéreas fisiográficas con características de relieve y suelos contrastantes entre sí (Degioanni *et al.*, 2008).

Si bien las propiedades del suelo varían a escala intra lote, existen dentro de los lotes zonas con características homogéneas, que se denominan zonas de manejo, y se definen como zonas dentro de un lote que poseen una combinación relativamente homogénea de los factores limitantes del rendimiento y para la cual una única dosificación de insumos es adecuada (Schepers *et al.*, 2004; Vrindts *et al.*, 2005; Moral *et al.*, 2010).

El éxito en la delimitación de zonas de manejo depende de la relación entre el rendimiento del cultivo y las propiedades del suelo. Generalmente, las diferentes zonas de manejo se pueden definir en base a mapas de rendimiento (Fleming *et al.*, 2000), información de suelo como por ejemplo conductividad eléctrica aparente o profundidad de suelo (Fraisse *et al.*, 2001; Moral *et al.*, 2010; Peralta *et al.*, 2013) y fotografías aéreas (Johnson *et al.*, 2001).

Los mapas de rendimiento son considerados, por algunos autores, una de las mejores herramientas para la delimitación de zonas de manejo, debido a que esta variable de síntesis sería un buen indicador de la productividad del suelo en las distintas zonas de manejo (Bongiovanni *et al.*, 2006; Horbe *et al.*, 2013).

Por lo tanto, aunque dentro de las zonas de manejo las propiedades del suelo son homogéneas, y por ende la disponibilidad de recursos para cada planta es similar, entre zonas existen diferencias en la oferta de recursos (Moral *et al.*, 2010) y, por ende, cabe suponer que manteniendo constante la densidad de plantas la tasa de crecimiento individual variará.

Al modificar la cantidad de individuos por superficie cambia la disponibilidad de recursos por planta, por lo que al mejorar la disponibilidad de recursos se debería aumentar la cantidad de individuos para mantener la tasa de crecimiento constante, si la disponibilidad de recursos disminuye entonces debería bajarse la cantidad de plantas para que la tasa de

crecimiento no se vea afectada. Esto hace que ambientes con más recursos soporten una mayor densidad y viceversa (Kruk y Satorre, 2003). Al respecto Bragachini *et al.* (2012), demostraron que en zonas de baja disponibilidad de recursos la disminución de la densidad de plantas de maíz incrementó el rendimiento debido a que permite un mejor crecimiento por planta; mientras que en zonas de alta disponibilidad se registraron mayores rendimientos ante la repuesta positiva al aumento de la densidad de siembra. Resultados similares fueron encontrados por Horbe *et al.*, (2013) en Brasil y Al-Kaisi y Yin (2003) quienes demostraron que se obtienen mayores rendimientos con mayor densidad al mejorar las condiciones ambientales (disponibilidad de agua y N).

Por lo tanto, la variabilidad espacial en la oferta de recursos limitantes de la producción justifica el cambio en la DOA y/o DOE dentro de un lote definiéndose así lo que se conoce como densidad de siembra espacialmente variable (Bongiovanni *et al.*, 2006)

En este sentido, varios estudios han demostrado que la densidad de plantas óptima agronómica varía al cambiar de ambientes, aún dentro de un mismo lote. Shanahan *et al.* (2004), al evaluar dos híbridos de maíz y cuatro densidades, en distintas zonas de manejo de un lote, no encontraron interacción entre el híbrido empleado y la densidad para el rendimiento, sin embargo, hallaron diferencias en la densidad óptima económica entre zonas, señalando que es necesario continuar con los estudios para perfeccionar los métodos de prescripción de siembra variable. Bullock *et al.* (1998) también observaron diferencias en la densidad óptima económica de maíz en función del rendimiento potencial en un amplio estudio de la región del cinturón maicero en EEUU. En Brasil Horbe *et al.* (2013) encontraron que el rendimiento del cultivo es afectado por la interacción entre la densidad y la zona de manejo, concluyendo que el ajuste de la densidad de plantas en las distintas zonas de manejo resulta en incrementos del rendimiento y del retorno económico parcial en relación con la densidad uniforme utilizada por los productores. Por otro lado, estudios realizados en Argentina demostraron que la densidad óptima puede variar entre genotipos aún para similares condiciones ambientales (Sarlungue *et al.*, 2007).

Por lo anteriormente citado, la DOA puede variar con las condiciones ambientales en interacción con el genotipo utilizado. Para lo cual es necesario una mayor comprensión de la relación entre NGP y TCP y su impacto sobre la DOA que facilite la toma de esta importante decisión de manejo del cultivo de maíz.

HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis

En la DOA de siembra de maíz la TCP durante el periodo crítico para la fijación del número de granos es constante y dependiente solamente del genotipo empleado.

Objetivo General

Analizar el efecto de la interacción genotipo:ambiente sobre la relación de número de granos fijados y tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico del maíz y sus implicancias sobre la densidad óptima agronómica.

Objetivos Específicos

- Determinar cambios en la TCP asociados al ambiente productivo en distintos genotipos.
- Analizar la relación entre la TCP y el NGP para distintos ambientes y genotipos, y evaluar el efecto interactivo entre genotipo:ambiente.
- Determinar el valor de tasa de crecimiento por planta que se relaciona con la densidad óptima agronómica para dos genotipos de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción de los sitios experimentales

Los ensayos experimentales del presente trabajo se realizaron en la campaña agrícola 2013/14, en tres sitios ubicados en las regiones naturales Pampa arenosa alta y Pampa arenosa plana, correspondientes a la mitad sur de la provincia de Córdoba (Figura 1).

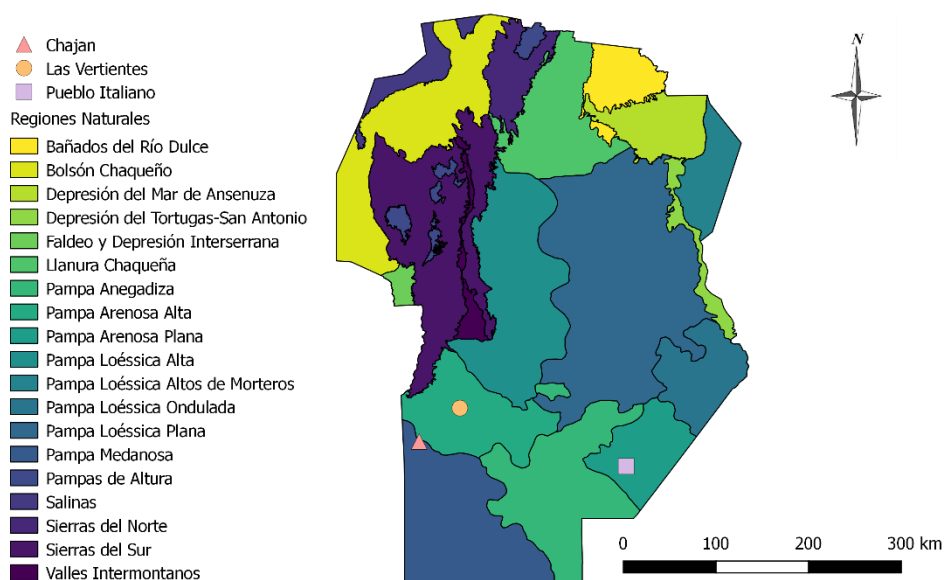


Figura 1. Mapa de las regiones naturales Córdoba (Agencia Córdoba Ambiente, 2013) y ubicación de los sitios experimentales.

Sitio Experimental Pueblo Italiano (PI)

Este sitio se ubicó en cercanías de la localidad de Pueblo Italiano (Córdoba) ($33^{\circ} 52' 46,56''S$ y $62^{\circ} 57' 36,24''O$). El clima de la zona se caracteriza por ser templado con una temperatura media anual de $16,6^{\circ}C$; registrándose desde los meses de septiembre a mayo días con temperaturas superiores a $35^{\circ}C$ (INTA, 1986). El periodo libre de heladas es de 223 días (desde el 13 de septiembre al 16 de mayo). El régimen pluviométrico es monzónico (80% de las lluvias se concentran en el semestre más cálido, octubre a marzo). El suelo es un Haplustol éntico, de textura franco arenoso, profundo, algo excesivamente drenado y un contenido de materia orgánica del horizonte A alrededor del 2%. Se presenta asociado a relieves planos altos y suavemente ondulados, con pendiente que van del 1 al 3 %. Clasificados según su aptitud de uso como clase IIIec (Jarsún *et al.*, 2003).

Sitio Experimental Las Vertientes (LV)

Este sitio experimental se ubicó en cercanías de la localidad de Las Vertientes (Córdoba) ($33^{\circ} 18' 56,27''\text{S}$ y $64^{\circ} 34' 22,78''\text{O}$). El clima de la región es templado subhúmedo, con un régimen de precipitaciones de tipo monzónico y con una precipitación media anual de 801 mm (Seiler *et al.*, 1995). Las fechas medias de primera y última heladas meteorológicas para el periodo 1974-1993 corresponden al 25 de mayo ($\pm 14,3$ días) y 12 de septiembre ($\pm 20,3$ días), respectivamente. Para ese mismo período, las fechas extremas de primera y última helada son el 29 de abril y el 4 de noviembre, respectivamente. El periodo medio libre de heladas meteorológicas resultante es de 255 días. Durante ese lapso el rango normal de temperaturas máximas varía de $22,1$ a $29,1$ °C (media= $26,7^{\circ}\text{C}$) y el de las mínimas de $9,5$ a $17,1^{\circ}\text{C}$ (media= $14,5^{\circ}\text{C}$), con una temperatura media anual de $16,4^{\circ}\text{C}$ (Seiler *et al.*, 1995). El suelo de este sitio es predominantemente un Haplustol údico, de textura franco-arenosa, profundo, de bien a algo excesivamente drenado y contenidos de materia orgánica del horizonte A de alrededor del 1,5%. Se presentan en pendientes que no superan el 1% y concavidades de drenaje libre. Clasificados según su aptitud de uso como clase VIsc (Jarsún *et al.*, 2003).

Sitio Experimental Chaján (CH)

El sitio experimental Chaján se localizó en cercanías a la localidad homónima, (Córdoba) ($33^{\circ} 38' 24,29''\text{S}$ y $64^{\circ} 58' 03,29''\text{O}$). La región presenta un clima templado subhúmedo, con un régimen de precipitaciones de tipo monzónico y media anual de 588 mm, concentrándose el 77 % de las mismas en los meses desde octubre a marzo. Las fechas medias de primera y última heladas meteorológicas para el periodo 1965-1985 corresponden al 22 de abril y 19 de octubre, respectivamente. El periodo medio libre de heladas meteorológicas resultante es de 185 días. Durante ese lapso el rango normal de temperaturas máximas es de $31,1$ °C y el de la mínima $0,8$ °C, con una temperatura media anual de $15,6$ °C (INTA, 2000). El suelo es un Haplustol éntico, de textura franco-arenosa, profundo, algo excesivamente drenado y contenidos de materia orgánica del horizonte A entre 1,5 y 2%, asociados a una topografía de concavidades, con pendientes que van del 1 al 3 %. Clasificados como IVsc según su aptitud de uso (Jarsún *et al.*, 2003).

En todos los sitios experimentales el cultivo antecesor fue soja. La siembra se realizó en forma mecánica, empleando una sembradora neumática en el sitio PI y LV y una sembradora a placa en el sitio experimental CH, con una distancia entre surcos de 0,52 m.

Las fechas de siembra fueron el 17 de octubre, 10 de diciembre y el 16 de diciembre del año 2013, para los sitios PI, LV y CH, respectivamente.

En todos los sitios y zonas de manejo se fertilizó con 10, 20, 10, 1 kg ha⁻¹ de N, P, S y Zn, respectivamente. En todas las condiciones las dosis de nutrientes empleadas fueron establecidas en base a satisfacer valores de suficiencia P, S y Zn para al menos la situación de mínima oferta nutricional, asegurándose de esta manera que en ningún caso la disponibilidad de estos nutrientes interactúe con los objetivos del presente trabajo.

En el estadio fenológico de V6 se realizó una re fertilización con 50 kg ha⁻¹ de N, según la dosis modal utilizada en el sur de Córdoba (Cisneros *et al.*, 2008) empleando nitrato de amonio calcáreo (CAN) como fuente.

El control de malezas se realizó empleando en todos los sitios una aplicación en barbecho de glifosato y en postemergencia del cultivo glifosato + atrazina.

Para el control de insectos de suelo se usó Clotianidin + Metiocarb y enfermedades del rizoplasma se utilizó trifloxystrobin + metalaxyl + ipconazole; en dosis comerciales. En ningún sitio experimental se registraron ataques de enfermedades del filoplasma que requirieran de un control químico de las mismas.

Delimitación de las zonas de manejo:

Previo a la instalación de los ensayos, se realizó una zonificación de los lotes donde se ubicaron los ensayos a fin de delimitar las zonas de manejo de alta producción (AP) y baja producción (BP) en cada sitio experimental.

La delimitación de zonas de manejo se realizó en base a mapas de rendimiento de campañas previas (ya sean 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 *et al.*, 2006). Para la eliminación de estos datos Outliers se utilizó el análisis de Intervalo Intercuartil (IIQ) (Tukey, 1977) este es un método de la estadística descriptiva, analítico, no paramétrico que identifica los valores extremos a través de una determinación estadística de la distribución de datos. Los puntos extremos o

valores atípicos (observaciones numéricamente distantes del resto de los datos) se definen entonces como los valores de los datos que se encuentran más allá de una "valla interior", definidos por la Ecuación I:

$$X < Q1 - 1,5 \cdot IIQ \text{ ó } X > Q3 + 1,5 \cdot IIQ \quad [I]$$

donde X son los valores outliers a eliminar y $Q1$ y $Q3$ son los cuartiles primero y tercero, e $IIQ = Q3 - Q1$.

Posteriormente se unieron todos los mapas de rendimiento ya limpios a una grilla de 9 m de ancho por 9 m de largo (coincidente con el ancho de plataforma de la cosechadora), y se creó un único mapa con la información de rendimiento correspondiente a cada campaña. El rendimiento se relativizó anualmente en cada celda en función del rendimiento promedio anual, de este modo se normalizó la productividad sitio específico independientemente del cultivo y de las condiciones ambientales de cada campaña.

Luego, se analizó el mapa resultante a través del software "Management Zone Analyst (MZA)" (Mizzou-ARS, 2000) para obtener las zonas de manejo. 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) que modela el grado de homogeneidad de las zonas. Valores bajos de éste, indican alto grado de organización y valores altos, bajo grado de organización. En base a los mismos se definen el número de zonas de manejo del lote y se obtiene la ubicación espacial de dichas zonas; la cual fue utilizada para la ubicación del ensayo en los distintos sitios.

Observaciones y determinaciones

Del clima:

Los registros diarios de las variables meteorológicas se obtuvieron de una estación automatizada de la Bolsa de Cereales de Córdoba, situada en las proximidades de los ensayos.

Se consideraron los datos diarios de:

- Precipitaciones (mm).
- Temperatura del aire, máxima, mínima y media en abrigo meteorológico (°C).

Del suelo:

Al momento de la siembra, se realizó un análisis de las propiedades químicas del suelo en los distintos sitios y en las distintas zonas de manejo delimitadas. Para ello, se realizó un muestreo estratificado por zona de manejo, es decir se tomó una muestra en la zona AP y BP en cada una de las localidades. Cada muestra a su vez fue compuesta por 30 submuestras obtenidas en forma aleatoria dentro de cada zona; se analizaron las siguientes capas de suelo: 0-0,20 y 0,20-0,40 m.

Las variables analizadas en los primeros 20 cm fueron: materia orgánica (Walkley y Black modificado), fósforo (Bray I), nitrógeno de nitratos (Ac Fenoldisulfónico), pH (Potenciometría 1:2,5), azufre de sulfatos (turbidimetría), calcio (Acetato de amonio 1N A.A), magnesio (Acetato de amonio 1N A.A), potasio (Acetato de amonio 1N F.LL), sodio (Acetato de amonio 1N F.LL), zinc (Ext. con DPTA. Espectrofotometría A.A.), manganeso (Ext. con DPTA. Espectrofotometría A.A.), cobre (Ext. con DPTA. Espectrofotometría A.A.), hierro (Ext. con DPTA. Espectrofotometría A.A.) y boro (Acetato de amonio. Azometina).

Del cultivo:

Etapas ontogénicas:

El seguimiento temporal de la fenología del cultivo (V_{13} , R_1 , R_3) en las distintas fechas de siembra se realizó *in situ*, mediante el registro de la fecha de ocurrencia en días calendario de las principales etapas fenológicas del cultivo, según la clave de estadios de desarrollo propuesta por Ritchie y Hanway (1982).

Producción de Materia Seca:

En los estadios fenológicos de V₁₃ y R₃ (Ritchie y Hanway, 1982), periodo coincidente con el periodo crítico del cultivo de maíz, se tomaron 4 muestras de 5 plantas, por tratamiento y repetición. Cada muestra se pesó en el campo y se tomó una alícuota de 1 planta por muestra, que posteriormente fue secada en estufa a 80°C hasta peso constante para establecer el contenido de humedad del material verde. Finalmente, se afectó el peso de la muestra verde (a campo) por este coeficiente, obteniéndose así la materia seca total.

La tasa de crecimiento por planta durante el periodo V₁₃-R₃, se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación (Andrade *et al.*, 1999):

$$TCP (g d^{-1}) = (MS R3 - MS V13)/DP \quad \text{[Ecuación II]}$$

donde TCP es la tasa de crecimiento por planta; MS V13 es la materia seca (g) en el estadio V13; MS R3 es materia seca (g) en R3; y DP es la duración en días del periodo comprendido entre V13 y R3.

Rendimiento y sus componentes:

Al momento de madurez de cosecha, se realizó la cosecha de manera manual. Se tomaron 4 muestras por tratamiento y repetición. En cada muestra se recolectaron todas las espigas que se encontraron en 5 metros lineales de los surcos centrales, posteriormente se procedió al desgrane mecánico de las espigas y pesado de la muestra; además se cuantificó el número de plantas presentes, a fin de obtener la densidad de plantas a cosecha en cada tratamiento.

En ese mismo momento se determinó el peso de granos, para lo cual se tomaron de cada muestra recolectada a campo, cinco submuestras de 100 granos cada una y se pesaron.

La determinación del número de granos se llevó a cabo a través de la ecuación III, la cual está basada en el peso de los granos y el rendimiento (Andrade *et al.*, 1999):

$$N^{\circ} \text{ granos } m^{-2} = \text{Rendimiento } (g m^{-2}) * 1000 / \text{Peso de 1000 granos } (g) \quad \text{[Ecuación III]}$$

donde N° granos m⁻² es el número de granos de maíz que hay en un metro cuadrado; Rendimiento es el rendimiento en grano del maíz (g m⁻²); Peso de 1000 granos es el peso en g de 1000 granos de maíz.

El número de granos por planta se obtuvo como el coeficiente entre el número de plantas de cada muestra y el número de granos de dicha muestra (ecuación IV):

$$N^{\circ} \text{ de granos planta}^{-1} = N^{\circ} \text{ de granos} / N^{\circ} \text{ de planta} \quad [\text{Ecuación IV}]$$

donde N° granos planta^{-1} es el número de granos por cada planta; N° de granos es el número de granos de la muestra n ; N° de plantas es el número de plantas de la muestra n .

Relación entre Variables

Relación entre densidad y rendimiento:

Utilizando los datos de rendimiento y densidad de plantas se ajustó un modelo de respuesta del rendimiento a la densidad de tipo cuadrático (Andrade *et al.*, 1996; Sarlengue *et al.*, 2007), como se observa en la ecuación V, para cada híbrido en cada sitio, zona de manejo y bloque.

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = a + b D + c D^2 \quad [\text{Ecuación V}]$$

donde a , b y c son parámetros determinados mediante regresión no lineal con el uso del programa GraphPad Prism version 5.00 para Windows, (GraphPad Software, San Diego California USA). D es densidad en plantas ha^{-1} y R es el rendimiento.

Densidad Óptima Agronómica:

La densidad óptima agronómica (DOA), que es la densidad en la cual se obtiene el mayor rendimiento de granos, se determinó para cada híbrido en cada repetición, zona de manejo y sitio experimental. La DOA se estableció según Sarlengue *et al.*, 2007 (ecuación VI) como la primera deriva de la función de producción del cultivo de maíz en relación a la densidad de plantas, donde se obtuvo un polinomio de segundo grado por cada híbrido (ecuación V)

$$DOA (\text{plantas ha}^{-1}) = -b/2a \quad [\text{Ecuación VI}]$$

donde DOA es la densidad óptima de plantas (plantas ha^{-1}); a y b son los parámetros obtenidos de la ecuación V.

Relación entre tasa de crecimiento por planta y número de granos:

Con los datos correspondientes a todas las densidades, híbridos, localidades y zonas de manejo se estimó la relación entre el número de granos por planta y la tasa de crecimiento individual, mediante el ajuste de la ecuación VII (Andrade *et al.*, 1999).

$$NGP = a - (b/TCP) \quad \text{[Ecuación VII]}$$

donde a y b son parámetros determinados mediante regresión no lineal con el uso del programa GraphPad Prism version 5.00 para Windows, (GraphPad Software, San Diego California USA). NGP corresponde a los números de granos por plantas; TCP a la tasa de crecimiento por planta en el período crítico de definición del rendimiento para el cultivo de maíz.

Las curvas obtenidas fueron comparadas mediante F test (Gallant, 1987).

Relación entre densidad y tasa de crecimiento por planta:

La relación entre densidad y tasa de crecimiento se realizó mediante el ajuste de una función exponencial (ecuación VIII); esta relación se determinó para cada híbrido en todos los sitios experimentales y para las distintas zonas de manejo.

$$TCP (g d^{-1}) = a \text{Exp}^{-bD} \quad \text{[Ecuación VIII]}$$

donde TCP es la tasa de crecimiento por planta ($g d^{-1}$); a y b son parámetros del modelo determinados mediante el programa GraphPad Prism version 5.00 para Windows, (GraphPad Software, San Diego California USA); D es la densidad de plantas a cosecha.

Las curvas obtenidas fueron comparadas mediante F test (Gallant, 1987).

Obtención de la TCP, número de granos, peso de 1000, rendimiento y producción por planta, correspondientes con la DOA

A partir de la densidad óptima agronómica obtenida en cada sitio, zona de manejo y bloque, y la ecuación VIII se obtuvo el valor de tasa de crecimiento correspondiente con la DOA (TCP_{DOA}).

Posteriormente a través de la ecuación VII y el valor de TCP_{DOA} obtenido previamente se determinó el número de granos (NGP_{DOA}).

El rendimiento máximo del cultivo (Rt_{DOA}) para cada sitio y zona de manejo se obtuvo mediante la ecuación V. La producción por planta (g) cuando la densidad correspondía a la óptima agronómica (PP_{DOA}) se calculó como el cociente entre el Rt_{DOA} y la DOA, según la ecuación IX:

$$PP_{DOA}(g) = \frac{Rt_{DOA}}{DOA} * 1000 \quad \text{[Ecuación IX]}$$

donde PP_{DOA} es la producción por planta cuando la densidad es la óptima agronómica (g); Rt_{DOA} es el rendimiento correspondiente a la densidad óptima agronómica ($kg\ ha^{-1}$) y DOA es la densidad óptima agronómica ($p\ ha^{-1}$).

Finalmente se estimó el peso de 1000 granos ($P1000_{DOA}$), según la ecuación X.

$$P1000_{DOA}(g) = \frac{PP_{DOA}}{NGP_{DOA}} * 1000 \quad \text{[Ecuación X]}$$

donde $P1000_{DOA}$ es el peso de 1000 granos cuando la densidad es la óptima agronómica (g); PP_{DOA} es la producción por planta cuando la densidad es la óptima agronómica (g) y NGP_{DOA} es el número de granos por planta cuando crecen en la densidad óptima agronómica.

Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental utilizado en este trabajo fue de bloques completos aleatorios, con un arreglo factorial de parcelas sub-divididas (Di Rienzo *et al.*, 2005) y dos repeticiones espaciales por tratamiento, siendo el factor principal el sitio con 3 niveles: PI, LV y CH; el factor secundario la zona 2 niveles, AP y BP; y el factor terciario el genotipo con 2 niveles: DK 692 VT3P y DK7210VT3P (híbridos elegidos por su amplia participación en el mercado (Di Matteo *et al.*, 2016)); donde el factor zona se anidó al sitio, como se describe en la siguiente ecuación.

$$y = \mu + S + S > Z + S * Z > B + H + S * H + H * Z + S * Z * H + \varepsilon \text{ [ecuación XI]}$$

donde y es la densidad óptima agronómica, y/o el número de granos por planta cuando la densidad fue la óptima, y/o rendimiento correspondiente a la densidad óptima, y/o peso de 1000 granos y/o producción individual. S representa el sitio, Z es la zona de manejo, H es el híbrido, B el bloque y ε el error.

Es necesario destacar que en cada sitio experimental se utilizaron 4 densidades de siembra, entre 40000 y 150000 semillas ha^{-1} (según disponibilidad por sitio) a los efectos de poder establecer en cada sitio la DOA. Posteriormente el modelo estadístico probado y la hipótesis testeada se realizó sobre esta DOA y su dependencia con el sitio, la zona de manejo y el híbrido utilizado. En cada caso particular y para cada DOA fueron estudiadas la relación entre NGP y TCP.

Análisis e interpretación de los resultados:

Todas las relaciones fueron ajustadas de acuerdo al análisis de regresión y sus parámetros comparados mediante el programa estadístico GraphPad Prism version 5.00 para Windows, (GraphPad Software, San Diego California USA).

Además, se realizó un ANAVA y test de comparación de medias LSD de Fisher ($\alpha=0,05$), mediante el software estadístico INFOSTAT versión 2016 (Di Reinzo *et al.*, 2016) para las variables de DOA, TCP_{DOA} , NGP_{DOA} , RTO_{DOA} , $P1000_{DOA}$ y PP_{DOA} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones meteorológicas durante el estudio

En Pueblo Italiano, durante la campaña 2013/14, se registró una temperatura media de 23°C, con una temperatura mínima absoluta de 5,9°C y máxima absoluta de 40,9°C (Figura 2). Es importante resaltar que, durante el periodo crítico del cultivo, este estuvo expuesto durante 18 días a temperaturas superiores a los 35°C, temperatura a partir de la cual el maíz comienza a sufrir estrés térmico (Edreira *et al.*, 2011). La precipitación durante el ciclo del cultivo fue de 708 mm, cuya distribución puede observarse en la Figura 3. Si bien estas precipitaciones se encuentran por encima de la normal (635 mm) para el mismo periodo, durante el periodo crítico del cultivo (20 de diciembre al 20 de enero) se registraron solo 36,6 mm indicando la posible ocurrencia de un estrés hídrico para el cultivo.

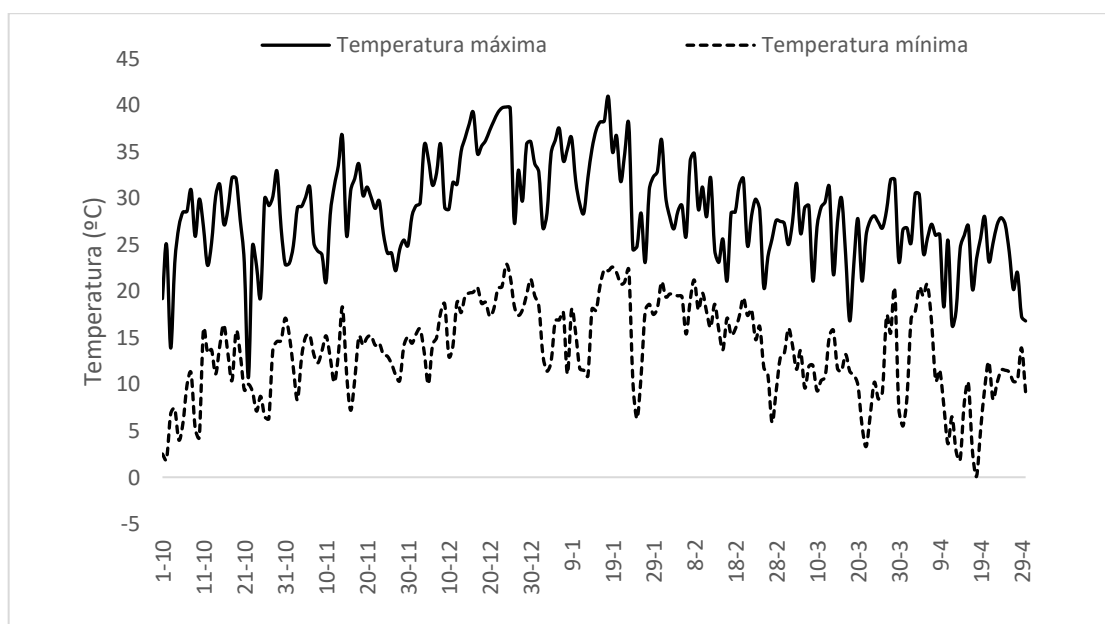


Figura 2. Temperaturas máximas (línea llena), mínimas (línea punteada), para la campaña 2013/14 en Pueblo Italiano.

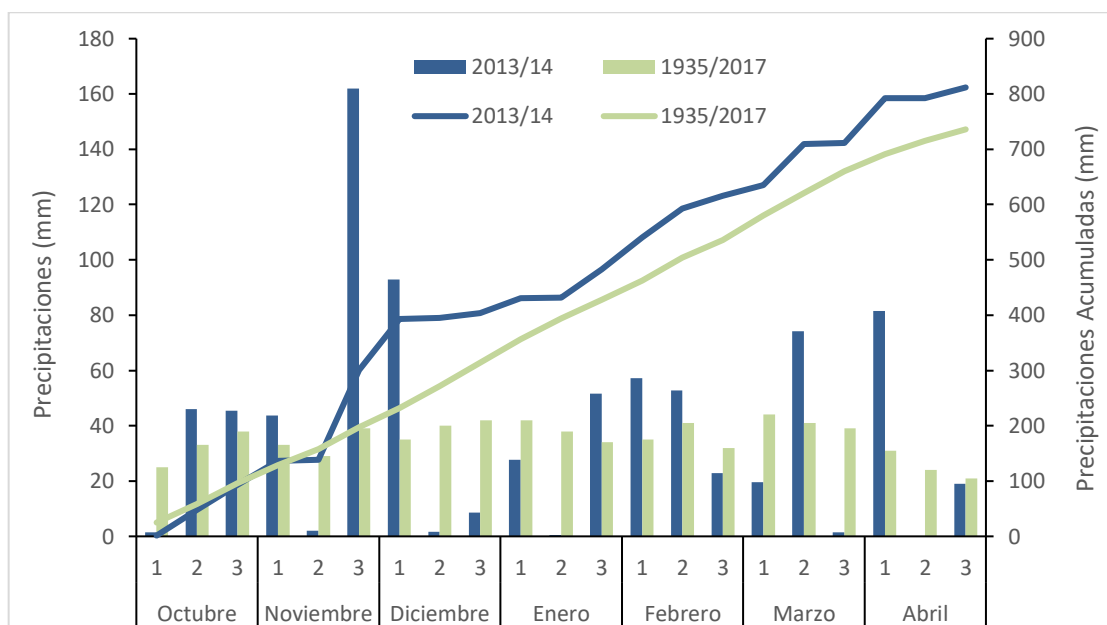


Figura 3. Precipitaciones decádicas (barras) y acumuladas (líneas) para la campaña 2013/14 y normal 1935/2017 en Pueblo Italiano.

En Las Vertientes la temperatura máxima registrada durante el ciclo del cultivo fue de 39,2°C y la mínima de -0,3°C (Figura 4), cabe mencionar que esta temperatura mínima ocurrió el 15 de abril, estando el cultivo en un estadio reproductivo avanzado (R₅₋₆), por lo que los daños sobre el rendimiento fueron despreciables.

Las precipitaciones sumaron un total de 401 mm durante el ciclo del cultivo. Cabe destacar las buenas condiciones hídricas durante el periodo crítico del cultivo (2° década de febrero a 1° década de marzo), donde las precipitaciones superaron a los valores normales de la serie 1974/93 (157 mm vs 108 mm). Esta condición hídrica permitió que el cultivo tenga condiciones favorables para la fijación de granos, principal componente del rendimiento, y por ende explica que el rendimiento alcanzado en este sitio haya sido superior a los otros. Si bien desde R3 en adelante (llenado de granos) las precipitaciones estuvieron por debajo de la normal el agua excedente del primer periodo permitió que el peso de los granos no sea afectado de manera negativa por la escasez de precipitaciones (Figura 5).

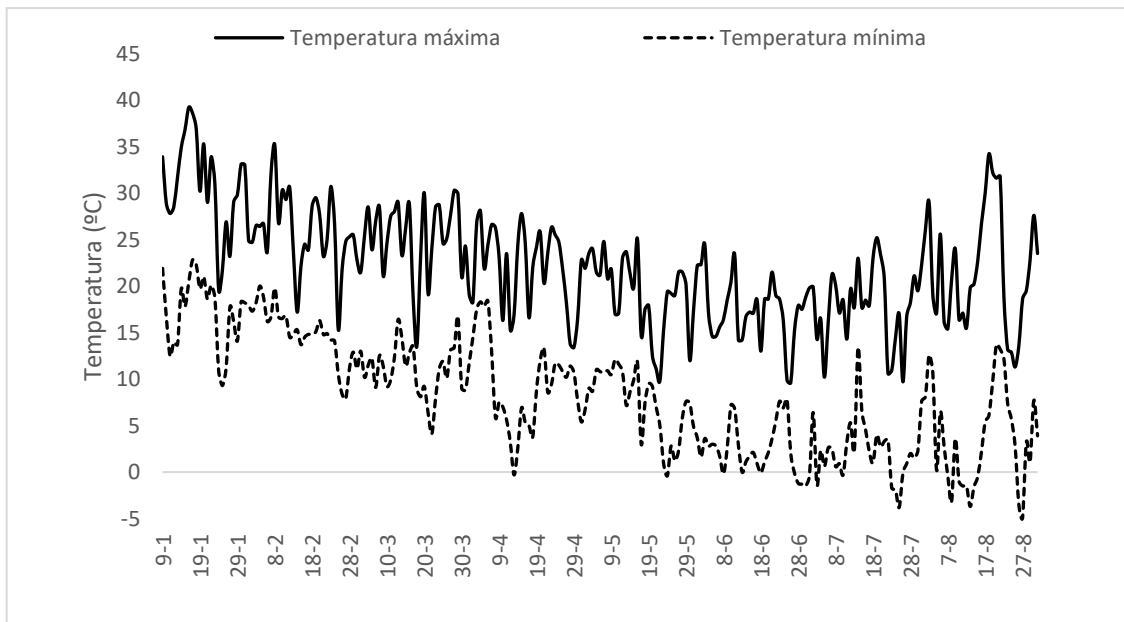


Figura 4. Temperaturas máximas (línea llena), mínimas (línea punteada), para la campaña 2013/14 en Las Vertientes.

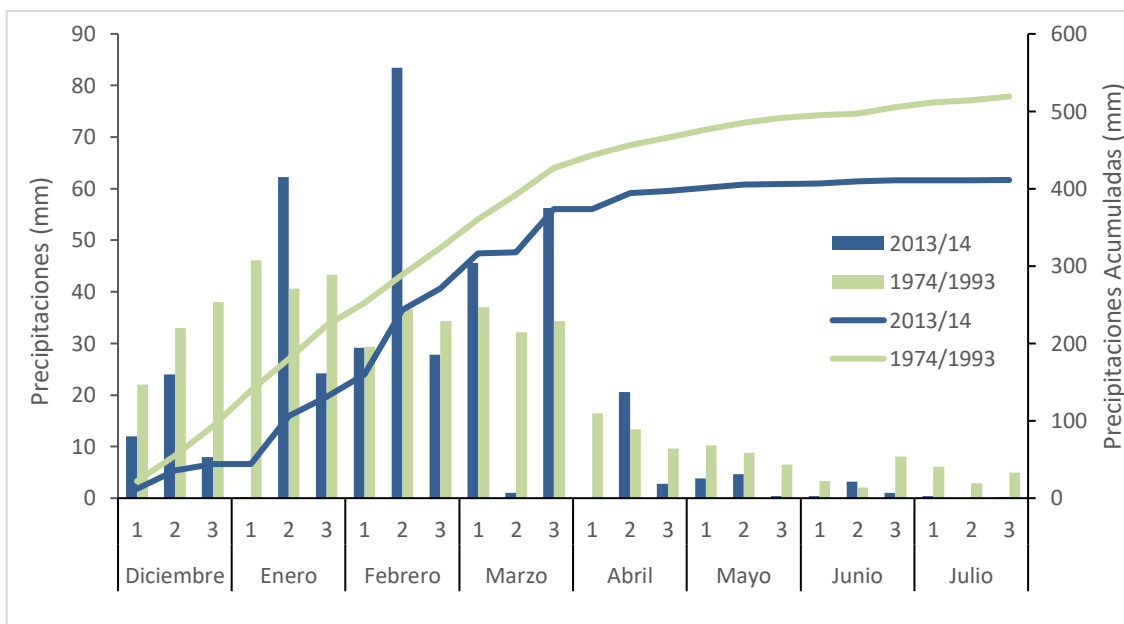


Figura 5. Precipitaciones decádicas (barras) y acumuladas (líneas) para la campaña 2013/14 y normal 1974/1993 en Las Vertientes.

En el sitio experimental Chaján se registró una temperatura máxima de 40,7°C y una mínima fue de -2,6°C, esta temperatura mínima, al igual que en el sitio LV, se produjo a mediados de abril, en este momento el cultivo estaba en estadios avanzados (R₅₋₆) y por lo tanto se descartó una disminución del rendimiento (Figura 6). Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo sumaron un total de 419 mm. Desde siembra hasta el inicio del periodo crítico las mismas fueron inferiores a las normales, con una diferencia de 64 mm respecto a

la normal. Lo que pudo generar un estrés hídrico que afecto al cultivo. Si bien las precipitaciones ocurridas durante el periodo crítico (segunda y tercera decena de febrero y primera decena de marzo) superaron a la normal en 35 mm, esto pudo no alcanzar la demanda del cultivo en dicho periodo. Finalmente durante el llenado de granos las precipitaciones fueron similares a las normales para el sitio (Figura 7).

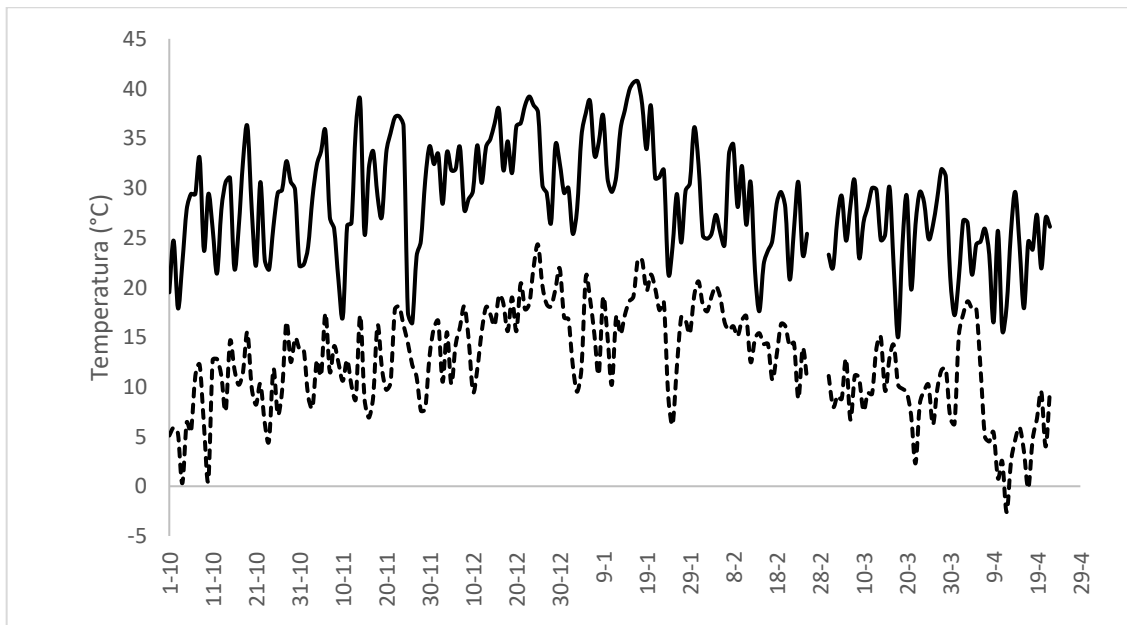


Figura 6. Temperaturas máximas (línea llena), mínimas (línea punteada) y precipitaciones (barras), para la campaña 2013/14 en Chaján.

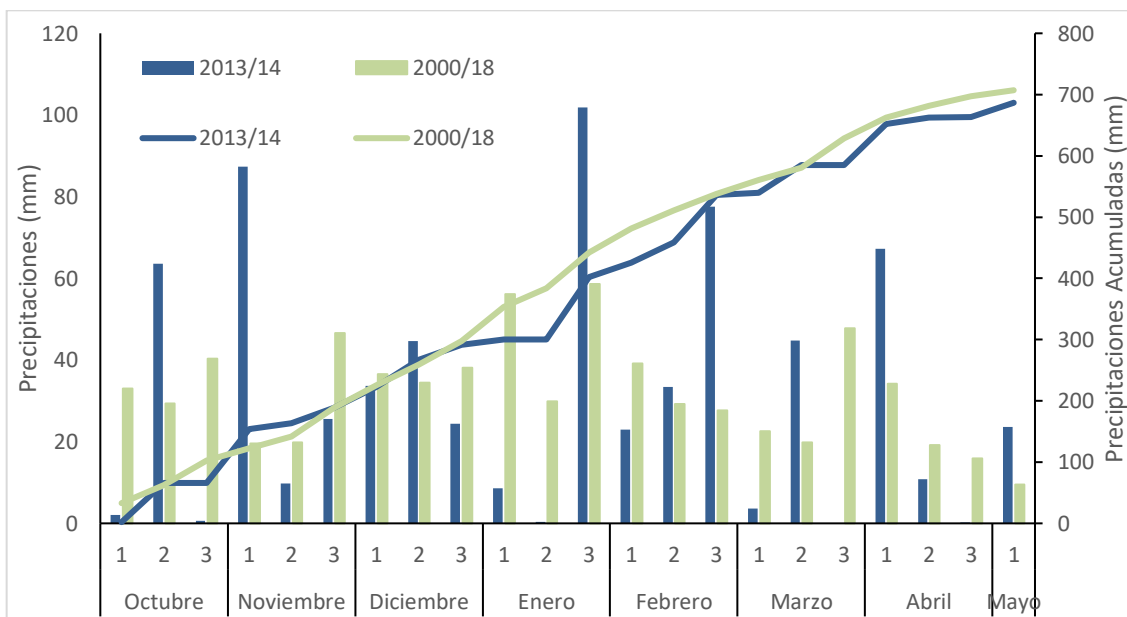


Figura 7. Precipitaciones decádicas (barras) y acumuladas (líneas) para la campaña 2013/14 y normal 2000/2018 en Chaján.

Análisis de las propiedades químicas del suelo

Las propiedades químicas del suelo de los distintos sitios experimentales y en las distintas zonas de manejo delimitadas se muestran en la Tabla 1.

Los resultados del análisis de suelo indicaron que en el sitio Pueblo Italiano los niveles de materia orgánica (MO) fueron altos (>2%), en comparación a los encontrados en los otros sitios experimentales evaluados, que variaron en un rango de 1 y 1,7%. Siendo superior en las zonas de alta producción (AP) dentro de cada sitio, excepto en CH. La misma tendencia se repite con el nitrógeno (N-NO₃), ya que este macronutriente está ligado fuertemente al contenido de MO de los suelos.

Tabla 1. Propiedades químicas del suelo en los distintos sitios experimentales, las zonas de manejo (AP y BP), y las profundidades (0 a 20 cm y de 20 a 40 cm) evaluadas.

	Pueblo Italiano				Las Vertientes				Chaján			
	AP		BP		AP		BP		AP		BP	
	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40	0-20	20-40
MO (g kg ⁻¹)	26,9		23,4		16,8		11		9,7		11,9	
N-NO ₃ (mg kg ⁻¹)	68,3	17,5	44,5	18,1	27,7	15,3	8,8	12,3	19,7	17	19,2	18,4
P (mg kg ⁻¹)	8,2		9		14,3		10,1		22,8		11,8	
S-SO ₄ (mg kg ⁻¹)	9	5,3	7,2	7,5	10,4	9	6,3	4,8	6,9	6,2	7	7,6
pH	5,7		5,8		6,4		5,5		6,3		6,3	
Ca (cmol kg ⁻¹)	6,13		5,99		5		5		5,83		4,87	
Mg (cmol kg ⁻¹)	2,11		2,15		1,4		1,55		1,43		1,4	
K (cmol kg ⁻¹)	1,78		1,84		1,26		1,55		1,68		1,1	
Na (cmol kg ⁻¹)	0,3		0,3		0,3		0,29		0,02		0,2	
Zn (mg kg ⁻¹)	0,89		0,85		0,48		0,18		0,25		0,19	
Mn (mg kg ⁻¹)	24,3		23,3		27,1		23,4		36		39	
Cu (mg kg ⁻¹)	0,96		0,89		0,87		0,72		0,5		0,58	
Fe (mg kg ⁻¹)	99,5		67,7		105,4		112,7		29,9		26,4	
Bo (mg kg ⁻¹)	1,36		0,82		0,83		0,52		0,54		0,56	

Los niveles de fósforo (P) estuvieron, a excepción de CH AP, todos los sitios presentaron valores de P-Bray al momento de la siembra por debajo del umbral crítico establecido para el cultivo de maíz (18 mg kg^{-1}) (Espósito *et al.*, 2013). Pueblo Italiano fue el sitio que presentó menores valores, respecto los otros dos, posiblemente debido a la mayor antigüedad bajo uso agrícola de los suelos de esta región (Sainz Rosas *et al.*, 2012). Lo cual, además explica los menores valores de pH encontrados en esta localidad, producto de la acidificación del suelo generada por su mayor tiempo e intensidad de uso (Sainz Rosas *et al.*, 2011).

En cuanto a los micronutrientes de más relevancia para el maíz, cabe resaltar que el zinc (Zn), se encontró por debajo del umbral crítico establecido para toda la región Pampeana de 1 mg kg^{-1} (Barbieri *et al.*, 2017). Otro micronutriente que se encontró en baja cantidad en todos los sitios fue el Boro, cuyo umbral crítico es de 1 mg kg^{-1} (Espósito *et al.*, 2013). Sin embargo, hasta la actualidad los estudios realizados sobre este micronutriente y su importancia en el maíz son escasos.

Relación entre la tasa de crecimiento por planta y el número de granos por planta

La relación entre TCP y NGP se ajustó a la función planteada por Andrade *et al.*, (1999); en la cual el número de granos fijados por planta se relaciona de manera curvilínea con la tasa de crecimiento individual durante el periodo crítico para la definición del rendimiento (Tablas 2 y 3).

En las Figuras 8, 9, y 10 y en la Tabla 2, se presentan los ajustes a la ecuación VI de los datos obtenidos en cada zona y sitio experimental para el híbrido DK 7210 VT3P, cabe recordar que la variabilidad obtenida en TCP y NGP provino de las diferentes densidades de siembras probadas. Además, puede observarse el ajuste general de este híbrido en todas las zonas de manejo y sitios experimentales evaluados.

Tabla 2. Ecuación ajustada entre números de granos por planta y tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico en cada sitio y zona de manejo para el híbrido DK 7210VT3P y ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona.

Sitio	Zona	Ecuación	R ²	p-valor	p-valor
				Parámetro A	Parámetro B
PI	AP	NG = 751,2 – (941,6 TCP ⁻¹)	0,55	0,6094	0,0737
	BP	NG = 704,8 – (719,5 TCP ⁻¹)	0,56	0,5494	0,7195
LV	AP	NG = 792,9 – (563,1 TCP ⁻¹)	0,55	0,0593	0,1799
	BP	NG = 780,5 – (732,4 TCP ⁻¹)	0,58	0,1457	0,6469
CH	AP	NG = 709,8 – (604,4 TCP ⁻¹)	0,65	0,5102	0,303
	BP	NG = 711,2 – (772,3 TCP ⁻¹)	0,52	0,6651	0,448
DK 7210 VT3P		NG = 729,2 – (681,7 TCP ⁻¹)	0,48		

*p-valor Parámetro A o B, indica la significancia estadística entre el valor ajustado para cada sitio/zona y el valor ajustado con la ecuación única.

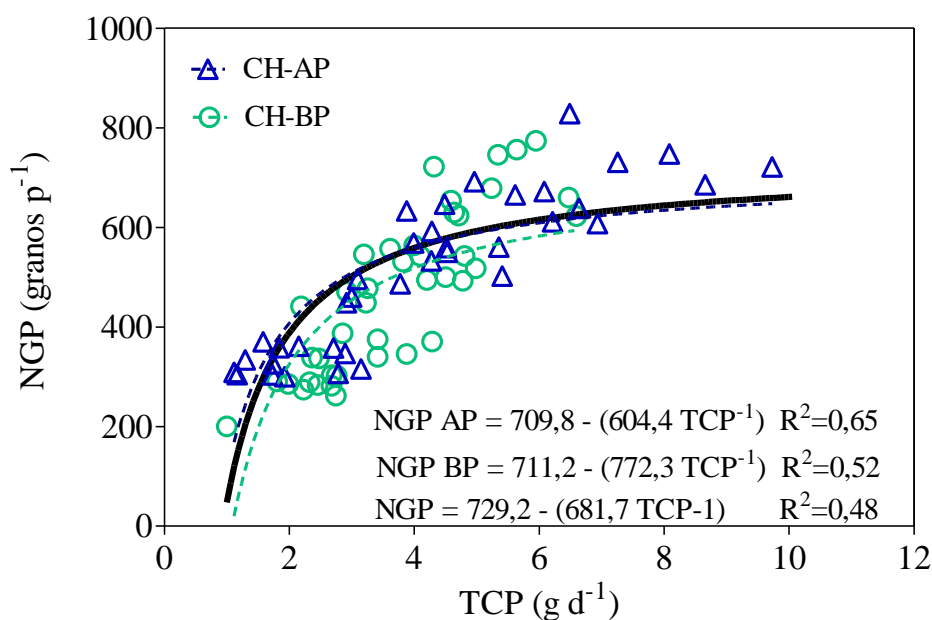


Figura 8. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p⁻¹) y tasa de crecimiento por planta entre V₁₃ y R₃ (TCP, g d⁻¹), para el híbrido DK 7210 VT3P en el sitio Chaján en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).

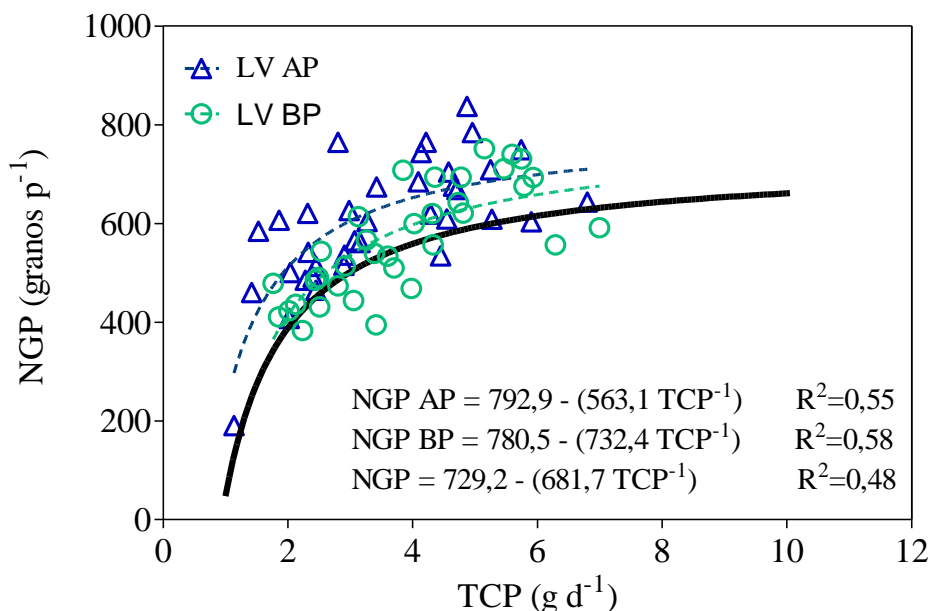


Figura 9. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en el sitio Las Vertientes en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).

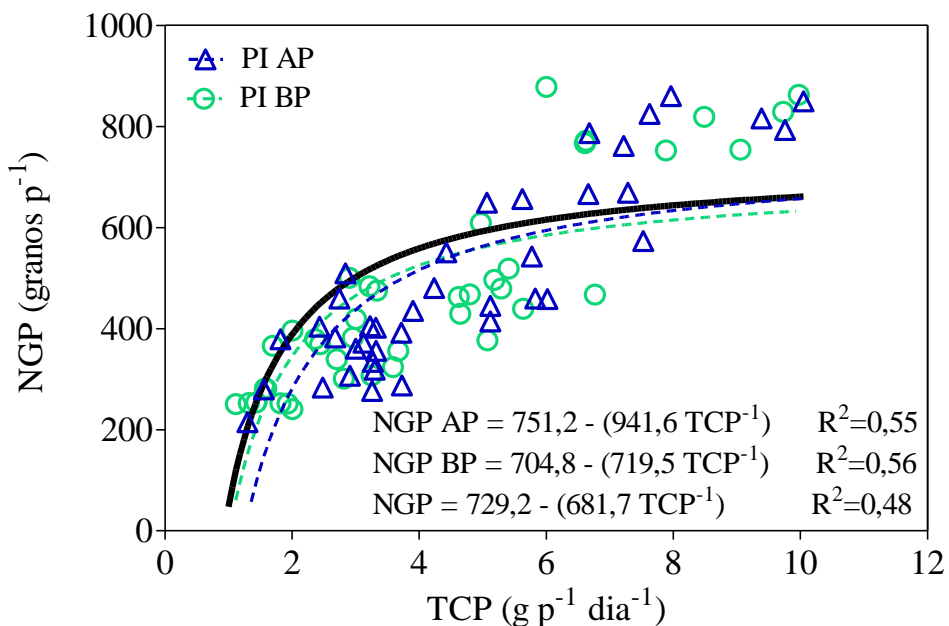


Figura 10. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g p^{-1} dia^{-1}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en el sitio Pueblo Italiano en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).

Como se aprecia en la Tabla 2 y según el F test realizado sobre los datos, las ecuaciones individuales (para cada zona en cada sitio) no difirieron estadísticamente de la obtenida para el conjunto de los datos ($p > 0,05$ para los parámetros A y B de cada ecuación), por lo tanto, todos los datos ajustaron a una única ecuación para este genotipo.

Para el híbrido DK 7210 VT3P, los parámetros estimados de la ecuación VII, como una ecuación única ($NG = a - (b/TCP)$) fueron: $a = 729,2 \pm 16,72$ y $b = 681,7 \pm 47,10$ ($R^2 = 0,48$; $F = 6,68$; $p < 0,0001$).

De la misma manera, en las Figuras 11, 12 y 13 y en la Tabla 3, se presentan los ajustes de la ecuación VII para los datos obtenidos en cada zona de manejo y sitio experimental para el híbrido DK 692 VT3P, además puede observarse el ajuste a esta función del mismo híbrido en todas las zonas y sitios experimentales, como ecuación única.

Tabla 3. Ecuación ajustada entre números de granos por planta y tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico en cada sitio y zonas de manejo para el híbrido DK 692 VT3P y ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona.

Sitio		Ecuación	R^2	Parámetro A	Parámetro B
PI	AP	$NG = 799,8 - (1069 \text{ TCP}^{-1})$	0,36	0,6731	0,148
	BP	$NG = 772,2 - (945,9 \text{ TCP}^{-1})$	0,47	0,9666	0,6282
LV	AP	$NG = 834,4 - (610 \text{ TCP}^{-1})$	0,63	0,756	0,2311
	BP	$NG = 865,4 - (685,2 \text{ TCP}^{-1})$	0,50	0,0748	0,8405
CH	AP	$NG = 764,3 - (744,5 \text{ TCP}^{-1})$	0,63	0,8969	0,7233
	BP	$NG = 780,7 - (778,5 \text{ TCP}^{-1})$	0,45	0,8318	0,1522
DK 692 VT3P		$NG = 769,6 - (711,7 \text{ TCP}^{-1})$	0,37		

*p-valor Parámetro A o B, indica la significancia estadística entre el valor ajustado para cada sitio/zona y el valor ajustado con la ecuación única.

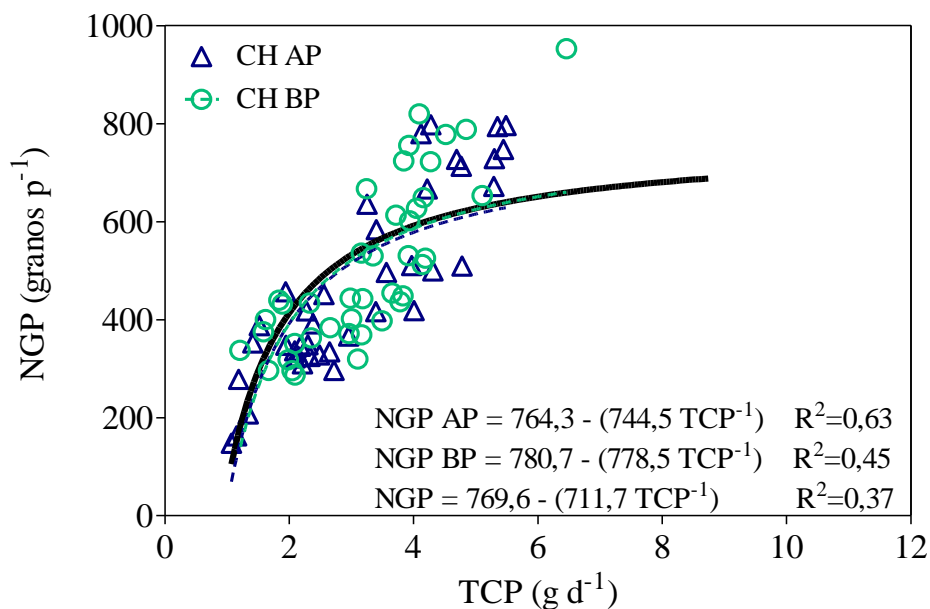


Figura 11. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 692 VT3P en el sitio Chaján en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).

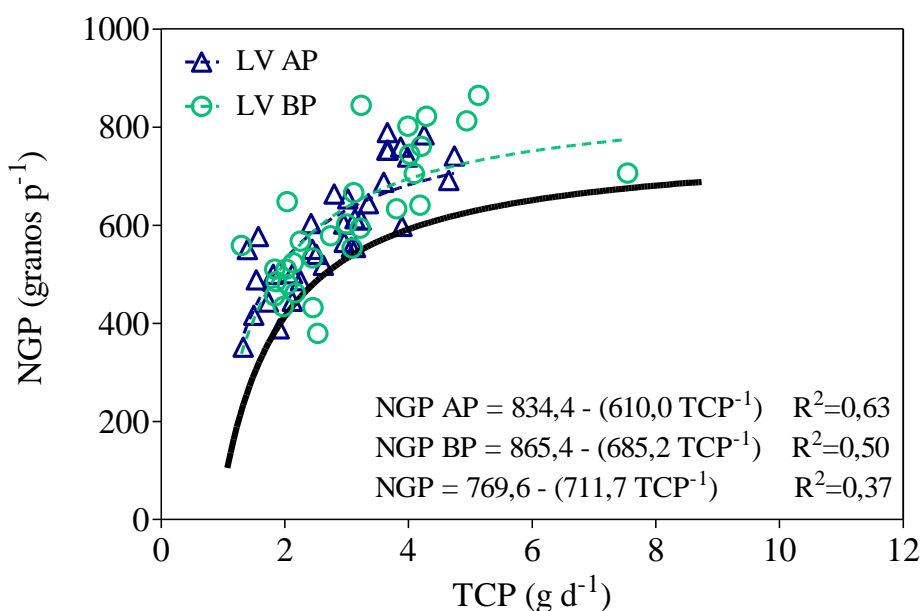


Figura 12. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 692 VT3P en el sitio Las Vertientes en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).

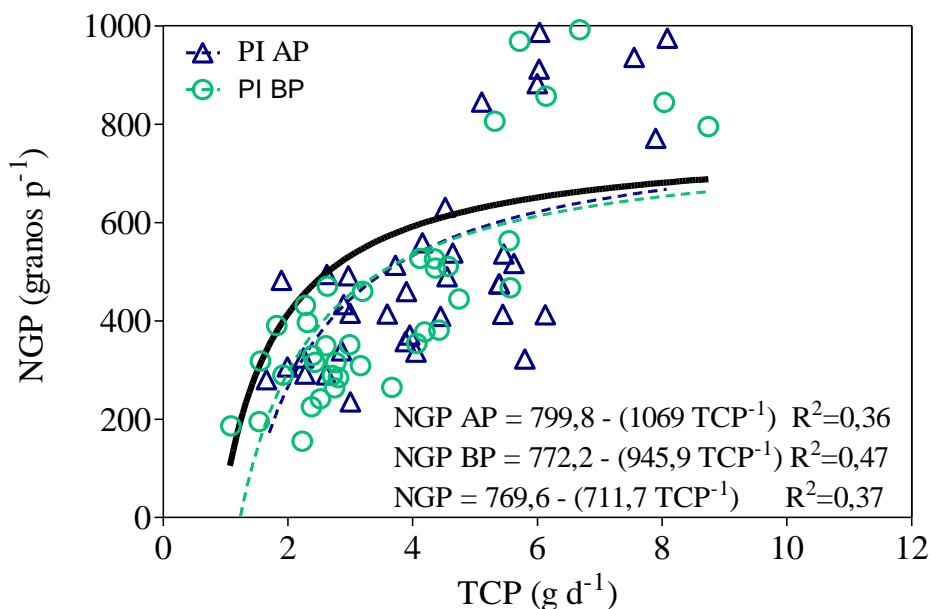


Figura 13. Relación entre el número de granos por planta (NGP, granos p^{-1}) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (TCP, $g d^{-1}$), para el híbrido DK 692 VT3P en el sitio Pueblo Italiano en la zona de alta producción (azul), baja producción (verde) y de ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona (línea negra).

Como fue planteado en el híbrido DK 7210 VT3P, la relación entre el NGP y la TCP del genotipo DK 692 VT3P no fue modificada por el sitio o la zona, encontrándose una única ecuación obtenida a partir de todos los datos ($p > 0,05$ para los parámetros A y B de la ecuación) (Figuras 11 a 13; Tabla 3). Los parámetros de esta ecuación única fueron: $a = 769,6 \pm 24,33$ y $b = 711,7 \pm 62,70$ ($R^2 = 0,37$; $F = 7,19$; $p < 0,0001$).

Coincidentemente con lo planteado por otros autores, la relación entre el número de granos por planta y la tasa de crecimiento individual fue genotipo dependiente (Echarte y Tollenar, 2006; Echarte *et al.*, 2013), no siendo modificada por cambios en el ambiente en el que se desarrolló la planta (*e.g.* densidad, sitio y zona de manejo). En este sentido, Andrade *et al.* (2002), encontraron que alteraciones en la disponibilidad de agua o de nitrógeno no generaron cambios en la relación entre el número de granos y la tasa de crecimiento por planta con respecto al mismo híbrido en condiciones no limitantes. Esto es debido a que los efectos directos de estas deficiencias sobre el número de granos son nulos o escasos, o bien que lo afectan indirectamente al disminuir la tasa de crecimiento de la planta. Contrariamente, D'Andrea *et al.* (2008), indicaron que al variar la oferta de N por planta (dosis de N de 0 y 400 kg ha^{-1}) la relación entre el número de granos fijados y la tasa de

crecimiento por planta fue modificada por afectar la tasa de partición de biomasa a espiga, y esta variación en la relación era dependiente del genotipo.

En la Figura 14, se observan las curvas de respuesta del NGP a la TCP para cada uno de los híbridos evaluados en las diferentes condiciones ambientales de este trabajo. Los parámetros de la función VII presentados en esta figura difirieron estadísticamente entre híbridos al 5% de probabilidad, lo cual indica que esta función es solo dependiente del material genético.

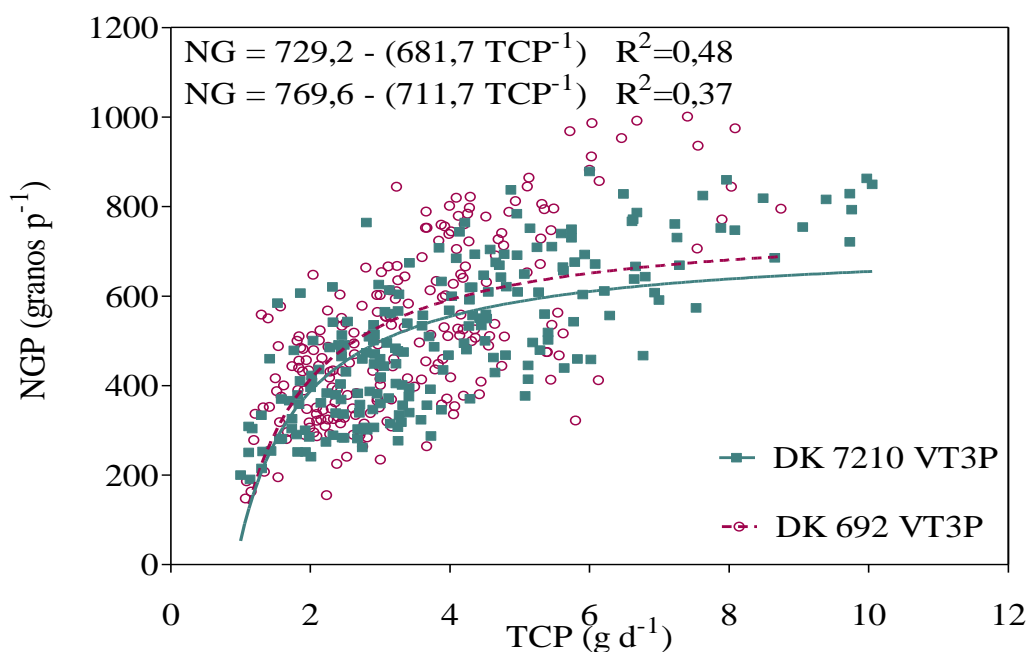


Figura 14. Relación entre el número de granos por planta ($\text{granos } p^{-1}$) y tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($\text{g } d^{-1}$), para los híbridos DK 692 VT3P (bordó) y DK 7210 VT3P (verde) en todos los sitios y zonas evaluadas.

Los valores estimados por híbrido del parámetro a (729,2 y 769,6, para DK 7210 VT3P y 692VT3p, respectivamente) y b (681,7 y 711,7 para DK 7210 VT3P y 692VT3P, respectivamente) se encuentran dentro del rango de valores estimados por Andrade *et al.*, (2002) quien determinó esta relación para distintas condiciones experimentales de disponibilidad de agua y nitrógeno. Los parámetros a y b de la ecuación obtenida por estos autores fueron 667 ± 19 y 705 ± 53 para los datos obtenidos con el suministro variable de N; 699 ± 41 y 837 ± 124 para datos obtenidos con disponibilidad variable de agua; y 699 ± 42 y 862 ± 101 para datos obtenidos con disponibilidad variable de N y agua.

Por otra parte, la diferencia entre genotipos encontrada coincide con lo señalado por otros autores. Echarte *et al.* (2013), indican que esta curva de respuesta cambia entre materiales genéticos, híbrido antiguo (liberado en 1965) y moderno (1993), similares resultados son descritos por Di Matteo *et al.* (2016) con híbridos argentinos de maíz liberados al mercado entre los años 1965 y 2010. Los cambios que señalan estos autores están referidos a una disminución del umbral de esterilidad y caída en la producción potencial individual. En este sentido, Tollenar y Lee (2011), indican que esta disminución del umbral es debido a que el mejoramiento genético ha tendido a la selección de genotipos capaces de tolerar altas densidades de siembra.

En otro estudio de campo realizado por Echarte y Tollenar (2006) demostraron que esta relación también cambia entre líneas parentales, y el híbrido (F1) resultante del cruzamiento de dichas líneas.

Para los genotipos evaluados se encontró un valor umbral de TCP por debajo del cual la planta no produce granos de 0,93 y 0,92 g d⁻¹, para DK 7210 VT3P y DK 692 VT3P, respectivamente. Valores levemente inferiores a los reportados por Andrade *et al.* (1999), quienes encontraron un umbral de 1 g d⁻¹ para el híbrido DK 636 (genotipo de la década de 1990). Sin embargo, estos valores estuvieron dentro del rango de umbrales de TCP encontrado por Echarte y Tollenar (2006), el cual varió de 0,67 a 1,2 g d⁻¹ para dos híbridos, y con los encontrados por Tollenar *et al.* (1992) rangos de TCP de 0,38 a 1,29 g d⁻¹ en 9 genotipos liberados entre 1959 y 1988 en EEUU.

Cabe mencionar que, al igual que lo resaltado por Andrade *et al.* (1999), este valor umbral es poco confiable, ya que existe una extrapolación de la curva por no haber conseguido datos medidos que estén próximos a este valor umbral de TCP para el inicio de fijación de granos.

Si bien en bajas tasas de crecimiento ambos híbridos se comportan de manera similar, conforme aumenta la tasa de crecimiento (umbral de esterilidad similar), DK 692 VT3P posee más granos para una misma tasa de crecimiento, lo cual indica la mayor potencialidad individual en la producción de granos, cuando la TCP fue de 4 g d⁻¹ el NGP fue de 593 y 560 granos p⁻¹, para el DK 692 VT3P y DK 7210 VT3P, respectivamente. Esto indicaría una mayor partición de biomasa a grano en el DK 692 VT3P respecto al otro genotipo evaluado en este trabajo.

Relación entre densidad y tasa de crecimiento por planta

La tasa de crecimiento por planta disminuyó de manera exponencial al incrementar la densidad de plantas. En las Figuras 15, 16, 17 y 18 y en la Tabla 4, se presentan los ajustes de la regresión entre la tasa de crecimiento individual durante el periodo crítico y la densidad de plantas de los datos obtenidos en cada zona de manejo y sitio experimental para el híbrido DK 7210 VT3P. Esta relación entre ambas variables difirió estadísticamente entre los ambientes según lo indicado por el F test ($F=11,65$; $p<0,0001$) y entre estos y una única función para este híbrido (Figura 18).

Tabla 4. Ecuación de regresión exponencial ajustada entre tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico y la densidad de plantas en cada sitio y zona de manejo para el híbrido DK 7210VT3P y ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona.

Sitio	Zona	Ecuación	R ²	p valor	p valor
				Parámetro A	Parámetro B
PI	AP	TCP = 12,38 Exp ^(-0,1349 D)	0,76	<0,0001	<0,0001
	BP	TCP = 14,90 Exp ^(-0,1850 D)	0,93	0,4207	0,9227
LV	AP	TCP = 8,982 Exp ^(-0,1120 D)	0,89	0,0001	0,0009
	BP	TCP = 7,419 Exp ^(-0,08687 D)	0,56	<0,0001	0,0018
CH	AP	TCP = 16,70 Exp ^(-0,1733 D)	0,85	<0,0001	<0,0001
	BP	TCP = 6,827 Exp ^(-0,07309 D)	0,60	0,0003	0,0089
DK 7210 VT3P		TCP = 11,58 Exp ^(-0,1362 D)			

*p-valor Parámetro A o B, indica la significancia estadística entre el valor ajustado para cada sitio/zona y el valor ajustado con la ecuación única.

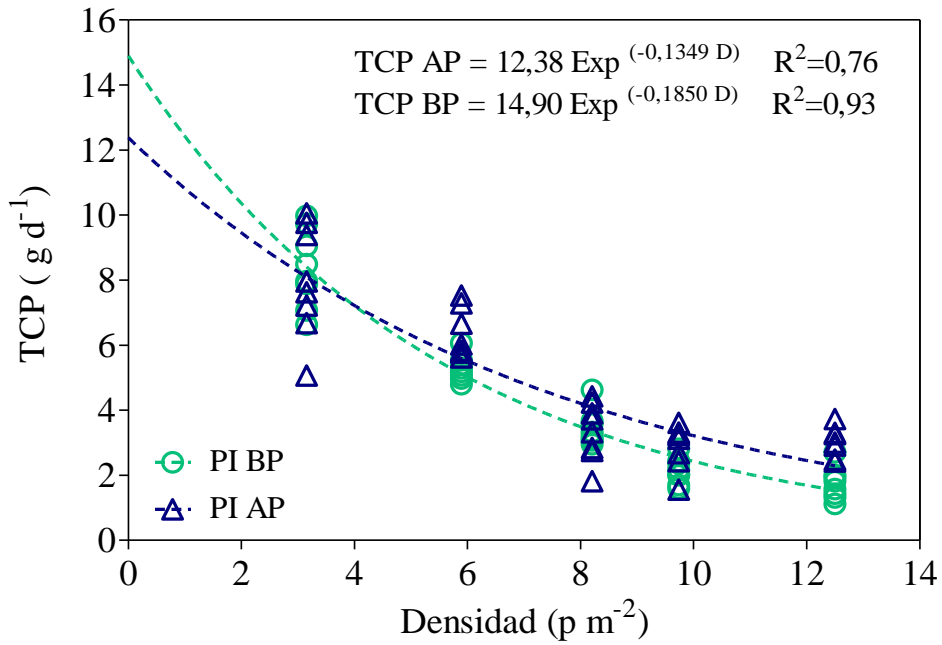


Figura 15. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Pueblo Italiano.

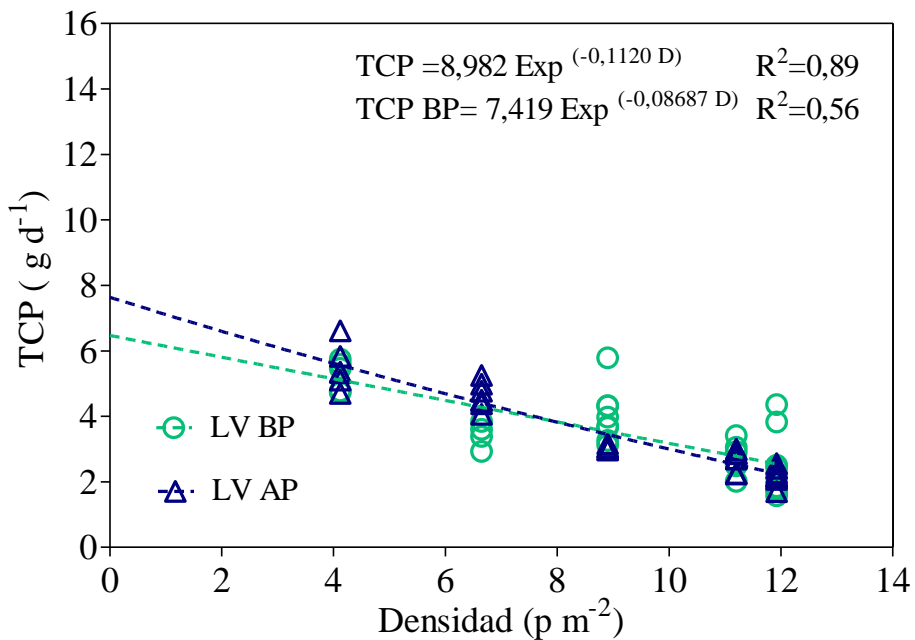


Figura 16. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Las Vertientes.

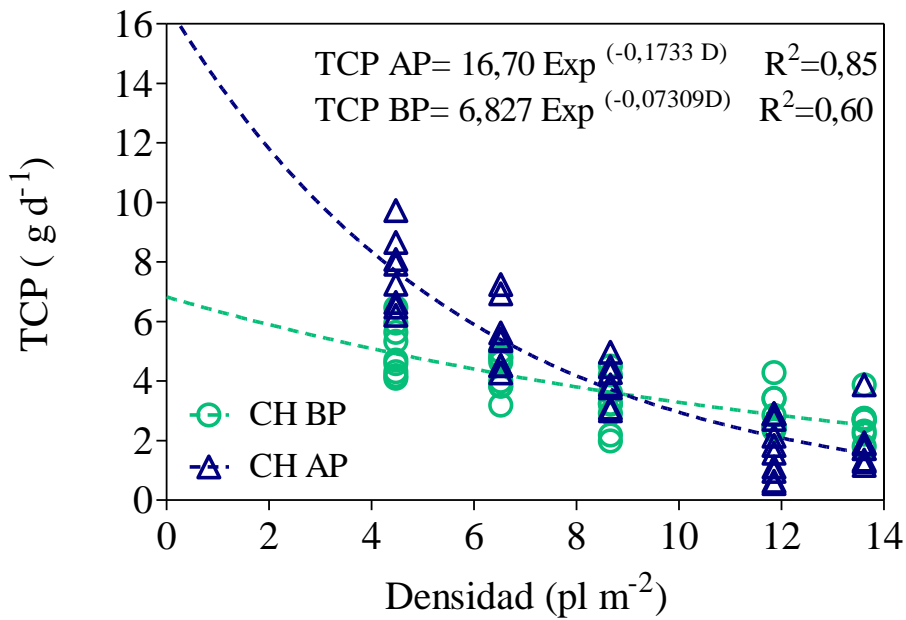


Figura 17. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g\ d^{-1}$) y densidad de plantas ($p\ m^{-2}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Chaján.

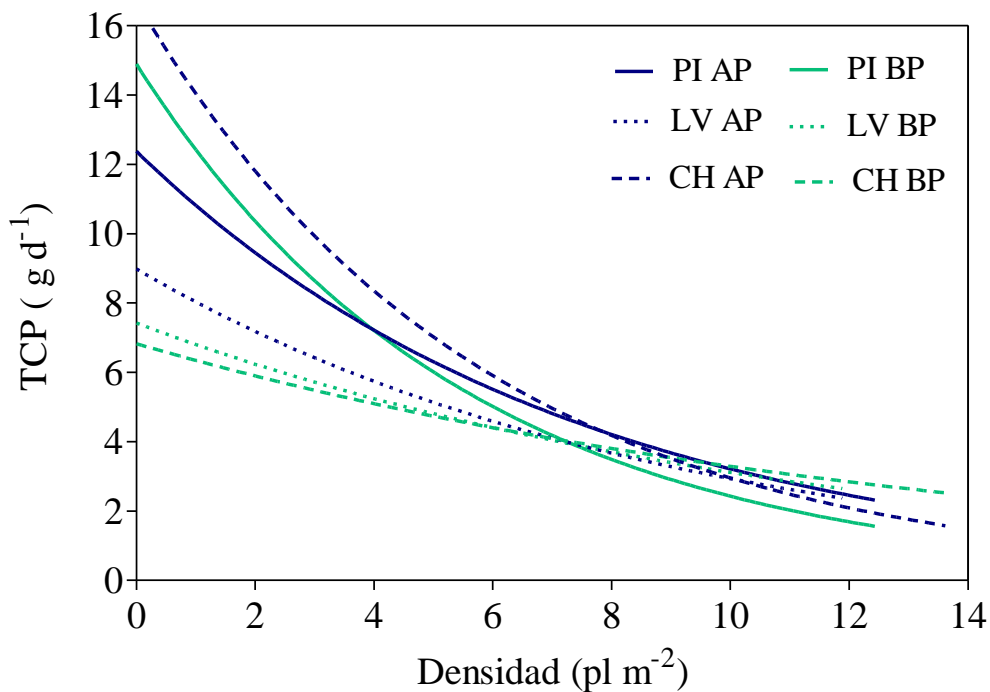


Figura 18. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g\ d^{-1}$) y densidad de plantas ($p\ m^{-2}$), para el híbrido DK 7210 VT3P en los distintos sitios experimentales y zonas de manejo.

El grado de ajuste (R^2) de los datos a una relación exponencial entre ambas variables osciló entre 0,57 y 0,93 (Tabla 4).

Cuando se compara cada una de las ecuaciones obtenidas en cada sitio y zona de manejo con una única ecuación construida a partir de todos los datos obtenidos ($TCP = 11,58 \text{ Exp}^{(-0,1362 D)}$) se observa que cada ambiente modificó esta relación de manera distinta y por lo tanto la variabilidad hallada no puede ser representada por una única ecuación.

A igual densidad poblacional, la tasa de crecimiento individual cambia de acuerdo con el ambiente, como consecuencia de modificaciones en la oferta de recursos asignados a cada planta.

En el genotipo DK692 VT3P, la relación entre la tasa de crecimiento por planta y la densidad también fue del tipo exponencial, como puede apreciarse en las Figuras 19, 20, 21 y 22 y en la Tabla 5.

Tabla 5. Ecuación de ajuste de regresión exponencial entre la tasa de crecimiento por planta durante el periodo crítico y la densidad de plantas en cada sitio y zona de manejo para el híbrido DK 692 VT3P y ecuación única para el mismo híbrido sin considerar sitio ni zona.

Sitio	Zona	Ecuación	R^2	p valor	p valor
				Parámetro A	Parámetro B
PI	AP	$TCP = 9,167 \text{ Exp}^{(-0,09159 D)}$	0,63	0,7662	0,1094
	BP	$TCP = 10,86 \text{ Exp}^{(-0,1409 D)}$	0,86	0,0051	0,0071
LV	AP	$TCP = 7,005 \text{ Exp}^{(-0,09285 D)}$	0,79	0,0011	0,0375
	BP	$TCP = 6,889 \text{ Exp}^{(-0,0829 D)}$	0,83	<0,0001	0,0004
CH	AP	$TCP = 9,351 \text{ Exp}^{(-0,1296 D)}$	0,70	0,7046	0,2565
	BP	$TCP = 7,488 \text{ Exp}^{(-0,09381 D)}$	0,69	0,0681	0,1002
DK 692 VT3P		$TCP = 9,928 \text{ Exp}^{(-0,1120 D)}$			

*p-valor Parámetro A o B, indica la significancia estadística entre el valor ajustado para cada sitio/zona y el valor ajustado con la ecuación única.

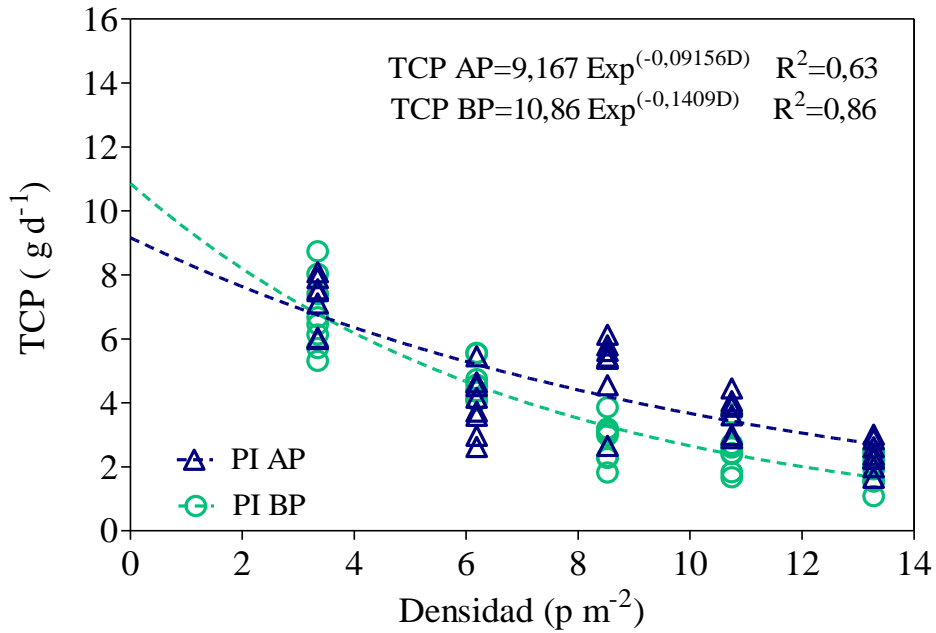


Figura 19. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 692 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Pueblo Italiano.

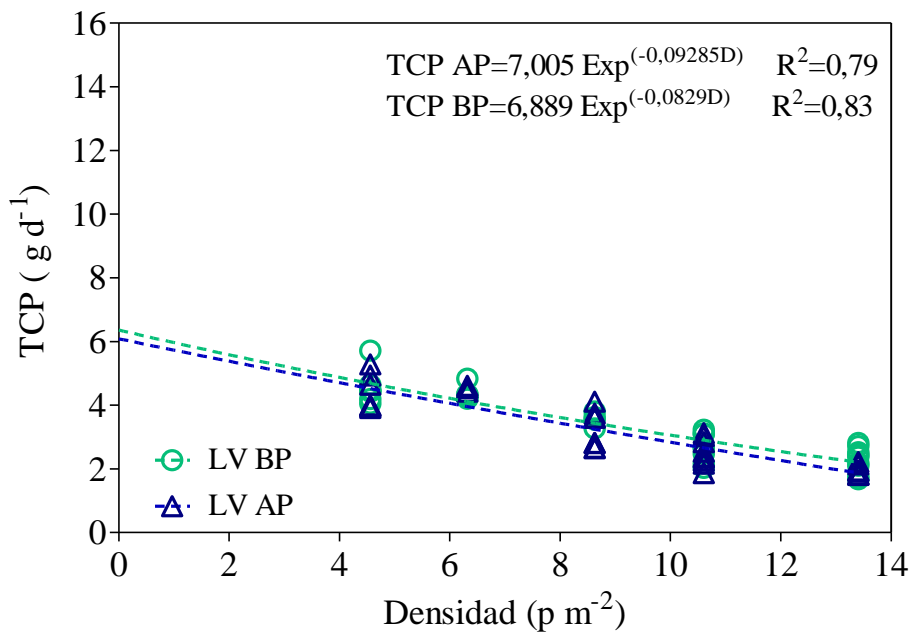


Figura 20. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), para el híbrido DK 692 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Las Vertientes.

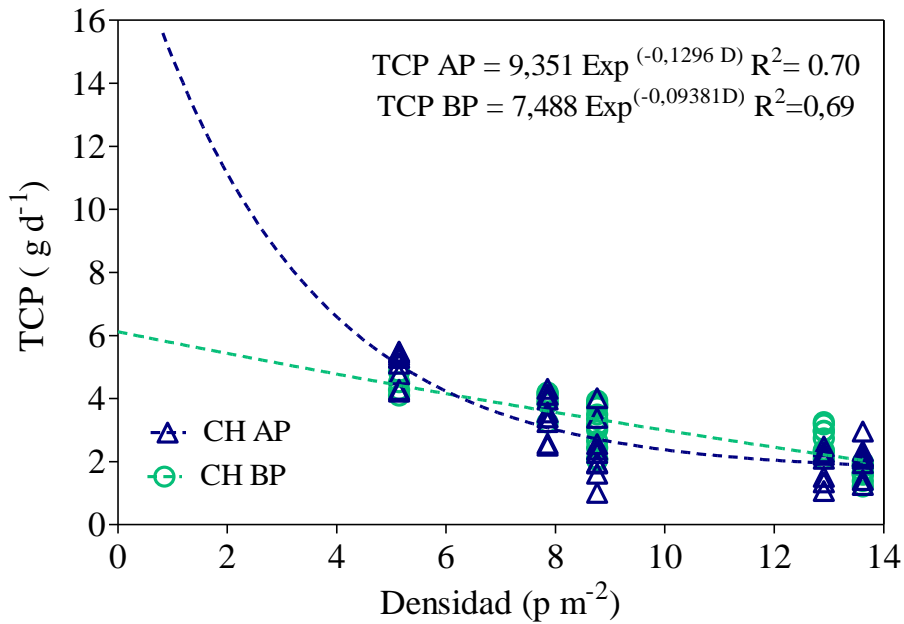


Figura 21. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g\ d^{-1}$) y densidad de plantas ($p\ m^{-2}$), para el híbrido DK 692 VT3P en la zona de alta (azul) y baja producción (verde) en Chaján.

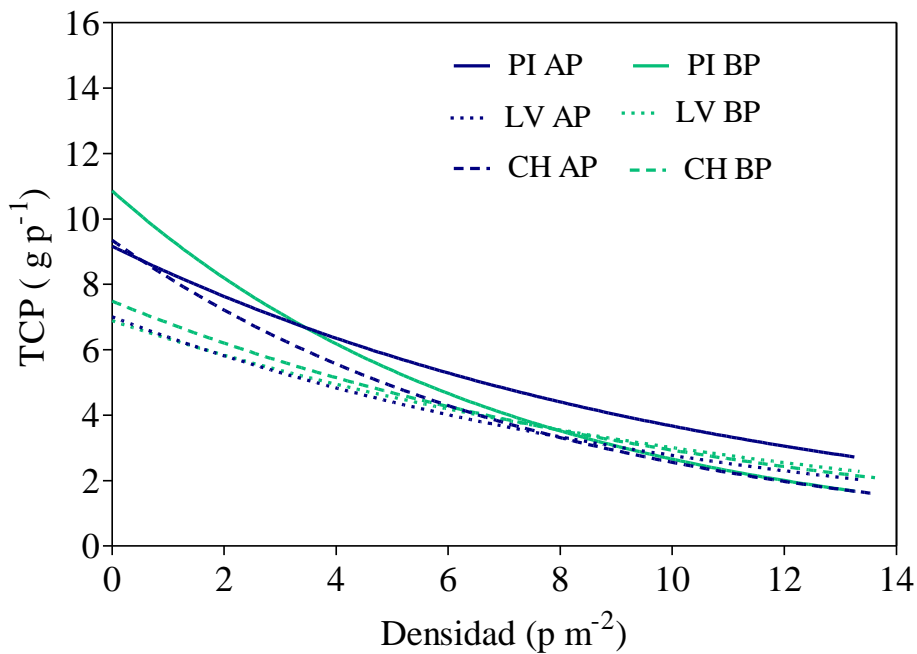


Figura 22. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g\ d^{-1}$) y densidad de plantas ($p\ m^{-2}$), para el híbrido DK 692 VT3P en todos los sitios experimentales y zonas de manejo.

La relación entre la TCP y la densidad para el genotipo DK 692 VT3P, difirió estadísticamente entre las ambientes evaluados ($F=7,588$; $p<0,0001$), al comparar cada una de las ecuaciones obtenidas en cada sitio y zona de manejo con una única ecuación construida a partir de todos los datos obtenidos ($TCP = 9,928 \text{ Exp}^{(-0,1120 D)}$), tal como se observa en las Figuras 19 a 22 y en la Tabla 5. Para este genotipo el ajuste a la regresión exponencial varió entre 0,63 y 0,85.

En este estudio se encontró que al cambiar de ambientes (zonas de manejo y sitios con sus respectivas fechas de siembra), manteniendo constante la densidad de plantas, se modificó la tasa de crecimiento individual lo cual indica que la oferta de recursos varía. Por un lado, esto podría deberse a que cambia la oferta de temperatura y agua entre las tres localidades (PI, LV, CH) (Figuras 2, 3, 4, 5, 6 y 7). Por otro lado, debe considerarse además que la disponibilidad de recursos varía espacialmente, como consecuencia de la cambios en las propiedades físicas y químicas de los suelos (Espósito, 2013). Por lo tanto, en cada zona de manejo la respuesta en la disminución de TCP al aumentar la densidad fue diferente.

Por otro lado, se encontró que la relación entre la tasa de crecimiento y la densidad de plantas no solo se modificó al cambiar de ambiente, sino que también entre genotipos (Figura 23, 24 y 25). En este sentido se encontró que en las tres localidades los parámetros del modelo de repuesta de la TCP a la densidad difirieron estadísticamente entre híbridos (DK 7210 VT3P y DK 692 VT3P) y zonas de manejo (AP y BP), ($F=7,290$; $p<0,0001$, $F=2,236$; $p=0,0439$ y $F=14,05$; $p<0,0001$, para Pueblo Italiano, Las Vertientes y Chaján respectivamente).

La diferencia entre híbridos y zonas de manejo en la respuesta de la TCP a la densidad fue mayor en aquellos sitios donde la disponibilidad hídrica fue menor, es decir en Chaján y Pueblo Italiano (Figura 3 y Figura 7); mientras que en Las Vertientes, donde la disponibilidad hídrica fue superior a la normal hasta el final del periodo crítico (Figura 5), las diferencias fueron menores. Además el rango de variación en la TCP, ante cambios de la densidad fue inferior que en los otros sitios, indicando que existe una menor respuesta en este sitio en particular.

Los cambios entre híbridos podría estar explicado por las diferencias en la captación de los recursos y su uso, característicos de cada genotipo (Lee y Tollenar, 2007; Echarte *et al.*, 2013; Nagore *et al.*, 2014). Resultados similares fueron encontrados por Sarlengue *et al.* (2007), quienes encontraron que aumentos en la densidad de plantas generaron disminuciones en la biomasa total de la planta y que la respuesta fue diferente entre distintos híbridos evaluados.

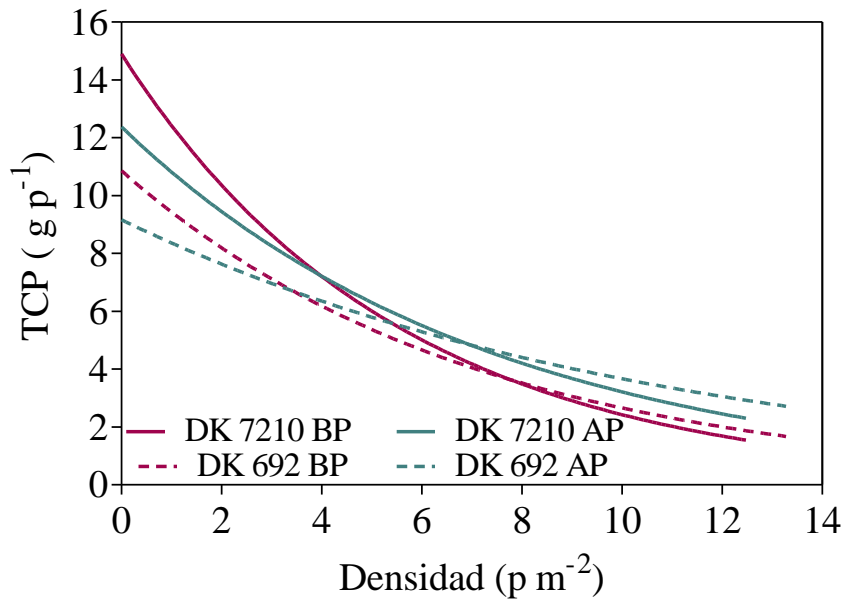


Figura 23. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), en la zona de alta (líneas verdes) y baja producción (líneas bordó) para el híbrido DK 7210 VT3P (línea llena) y para el híbrido DK 692 VT3P (línea punteada) en la localidad de Pueblo Italiano.

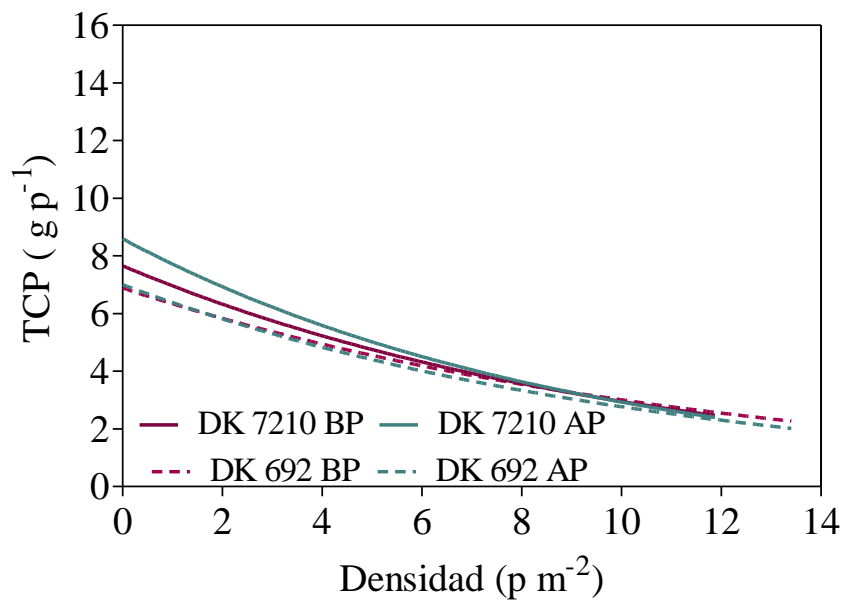


Figura 24. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 ($g d^{-1}$) y densidad de plantas ($p m^{-2}$), en la zona de alta (líneas verdes) y baja producción (líneas bordó) para el híbrido DK 7210 VT3P (línea llena) y para el híbrido DK 692 VT3P (línea punteada) en la localidad de Las Vertientes.

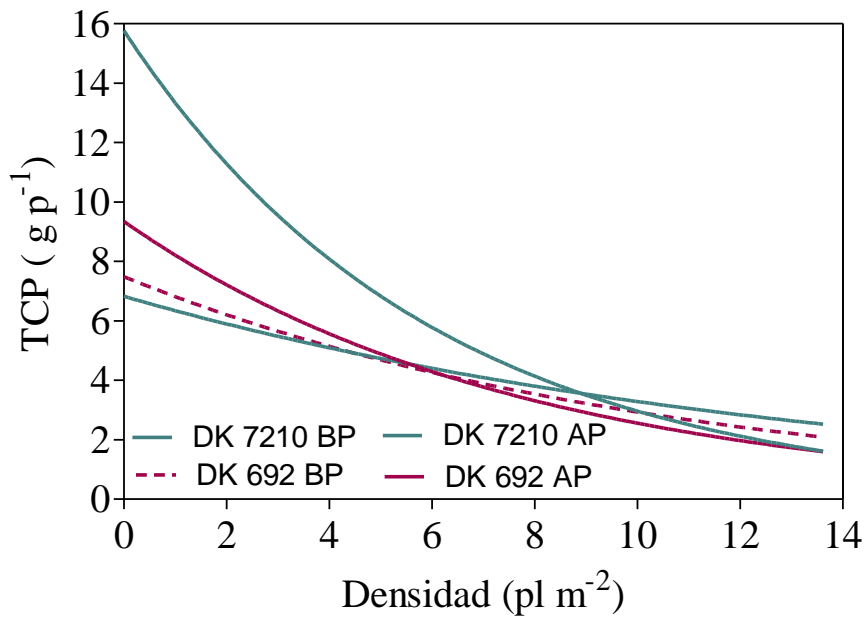


Figura 25. Relación entre tasa de crecimiento por planta entre V_{13} y R_3 (g d^{-1}) y densidad de plantas (pl m^{-2}), en la zona de alta (líneas verdes) y baja producción (líneas bordó) para el híbrido DK 7210 VT3P (línea llena) y para el híbrido DK 692 VT3P (línea punteada) en la localidad de Chaján.

Relación entre rendimiento y densidad de plantas.

La respuesta del rendimiento del cultivo de maíz a la densidad de plantas ajustó a una función polinómica de segundo orden o de tipo cuadrática para ambos genotipos y varió entre éstos y los ambientes (sitio y zona productiva), tal como se observa en las Figuras 26 para el DK 7210 VT3P y en la Figura 27 para el híbrido DK 692VT3P.

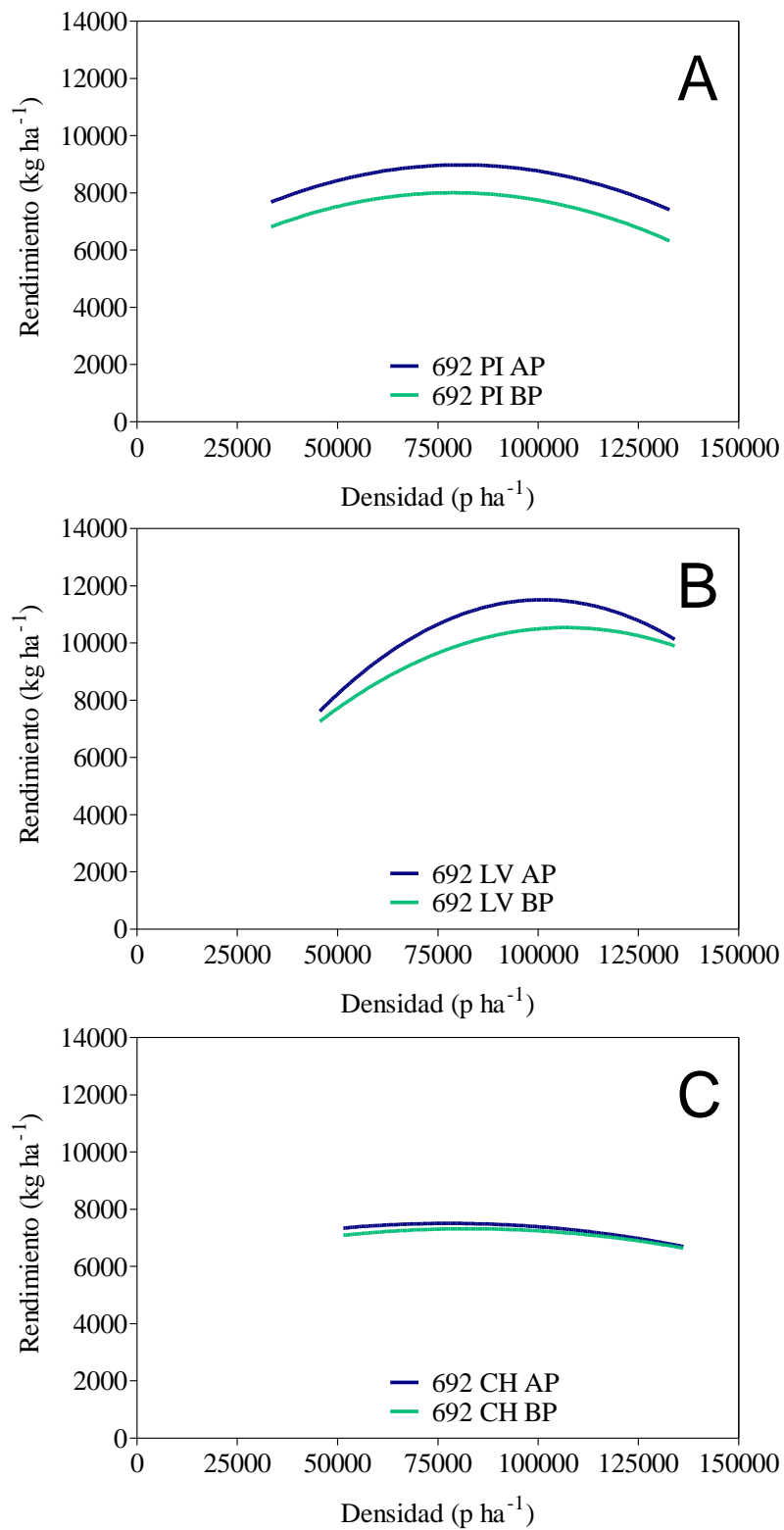


Figura 26. Relación entre Rendimiento (kg ha⁻¹) y densidad de plantas (p ha⁻¹) del híbrido DK 692 VT3P para ambas zonas de manejo en A. Pueblo Italiano, B. Las Vertientes y C. Chaján.

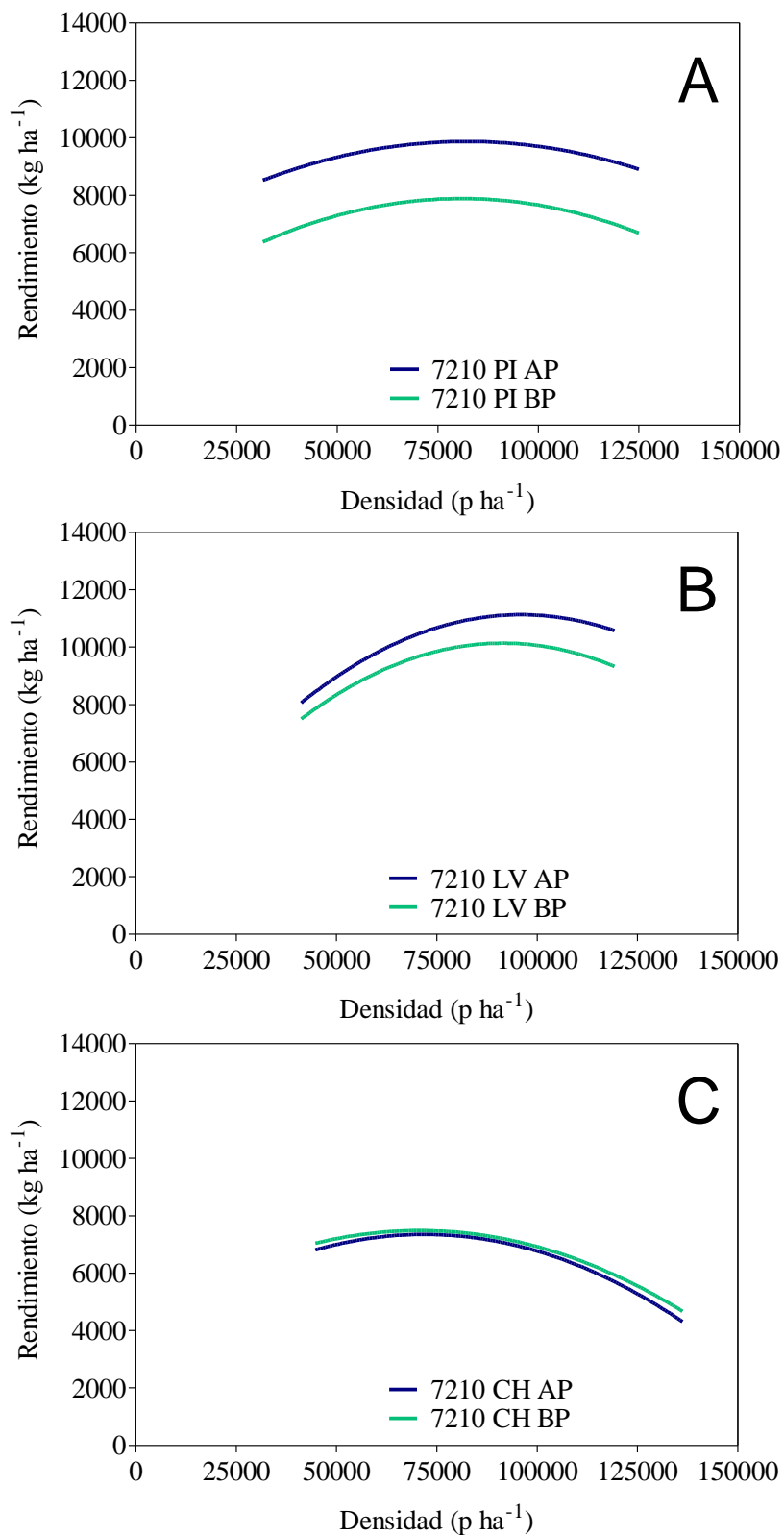


Figura 27. Relación entre Rendimiento (kg ha⁻¹) y densidad de plantas (p ha⁻¹) del híbrido DK 7210 VT3P para ambas zonas de manejo en A. Pueblo Italiano, B. Las Vertientes y C. Chaján.

En la Localidad de PI y LV se encontró que en la zona AP el rendimiento fue superior en todas las densidades al obtenido en la zona BP. En CH la diferencia entre zonas solo se encontró para el híbrido DK 692 VT3P, mientras que para el DK 7210 VT3P las curvas de respuesta no difirieron entre las zonas delimitadas previamente.

La variación en la respuesta del rendimiento de maíz a la densidad de plantas entre localidades y zonas está ampliamente documentada en la bibliografía, donde se indica que esta relación es altamente dependiente del ambiente en donde se desarrolla el cultivo (Bullock *et al.*, 1998; Shanahan *et al.* 2004; Bragachini *et al.* 2012; Horbe *et al.*, 2013; Martinez *et al.*, 2014). Al cambiar de ambientes de producción, ya sea por cambio en el sitio y/o zona, se altera la oferta de recursos, radiación solar y agua (Figura 3, 5 y 7), como así también varían las propiedades físicas y químicas de los suelos (Bongiovanni *et al.*, 2006; Esposito, 2013; Echeverría y García, 2014).

La mayor diferencia en la respuesta a la densidad en la localidad de LV puede explicarse por la mejor oferta hídrica durante el periodo crítico (Figura 5). En este caso el agua fue menos limitante para la producción y por lo tanto el nitrógeno pudo posicionarse como el principal factor limitante del rendimiento debido al uso de una única dosis de N en todos los sitios y zonas de manejo. Al observar, el contenido de materia orgánica y N-NO₃ (Tabla 1), se aprecian cambios que oscilan entre un rango entre el 50 y 250%, entre ambas zonas de manejo (AP y BP), mientras que este rango fue de entre 15 al 50% en las otras localidades (PI y CH). Esto pone en evidencia la importancia de adaptar la oferta de N de acuerdo al rendimiento alcanzable, en este sentido trabajos recientes indican que el rendimiento responde de manera interactiva a la densidad de siembra y dosis de nitrógeno (Cerliani *et al.*, 2016; Esposito *et al.*, 2018).

Densidad óptima agronómica, tasa de crecimiento por planta, número de granos y rendimiento, peso de 1000 granos y producción por planta, correspondientes con la densidad óptima agronómica.

En la Tabla 6 se presentan los valores de densidad óptima agronómica (DOA) y bajo esta densidad las tasas de crecimiento por planta (TCP_{DOA}), el número de granos por planta (NGP_{DOA}), el rendimiento (Rt_{DOA}), el peso de 1000 granos (P1000_{DOA}) y la producción por planta (PP_{DOA}) de maíz correspondientes a la densidad óptima agronómica en cada sitio y zona de manejo para los híbridos DK 7210 VT3P y DK 692 VT3P.

Tabla 6. Densidad óptima agronómica (DOA), tasas de crecimiento por planta (TCP_{DOA}), número de granos (NGP_{DOA}), rendimiento de maíz (Rt_{DOA}), peso de 1000 granos ($P1000_{DOA}$) y producción por planta (PP_{DOA}) correspondientes a la densidad óptima agronómica en cada sitio y zona de manejo para ambos híbridos evaluados (DK 7210 VT3P y DK 692 VT3P).

Híbrido			DOA	TCP_{DOA}	NGP_{DOA}	Rt_{DOA}	$P1000_{DOA}$	PP_{DOA}
	Sitio	Zona	(p ha ⁻¹)	(g d ⁻¹)	(g p ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	(g)	(g p ⁻¹)
DK 7210 VT3P	PI	AP	82297	4,09	594,84	9884	202	120,4
		BP	81276	3,42	560,29	7896	174	97,7
	LV	AP	95903	3,07	507,00	11153	229	116,3
		BP	91727	3,34	525,33	10142	211	110,6
	CH	AP	71872	4,81	587,36	7351	174	102,3
		BP	70616	4,07	571,93	7487	189	106,5
DK 692 VT3P	PI	AP	82909	4,29	603,62	9110	182	109,9
		BP	78604	3,59	570,91	8018	179	102,2
	LV	AP	101074	2,74	509,89	11512	223	113,9
		BP	106909	2,84	518,91	10548	190	98,7
	CH	AP	77967	3,40	560,91	7509	172	96,4
		BP	77430	3,64	571,93	7344	169	97,4
Híbrido			NS ¹	*	NS	NS	NS	NS
DMS			7199,6	0,299	15,997	281,93	0,01439	10,898
Sitio			**	**	**	***	**	NS
DMS			8817,7	0,366	19,591	345,291	0,0177	13,347
Sitio > Zona			NS	NS	NS	**	NS	NS
DMS			12470,0	0,518	27,707	488,31	0,0249	18,876
Híbrido: Sitio			NS	*	NS	NS	NS	NS
DMS			12470,0	0,518	27,707	488,32	0,0249	18,876
Híbrido: Zona			NS	NS	NS	NS	NS	NS
DMS			10181,7	0,423	22,623	398,71	0,0203	15,412
Sitio : Zona : Híbrido			NS	NS	NS	NS	NS	NS
DMS			17635,3	0,733	39,184	690,58	0,3524	26,694
R2			0,91	0,94	0,94	0,99	0,89	0,72
CV			8,49	8,30	2,88	3,14	7,53	10,29

¹NS, no significativo; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.0001$.

La densidad óptima agronómica obtenida en los distintos ambientes (sitios y zonas de manejo) y genotipos varió en un rango de 70616 a 106909 p ha⁻¹. Hernández *et al.* (2014), encontraron para distintos genotipos, similares valores de DOA y rendimiento a los descritos en este trabajo. En su estudio, los valores de DOA encontrados variaron entre 7,3 y 11,4 p m⁻² y los rendimientos fueron desde 10,4 a 13,5 Mg ha⁻¹. Por su parte, Sarlengue *et al.*, (2007) encontraron valores de DOA de 9,9 a 16,7 p m⁻², para distintos genotipos en Balcarce (Bs. As.), hallando valores superiores para genotipos de ciclo corto, que poseen plantas de menor tamaño, respecto a genotipos de ciclo largo. En otro estudio realizado en Argentina, Di Matteo *et al.*, (2016), evaluando híbridos liberados en distintas décadas encontraron que la DOA varió entre 9,7 y 16,4 p m⁻².

La DOA varió significativamente entre los tres sitios evaluados ($p= 0,0013$). LV fue donde se registraron los mayores valores (98903 plantas ha⁻¹), este sitio difirió estadísticamente de PI (81271 plantas ha⁻¹) y CH (74472 plantas ha⁻¹), siendo un 33 y 22 % superior, respectivamente. Esta mayor DOA en LV puede deberse a las mejores condiciones hídricas del cultivo durante el periodo crítico (Figura 5). Similarmente Hernández *et al.* (2014), detectaron diferencias en la DOA entre distintos ambientes productivos a los que se expusieron los genotipos de maíz a través de diferentes ciclos agrícolas.

No se detectaron diferencias significativas entre las zonas de manejo o los híbridos utilizados, como así tampoco en las interacciones entre las variables analizadas sobre la DOA.

A diferencia de lo encontrado en este trabajo, otros autores señalan que la DOA se modifica entre zonas de manejo dentro de un mismo lote (Horbe *et al.*, 2013). Resultados similares fueron encontrados por otros autores en EEUU (Bullock *et al.*, 1998; Shanahan *et al.* 2004) y a nivel local (Bragachini *et al.* 2010). En todos estos estudios los ambientes con mayor disponibilidad de recursos, fueron los que presentaron una mayor DOA. Esto se debe al hecho de que en los ambientes de menor calidad (o sea, menor disponibilidad de recursos, como agua y/o nutrientes), aumentos en la población de plantas generan anticipadamente una competencia intraespecífica por los recursos (Bragachini *et al.* 2010; Horbe *et al.*, 2013). La ausencia de diferencias en este trabajo podría deberse a que en condiciones hídricas favorables la diferencias entre zonas de manejo tienden a minimizarse (Martinez Bologna *et al.*, 2014) o bien las zonas de manejo delimitadas no fueron lo suficientemente contrastantes entre sí para las condiciones de este ciclo experimental.

En el caso del número de granos por planta cuando el individuo crece en su DOA, tampoco se detectó efecto de la zona de manejo, el híbrido y su interacción. Aunque el efecto

sitio fue significativo, indicando que LV generó un menor NGP_{DOA} (515,28) que fue estadísticamente inferior al encontrado en CH y PI (570,42 y 582,41, respectivamente), que produjeron un 11 y 13 % más de granos en esta densidad.

El rendimiento que se corresponde con la DOA, varió tanto para el sitio evaluado ($p < 0,0001$) como para las zonas dentro de cada sitio ($p = 0,0006$). El sitio más productivo fue LV (10839 kg ha⁻¹), seguido por PI (8727 kg ha⁻¹) y en tercer lugar se ubicó CH (7423 kg ha⁻¹). En cuanto las diferencias entre las zonas de manejo, las mismas fueron de un 9 y 19 % superior en AP respecto a BP en LV y PI, mientras que en CH no hubo diferencias entre las zonas de manejo delimitadas.

La TCP_{DOA} , varió en un rango desde 2,74 a 4,81 g d⁻¹. Esta variable fue diferente entre i) genotipos ($p = 0,0209$): 3,80 y 3,42 g d⁻¹ para DK 7210 VT3P y el DK 692 VT3P, respectivamente, ii) sitios ($p = 0,0012$): 3,98, 3,85 y 3,00 g d⁻¹ para CH, PI y LV, respectivamente; y iii) afectada por la interacción entre el sitio y el híbrido ($p = 0,0282$) según se observa en la figura 28.

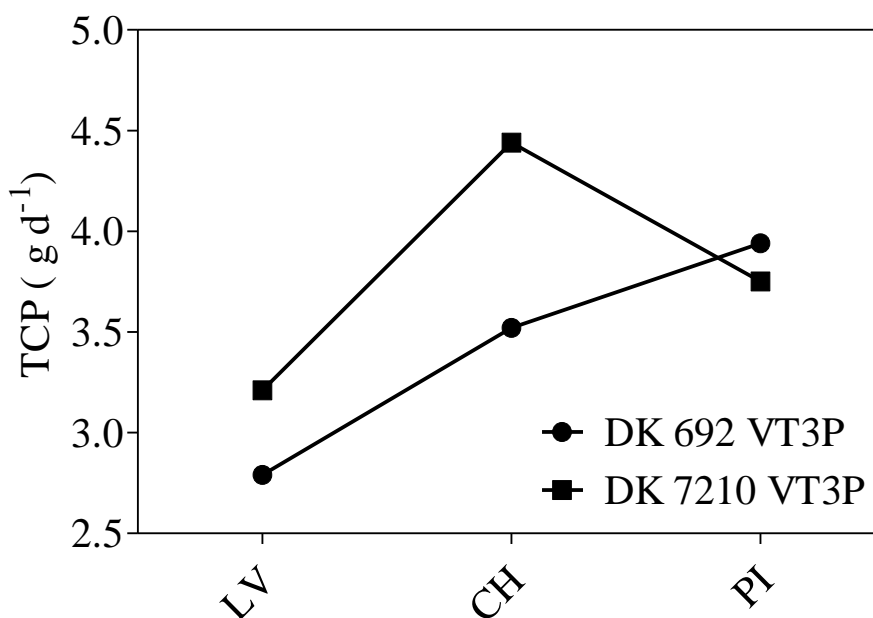


Figura 28. Relación entre tasa de crecimiento por planta (g d⁻¹) y los sitios para ambos híbridos.

En LV y CH el híbrido DK 7210 VT3P presentó mayores valores de TCP_{DOA} que el DK 692 VT3P, en tanto que en PI no se encontraron diferencias estadísticas en la TCP_{DOA} de los híbridos evaluados.

El hecho de que en PI no se hayan encontrado diferencias, podría deberse que por la fecha de siembra utilizada, el periodo crítico del cultivo estuvo expuesto a mayores temperaturas, ya que el mismo ocurrió durante finales de diciembre y principios de enero (Figura 2), y según lo señalado por Andrade *et al.* (1996), al exponer el cultivo a mayores temperaturas nocturnas durante el periodo crítico, la fotosíntesis neta resulta menor en comparación con un cultivo que crece bajo las mismas condiciones pero con temperaturas nocturnas más frescas. La diferencia en este efecto entre ambos híbridos evaluados en este trabajo podría estar dado por diferencias en las temperaturas cardinales entre ambos, lo cual haría que el DK 7210 VT3P haya sido afectado y el otro genotipo no. De no haber ocurrido este estrés térmico en PI sería muy probable que la interacción Híbrido:Sitio no fuese estadísticamente significativa.

La variable $P1000_{DOA}$, fue afectada estadísticamente por el sitio, presentando los mayores pesos LV (213 g), mientras que en PI y CH los pesos fueron inferiores (184 y 176 g, para PI y CH, respectivamente).

Al analizar la producción por planta (PP_{DOA}), se encontró que la misma no fue alterada por ninguno de los factores estudiados (sitio, zona de manejo e híbrido) como así tampoco por la interacción de estos. Variando en un rango entre 96,4 y 120,4 g p⁻¹. Estos valores fueron levemente inferiores a los estimados a partir de los datos presentados por Hernandez *et al.* (2014), cuyo rango para distintos genotipos fue entre 105 y 155 g p⁻¹.

La DOA mostró una relación lineal positiva con el rendimiento cuando la densidad fue la óptima, en ambos híbridos (Figura 29).

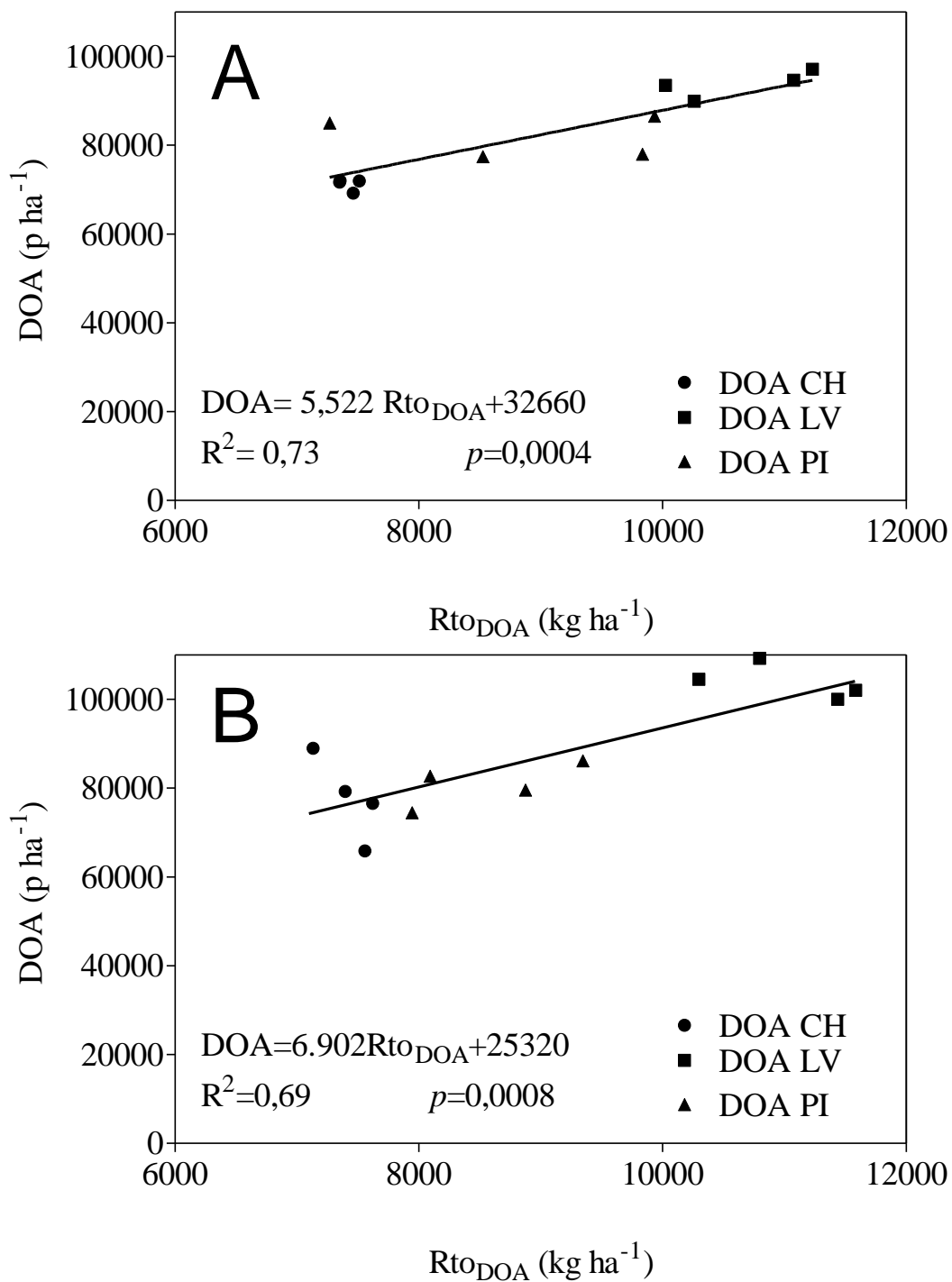


Figura 29. Relación entre la DOA (p ha⁻¹) y el Rto_{DOA} (kg ha⁻¹) para el híbrido A. DK 7210 VT3P y B. DK 692 VT3P.

En la Figura 30 se presentan las relaciones entre TCP_{DOA} y DOA para los híbridos DK 7210 VT3P y el DK 692 VT3P, respectivamente.

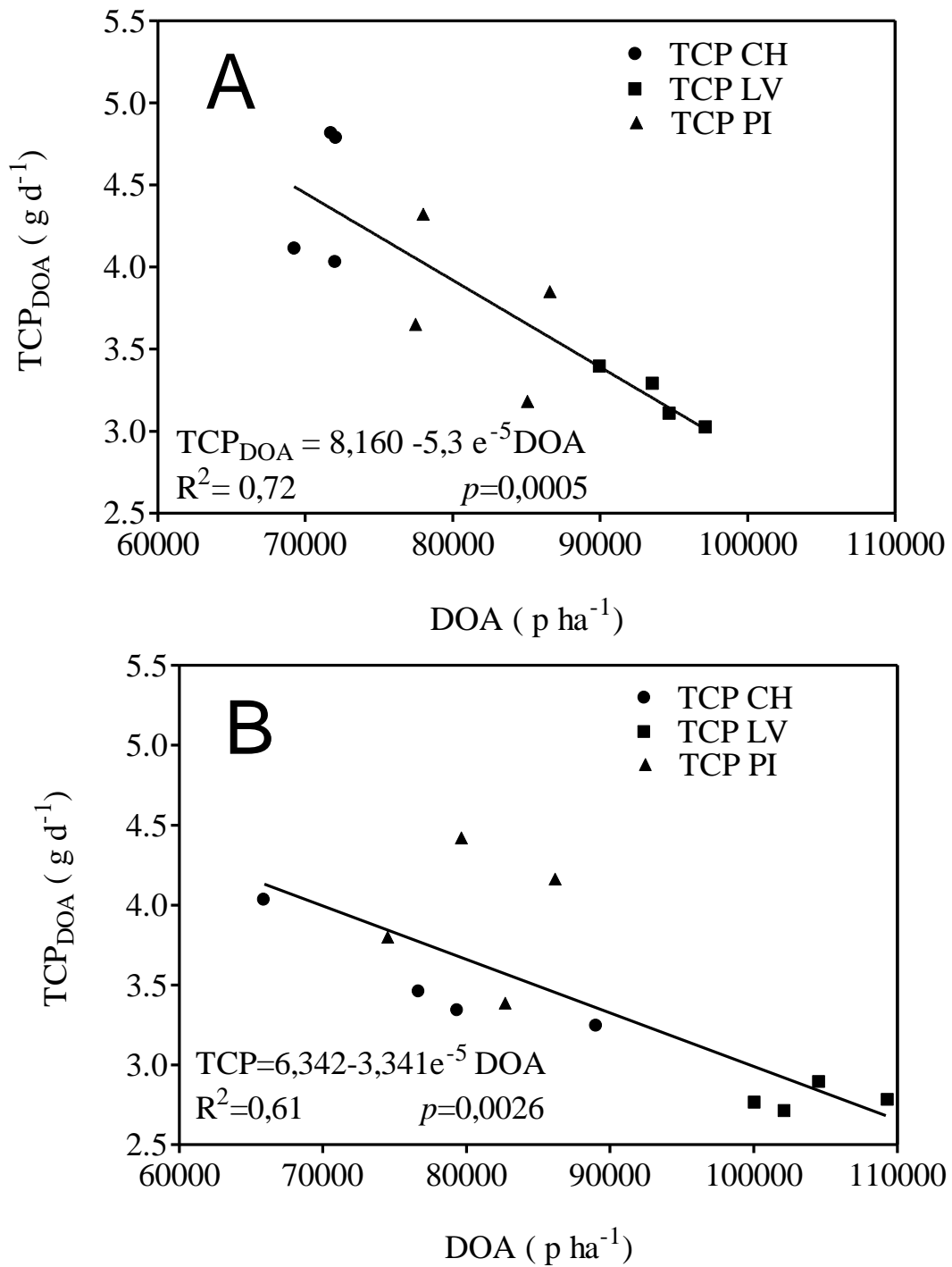


Figura 30. Relación entre TCP_{DOA} ($g d^{-1}$) y la DOA ($p ha^{-1}$), para el híbrido A. DK 7210 VT3P y B. DK 692 VT3P.

La relación lineal entre NGP_{DOA} y DOA para los híbridos DK 7210 VT3P y el DK 692 VT3P se observan en la Figura 31.

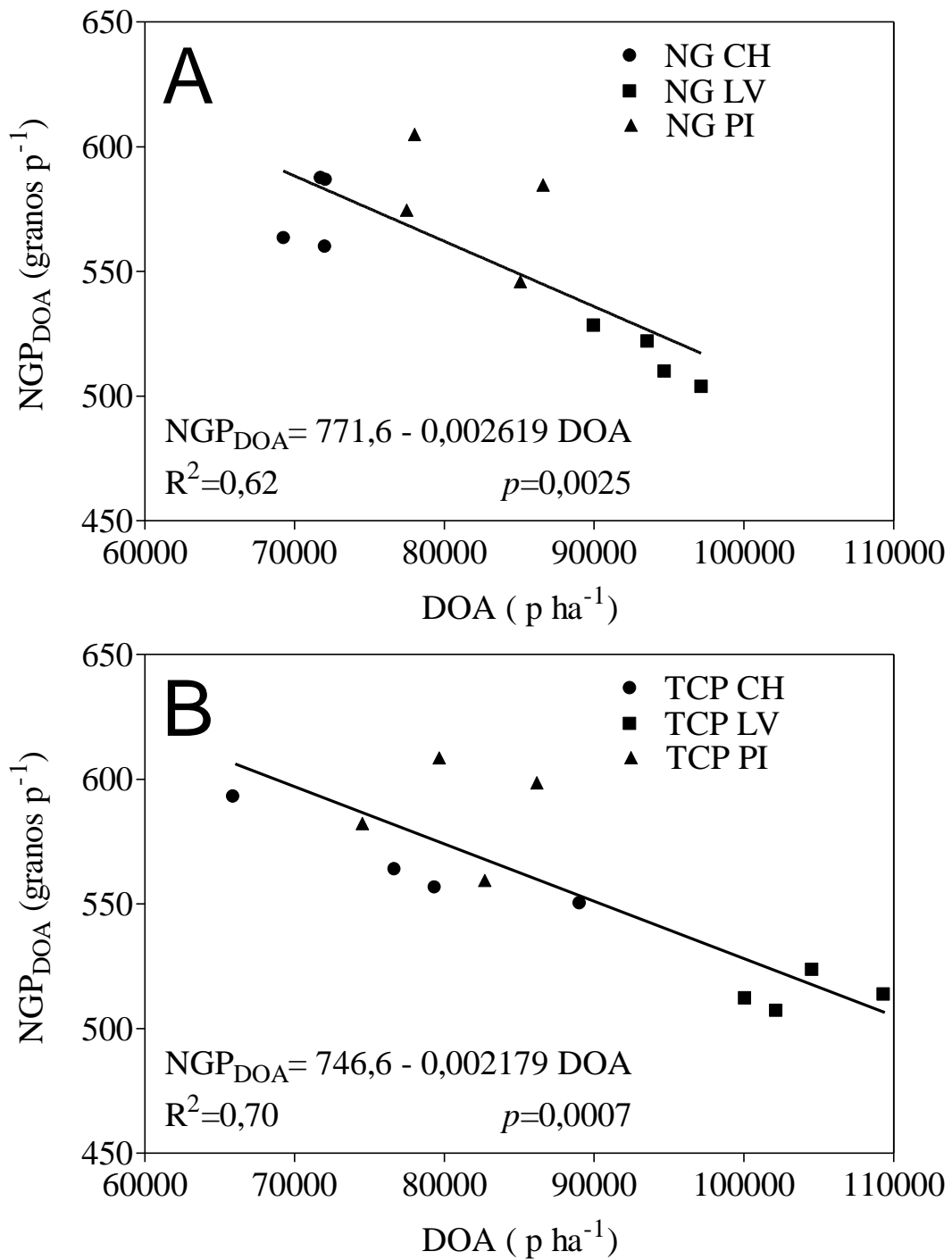


Figura 31. Relación entre NGP_{DOA} (granos p^{-1}) y la DOA ($p ha^{-1}$) para el híbrido A. DK 7210 VT3P y B. DK692VT3P.

La relación entre el NGP_{DOA} y la TCP_{DOA} para híbrido DK 7210 VT3P y el DK 692 VT3P, se presentan en la Figura 32.

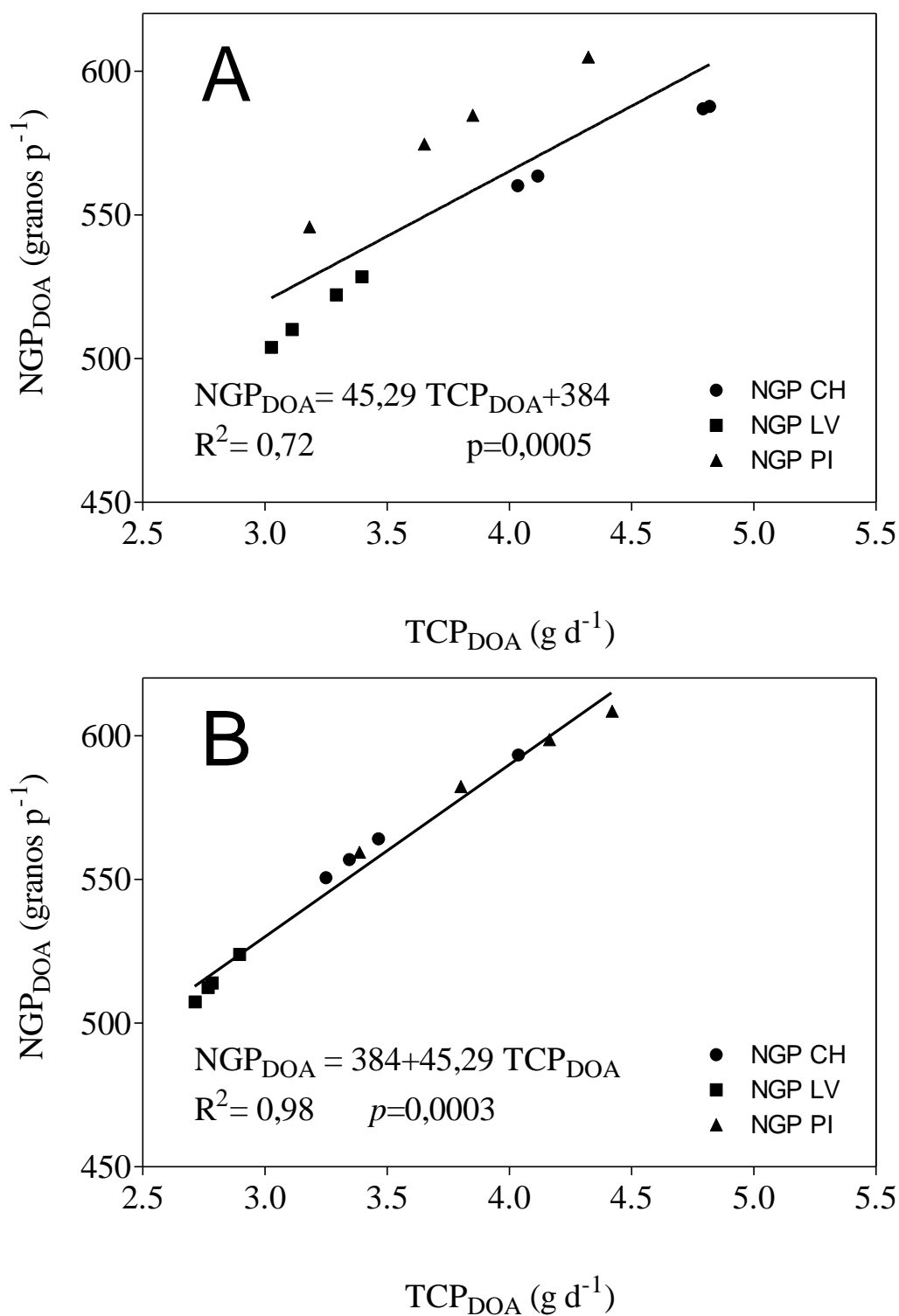


Figura 32. Relación entre el NGP_{DOA} (granos p⁻¹) y la TCP_{DOA} (g d⁻¹) para el híbrido A- DK 7210 VT3P y B- DK 692 VT3P.

De acuerdo con lo presentado en las figuras 29 y 32 la DOA se encuentra lineal y positivamente relacionada con el rendimiento obtenido, lo cual sugiere que un mayor rendimiento de maíz como consecuencia de una mejor oferta ambiental exige un incremento en la densidad de siembra. Ello es coincidente con lo señalado por Andrade *et al.* (1996), Hernández *et al.* (2014) y Di Matteo *et al.* (2016). Esta situación indica que en el manejo agronómico primero se defina cuál sería el rendimiento posible de obtener (a partir de la oferta de recursos de cada ambiente) y mediante relaciones presentadas en la Figura 29 definir la DOA.

Por otro lado, dentro del rango de TCP_{DOA} estimados en este trabajo, a medida que disminuye la DOA se incrementa la TCP (Figura 30) y como consecuencia el NGP (Figura 31). No obstante la disminución de la TCP ante el incremento de la DOA, el rendimiento aumenta por el mayor número de plantas, aunque crezcan menos individualmente. Indicando que dentro del rango de densidades óptimas la relación entre TCP y NGP es lineal (Figura 32). En este sentido, Kiniry *et al.*, (1997), proponen que una regresión lineal podría ser usada exitosamente cuando los valores de TCP, no sean extremos, es decir estén dentro de un rango normal.

En relación con el $P1000_{DOA}$, cabe señalar que se encontró una relación lineal negativa con el NGP_{DOA} (Figura 33). Considerando que el NGP_{DOA} disminuye conforme aumenta la DOA, el aumento en el $P1000_{DOA}$ actuaría compensando la caída en el NGP_{DOA} y por ello la PP_{DOA} se mantiene constante. Dicho efecto fue mencionado por Esposito *et al.*, (2013), quienes indicaron que es posible compensar una caída en el NGP a través del aumento de peso de estos, sin afectarse el rendimiento, dependiendo del genotipo utilizado.

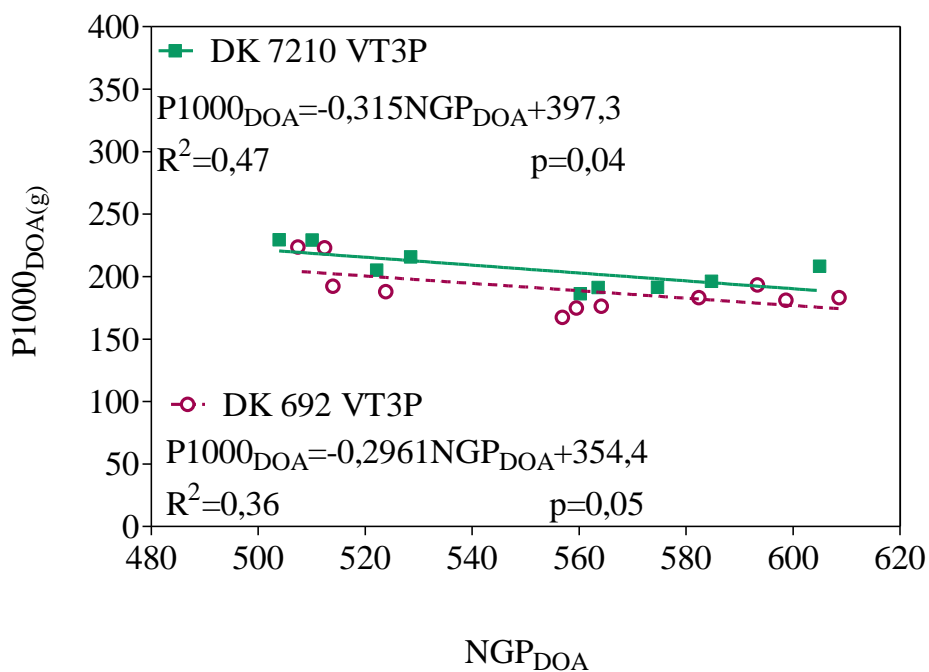


Figura 33. Relación entre $P1000_{DOA}$ (g) y el NGP_{DOA} ($g p^{-1}$) para ambos genotipos.

Finalmente, en la DOA la producción por planta se mantiene constante independientemente de las condiciones ambientales bajo las cuales crezca el cultivo de maíz y en este caso particular para los dos híbridos evaluados sin diferenciarse entre sí (Tabla 6), lo cual indicaría que el ajuste de la DOA es dependiente del rendimiento posible de obtener en cada ambiente, dado que la producción por planta es constante en la DOA.

CONCLUSIONES

Los estudios realizados demostraron que la relación entre la TCP y el NGP, es de tipo hiperbólica y que la misma sólo se modificó entre genotipos utilizados, sin ser alterada por las condiciones ambientales en el rango de variación de ambientes evaluados en este trabajo (productividad de 7000 y 11000 kg ha⁻¹).

Por su parte, la tasa de crecimiento por planta fue afectada por el ambiente (sitio y zona de manejo). Estos factores no sólo modificaron la TCP, sino que además generaron cambios en la relación entre ésta y la densidad. Es decir la disminución en la TCP ante aumentos en la densidad de siembra, ocurrió a distintas tasas de acuerdo al ambiente; y también se modificó de acuerdo a genotipo empleado.

Para los dos genotipos evaluados, se encontró un rango de TCP_{DOA} estimado entre 2,74 a 4,81 g d⁻¹, en este rango el NGP varió entre 504 y 608 granos p⁻¹. Sin embargo la producción por planta cuando la densidad fue la óptima agronómica se mantuvo constante, debido al efecto compensatorio entre el NGP y el peso individual de los granos.

El hecho de que la producción individual se mantenga constante, cuando la densidad sea la óptima agronómica, resulta de gran interés en la toma de decisiones ya que permitiría la calibración de un modelo de recomendación de densidad de siembra a partir de esta información y del rendimiento objetivo dependiente de las condiciones de producción.

Es necesario profundizar los estudios para evaluar el efecto de otros genotipos sobre estas variables, ya que es probable que exista una influencia genética sobre la producción individual en la densidad óptima. Como consecuencia de las diferencias genéticas en la producción y partición de materia seca a grano por planta.

Finalmente, sería interesante generar este tipo de información en otras regiones del país, con condiciones ambientales más extremas las cuales puedan producir cambios en alguna de las relaciones establecidas en este trabajo.

BIBLIOGRAFIA

- Andrade, F.H., Cirilo, A., Uhart, S., & Otegui, M. (1996). *Ecofisiología del Cultivo de Maíz*. Editorial La Barrosa. EEA Balcarce, CERBAS, INTA-FCA, UNMP (Eds.). Dekalb Press. Buenos Aires. 292 pp
- Andrade, F. H., Vega, C., Uhart, S., Cirilo, A., Cantarero, M., & Valentinuz, O. (1999). Kernel number determination in maize. *Crop Science*, 39(2), 453-459.
- Andrade, F. H. S., Aguirrezábal, V. O., Castillo, L. A. A., Bedmar, H. A., Cirilo, F., Della Maggiora, A. G. & Gardiol, M. (2000). Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja.
- Andrade, F. H., Echarte, L., Rizzalli, R., Della Maggiora, A., & Casanovas, M. (2002). Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Science*, 42(4), 1173-1179.
- Al-Kaisi, M. M., & Yin, X. (2003). Effects of nitrogen rate, irrigation rate, and plant population on corn yield and water use efficiency. *Agronomy journal*, 95(6), 1475-1482.
- Barbieri, P. A., Sainz Rozas, H. R., Wyngaard, N., Eyherabide, M., Reussi Calvo, N. I., Salvagotti, F. & Colazo, J. C. (2017). Can Edaphic Variables Improve DTPA-Based Zinc Diagnosis in Corn? *Soil Science Society of America Journal*, 81(3), 556-563.
- BCCBA. 2017. En: <http://www.bccba.com.ar/maiz-6970.html>. Consultado el 18/07/2017.
- Bongiovanni, R., Mantovani, E., Best, S., & Roel, Á. (2006). Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Procisur/IICA.
- Bragachini, M., Mendez, A., Scaramuzza, F., Velez, J. P., & Villarroel, D. (2010). Dosificación variable de insumos. *9no Curso Internacional de Agricultura de Precisión y 4ta Expo de Máquinas Precisas, Córdoba-Argentina*.
- Bragachini, M., Méndez, A., Scaramuzza, F., Villarroel, D. & Vélez, J.P. (2012) Ensayo de larga duración de manejo de insumos en forma variable. INTA. En: <http://inta.gob.ar/documentos/ensayo-de-larga-duracion-de-manejo-deinsumos-en-forma-variable/>.
- Bouma, J., & Finke, P. A. (1993). Origin and nature of soil resource variability. *Soil Specific Crop Management*, Madison, Wisconsin, ASA-CSSA-SSSA, 3-14.
- Bullock, D. G., Bullock, D. S., Nafziger, E. D., Doerge, T. A., Paszkiewicz, S. R., Carter, P. R., & Peterson, T. A. (1998). Does variable rate seeding of corn pay?. *Agronomy Journal*, 90(6), 830-836.

- Cerliani, C., & Espósito, G. (2016). Importancia de la interacción nitrógeno:densidad en la dosificación de N para incrementar la EUN del maíz. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: ordenamiento territorial: un desafío para la ciencia del suelo: trabajos de investigación. Compilado por Carmen Gloria Cholaky ; José Cisneros. - 1a ed. - Río Cuarto: UniRío Editora, 2016.
- Cisneros J. M., Cantero A., Degioanni A., Becerra V. H. & Zubrzycki M. A. (2008). Producción, uso y manejo de las tierras. En: Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el Sur de Córdoba, Argentina. De Prada J. D., Penna J. P. (ed.), INTA, pp. 31-46.
- D'Andrea, K. E., Otegui, M. E., & Cirilo, A. G. (2008). Kernel number determination differs among maize hybrids in response to nitrogen. *Field Crops Research*, 105(3), 228-239.
- Degioanni, A., De Prada, J.D. & Cisneros, J.M. (2008). Características del área de estudio, unidades ambientales y productores de la muestra. Capítulo 2. En: Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el Sur de Córdoba, Argentina. Ed. de Prada, J.D. y J.A. Penna. Pp. 23-30.
- Dillon, J. & Anderson, J. (1990). *The Analysis of Response in Crop and Livestock Production*. Pergamon Press, New York
- Di Matteo, J. A., Ferreyra, J. M., Cerrudo, A. A., Echarte, L., & Andrade, F. H. (2016). Yield potential and yield stability of Argentine maize hybrids over 45 years of breeding. *Field Crops Research*, 197, 107-116.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Gonzalez L., Tablada M., Diaz, M.D.P, Robledo C.W. y Balzarini M.G. (2005). *Estadísticas para las ciencias agropecuarias*. Sexta edición. Editorial Brujas. Córdoba, Argentina. 340 pp.
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. (2016) *InfoStat versión 2016*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Duncan, W. G. (1958). The Relationship between Corn Population and Yield. *Agronomy Journal*, 50(2), 82-84.
- Echarte, L., & Andrade, F. H. (2003). Harvest index stability of Argentinean maize hybrids released between 1965 and 1993. *Field Crops Research*, 82(1), 1-12.
- Echarte, L., & Tollenaar, M. (2006). Kernel set in maize hybrids and their inbred lines exposed to stress. *Crop science*, 46(2), 870-878.
- Echarte, L., Nagore, L., Di Matteo, J., Cambareri, M., Robles, M., & Della Maggiora, A. (2013). Grain yield determination and resource use efficiency in maize hybrids released in different decades. In *Agricultural Chemistry*. InTech.

- Echeverría, H. E., & García, F. O. (2014). Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos (No. 631.8). INTA.
- Edmeades, G. O., & Daynard, T. B. (1979). The relationship between final yield and photosynthesis at flowering in individual maize plants. *Canadian Journal of Plant Science*, 59(3), 585-601.
- Edreira, J. R., Carpici, E. B., Sammarro, D., & Otegui, M. E. (2011). Heat stress effects around flowering on kernel set of temperate and tropical maize hybrids. *Field Crops Research*, 123(2), 62-73.
- Espósito, G. P. (2013). Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la respuesta al nitrógeno en maíz mediante un modelo econométrico mixto espacial (MEME). Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba.
- Espósito, G.; G. Balboa; C. Cerliani & Balboa, R. (2013). Mejores prácticas de manejo para la nutrición de suelos y cultivos. En: Primeras Jornadas Nacionales de Suelos de Ambientes Semiáridos y Segundas Jornadas Provinciales de Agricultura Sustentable. - 1a Ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Ed.: Barbosa, Osvaldo Andrés; Colazo, Juan Cruz. Argentina. ISBN 978-987-24771-5-8. 2013. Páginas: 49-69.
- Esposito, G, Naville, R., & Cerliani, C. (2018). Densidad óptima de siembra en maíz y su interacción con la oferta nitrogenada. En Acta de conferencias, mesas panel, trabajos completos, comunicaciones y resúmenes / XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Miguel de Tucumán, Argentina. ISBN 978-987-46870-0-5.
- FAO. 2017. En: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Consultado el 18/07/2017.
- Fleming, K. L., Westfall, D. G., Wiens, D. W., & Brodahl, M. C. (2000). Evaluating farmer defined management zone maps for variable rate fertilizer application. *Precision Agriculture*, 2(2), 201-215.
- Fraisse, C. W., Sudduth, K. A., & Kitchen, N. R. (2001). Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the ASAE*, 44(1), 155.
- Gallant, A. R. (1987), *Nonlinear Statistical Models*.
- Hernández, F., Amelong, A., & Borrás, L. (2014). Genotypic differences among Argentinean maize hybrids in yield response to stand density. *Agronomy Journal*, 106(6), 2316-2324.

- Hörbe, T. A. N., Amado, T. J. C., Ferreira, A. D. O., & Alba, P. J. (2013). Optimization of corn plant population according to management zones in Southern Brazil. *Precision Agriculture*, 14(4), 450-465.
- INTA. 1986. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3363-34 La Cesira. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Ministerio de agricultura, ganadería y recursos renovables, Córdoba, Argentina. 27-31 p.
- Jarsún, B., Gorgas J. A., Zamora E., Bosnero E., Lovera E., Ravelo A. & Tassile J. L. (2003). Recursos Naturales de la provincia de Córdoba: Los suelos. Agencia Córdoba D.A.C.y T.S.E.M Dirección de Ambiente, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Manfredi, Córdoba.
- Kiniry, J. R., Williams, J. R., Vanderlip, R. L., Atwood, J. D., Reicosky, D. C., Mulliken, J., & Wiebold, W. J. (1997). Evaluation of two maize models for nine US locations. *Agronomy Journal*, 89(3), 421-426.
- Kruk, B., & Satorre, E.H. (2003). Densidad y arreglo espacial del cultivo. Pp 277-316. En: EH Satorre; RL Benech; GA Slafer; EB de la Fuente; DJ Miralles; ME Otegui & R Savin (Eds.). Producción de granos: Bases funcionales para su manejo. FAUBA. Buenos Aires
- Lee, E. A., & Tollenaar, M. (2007). Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield. *Crop Science*, 47(Supplement_3), S-202.
- MAGYP. 2017. En: <https://datos.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Consultado el 18/07/2017
- Martínez Bologna, G., Castro, S., Cerliani, C., Balboa, G., Naville, R., & Espósito, G. (2014) Densidad de siembra de maíz asociada a la variabilidad espacial del suelo. En: XXIV Congreso Argentino de la Ciencias de Suelo. Bahía Blanca, Argentina.
- Moral, F. J., Terrón, J. M., & Da Silva, J. M. (2010). Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 335-343.
- Nagore, M. L., Echarte, L., Andrade, F. H., & Della Maggiora, A. (2014). Crop evapotranspiration in Argentinean maize hybrids released in different decades. *Field Crops Research*, 155, 23-29.
- Peralta, N. R., Costa, J. L., Castro Franco, M., & M. Balzarini. (2013). Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo.
- Ritchie, S. W., Hanway, J. J., & Benson, G. O. (1982). How a plant crop develops. Spec. Rep, 48.

- Sainz Rozas, H. R., Echeverría, H. E., & Angelini, H. P. (2011). Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Ciencia del suelo*, 29(1), 29-37.
- Sainz Rozas, H.R., Echeverría, H. E., & Angelini, H. (2012). Fósforo disponible en suelos agrícolas de la región Pampeana y Extra Pampeana argentina. *Revista de investigaciones agropecuarias*, 38(1), 33-39.
- Sarlangue, T., Andrade, F. H., Calviño, P. A., & Purcell, L. C. (2007). Why do maize hybrids respond differently to variations in plant density?. *Agronomy Journal*, 99(4), 984-991.
- Schepers, A. R., Shanahan, J. F., Liebig, M. A., Schepers, J. S., Johnson, S. H., & Luchiari, A. (2004). Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agronomy Journal*, 96(1), 195-203.
- Seiler, R., Fabricius, R., Rotondo, V., Vinocur, & Bonacci, J. (1995). Agroclimatología de Río Cuarto 1974/1993. Vol I. Catedra de Agrometeorología-Universidad Nacional de Río Cuarto. Cordoba, Argentina.
- Shanahan, J. F., Doerge, T. A., Johnson, J. J., & Vigil, M. F. (2004). Feasibility of site-specific management of corn hybrids and plant densities in the Great Plains. *Precision Agriculture*, 5(3), 207-225.
- Tollenaar, M., Dwyer, L. M., & Stewart, D. W. (1992). Ear and kernel formation in maize hybrids representing three decades of grain yield improvement in Ontario. *Crop Science*, 32(2), 432-438.
- Tollenaar, M., & Lee, E. A. (2011). 2 Strategies for Enhancing Grain Yield in Maize. *Plant breeding reviews*, 34, 37.
- Tukey, J.W. 1977. Exploratory data analysis. Addison-Wesley Reading, MA. 688pp.
- Vrindts, E., Mouazen, A. M., Reyniers, M., Maertens, K., Maleki, M. R., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (2005). Management zones based on correlation between soil compaction, yield and crop data. *Biosystems Engineering*, 92(4), 419-428.