

DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE MAÍZ ANTE MODIFICACIONES EN EL  
MANEJO DE LA DENSIDAD, DISTANCIA ENTRE SURCOS Y FECHA DE SIEMBRA.  
ANÁLISIS DE CAMPAÑAS 2007-2010 DE MIEMBROS MAIZAR EN EL NOA

Editor Claudia R.C. Vega

INTA EEA Manfredi - Ecofisiología de cultivos



2011

Editor  
Claudia R.C. Vega  
INTA EEA Manfredi

Participantes Miembros de MAIZAR:

Fraguío, M. (Maizar).  
Uhart, S.A. (Dow).  
Fenoglio, A. (Syngenta).  
Cela, M. (Monsanto).  
Lustig, S. (Monsanto).  
Céliz, A. (Nidera).  
Novoa, D. (Nidera).  
Teran Vega, E. (Dow).  
García Stepien, L.E. (U.N.L.Z.- Maizar).  
Portugal, A. (AIANBA).

Agradecimiento:

Lorea, R. (INTA EEA Pergamino).  
Canova, D. (Aapresid).  
Mercau, J. L.  
Del Campo, A. (AIANBA).

Comisión de Producción, Ciencia y Tecnología de MAIZAR.

Cita: Vega, C.R.C. (Ed.). 2011. Determinación del rendimiento de maíz ante modificaciones en el manejo de la densidad, distancia entre surcos y fecha de siembra. Análisis de campañas 2007-2010 de miembros de MAIZAR en el NOA. Buenos Aires (AR): MAIZAR. Asociación Maíz y Sorgo Argentino. 55 p. Disponible en: <http://www.maizar.org.ar/documentos/maizar%20noa.pdf>

## CONTENIDO

1.	Introducción .....	10
2.	Materiales y métodos.....	11
2.1.	Construcción de una Base de datos unificada.....	11
2.2.	Protocolos básicos de experimentos comunes.....	11
2.3.	Análisis estadísticos .....	12
3.	Resultados.....	13
3.1.	Caracterización climática de los ambientes analizados .....	13
3.2.	Rendimientos promedios e índices ambientales explorados .....	15
3.3.	Manejo de la estructura del canopeo. I. Respuesta genotípica a cambios en la densidad de plantas e interacciones con el ambiente .....	19
3.4.	Manejo de la estructura del canopeo. II. Respuesta genotípica a cambios en la distancia entre surcos y la densidad de plantas .....	34
3.5.	Fecha de siembra y determinación del rendimiento.....	42
4.	Conclusiones .....	52
5.	Bibliografía citada .....	52

## ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Resumen de rendimientos promedios y su coeficiente de variación (CV%) en experimentos ejecutados durante 2006-2010 en el marco del Proyecto MAIZAR NOA. El código del Ensayo hace referencia a la localidad, año y un número identificador general. Se indican detalles del objetivo general de cada experimento (DES, d y G refieren a: distancia entre surcos, densidad poblacional y genotipo, respectivamente). ..... 16
- Tabla 2. Análisis de la varianza, medias del rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$  con 14.5% H) según efectos principales (d, Densidad de plantas y G, Genotipo) en cultivos de maíz manejados en veintitrés ambientes (combinación de localidades y campañas) durante el período 2007-2010. Las siglas indican localidad, año y número de identificación del experimento. Localidades: Bu: Burruyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); TULC: La Cruz (Tucumán). ..... 21
- Tabla 2 Continuación. Análisis de la varianza, medias del rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$  con 14.5% H) según efectos principales (d, Densidad de plantas y G, Genotipo) en cultivos de maíz manejados en veintitrés ambientes (combinación de localidades y campañas) durante el período 2007-2010. Las siglas indican localidad, año y número de identificación del experimento. Localidades: Bu: Burruyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); TULC: La Cruz (Tucumán). ..... 22
- Tabla 3. Análisis de la varianza, medias del rendimiento en grano de maíz ( $\text{kg ha}^{-1}$ , 14% H) según efectos principales (Experimento, Densidad de plantas y Genotipo) a través de veintitrés ambientes (combinación de localidades y campañas) del NOA. .... 24
- Tabla 4. Análisis de la varianza, medias del rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$  con 14.5% H) según efectos principales (Densidad de plantas -d-, Distancia entre hileras -DES-, Genotipo -G-) en cultivos de maíz manejados en ocho ambientes (combinación de localidades y campañas)... 35
- Tabla 5. Análisis de la varianza para los efectos de prácticas de manejo (Experimento, Distancia entre surcos, Densidad de plantas y Genotipo) e interacciones, y medias del rendimiento de maíz ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ). Experimentos conducidos en diez ambientes del NOA argentino durante 2007-10 (Códigos en Tabla 1). ..... 37
- Tabla 6. Análisis de la varianza para los efectos de prácticas de manejo (Distancia entre surcos, Densidad de plantas y Genotipo) e interacciones, y medias del rendimiento de maíz ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ). Experimentos conducidos en diez ambientes del NOA argentino durante 2007-10. .... 38
- Tabla 7. Análisis de la varianza, rendimiento (14% H) según efectos principales (genotipo) e interacción entre prácticas de manejo (fecha de siembra y densidad de plantas) en cultivos de

maíz sembrados en La Cruz, campaña 2006-07 .....	44
Tabla 8. Parámetros de modelos lineales y polinómicos para la relación entre el rendimiento y la fecha de siembra (considerado como días desde el 1 de diciembre, DD_1dic) en 15 genotipos sembrados en tres fechas de siembra en La Cruz, Tucumán (2006-07). En todos los casos, los parámetros lineales fueron significativos a $p < 0.0001$ y los polinómicos a $p < 0.05$ . Para los casos en que el componente cuadrático de los modelos ajustados fue significativo, se presentan ambos modelos ajustados. ....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Radiación solar promedio ( $W m^{-2}$ ) desde el primero de diciembre (DD\_1Dic) durante tres campañas en las localidades de La Cocha (A) y Monte Redondo (B). Ejemplo de variación diaria de la radiación solar (C) y de la temperatura (D) en tres localidades durante la campaña 2007-2008. En C, posición relativa del período crítico de maíces sembrados durante la segunda quincena de diciembre (1) o primera de enero (2). Datos climáticos provistos por EEAOC, Tucumán. .... 14
- Figura 2. Gráfico de cajas para describir variabilidad y rendimientos en cuarenta experimentos ejecutados durante las campañas 2007-2010 en distintas localidades del NOA. Los experimentos incluyeron el análisis de distintas prácticas de manejo y genotipo. Las siglas de los experimentos incluyen el código de la localidad, año de evaluación y número identificador (detalles en Tabla 1). Localidades: Bu: Burreyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); Iz: Izcayacu (Santiago del Estero) JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); RSP: Roque Sáenz Peña (Chaco); TULC: La Cruz (Tucumán). .... 15
- Figura 3. Índice ambiental (IA,  $kg ha^{-1}$ ) modulado por la fecha de siembra en distintas localidades del NOA. Se ajustaron modelos de regresión sigmoide o de valor extremo que explicaron el 54% de la variación del índice ambiental. Modelo sigmoide:  $IA = 7447 + 2766 / (1 + \exp(-(DD\_1dic - 38) / (-3.7)))$ . Coeficiente de correlación Pearson  $r = -0.68$ . .... 17
- Figura 4. Relación entre el número de granos por unidad de superficie y el rendimiento en grano (A) y el peso de granos (B, mg) en experimentos conducidos en tres localidades: El Tunal (Salta), LA: Los Altos (Catamarca) y Qm: Quimilí (Santiago del Estero). Detalles de rendimientos medios y fechas de siembra en Tabla 1. En todos los casos, las relaciones fueron significativas ( $p < 0.001$ ). El coeficiente de correlación de Pearson fluctuó entre 0.21 a 0.54 para la relación entre  $NG m^{-2}$  y rendimiento (A); y entre -0.43 a -0.68 para la relación entre  $NG m^{-2}$  y peso de granos (B). .... 18
- Figura 5. Gráfico de cajas para describir la variabilidad y el rendimiento ( $kg ha^{-1}$  a 14 % H) más frecuente obtenido durante las campañas 2007-2010 en distintas localidades. Datos promedios de ensayos para valorar el efecto de la densidad de plantas y genotipos (Tabla 2). Localidades: Bu: Burreyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); TULC: La Cruz (Tucumán). .... 19
- Figura 6. Rendimiento en grano en seis genotipos de maíz sembrados en tres densidades de plantas (5, 6.5 y 8 p  $m^{-2}$ ). Datos promedios de veintitrés ambientes (combinaciones entre localidad y campaña). .... 20
- Figura 7. Índice ambiental (estimado como la media de los rendimientos dentro de cada ensayo)

- y fecha de siembra (en días desde el 1 de diciembre. Coeficiente de correlación Pearson para ambas variables =-0.49;  $p < 0.0001$ . ..... 23
- Figura 8. Variación del rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en respuesta a la densidad de plantas (5, 6.5 y 8  $\text{p m}^{-2}$ ) a través de ambientes (cuantificados por sus índices ambientales, IA). Rendimiento a 5  $\text{p m}^{-2}$  =  $1649.45 + 0.75 * \text{IA}$ ;  $R^2 = 0.42$ ; Rendimiento a 6.5  $\text{p m}^{-2}$  =  $-282.35 + 1.05 * \text{IA}$ ;  $R^2 = 0.57$ ; Rendimiento a 8  $\text{p m}^{-2}$  =  $-1242.05 + 1.19 * \text{IA}$ ;  $R^2 = 0.61$ . Modelos con  $p < 0.0001$ . ..... 24
- Figura 9. Respuesta del rendimiento al aumento de la densidad de plantas (%) en función del índice ambiental (media del rendimiento de cada ensayo;  $\text{kg ha}^{-1}$ ). La respuesta se calculó -teniendo en cuenta las diferencias significativas entre tratamientos- como el incremento porcentual del rendimiento en la densidad más alta (o de las dos densidades más altas según corresponda, Tabla 2) respecto al de la baja densidad. Los puntos representan los casos donde hubo (■) o no (□) respuesta a la densidad. La pendiente del modelo ajustado para los casos con respuesta significativa fue  $0.0027 \pm 0.001$  ( $p = 0.043$ ;  $R^2 = 0.25$ ). ..... 25
- Figura 10. Gráfico de cajas para describir la variabilidad y el rendimiento más frecuente obtenido durante las campañas 2007-2010 en distintas localidades. Datos promedios de ensayos para valorar el efecto de la densidad de plantas y genotipos (Tabla 2). ..... 25
- Figura 11. Densidad de plantas y rendimiento en grano (14.5% H) en seis localidades del NOA ( $n = 911$ ). Las localidades incluyeron entre dos (La Cocha, La Cruz, Las Lajitas y Rosario de la Frontera) y cuatro (Los Altos y Monte Redondo) campañas con experimentos para valorar el efecto de la densidad de plantas y el genotipo. Las Lajitas y Los Altos (R promedio =  $10177 \text{ Kg ha}^{-1}$ ); Monte Redondo (R promedio =  $9583 \text{ Kg ha}^{-1}$ ); La Cruz (R promedio =  $9016 \text{ Kg ha}^{-1}$ ); Rosario de la Frontera (R promedio =  $8414 \text{ Kg ha}^{-1}$ ); La Cocha (R promedio =  $7914 \text{ Kg ha}^{-1}$ ). ..... 26
- Figura 12. Gráficos de cajas para mostrar valor más frecuente y variabilidad en el rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$  con 14.5% H) de seis genotipos de maíz a través de localidades. Datos promedios de ensayos para valorar el efecto de la densidad de plantas y genotipos. UE por localidad: La Cocha (147), La Cruz (138), Las Lajitas (147), Los Altos (197), Monte Redondo (183) y Rosario de la Frontera (99). ..... 27
- Figura 13. Modelos lineales estimados para la relación entre el rendimiento y el índice ambiental ( $p < 0.0001$ ). La pendiente de los modelos (indicador de la responsividad) se indica entre paréntesis para cada genotipo: 2B710HX (1.23); AW190MG (0.75); AX1013MG (0.88); DK390MG (1.36); DK910MG (0.7); MASS636HX (1.12). Datos promedios de veintitrés experimentos diseñados para valorar el efecto de la densidad y el genotipo. .... 27
- Figura 14. Variabilidad genotípica de la respuesta a la densidad de plantas a través de ambientes en seis genotipos de maíz sembrados en el NOA. Las pendientes en los modelos son una medida de la respuesta al incremento en densidad y en calidad ambiental. .... 28
- Figura 15. Rendimiento y radiación solar interceptada en respuesta a la densidad de plantas (A) y el genotipo (B). Datos de experimentos LA-2007-5 y LA-2008-3. .... 29
- Figura 16. Relación entre la interceptación de radiación solar durante el período crítico (RFAI PC, %), el número de granos (B) y el rendimiento en seis genotipos de maíz (A). La variación de RFAI fue lograda a través de distintas densidades poblacionales (5 a 8  $\text{p m}^{-2}$ ). Las pendientes

para la relación rendimiento y radiación solar se indican entre paréntesis para cada genotipo: 2B710HX (129); AW190MG (118); AX1013MG (117); DK390MG (141); DK910MG (108); MASS636HX (127).....	30
Figura 17.Ejemplo de variación del número de granos por unidad de superficie (A) y prolificidad (B) en respuesta a la densidad poblacional en seis genotipos de maíz. ....	30
Figura 18.Biplot GGE (A) y AMMI1 (B) para analizar interacciones entre ambientes y genotipos de maíz. Datos promedios de ensayos de densidad de plantas y genotipos realizados en 24 combinaciones de año y localidad. Las siglas de los experimentos incluyen el código de la localidad, el año de evaluación y el número identificador. Códigos de Localidades e índices ambientales entre paréntesis: Bu: Burreyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); TULC: La Cruz (Tucumán). ....	32
Figura 19.Respuesta del rendimiento de maíz a la disminución de la distancia entre surcos en función del índice ambiental. Modelos lineales ajustados a través de experimentos ( $p < 0.0001$ ). Los interceptos fueron no significativos. La pendiente fue $1.03 \pm 0.015$ , $0.97 \pm 0.013$ y $0.98 \pm 0.017$ a 0.52, 0.70 y 1.04 m, respectivamente. ....	36
Figura 20.Rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de cultivos de maíz sembrados en diez ambientes (siglas de los experimentos incluyen el código de la localidad, el año de evaluación y el número identificador). Localidades con sus rendimientos promedios ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) entre paréntesis: GV-2007-30: General Vedia (7491); Iz-2007-31: Izcayacu (6096); LA-2007-29: Los Altos (9192); LA-2008-14: Los Altos (10942); LA-2009-13: Los Altos (9047); LA-2010-53: Los Altos (10824); RSP-2007-7: Roque Sáenz Peña (6632); TULC-2007-37: La Cruz (5842); TULC-2008-24: La Cruz (11481); TULC-2010-41: La Cruz (9986). Experimentos diseñados para valorar el efecto de la distancia entre surcos y la densidad de plantas. El modelo ajustado fue una función logística ( $\text{Rendimiento} = 6960 / [1 + \exp^{-4385(20.7 - \text{DD}_{1\text{dic}})}] + 8.7$ ). ....	39
Figura 21.Biplot (AMMI 2) para visualizar las causas de la interacción genotipo y ambiente (efecto localidad y año) en experimentos diseñados para valorar el efecto de la distancia entre surcos y la densidad de plantas. Las siglas de los experimentos incluyen el código de la localidad, el año de evaluación y el número identificador. Códigos de Localidades con sus rendimientos promedios ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) entre paréntesis: GV-2007-30: General Vedia (7491); Iz-2007-31: Izcayacu (6096); LA-2007-29: Los Altos (9192); LA-2008-14: Los Altos (10942); LA-2009-13: Los Altos (9047); LA-2010-53: Los Altos (10824); RSP-2007-7: Roque Sáenz Peña (6632); TULC-2007-37: La Cruz (5842); TULC-2008-24: La Cruz (11481); TULC-2010-41: La Cruz (9986). ....	40
Figura 22.Variación del rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en respuesta a la fecha de siembra en distintos genotipos de maíz. Bajo la categoría Otro G, se promedió el rendimiento de 13 genotipos (3 comerciales y 10 experimentales). ....	42
Figura 23.Variación de los días a floración en respuesta a la fecha de siembra en distintos genotipos de maíz. Bajo la categoría Otro G, se promedió el rendimiento de 13 genotipos (3	

comerciales y 10 experimentales) .....	43
Figura 24. Gráfico de cajas para visualizar los rangos de rendimiento logrados en 15 genotipos de maíz sembrados bajo la combinación de densidades de plantas (5, 6.5 y 8 p m <sup>-2</sup> ) y tres fechas de siembra. La línea horizontal en el centro de la caja indica el valor más frecuente observado. Los puntos indican valores extremos. Ensayo conducido en la localidad de La Cruz, Tucumán, campaña 2006-07. ....	45
Figura 25. Rendimiento promedio de 15 genotipos en función de fechas de siembras y modelo sigmoide propuesto de Figura 3. ....	45
Figura 26. Interacciones entre genotipo y fecha de siembra (A), genotipo y densidad de plantas (B) y fecha de siembra y densidad de plantas (C) como determinantes del rendimiento en grano. Ensayos conducidos en La Cruz, campaña 2006-07. ....	47
Figura 27. AMMI (2) entre ambiente y genotipo para explicar cuáles genotipos influyeron más en la varianza asociada con la interacción G*A. Experimentos conducidos en tres fechas de siembra (FS.1; FS.2; y FS.3, Tabla 7) en la localidad de La Cruz, Tucumán. ....	47
Figura 28. Biplot GEE para interpretar interacciones G*A y detección de mega-ambientes y genotipos asociados. ....	48
Figura 29. GGE para detectar los mejores genotipos en ambientes modulados por la fecha de siembra. ....	49

## 1. INTRODUCCIÓN

En el NOA, el maíz -predominantemente de germoplasma tropical (o tropical\*templado)- alcanza rendimientos promedios de 5-6 t ha<sup>-1</sup>, valores que resaltan la importante brecha respecto a rendimientos potenciales que podrían lograrse en función de factores ambientales como la temperatura y radiación solar. Estimaciones realizadas localmente en base a estos factores en varias localidades del norte (Uhart, -Anexo p. 27-) indican que, sin limitaciones hídricas, nutricionales y bióticas, los rendimientos potenciales se ubican en rangos de 10 (Orán) a 14 t ha<sup>-1</sup> (Tucumán). Es ampliamente conocido que los techos de rendimiento potencial en una localidad están estrechamente asociados con: i) la temperatura media diaria (Tm, °C) y la radiación solar incidente (R; MJ m<sup>-2</sup>) durante la etapa crítica alrededor de la floración, factores que determinan el llamado cociente fototérmico (Andrade, 1992); y ii) el potencial genético del genotipo seleccionado. Por ende, la combinación de localidad y manejo (sobre todo la fecha de siembra y el genotipo) es la principal causa determinante del rendimiento potencial. En el NOA, rendimientos superiores a los estimados en base al cociente fototérmico han sido reportados en micro-parcelas, por ej. entre 13 y 15 t ha<sup>-1</sup> en Las Lajitas y Los Altos, respectivamente (Uhart, -Anexo p. 27-), situación que podría estar asociada al tercer factor mencionado -el genotipo- o a la sinergia manejo-genotipo. Sólo la mejora genética o su combinación con mejores prácticas de manejo pueden superar las limitaciones impuestas por el cociente fototérmico en una determinada localidad.

Es importante recordar que, por la sensibilidad de las estructuras reproductivas alrededor de la floración, el maíz es una de las especies más responsiva al óptimo manejo de los insumos. Y por ello, el manejo agronómico debe apuntar al logro de un óptimo estado fisiológico durante el período crítico ( $\pm 15$  alrededor de floración femenina) que no sólo maximiza tasas de crecimiento de cultivo sino que optimiza la fijación y funcionamiento pleno de las estructuras reproductivas -básicamente, lo que se entiende como partición de biomasa a la espiga; (Vega et al., 2001a)-. En ambientes de alta calidad, la clave para maximizar tasas de crecimiento de cultivo y la partición es la captura de radiación solar; y en ambientes con limitaciones hídricas y/o térmicas severas durante las etapas críticas alrededor de floración, las estrategias deberán orientarse a un manejo conservador (escape con fechas de siembra tardías, uso de materiales tolerantes y de ciclos apropiados) sin afectar en demasía la captura de la radiación solar.

Entonces, en la medida que el progreso genético prosiga, una mejor comprensión de las interacciones entre el ambiente, el manejo y el genotipo permitirá aprovechar la sinergia entre estos factores (Fischer and Palmer, 1984; Zaidi et al., 2003). Adicionalmente, un buen entendimiento de los mecanismos del cultivo alterados por estos factores de manejo permitiría optimizar el rendimiento, disminuyendo brechas entre los rendimientos potencialmente alcanzables y, contribuiría para el diseño de estrategias de manejo y de selección de genotipos adaptados.

Con el objetivo de analizar factores de manejo que puedan contribuir a la mejora del rendimiento, estabilidad y rentabilidad del maíz, MAIZAR promovió la unión de esfuerzos entre empresas privadas y sectores públicos para unificar protocolos de experimentación en distintos ambientes del noroeste argentino. La vasta información generada permitirá

responder cuantitativamente a interrogantes planteados como paradigmas o aspectos poco claros que actualmente existen en el manejo del cultivo de maíz en el NOA (Mercau, -Anexo p. 1-; Uhart, -Anexo p. 27-). En particular, en este trabajo se analizarán conceptos relacionados con las interacciones entre factores de manejo que modulan el diseño espacial del cultivo (distancia entre surcos, densidad de plantas), el ambiente (localidades, fechas de siembra, variabilidad interanual) y el genotipo. Un aspecto único a resaltar es que el esfuerzo conjunto permitió analizar el conjunto de estas prácticas de manejo a través de gradientes de calidad ambiental.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Construcción de una Base de datos unificada

La información proporcionada por los participantes del proyecto permitió la construcción de una Base de datos unificada ( $n=4132$  unidades experimentales). Los datos han sido revisados en términos de su calidad, corregidos y unificados en medidas comunes. Debido al distinto grado de detalle que cada ejecutor impuso en el relevamiento de datos, la base de datos es desbalanceada. Por ello, algunos análisis en este informe estarán basados en un menor número de experimentos.

### 2.2. Protocolos básicos de experimentos comunes

Dos tipos de experimentos principales fueron consensuados bajo protocolos estandarizados. Los Experimentos de tipo I estudiaron la combinación de factores de manejo: i) genotipos (G), distanciamiento entre surcos (DES) y densidad de plantas (d); y ii) genotipos y densidad de plantas. En ambos tipos de experimentos, se realizaron ensayos factoriales con al menos tres repeticiones (bloques completos) en un diseño de parcelas sub-divididas. En general, las unidades experimentales tuvieron un mínimo de 4 surcos y 10 m de largo. Los ensayos se condujeron sin limitaciones nutricionales y se mantuvieron libres de insectos, malezas y enfermedades.

En los experimentos  $G*DES*d$ , el espaciado entre surcos fue la parcela principal y tuvo tres niveles (1.04, 0.70 y 0.52 m entre líneas). En la subparcela, se ubicó la densidad de plantas (5 y 7 p m<sup>-2</sup>) y en la sub-subparcela los genotipos. Similarmente, en los experimentos  $G*d$ , la parcela principal fue la densidad poblacional (5, 6.5 y 8 p m<sup>-2</sup>), y la subparcela fue el genotipo.

En ambos tipos de experimentos, se usaron diversos genotipos pero sólo se analizarán en este informe seis genotipos comunes presentes en todos los ensayos (DK390MG, MASS636HX, 2B710HX, DK910MG, AW190MG, AX1013MG). Los mismos representaron materiales de cada empresa participante y se caracterizaron por tener diferente estructura de planta (altura, foliosidad, tendencia al vuelco, ángulo foliar, entre otros) y origen de germoplasma (por ej. templado como AW190MG o tropical como MASS636HX).

Adicionalmente, y en paralelo a los experimentos por protocolo, se ejecutaron análisis que valoraron componentes ecofisiológicos (como captura y eficiencia en el uso de la

radiación solar, tasas de crecimiento de cultivo, entre otros). La información generada por dichos análisis no ha sido compilada en la Base unificada, debido a los distintos genotipos utilizados. Sin embargo, debido a su contribución para mejorar la interpretación de los datos obtenidos y la discusión, dichos análisis son presentados como un compilado Anexo en este informe. Referencias a los mismos son agregadas a lo largo del cuerpo principal de este informe.

Un estudio adicional para valorar el impacto de las fechas de siembra fue realizado por uno de los participantes de MAIZAR y será discutido en este informe aunque su protocolo no responda inicialmente al general (básicamente por el uso de genotipos experimentales no necesariamente demostrados como adaptados a la zona). Sin embargo, presenta un marco de análisis cuantitativo de valioso aporte para la discusión de la respuesta a la fecha de siembra.

### 2.3. Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante procedimientos ANOVA tradicionales y MLM (modelos lineales mixtos más específicos para ensayos multi-ambientales que permiten la consideración de efectos fijos y aleatorios y correcciones por heterocedasticidad) usando los paquetes estadísticos Infostat e Infogen (Balzarini and Di Rienzo, 2003; Balzarini et al., 2008). Análisis de las interacciones entre genotipo y ambiente incluyeron análisis complementarios gráficos tipo biplots -AMMI(2) y GGE (Balzarini and Di Rienzo, 2003)-. Modelos lineales y no lineales fueron ajustados mediante Table Curve (Jandel Scientific, 1994) y Statview (Abacus Concepts, 1996).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Caracterización climática de los ambientes analizados

La región NOA abarca las provincias de Tucumán, Salta, Jujuy, Santiago del Estero y Catamarca (22-29° LS y 63-68° LO) con predominio de clima subtropical con régimen de lluvias monzónico (rangos de 500 a 1200 mm anuales, concentradas entre octubre y abril). Las temperaturas medias anuales oscilan entre los 19 a 22 °C, y en su mayoría las zonas de cultivo de granos se caracterizan por baja amplitud térmica. Temperaturas máximas absolutas mensuales superan los 40°C en diciembre y enero (por ej. en Santiago, Campo Gallo y Orán donde temperaturas de 44 °C pueden ocurrir (Pascale and Lamelas, 2009).

A modo de ejemplo, se presenta en Figura 1 la variación temporal de los factores ambientales radiación solar y temperatura en tres localidades del NOA (La Cocha, Monte Redondo y La Cruz). En cada ambiente, la relación entre la radiación solar (RS) y la temperatura media (T) determinan el coeficiente fototérmico  $Q = RS / T - T_b$ ;  $T_b$ =temperatura base del maíz (8°C). Ambas curvas son típicamente campanas con máximos alrededor de diciembre (radiación solar) o enero (temperatura). Por ello, el cociente fototérmico es máximo en el invierno y mínimo a mediados/final de verano. Considerando su latitud, el NOA tiene cocientes fototérmicos menores que regiones en el sur -Figura 3 en Cantarero *et al.*, (2009) en Anexo p. 23-, y esto explica el menor rendimiento potencial que puede alcanzar un cultivo de maíz respecto a otras zonas, aún cuando pueda ser manejado en fechas tempranas y en condiciones hídricas y nutricionales óptimas.

La fecha de siembra, entonces, es el principal factor de manejo que modula el ambiente durante el período crítico de floración. Considerando que en ambientes del NOA, otros factores de estrés como el hídrico, térmico o su combinación son frecuentes (Lamelas et al., 2006), la elección de la fecha de siembra y el genotipo serán estrategias claves para evitar los períodos de máxima demanda ambiental y/o con probabilidades de estreses, preservando la calidad del ambiente en términos de radiación solar durante el período crítico y el llenado de granos. En este sentido, la contribución del genotipo es importante ya que se conoce que los genotipos con germoplasma tropical son más tolerantes a los estreses, como por ej. el térmico (Cicchino et al., 2010).

A pesar de que en el NOA la radiación solar disminuye en mayor proporción que la temperatura (y por ende, el Q) a partir de mediados/finales de febrero, es de destacar que los períodos críticos alrededor de la floración de maíces sembrados en fechas de diciembre y enero ocurren en ambientes de similar Q -Figura 1, y Figura 3 en Cantarero *et al.*, (2009), en Anexo p. 23-. Este concepto es importante ya que, entonces, pueden lograrse ambientes de similar Q pero de menor probabilidad de estrés durante este rango de fechas. Por ej., para la campaña año 2006-07, el cociente fototérmico varió en estas localidades entre 0.82 y 1.6 (media  $1.24 \pm 0.19$ ; CV=16%) durante 100 días a partir del primero de diciembre (Figura 1). En comparación en el NEA, siembras de octubre ubican la floración en enero con  $Q \cong 1.5$ , mientras que siembras de diciembre ubican la floración a inicios de marzo cuando el Q se ha reducido en un 17% - $Q \cong 1.2$ , (Metzler, 2008)-.

Un aspecto adicional importante a tener en cuenta es la variación interanual y diaria de

la radiación solar durante las etapas críticas debida a la variación de la heliofanía (Figura 1c). Días nublados o con precipitaciones pueden disminuir la radiación solar hasta en 80% (de 300 a 50  $Wm^{-2}$ ). Debido a que las tasas de crecimiento del cultivo y de las espigas están estrechamente asociadas con la incidencia e intercepción de la radiación solar (Andrade et al., 2005), este factor ambiental puede explicar variaciones interanuales en el número de granos  $m^{-2}$ , aún cuando el nivel hídrico en suelo sea óptimo.

Finalmente, la marcada disminución de la radiación solar hacia el otoño debe tenerse en cuenta por ser una fuerte limitante durante el llenado de granos en fechas de siembra tardías (más adelante se discutirán nuevamente estos aspectos) o en genotipos de ciclo largo.

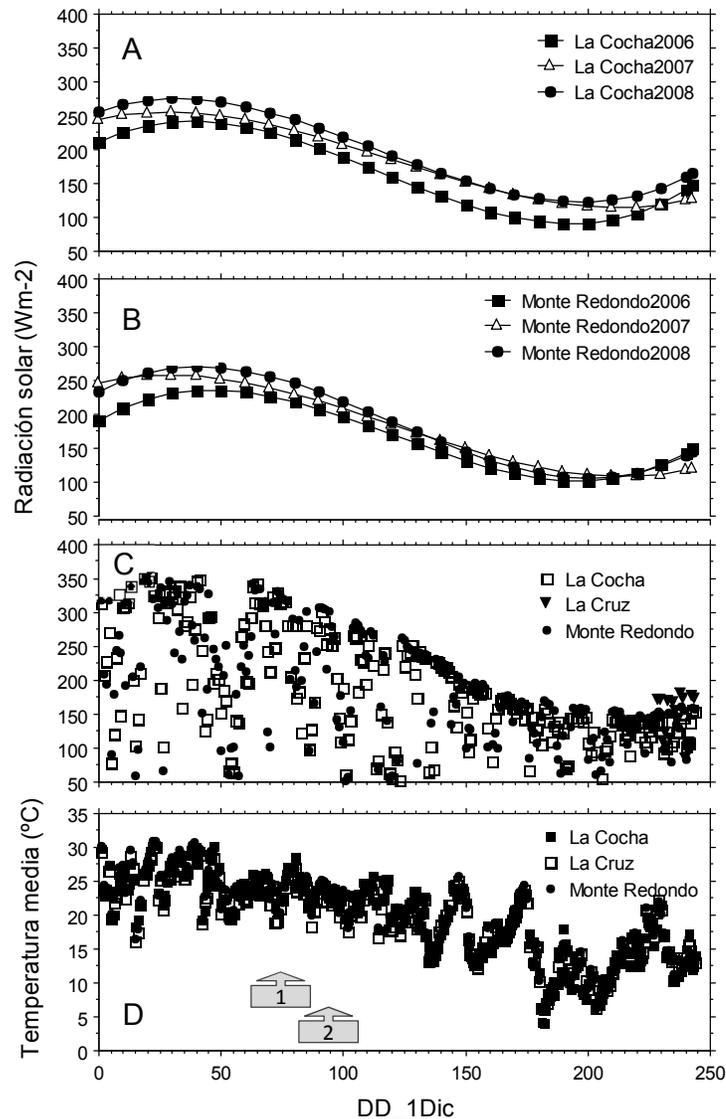


Figura 1. Radiación solar promedio ( $W m^{-2}$ ) desde el primero de diciembre (DD\_1Dic) durante tres campañas en las localidades de La Cocha (A) y Monte Redondo (B). Ejemplo de variación diaria de la radiación solar (C) y de la temperatura (D) en tres localidades durante la campaña 2007-2008. En C, posición relativa del período crítico de maíces sembrados durante la segunda quincena de diciembre (1) o primera de enero (2). Datos climáticos provistos por EEAOC, Tucumán.

Disminuciones de la temperatura media hacia el otoño correlacionan con incrementos

en la duración de etapas fenológicas, por ej. emergencia-floración en maíz. Las fechas de siembra durante diciembre a fin de enero impactarían, sin embargo, relativamente poco en la duración de la fase emergencia-floración ( $55 \pm 2.67$  días promedio para todos los genotipos en este estudio). Aunque, la duración de dicha fase varía según el genotipo; por ej. AW190MG, DK910MG y AX1013MG son generalmente 3-5 días más cortos que MASS636HX, 2B710HX y DK390MG.

### 3.2. Rendimientos promedios e índices ambientales explorados

Cuarenta ensayos fueron sembrados durante 2006 a 2010 en diecisiete localidades de seis provincias del NOA, totalizando 2088 unidades experimentales (computando sólo aquellos casos con los genotipos comunes establecidos por protocolos MAIZAR para el período 2006-2009). El rendimiento promedio por ensayo fluctuó entre un mínimo de 5842 (TULC-2007-37) y un máximo de 11481 kg ha<sup>-1</sup> (TULC-2008-24; Figura 2 y Tabla 1).

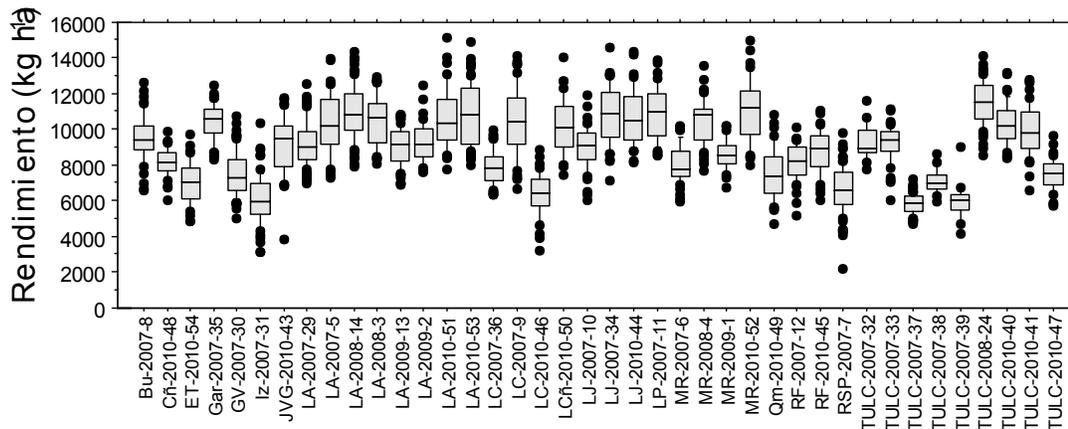


Figura 2. Gráfico de cajas para describir la variabilidad y el rendimiento promedio obtenido en cuarenta experimentos ejecutados durante las campañas 2007-2010 en distintas localidades del NOA. Los experimentos incluyeron el análisis de distintas prácticas de manejo y genotipo. Las siglas de los experimentos incluyen el código de la localidad, el año de evaluación y el número identificador (detalles en Tabla 1). Localidades: Bu: Burruyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); Iz: Izcayacu (Santiago del Estero) JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); RSP: Roque Sáenz Peña (Chaco); TULC: La Cruz (Tucumán).

El máximo rendimiento observado fue de 14038.5 kg ha<sup>-1</sup> con el genotipo DK390MG manejado a 7 p m<sup>-2</sup> y a una distancia entre surcos de 0.52 en el experimento LA-2010-53 sembrado el 23/12/2009. Respecto a las distintas combinaciones de manejo que, en promedio resultaron en un índice ambiental de 10824 kg ha<sup>-1</sup>, este caso exhibió una respuesta cercana al 40%. Considerando la media de genotipos manejados en forma idéntica (11920 kg ha<sup>-1</sup>), este caso exhibió una respuesta del 18%, destacando la importancia de la respuesta al manejo agronómico (genotipo, densidad y espaciamiento).

Tabla 1. Resumen de rendimientos promedios y su coeficiente de variación (CV%) en experimentos ejecutados durante 2006-2010 en el marco del Proyecto MAIZAR NOA. El código del Ensayo hace referencia a la localidad, año y un número identificatorio general. Se indican detalles del objetivo general de cada experimento (DES, d y G refieren a: distancia entre surcos, densidad poblacional y genotipo, respectivamente).

Provincia	Localidad	Categoría ensayo	Código Ensayo	Fecha de siembra	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	CV% Rendimiento
Santiago del Estero	Izcayacu	DES *d*G	Iz-2007-31	20/01/2007	6096	22.7
Catamarca	Los Altos	d*G	LA-2007-5	28/12/2006	10306	11.6
			LA-2008-3	28/12/2007	10534	13.2
			LA-2009-2	23/12/2008	9345	11.2
			LA-2010-51	23/12/2009	10662	15.9
		DES *d*G	LA-2007-29	30/01/2007	9192	13.2
			LA-2008-14	29/12/2007	10942	13.9
			LA-2009-13	08/01/2009	9047	11.6
Chaco	General Vedia	DES *d*G	LA-2010-53	23/12/2009	10824	15.4
			GV-2007-30	05/02/2007	7491	16.7
Salta	Roque Sáenz Peña	DES *d*G	RSP-2007-7	06/02/2007	6632	20.2
	El Tunal	d*G	ET-2010-54	28/01/2010	7077	16.8
Santiago del Estero	Joaquín V González	d*G	JVG-2010-43	15/01/2010	9120	17.9
	Las Lajitas	d*G	LJ-2007-10	08/01/2007	9035	13.0
			LJ-2007-34	20/12/2006	10796	15.0
			LJ-2010-44	20/12/2009	10659	14.5
	Rosario de la Frontera	d*G	RF-2007-12	08/02/2007	8136	12.1
			RF-2010-45	17/01/2010	8748	13.6
	Santiago del Estero	La Cañada	d*G	LCñ-2010-50	19/12/2009	10216
La Paloma		d*G	LP-2007-11	08/01/2007	10849	13.6
Quimilí		d*G	Qm-2010-49	17/01/2010	7511	18.9
Tucumán	Burruyacu	d*G	Bu-2007-8	06/02/2007	9501	13.7
	Cañete	d*G	Cñ-2010-48	10/01/2010	8133	9.7
	Garmendia	d*G	Gar-2007-35	23/12/2006	10400	9.8
			LC-2007-36	16/12/2006	7839	12.1
			LC-2007-9	12/01/2007	10415	17.5
	La Cruz	d*G	LC-2010-46	08/01/2010	6373	19.0
			TULC-2007-33	10/12/2006	9232	11.0
			TULC-2010-40	14/12/2009	10306	16.8
			TULC-2010-47	13/01/2010	7475	11.5
			DES *d*G	TULC-2007-37	01/02/2007	5842
TULC-2008-24				15/12/2007	11481	10.8
TULC-2010-41				14/12/2009	9986	14.0
FS*d*G	TULC-2007-32	23/12/2006	9275	10.7		
	TULC-2007-38	13/01/2007	7079	9.1		
	TULC-2007-39	01/02/2007	5996	17.0		
Monte Redondo	d*G	MR-2007-6	28/01/2007	8069	13.0	
		MR-2008-4	02/01/2008	10466	12.0	
		MR-2009-1	06/01/2009	8634	9.8	
		MR-2010-52	23/12/2009	11117	15.0	

Las fechas de siembra de todos los ensayos oscilaron entre el 10 de diciembre al 8 de febrero, aspecto que generó junto a la localidad, un rango amplio de índices ambientales. En una primera aproximación de análisis a través de localidades y años, pudo observarse que el rendimiento promedio de los ensayos fue parcialmente explicado por la fecha de siembra (coeficiente de correlación Pearson  $r = -0.68$ ; Figura 3). Fechas de siembra hasta inicios de enero se asociaron con rendimientos cercanos a  $10000 \text{ kg ha}^{-1}$ . A partir de estas fechas, el rendimiento disminuyó en promedio un 22%.

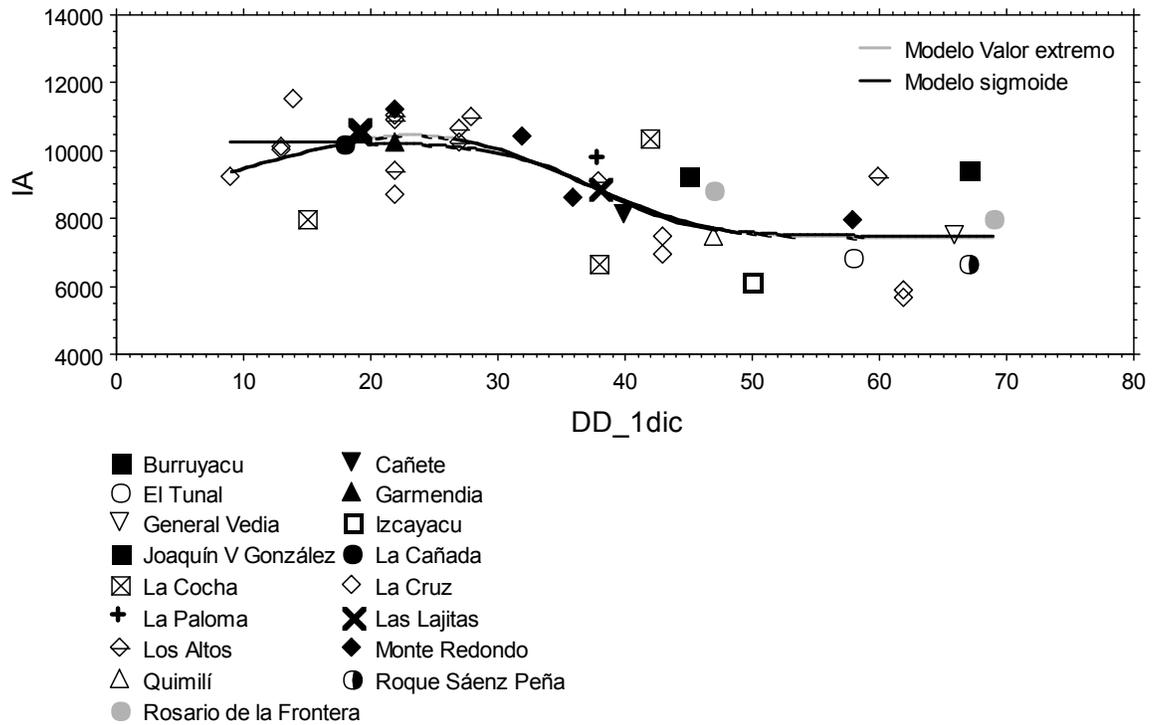


Figura 3. Índice ambiental (IA,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) modulado por la fecha de siembra en distintas localidades del NOA. Se ajustaron modelos de regresión sigmoide o de valor extremo que explicaron el 54% de la variación del índice ambiental. Modelo sigmoide:  $IA = 7447 + 2766 / (1 + \exp(-(\text{DD\_1dic} - 38) / (-3.7)))$ . Coeficiente de correlación Pearson  $r = -0.68$ .

Para una misma fecha de siembra y localidad, la variación interanual del rendimiento reflejaría principalmente condiciones durante la etapa crítica, cuando se define el componente número de granos. Sin embargo, cada caso particular debería analizarse mediante la disección del rendimiento en sus componentes número y peso de granos para establecer con mayor precisión si el factor más limitante ocurrió durante la etapa crítica alrededor de floración o durante el llenado de granos.

Como se discutiera en la sección anterior, fechas de siembra muy tardías exponen al cultivo a condiciones declinantes de radiación solar que impactan sobre la calidad ambiental durante etapas críticas o de llenado de granos. En siembras en febrero, la duración de la etapa vegetativa -emergencia-panojamiento- es mayor (probablemente por las menores temperaturas durante el fin del verano) lo cual ubica la floración pasado el inicio del otoño (primera quincena de abril). En el caso el Tunal-2010-54, por ejemplo, la etapa siembra-floración duró 72 días.

Sólo en tres ambientes fue posible indagar acerca de la contribución de los componentes del rendimiento número y peso de granos (El Tunal, Salta; Los Altos, Catamarca y Quimilí, Santiago del Estero). El número de granos se asoció positivamente con el rendimiento ( $p < 0.05$ ;  $24 > R^2 > 29$ ; Figura 4) a través de un rango de 4238 y 12957  $\text{kg ha}^{-1}$ . Dentro de cada ambiente, la variación ocurrió en respuesta a cambios en prácticas de manejo o genotipo (aspecto que se discutirá en particular más adelante). El peso de granos correlacionó negativamente con el número de granos ( $18 > R^2 > 46$ ;  $p < 0.0001$ ), probablemente como consecuencia de conocidos procesos de compensación entre componentes del rendimiento (Sadras, 2007). En el ambiente donde el rendimiento fue mayor para un mismo número de granos fijados, el PG fue mayor. Dicho resultado estuvo seguramente asociado con la fecha de siembra más temprana utilizada (mayor radiación solar) y la localidad (Figura 4; caso LA-2008-3), aunque estreses hídricos pueden afectar también el PG a través de su efecto sobre la duración del llenado de granos. En el caso El Tunal, el llenado de granos inició tardíamente alrededor del 10 de abril, cuando la radiación solar marcadamente disminuye. En este caso, el PG fue significativamente inferior al logrado en las otras localidades.

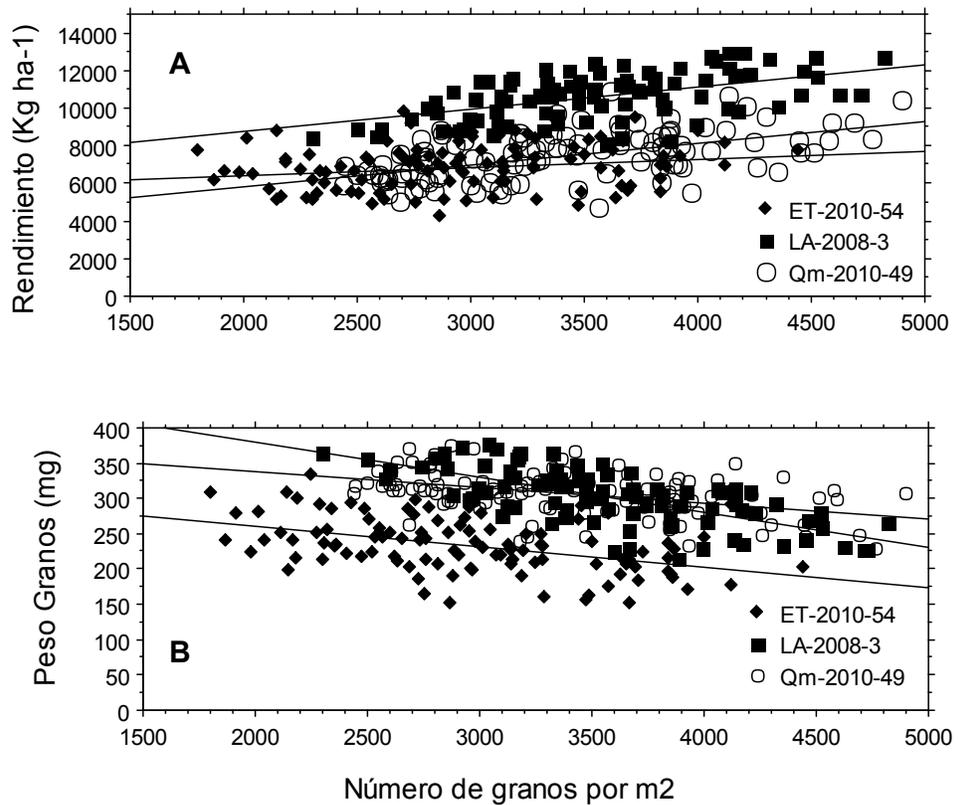


Figura 4. Relación entre el número de granos por unidad de superficie y el rendimiento en grano (A) y el peso de granos (B, mg) en experimentos conducidos en tres localidades: El Tunal (Salta), LA: Los Altos (Catamarca) y Qm: Quimilí (Santiago del Estero). Detalles de rendimientos medios y fechas de siembra en Tabla 1. En todos los casos, las relaciones fueron significativas ( $p < 0.001$ ). El coeficiente de correlación de Pearson fluctuó entre 0.21 a 0.54 para la relación entre  $\text{NG m}^{-2}$  y rendimiento (A); y entre -0.43 a -0.68 para la relación entre  $\text{NG m}^{-2}$  y peso de granos (B).

### 3.3. Manejo de la estructura del canopeo. I. Respuesta genotípica a cambios en la densidad de plantas e interacciones con el ambiente

Un objetivo básico en el manejo de los cultivos debe ser el de maximizar la captura de radiación solar incidente, ya que ello garantiza: i) las máximas tasas de crecimiento de cultivo alrededor de la floración y ii) óptima partición de biomasa hacia estructuras reproductivas. Prácticas de manejo que afectan la estructura del canopeo del cultivo de maíz -como la densidad de plantas, distancia entre surcos, uniformidad espacial y temporal- deben conducir a una intercepción de radiación solar cercana al 95% al inicio del período crítico. Mejoras en la intercepción de radiación solar por arriba de estos valores no resultan en aumentos significativos de biomasa ni rendimiento (Andrade et al., 2002), y pueden en casos especiales, ser contraproducentes (i.e. suelos de escasa capacidad de almacenaje de agua; intolerancia del genotipo a altas densidades; sequía progresiva que limita el agua disponible en floración). En maíz, los potenciales efectos negativos son explicados porque el incremento de la interacción y competencia entre individuos de un mismo cultivo puede disminuir los recursos por planta por debajo de umbrales mínimos para la producción de estructuras reproductivas (Vega et al., 2001b). Debido a que en el NOA, el maíz se maneja principalmente en secano y durante un amplio rango de fechas de siembra, es necesario comprender con mayor robustez la respuesta del rendimiento a cambios en la estructura de canopeo moduladas por la interacción entre los factores ambiente (localidad, temperaturas, radiación solar), genotipo y densidad de plantas.

En este marco, veintisiete ensayos en catorce localidades de las provincias de Tucumán, Salta, Santiago del Estero y Catamarca fueron realizados para valorar el efecto de la densidad, el genotipo y su interacción (n=1282; detalles en Tabla 1). El rango de fechas de siembra estuvo ubicado entre el 10 de diciembre y el 08 de febrero. El rendimiento promedio fue de  $9318 \pm 1851.7 \text{ Kg ha}^{-1}$  y el rango observado a través de ambientes y tratamientos fluctuó entre  $3218$  y  $15100 \text{ Kg ha}^{-1}$  (Figura 5).

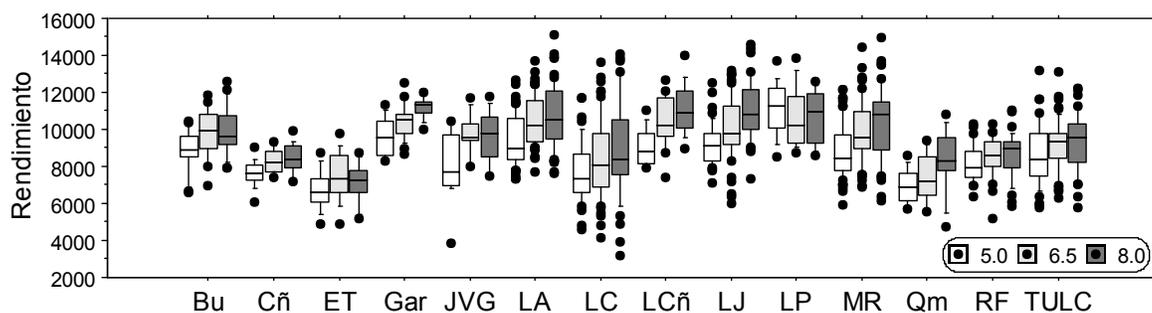


Figura 5. Gráfico de cajas para describir la variabilidad y el rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$  a 14 % H) más frecuente obtenido durante las campañas 2007-2010 en distintas localidades. Datos promedios de ensayos para valorar el efecto de la densidad de plantas y genotipos (Tabla 2). Localidades: Bu: Burruyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); TULC: La Cruz (Tucumán).

De veintisiete casos, veinte exhibieron respuesta a la densidad de plantas y veintitrés al genotipo. Sin embargo, sólo en 2/23 casos, la interacción Densidad\*Genotipo fue significativa (Tabla 2). En 19/20 casos donde hubo respuesta a la densidad, el rendimiento fue mínimo en la densidad más baja. En 9/20 casos, la densidad de 8 plantas m<sup>-2</sup> exhibió los rendimientos más altos y en 10/20 casos, no hubo diferencia entre las densidades de 6.5 y 8 p m<sup>-2</sup>. El óptimo de densidad para rendimiento, entonces, estaría ubicado entre las densidades de 6.5 y 8 p m<sup>-2</sup> en la mayoría de los ambientes estudiados. En promedio a través de ambientes, las densidades más altas incrementaron el rendimiento en 16.9%, siendo el rango de respuesta entre 9.5 y 27%. Sólo en el caso LA-2009-2, el máximo rendimiento ocurrió en la densidad media (Tabla 2). En los casos, donde existió interacción G\*densidad de plantas (Gar-2007-35 y MR-2008-4), se compararon las medias de rendimiento con el test DGC resultando discriminación en dos grupos. En Gar-2007-35, la densidad de 5 p m<sup>-2</sup> se asoció con bajos rendimientos sólo en los genotipos DK390MG, AX1013MG y 2B710HX. En MR-2008-4, los rendimientos mínimos ocurrieron en las siguientes combinaciones G\*densidad: DK910MG (5 y 6.5 p m<sup>-2</sup>), AX1013MG (5 y 6.5 p m<sup>-2</sup>) y 2B710HX y AW190MG a 5 p m<sup>-2</sup>

Dentro de cada ambiente (combinación año y localidad), existió escasa o nula interacción entre el genotipo y la densidad de plantas (Tabla 2; excepciones fueron Gar-2007-35 y MR-2008-4). Es decir, en la mayoría de los casos, todos los genotipos exhibieron sus mayores rendimientos en las densidades de plantas más altas (Tabla 2; Figura 6).

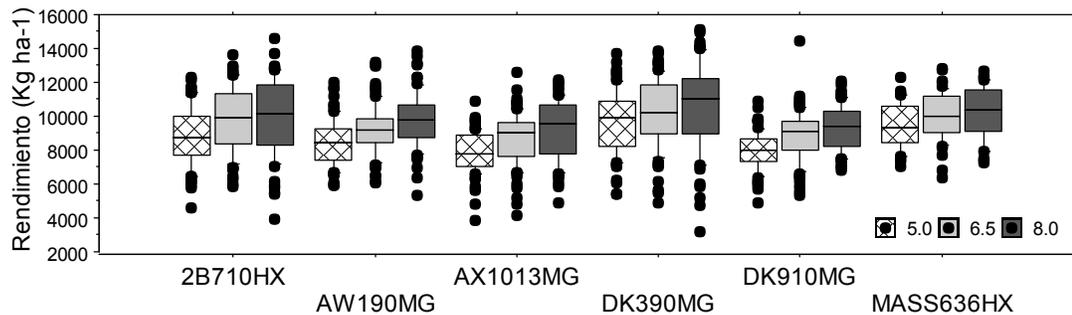


Figura 6. Rendimiento en grano en seis genotipos de maíz sembrados en tres densidades de plantas (5, 6.5 y 8 p m<sup>-2</sup>). Datos promedios de veintitrés ambientes (combinaciones entre localidad y campaña).

El análisis de los veintisiete ensayos en conjunto mostró que el rendimiento fue afectado significativamente por todos los factores de manejo (Experimento, Densidad de plantas, Genotipo; Tabla 3). Relativamente, sin embargo, los factores que explicaron en mayor medida la varianza del rendimiento fueron el ambiente (Experimento;  $\cong$  60%), el genotipo ( $\cong$  12%) y la interacción entre estos dos factores ( $\cong$  15%). En general, también a través de ambientes, la respuesta al incremento de la densidad fue positiva, con diferencias significativas entre los tres niveles evaluados (Tabla 3). La densidad de plantas explicó el 8% de la varianza del rendimiento.

Tabla 2. Análisis de la varianza, medias del rendimiento en grano (kg ha<sup>-1</sup> con 14.5% H) según efectos principales (d, Densidad de plantas y G, Genotipo) en cultivos de maíz manejados en veintitrés ambientes (combinación de localidades y campañas) durante el período 2007-2010. Las siglas indican localidad, año y número de identificación del experimento. Localidades: Bu: Burreyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); TULC: La Cruz (Tucumán).

FdV	Bu-2007-8	Cñ-2010-48	LCñ-2010-50	ET-2010-54	Gar-2007-35	JVG-2010-43	LA-2007-5	LA-2008-3	LA-2009-2	LA-2010-51	LC-2007-36	LC-2007-9	LC-2010-46	LJ-2007-10
Densidad plantas	0.0003	0.0004	<0.0001	0.057	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0469	0.0001	0.0011	<0.0001	NS	0.0005
Genotipo	<0.0001	0.0003	<0.0001	NS	0.0482	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	NS	0.0082
Bloque	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.0452	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.0442
d*G	NS	NS	NS	NS	0.0106	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<b>Densidad de plantas</b>														
5.0 pm <sup>-2</sup>	8820 B	7601 B	9039 C	6645 A	9615 C	8066 B	9012 C	9810 B	9172 B	9842 C	7283 B	9052 B	6355 A	8783 B
6.5 pm <sup>-2</sup>	9791 A	8331 A	10393 B	7502 A	10401 B	9747 A	10565 B	10755 A	9762 A	10718 B	7892 A	10937 A	6171 A	8507 B
8.0 pm <sup>-2</sup>	9893 A	8465 A	11115 A	7086 A	11183 A	9546 A	11342 A	11036 A	9102 B	11483 A	8289 A	11256 A	6593 A	9814 A
<b>Genotipo</b>														
2B710HX	9358 B	7674 B	11090 A	6824 A	10494 A	9986 A	11306 A	11596 A	9598 B	11724 B	7230 B	9449 B	6190 A	9380 A
AW190MG	7919 C	8692 A	9868 B	7350 A	10298 A	8744 B	9237 B	8889 C	8288 C	9644 C	8359 A	11688 A	6873 A	9676 A
AX1013MG	9296 B	7707 B	9216 B	7229 A	9711 B	7519 C	9302 B	10094 B		9904 C	7479 B	9800 B	5860 A	8062 C
DK390MG	11044 A	8661 A	11455 A	6483 A	10422 A	10819 A	11916 A	11740 A	10530 A	12743 A	8631 A	12119 A	6269 A	9553 A
DK910MG	9069 B	7928 B	9338 B	7502 A	10684 A	8531 B	8747 B	9490 B	9184 B	9160 C	7090 B	9323 B	6673 A	8758 B
MASS636HX	10323 A				10789 A		11328 A	11392 A	9127 B		8138 A	10110 B		8779 A

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0.05). Test LSD.

Tabla 2 Continuación. Análisis de la varianza, medias del rendimiento en grano (kg ha<sup>-1</sup> con 14.5% H) según efectos principales (d, Densidad de plantas y G, Genotipo) en cultivos de maíz manejados en veintitrés ambientes (combinación de localidades y campañas) durante el período 2007-2010. Las siglas indican localidad, año y número de identificación del experimento. Localidades: Bu: Burruyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); TULC: La Cruz (Tucumán).

FdV	LJ-2007-34	LJ-2010-44	LP-2007-11	MR-2007-6	MR-2008-4	MR-2009-1	MR-2010-52	Qm-2010-49	RF-2007-12	RF-2010-45	TULC-2007-33	TULC-2010-40	TULC-2010-47
Densidad plantas	0.0001	<0.0001	NS	0.0096	<0.0001	0.0002	0.0001	0.0134	NS	NS	<0.0001	NS	NS
Genotipo	<0.0001	<0.0001	<0.0001	NS	<0.0001	0.056	<0.0001	NS	<0.0001	<0.0001	0.017	0.0002	<0.0001
Bloque	NS	NS	NS	<0.0001	NS	NS	NS	0.0051	NS	NS	NS	NS	0.0536
d*G	NS	NS	NS	NS	0.0186	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<b>Densidad de plantas</b>													
5.0 pm <sup>-2</sup>	9699 C	9347 C	11091 A	7588 B	9491 B	8117 B	10036 B	6909 B	7914 A	8398 A	8209 B	10211 A	7349 A
6.5 pm <sup>-2</sup>	10788 B	10765 B	10701 A	8375 A	10810 A	9151 A	11358 A	7333 B	8227 A	8880 A	9411 A	10262 A	7563 A
8.0 pm <sup>-2</sup>	11909 A	11866 A	10755 A	8245 A	11096 A		11764 A	8291 A	8268 A	8966 A	9899 A	10444 A	7515 A
<b>Genotipo</b>													
2B710HX	11671 A	11286 B	11669 B	8417 A	10307 B	8992 A	12302 A	7932 A	8496 A	9466 A	9146 B	9264 C	6491 C
AW190MG	12283 A	10286 C	9719 C	7582 B	10299 B	8051 B	9837 B	7546 A	8936 A	8703 B	9100 B	10257 B	8622 A
AX1013MG	9787 C	10097 C		8303 A	9537 C		10517 B	7534 A		7250 C	8509 C	10058 B	7170 B
DK390MG	10927 B	12261 A	12561 A	7947 A	11586 A	9100 A	12486 A	7548 A	8760 A	9693 A	9475 A	11818 A	7636 B
DK910MG			9092 C	7983 A	9877 B	8571 A	10351 B	6995 A	7686 C	8629 B	8902 B	10131 B	7457 B
MASS636HX	10710 B		11203 B	8182 A	11191 A	8456 A			8199 B		9904 A		

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (p<0.05). Test LSD.

Todas las interacciones dobles entre los factores ambiente (Experimento) y genotipo, ambiente y densidad de plantas y densidad y genotipo fueron significativas (Tabla 3). Esto implica, entonces, que ante la variación de ambientes, existieron cambios en la magnitud de las respuestas a la densidad y al genotipo. Sin embargo, las interacciones ambiente\*densidad y genotipo\*densidad sólo explicaron un 4.5 y menos del 0.5%, respectivamente, de la varianza del rendimiento. Como se indicara más arriba, estas interacciones pueden ser explicadas porque las respuestas difirieron en intensidad y por el hecho de que algunos sitios no exhibieron respuesta a la densidad de plantas (Tabla 2).

Por su respuesta combinada a la densidad de plantas y genotipo, ocho grupos de ambientes fueron distinguidos (Tabla 3). Para una identificación más clara de los grupos, se optó por el test de comparación de medias DGC (Di Rienzo et al., 2008).

La variabilidad del rendimiento entre ambientes pudo ser parcialmente explicada por la fecha de siembra de los ensayos (Figura 7). Dentro de cada localidad, otros factores como la disponibilidad hídrica alrededor del período crítico (datos no disponibles) podrían explicar la variabilidad interanual.

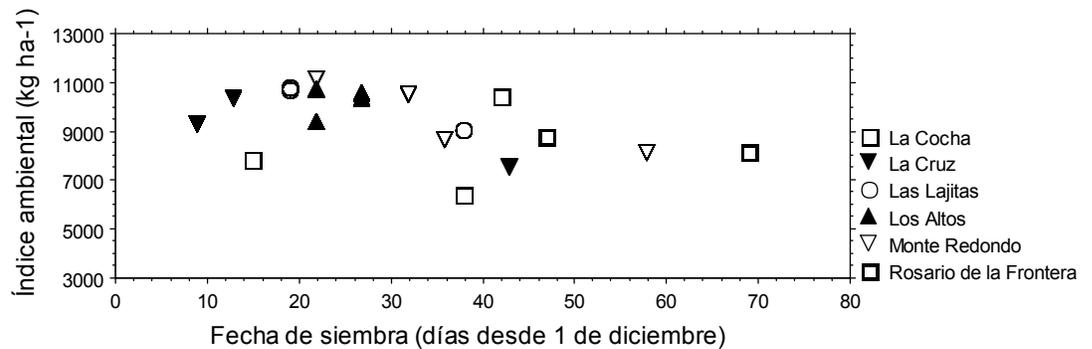


Figura 7. Índice ambiental (estimado como la media de los rendimientos dentro de cada ensayo) y fecha de siembra (en días desde el 1 de diciembre. Coeficiente de correlación Pearson para ambas variables =-0.49; p<0.0001.

Hubo una relación significativa entre la magnitud de la respuesta al incremento de la densidad de plantas (por arriba de las 5 p m<sup>-2</sup>) y el índice ambiental de cada experimento (Figura 8). La pendiente de los modelos ajustados en Figura 8 muestra la magnitud de la respuesta del rendimiento a la densidad de plantas a medida que la calidad ambiental se incrementa. La respuesta fue máxima en los ambientes de mayor calidad (calidad cuantificada por el rendimiento promedio del experimento; IA), fluctuando entre 1005 a 1190 kg ha<sup>-1</sup> por cada 1000 kg ha<sup>-1</sup> de incremento en el IA.

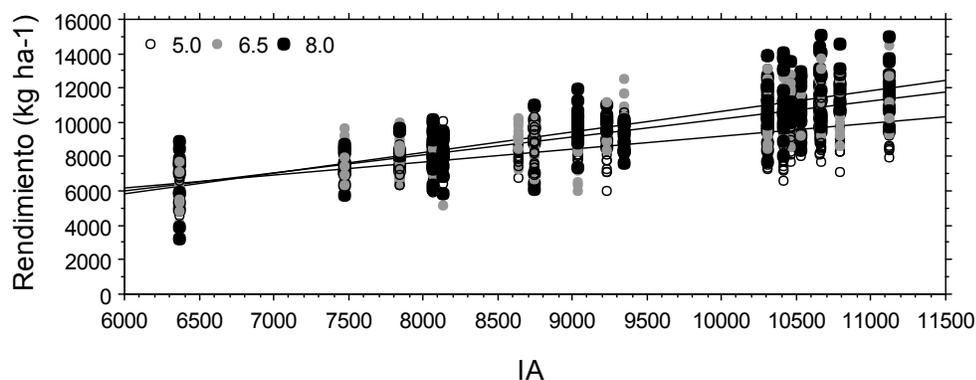


Figura 8. Variación del rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en respuesta a la densidad de plantas (5, 6.5 y 8  $\text{p m}^{-2}$ ) a través de ambientes (cuantificados por sus índices ambientales, IA). Rendimiento a 5  $\text{p m}^{-2}$  =  $1649.45 + 0.75 * \text{IA}$ ;  $R^2 = 0.42$ ; Rendimiento a 6.5  $\text{p m}^{-2}$  =  $-282.35 + 1.05 * \text{IA}$ ;  $R^2 = 0.57$ ; Rendimiento a 8  $\text{p m}^{-2}$  =  $-1242.05 + 1.19 * \text{IA}$ ;  $R^2 = 0.61$ . Modelos con  $p < 0.0001$ .

Tabla 3. Análisis de la varianza, medias del rendimiento en grano de maíz ( $\text{kg ha}^{-1}$ , 14% H) según efectos principales (Experimento, Densidad de plantas y Genotipo) a través de veintitrés ambientes (combinación de localidades y campañas) del NOA.

Factor	P value	% de la varianza no debida al error
Experimento	<0.0001	59.77
Genotipo	<0.0001	11.86
Densidad de plantas	<0.0001	8.31
Experimento * Genotipo	<0.0001	15.11
Experimento * Densidad de plantas	<0.0001	4.54
Genotipo * Densidad de plantas	0.034	0.41
Experimento * Genotipo* Densidad	NS	
Repetición	0.04	
<b>Rendimiento<sup>1</sup> promedio de grupos de Experimentos<sup>2</sup></b>		
52; 11; 34; 44; 51	10793.7	
3; 4; 9; 35; 5; 40; 50	10372.7	
8; 2; 33; 43; 10	9234.8	
45; 1	8691.2	
12; 48; 6; 36	8039.7	
49; 47	7493.1	
54	7077.4	
46	6373.0	
<b>Rendimiento promedio por Genotipo</b>		
AX1013MG	8593	
DK910MG	8725	
AW190MG	9107	
2B710HX	9512	
MASS636HX	9870	
DK390MG	10171	

<sup>1</sup> Rendimiento en  $\text{kg ha}^{-1}$  y 14.5% H

<sup>2</sup> Número de identificación del experimento (códigos ampliados se presentan en Tabla 2)

Debido a existencia de interacciones significativas, no se exhibe comparación estadística de medias.

En términos promedios, el índice ambiental explicó en un 25% la respuesta relativa del rendimiento (Figura 9). Por cada incremento de 1000 Kg en el rendimiento medio del ambiente, el rendimiento en alta densidad aumentó en 2.7% respecto a la densidad de 5 p m<sup>-2</sup>.

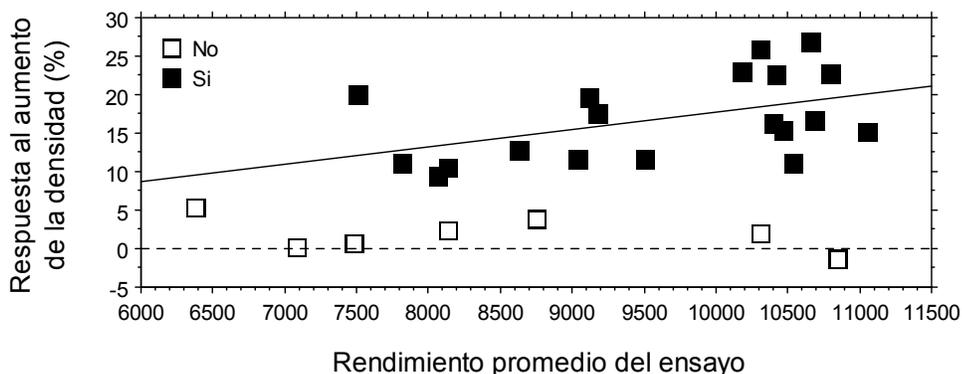


Figura 9. Respuesta del rendimiento al aumento de la densidad de plantas (%) en función del índice ambiental (media del rendimiento de cada ensayo; kg ha<sup>-1</sup>). La respuesta se calculó -teniendo en cuenta las diferencias significativas entre tratamientos- como el incremento porcentual del rendimiento en la densidad más alta (o de las dos densidades más altas según corresponda, Tabla 2) respecto al de la baja densidad. Los puntos representan los casos donde hubo (■) o no (□) respuesta a la densidad. La pendiente del modelo ajustado para los casos con respuesta significativa fue  $0.0027 \pm 0.001$  ( $p=0.043$ ;  $R^2=0.25$ ).

En Figura 10, se muestra la variabilidad del rendimiento en grano a través de los experimentos de densidad en las catorce localidades evaluadas. Es importante tener en cuenta que las localidades difirieron en el número de campañas en que los ensayos de densidad y genotipos fueron realizados. Así por ejemplo, sólo se realizó un experimento en la mayoría de las localidades (La Cañada, Joaquín V González, Cañete, Quimilí, El Tunal, La Paloma, Garmendia, Burruyacu).

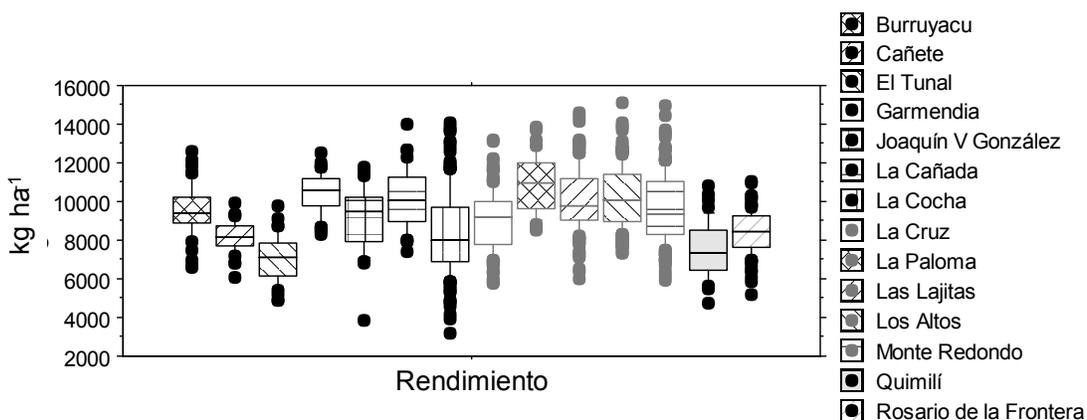


Figura 10. Gráfico de cajas para describir la variabilidad y el rendimiento más frecuente obtenido durante las campañas 2007-2010 en distintas localidades. Datos promedios de ensayos para valorar el efecto de la densidad de plantas y genotipos (Tabla 2).

En seis localidades (La Cocha, La Cruz, Las Lajitas, Los Altos, Monte Redondo y Rosario de la Frontera) pudo analizarse adicionalmente el efecto año y las interacciones entre éste y prácticas de manejo (densidad de plantas y genotipo). En 5 de las 6 localidades (excepción La Cruz, n=138), los efectos del año y de la densidad (Figura 11) fueron significativos ( $p < 0.001$ ). Sólo en 1 localidad existió interacción entre el año y la densidad de plantas (Los Altos). Tomando el promedio de los años, las localidades difirieron en su rendimiento, con excepción de Los Altos y Las Lajitas (rendimiento promedio de  $10177 \text{ Kg ha}^{-1}$ ). Sin embargo, debido a la existencia de interacciones entre año y localidades con cambios de rangos (o crossover), no fue posible categorizar las seis localidades por su rendimiento. Esto estaría relacionado con el hecho de que los experimentos fueron sembrados en distintas fechas de siembra (Figura 7).

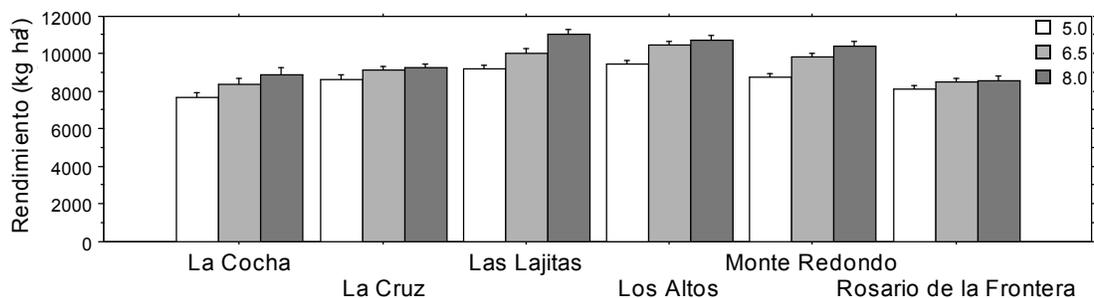


Figura 11. Densidad de plantas y rendimiento en grano (14.5% H) en seis localidades del NOA (n=911). Las localidades incluyeron entre dos (La Cocha, La Cruz, Las Lajitas y Rosario de la Frontera) y cuatro (Los Altos y Monte Redondo) campañas con experimentos para valorar el efecto de la densidad de plantas y el genotipo. Las Lajitas y Los Altos (R promedio= $10177 \text{ Kg ha}^{-1}$ ); Monte Redondo (R promedio= $9583 \text{ Kg ha}^{-1}$ ); La Cruz (R promedio= $9016 \text{ Kg ha}^{-1}$ ); Rosario de la Frontera (R promedio= $8414 \text{ Kg ha}^{-1}$ ); La Cocha (R promedio= $7914 \text{ Kg ha}^{-1}$ ).

Si bien la interacción localidad por densidad de plantas fue significativa, sólo se observó cambio en la magnitud de respuestas. Por ello, es posible concluir que, en todas las localidades y campañas evaluadas, el rendimiento fue mínimo en la baja densidad.

Como era esperable, el efecto del genotipo fue siempre significativo ( $p < 0.0001$  en 5/6 casos y  $p > 0.02$  en 1/6; Figura 12). Existieron, asimismo, interacciones entre genotipo y año (4/6 casos) dentro de localidades. Un resultado importante, sin embargo, es que no existieron interacciones entre el genotipo y la densidad de plantas a través de años en cada una de las seis localidades evaluadas. A través de ambientes, la respuesta del genotipo al incremento de la densidad fue sólo de distinta magnitud (interacciones en Tabla 3).

En cambio, sí existieron interacciones entre la localidad y genotipo importantes - con cambios de rango- (Figura 12). Sólo fue posible concluir que el genotipo DK390MG fue el que consistentemente exhibió rendimientos dentro del grupo de

genotipos superiores. Los genotipos AW190MG y 2B710HX fueron los de mayor inestabilidad a través de años y localidades.

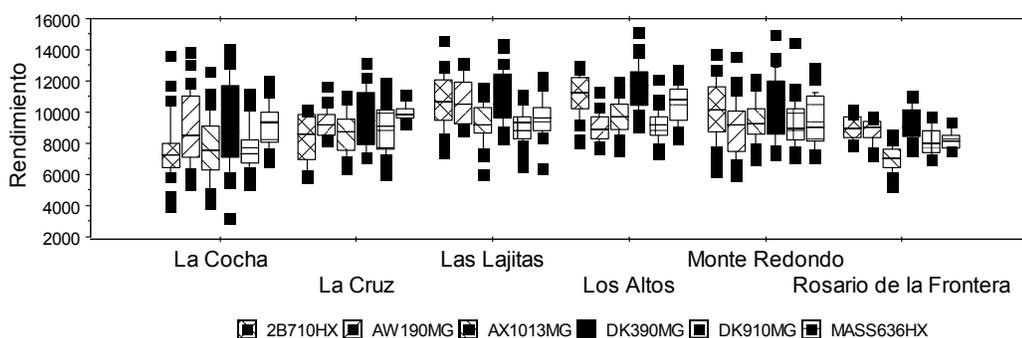


Figura 12. Gráficos de cajas para mostrar valor más frecuente y variabilidad en el rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$  con 14.5% H) de seis genotipos de maíz a través de localidades. Datos promedios de ensayos para valorar el efecto de la densidad de plantas y genotipos. UE por localidad: La Cocha (147), La Cruz (138), Las Lajitas (147), Los Altos (197), Monte Redondo (183) y Rosario de la Frontera (99).

Por otro lado, considerando los ambientes por su media de rendimiento (estimador del índice ambiental), los genotipos difirieron en su capacidad de respuesta a ambientes de mejor calidad (Figura 13). La pendiente de la respuesta del rendimiento al índice ambiental es un estimador de la capacidad de respuesta del genotipo (Figura 13). En promedio, DK390MG y 2B710HX fueron los de mayor, y DK910MG y AW190MG los de menor respuesta al incremento de la calidad ambiental.

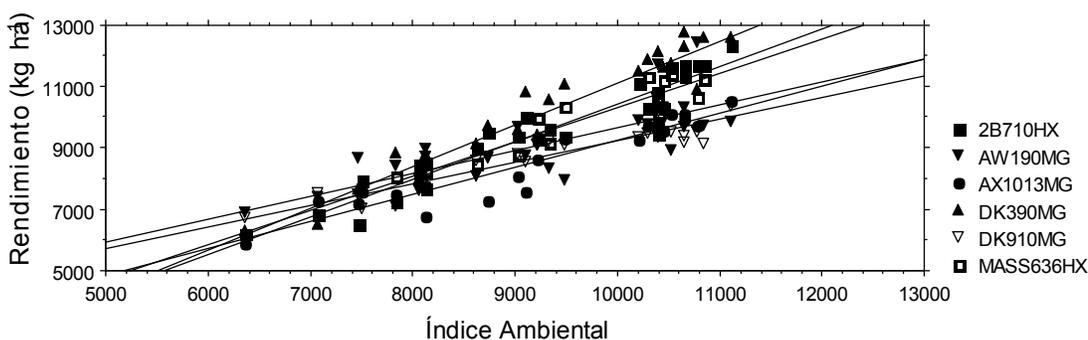


Figura 13. Modelos lineales estimados para la relación entre el rendimiento y el índice ambiental ( $p < 0.0001$ ). La pendiente de los modelos (indicador de la responsividad) se indica entre paréntesis para cada genotipo: 2B710HX (1.23); AW190MG (0.75); AX1013MG (0.88); DK390MG (1.36); DK910MG (0.7); MASS636HX (1.12). Datos promedios de veintitrés experimentos diseñados para valorar el efecto de la densidad y el genotipo.

Es de destacar, sin embargo, que AW190MG y DK910MG fueron los genotipos que exhibieron estables o mayores rendimientos en ambientes de menor índice ambiental (Figura 13). En Figura 14, se discriminan las respuestas por genotipo y densidad en función de la calidad ambiental. Las pendientes en los modelos

ajustados son un indicador de la capacidad plástica o de respuesta a la densidad a través de ambientes. Para un mismo genotipo, los cambios de pendiente en función de la densidad a través de ambientes explican las interacciones dobles entre la densidad y el ambiente (Tabla 3).

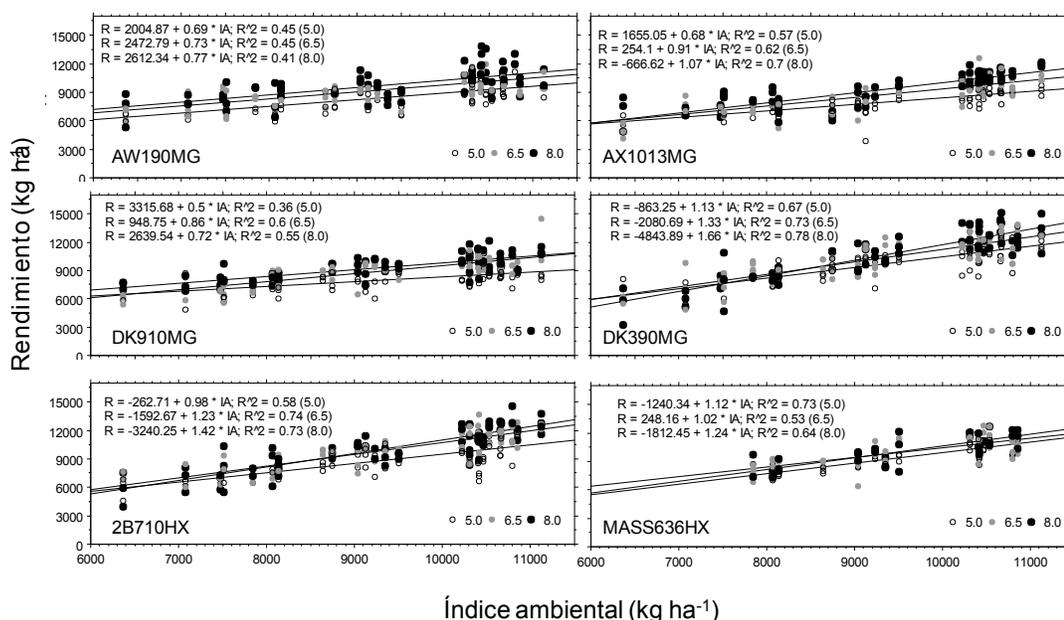


Figura 14. Variabilidad genotípica de la respuesta a la densidad de plantas a través de ambientes en seis genotipos de maíz sembrados en el NOA. Las pendientes en los modelos por densidad de plantas son una medida de la respuesta al incremento en densidad y en calidad ambiental.

Los genotipos de mayor respuesta al ambiente y a la densidad de plantas fueron DK390MG, 2B710HX y MASS636HX. En ambientes de alta calidad, los rendimientos de estos genotipos fueron máximos en alta densidad. Sin embargo, marcados interceptos negativos en los modelos ajustados podrían indicar que en ambientes de baja calidad, estos genotipos (en menor medida MASS636HX) responderían negativamente a un excesivo incremento en la densidad de plantas. Sin embargo, debido a que no se conoce con precisión la razón de la menor calidad ambiental en cada experimento, será necesario profundizar, a futuro, en el análisis a nivel de componentes de rendimiento. Como se discutiera en secciones anteriores, atrasos en la fecha de siembra correlacionaron con menores índices ambientales, y es probable que la radiación solar haya sido el factor predominantemente limitante en los ambientes de menor calidad. La identificación de casos con limitantes de tipo hídrica alrededor de las etapas críticas podría contribuir a una mejor interpretación de la interacción densidad\*genotipo en ambientes de baja calidad. Sin embargo, para el set de experimentos analizados, y como se mencionara antes, las interacciones entre el genotipo y la densidad fueron bajas, contribuyendo escasamente a explicar la varianza total del rendimiento.

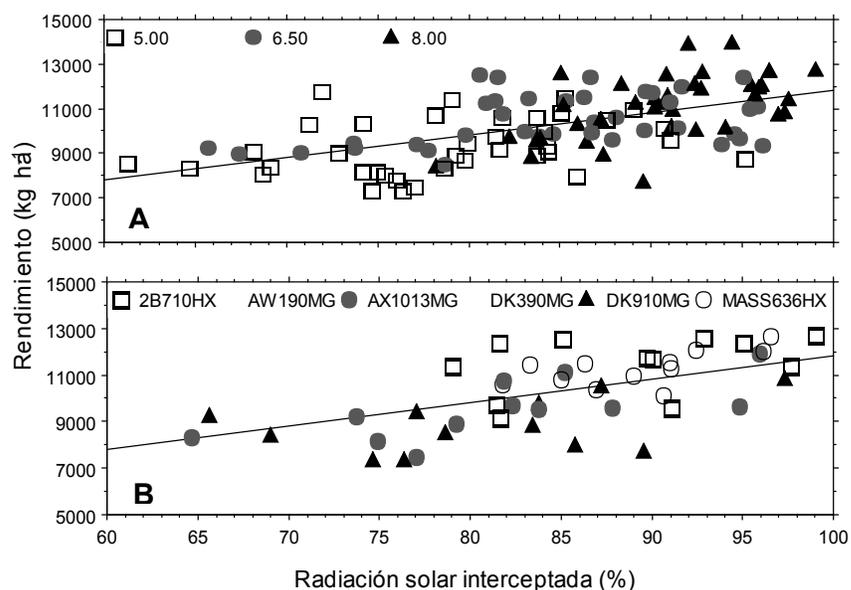


Figura 15. Rendimiento y radiación solar interceptada en respuesta a la densidad de plantas (A) y el genotipo (B). Datos de experimentos LA-2007-5 y LA-2008-3.

La mayor respuesta de DK390MG, 2B710HX y MASS636HX a incrementos en la densidad en ambientes de alta calidad puede reflejar mejoras en la captura de radiación solar y la tolerancia a mayor competencia intraespecífica. En un experimento donde se valoró la interceptación de la radiación solar durante el período crítico, se encontró que con cada unidad porcentual de incremento en la captura de radiación solar alrededor de las etapas críticas, el rendimiento aumentó en  $121 \pm 1.34$   $\text{kg ha}^{-1}$  ( $p < 0.0001$ ; Figura 15). Cuarenta y 32% de la variación del rendimiento (Figura 16A) y del número de granos (Figura 16B), respectivamente, fueron explicadas por la interceptación de la radiación solar.

MASS636HX, 2B710HX y DK390MG fueron los genotipos de mayor respuesta a mejoras en la interceptación de la radiación ( $132$   $\text{kg ha}^{-1}$  de ganancia por cada porcentaje de incremento en la radiación solar).

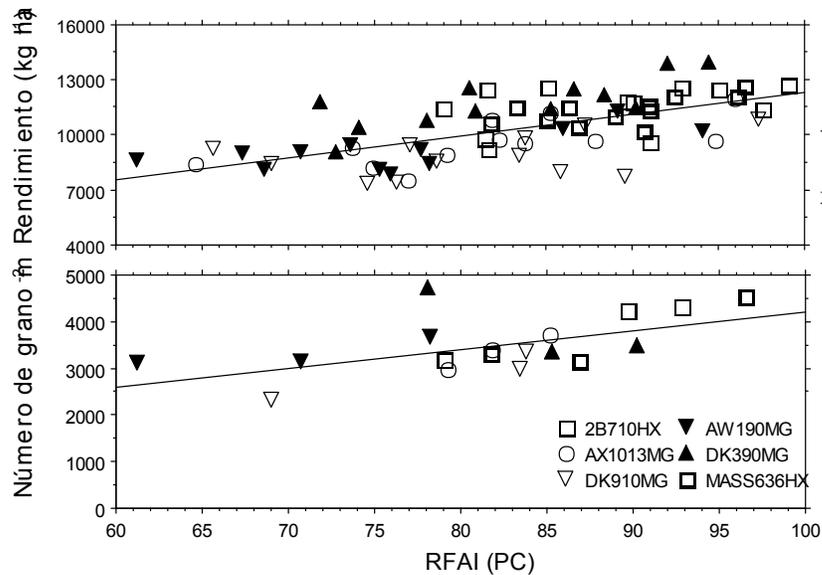


Figura 16. Relación entre la intercepción de radiación solar durante el período crítico (RFAI PC, %), el número de granos (B) y el rendimiento en seis genotipos de maíz (A). La variación de RFAI fue lograda a través de distintas densidades poblacionales (5 a 8 p m<sup>-2</sup>). Las pendientes para la relación rendimiento y radiación solar se indican entre paréntesis para cada genotipo: 2B710HX (129); AW190MG (118); AX1013MG (117); DK390MG (141); DK910MG (108); MASS636HX (127).

El número de granos por unidad de superficie fue el principal componente del rendimiento asociado con la mejora del rendimiento ante incrementos en la densidad poblacional (Figura 17A). En baja densidad, sólo AW190MG exhibió incrementos en su prolificidad (Figura 17B)

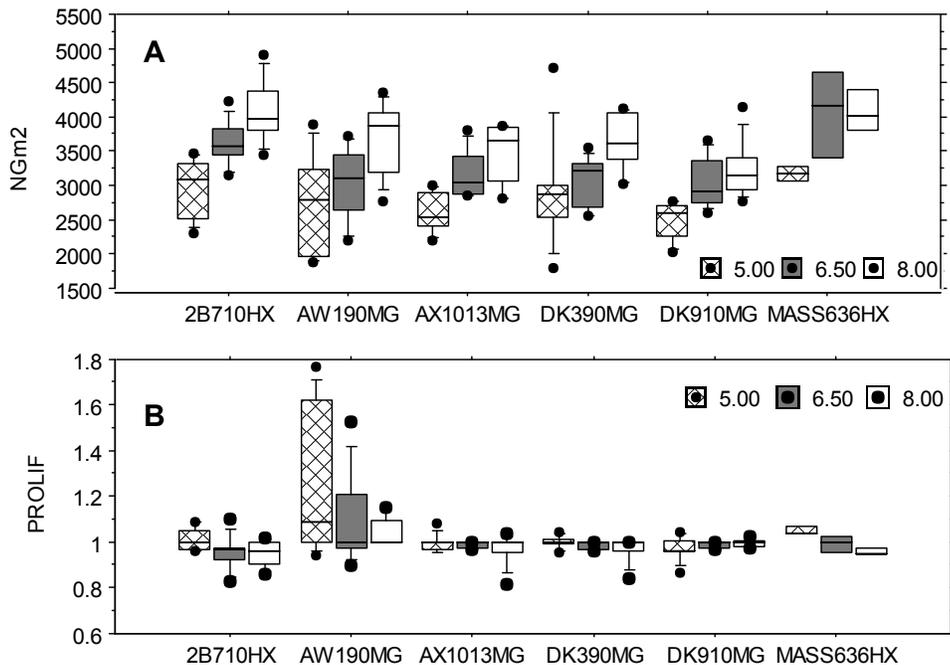


Figura 17. Ejemplo de variación del número de granos por unidad de superficie (A) y prolificidad (B) en respuesta a la densidad poblacional en seis genotipos de maíz.

Debido a que el ambiente (definido por la combinación del año y localidad) fue el factor que más fuertemente contribuyó a la variabilidad total, en comparación con el genotipo y la interacción ambiente\*genotipo (Tabla 3), se realizó un análisis gráfico de tipo Biplot GGE (Figura 18). Este análisis permite indagar en la existencia de potenciales mega-ambientes e identificar genotipos asociados a los mismos (Balzarini and Di Rienzo, 2003).

La variabilidad de la interacción genotipo por ambiente fue explicada en casi 83% por las componentes principales 1 y 2 (CP1 y CP2, Figura 18A). La CP1 se asoció positivamente con el rendimiento (Figura 18B).

Se distinguieron tres mega-ambientes (delimitados por las líneas de punto en Figura 18A) con genotipos contrastantes (ubicados en los vértices de los mega-ambientes y sobre la línea envolvente; Figura 18) que se comportaron como sobresalientes en los sitios asociados. Los mega-ambientes estuvieron asociados con los genotipos DK390MG, AW190MG y DK910MG y AX1013MG (Figura 18A).

Según este análisis, los genotipos con CP1 altos fueron los de mayor rendimiento (DK390MG, 2B710HX y MASS636HX, en tercer lugar), siendo los ambientes con CP1 altos y CP2 cercanos a cero los que permitieron su detección (en Figura 18B, ambientes como LA-2010-51 o LA-2007-5). Asimismo, DK390, 2B710HX y MASS636HX fueron los de mejor rendimiento en ambientes de alta calidad (IA superiores a 10000 Kg ha<sup>-1</sup>; Figura 18). En contraposición, AW190MG exhibió mayores rendimientos relativos en ambientes de menor calidad ambiental.

Por ej. los sitios LC-2010-46, Cñ-2010-48, y TUL-2010-47, LA2007-34 y LC-2007-9 constituyeron un mega-ambiente donde AW190MG fue el genotipo ganador. En este mega-ambiente, los primeros tres sitios correspondieron a los ensayos de más bajo rendimiento promedio (7100 kg ha<sup>-1</sup>) para las fechas de siembra de principios de enero. Es probable que los bajos rendimientos hayan estado asociados con estreses durante las etapas críticas, alrededor de la floración.

Los genotipos AX1013 y DK910MG fueron los genotipos de menor rendimiento promedio a través de ensayos (Tabla 3) y estuvieron asociados con mega-ambientes con nula o escasa respuesta al genotipo (Tabla 2; por ej. en casos MR-2007-6 y ET-2010-54, ambos experimentos sembrados en ambientes de baja calidad en términos de radiación solar asociada con fechas de siembra de fines de febrero; Figura 3).

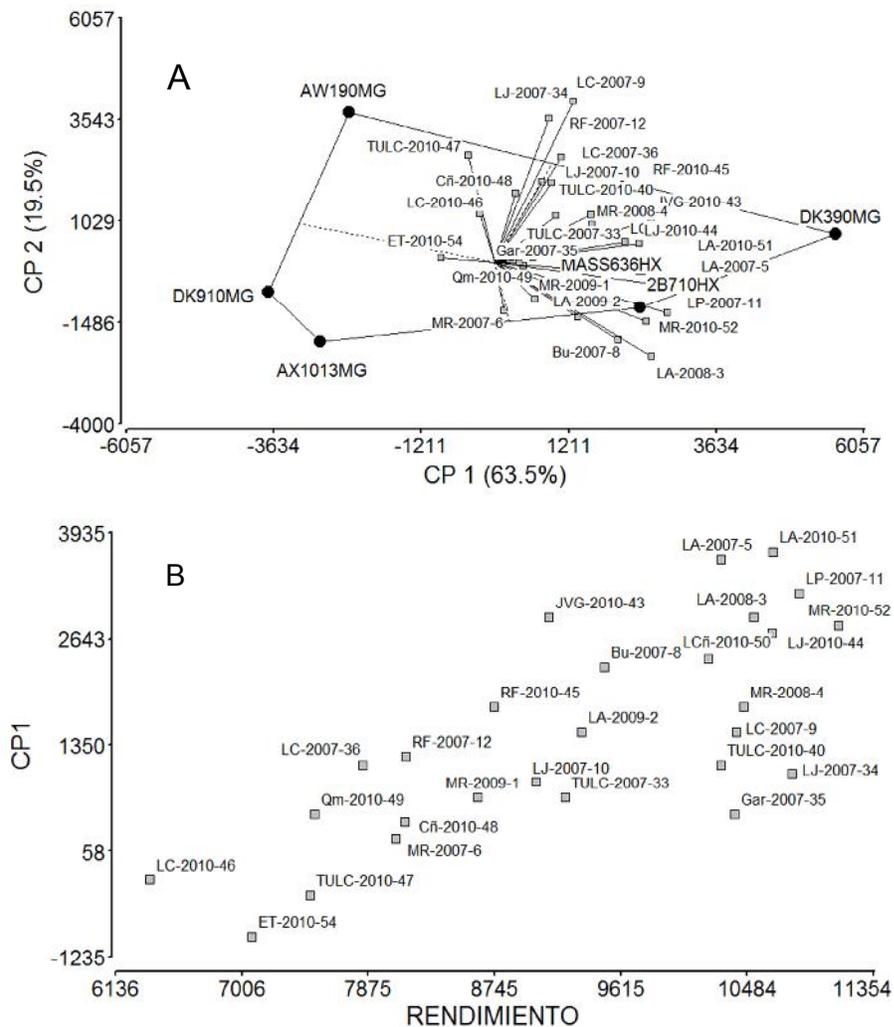


Figura 18. Biplot GGE (A) y AMMI1 (B) para analizar interacciones entre ambientes y genotipos de maíz. Datos promedios de ensayos de densidad de plantas y genotipos realizados en 24 combinaciones de año y localidad. Las siglas de los experimentos incluyen el código de la localidad, el año de evaluación y el número identificatorio. Códigos de Localidades e índices ambientales entre paréntesis: Bu: Burreuyacu (Tucumán); Cñ: Cañete (Tucumán); ET: El Tunal (Salta); Gar: Garmendia (Tucumán); JVG: Joaquín V González (Salta); LA: Los Altos (Catamarca); LC: La Cocha (Tucumán); LCñ: La Cañada (Santiago del Estero); LJ: Las Lajitas (Salta); LP: La Paloma (Santiago del Estero); MR: Monte Redondo (Tucumán); Qm: Quimilí (Santiago del Estero); RF: Rosario de la Frontera (Salta); TULC: La Cruz (Tucumán).

En resumen, el efecto positivo del incremento de la densidad de plantas sobre el rendimiento fue claro y consistente a través de localidades, ambientes asociados con la fecha de siembra y en todos los genotipos. Aunque no era esperable debido a la contrastante arquitectura de los genotipos, la interacción entre el genotipo y la densidad fue mínima y explicó menos del 0.5% de la varianza del rendimiento. En ningún caso, se observó respuesta negativa al incremento de la densidad, aunque el óptimo para muchos sitios estaría ubicado entre 6.5 y 8 p m<sup>-2</sup>.

Las mayores respuestas a la densidad de plantas se observaron en ambientes de alta calidad (IA > 10000 Kg ha<sup>-1</sup>, asociados principalmente con fechas de siembra

más tempranas -Figura 9-). En estos casos, el incremento de la densidad de plantas aumentó la captura de radiación solar durante el período crítico y el número de granos por unidad de superficie. Si bien existieron interacciones entre la densidad poblacional y localidad (o año dentro de localidad), éstas fueron debidas principalmente a variaciones en la magnitud de la respuesta.

En este estudio, el ambiente fue el factor más importante para explicar la variación del rendimiento y la respuesta al manejo. Asimismo, el efecto año fue importante dentro de localidad (cuando pudo valorarse) por lo que los sitios presentaron índices ambientales variables. Un aspecto importante será determinar las causas de variación del IA, sobre todo dentro de localidad. En este conjunto de experimentos, el índice ambiental correlacionó negativa y significativamente con la fecha de siembra estimada como días desde el primero de diciembre (Coeficiente Pearson= -0.49;  $p < 0.0001$ ;  $n = 912$ ). Las fechas de siembra más tardías no sólo afectan la radiación solar disponible durante la etapa de fijación de granos (disminuyendo el número de granos), sino principalmente el llenado de granos.

El análisis de las interacciones G\*ambiente permitió detectar comportamientos de genotipos contrastantes en respuesta a la calidad ambiental. DK390MG, 2B710HX y MASS636HX sobresalieron en el mega-ambiente de mayor cantidad de sitios analizados y fueron los de máximo rendimiento en ambientes de alta calidad. AW190MG se asoció positivamente con casos de bajo índice ambiental. AX1013MG y DK910MG se asociaron con ambientes donde no existió respuesta al genotipo.

Estos resultados permitieron el análisis dentro y a través de localidades, clarificando las interacciones entre la respuesta al cambio en la densidad y la localidad y el genotipo. Otros estudios en el NOA (Suárez et al., -Anexo p. 35-) y en el NEA (Metzler, 2008) han demostrado también que el incremento en la densidad de plantas mejora la captura de radiación solar y el número de granos por superficie, y que estos efectos son más importantes en genotipos con germoplasma templado o tropical\*templado. Estos estudios indican también que en fechas más tempranas, la respuesta a la densidad es mayor. Es de destacar que nunca se observaron disminuciones del rendimiento en la máxima densidad de plantas (análisis de 147 combinaciones de densidad\*genotipo), excepto una única tendencia no significativa en el caso ET-2010-54. Fue claro, sin embargo, que en muchas situaciones las densidades de 6.5 y 8 p m<sup>-2</sup> no difirieron en su rendimiento por lo que los óptimos para el amplio rango de ambientes analizados se encontraría entre estos valores de densidades poblacionales. A pesar de que inicialmente se había postulado que las distintas arquitecturas de los genotipos podrían impactar diferencialmente en la respuesta a la densidad, los cambios genotípicos observados fueron mayoritariamente por cambios en la magnitud de las respuestas y nunca por situaciones cross-over. Finalmente, la respuesta al incremento de la densidad de plantas fue de mayor magnitud en las situaciones de mayor calidad ambiental, asociadas en general con las fechas de siembra más tempranas.

### 3.4. Manejo de la estructura del canopeo. II. Respuesta genotípica a cambios en la distancia entre surcos y la densidad de plantas

Como se presentara en la sección anterior, cambios en la densidad poblacional y la distancia entre surcos modifican el espacio por planta, el acceso a recursos edáficos y radiativos, y la interacción entre individuos de un mismo cultivo (Vega and Andrade, 2002). Estos factores de manejo determinan la magnitud y persistencia del área foliar y la captura de la radiación solar. Sin embargo, incrementos en la competencia intraespecífica pueden alterar la partición de biomasa reproductiva con efectos negativos si el acceso de recursos por individuo es disminuido por debajo de umbrales mínimos (Vega et al., 2001a). Considerando que los ambientes del NOA pueden estar limitados en recursos ambientales -hídricos, temperaturas extremas; (Lamelas et al., 2006)-, en particular durante las etapas críticas, es importante indagar en la respuesta del rendimiento a cambios en la estructura del canopeo modulados por la distancia entre surcos y el genotipo.

El objetivo de los experimentos que a continuación se detallan fue valorar la respuesta del rendimiento a cambios en la distancia entre surcos y la densidad de plantas en genotipos de arquitectura contrastante.

Diez experimentos (total UE=722) fueron realizados durante las campañas 2007 a 2010 para valorar los efectos combinados de Genotipo (G), densidad (d) y distanciamiento entre surcos (DES). Las localidades incluyeron: Los Altos (4 campañas), La Cruz (3 campañas), Izcayacu, General Vedia, Roque Saénz Peña, siendo el rendimiento promedio a través ambientes  $8701 \pm 2371 \text{ Kg ha}^{-1}$  (rango entre 5842 y  $11481 \text{ Kg ha}^{-1}$ ; Tabla 4).

El análisis de efectos principales e interacciones dentro de cada localidad (Tabla 4) indicó efectos altamente significativos del genotipo, sin interacciones entre éste y la densidad de plantas (1 excepción) o la distancia entre surcos (1 excepción). El genotipo explicó entre el 16 al 81% de la varianza total no debida al error a través de experimentos.

El aumento en la densidad de plantas se asoció con incrementos significativos en el rendimiento en 7/10 casos (aumento promedio del 16%) y tendencias positivas en el resto de los casos (Tabla 4). Este factor de manejo explicó entre el 0.1 y 38% de la varianza total del rendimiento a través de experimentos.

La disminución en la distancia entre surcos incrementó el rendimiento significativamente en sólo 3/10 casos, aunque la tendencia fue similar en 6 de los 7 casos restantes (3 casos significativos a  $p < 0.1$ ; Tabla 4). Sólo en el ambiente TULC-2007-37 (ambiente con menor rinde promedio en este grupo de experimentos), el rendimiento disminuyó significativamente (aunque sólo un 5% en promedio) en el tratamiento con la menor distancia entre plantas. En este caso, existió también interacción entre distancia y genotipo (Tabla 4). Sólo en dos casos (LA-2007-29 y LA-2010-53), la interacción entre densidad de plantas y distancia entre surcos fue

significativa, pero ésta sólo explicó el 4 % de la varianza total. La distancia entre surcos explicó entre el 1 al 15% de la varianza total a través de experimentos.

Tabla 4. Análisis de la varianza, medias del rendimiento en grano (kg ha<sup>-1</sup> con 14.5% H) según efectos principales (Densidad de plantas -d-, Distancia entre hileras -DES-, Genotipo -G-) en cultivos de maíz manejados en ocho ambientes (combinación de localidades y campañas).

FdV	GV-2007-30 <sup>1</sup>	Iz-2007-31	LA-2007-29	LA-2008-14	LA-2009-13	RSP-2007-7 <sup>1</sup>	TULC-2007-37	TULC-2008-24 <sup>1</sup>	TULC-2010-41	LA-2010-53
DES	0.0793	NS	0.0445	0.0613	0.0414	NS	0.0057	NS	0.0898	0.073
Densidad	NS <sup>1</sup>	0.071	0.0038	0.0001	0.0154	NS	0.001	NS	0.0046	0.0001
Genotipo	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0151	<0.0001	0.0001
DES*d	NS	NS	0.047	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.0027
DES*Genotipo	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.0148	NS	NS	NS
d*Genotipo	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.0351	NS
DES*d*G	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Densidad de plantas (p m <sup>-2</sup> )										
5	7448	5618	8818 A	10206 A	8735 A	6500	5556 A	11367	9237 A	10260 A
7	7533	6573	9567 B	11678 B	9358 B	6764	6127 B	11595	10734. B	11482 B
Distancia entre hileras (m)										
0.52	7678	6466	9467 B	11557	9548 B	7003	5692 A	11567	10265	11185 B
0.7	7304	5726	8918 A	10345	8916 A	6261	5991 B			10791 AB
1.04				10925	8677 A			11393	9707	10603 A
Genotipo										
2B710HX	8016 C	5827 A B	10269 C	11844 D	9385 C	7098 B C	5952 B C	11548	8964 A	11551 B
AX1013MG	7135 B	5252 A	8143 A	10341 B	10054 D	5933 A	5463 A	10869		
DK390MG	8965 D	7375 C	9810 B C	11655 D		7713 C	6149 C	11987	11247 C	12746 C
DK910MG	6086 A	5751 A B	8417 A	9743 A	8034 A	5728 A	5714 A B	11481	9566 B	9351 A
MASS636HX	7252 B	6273 B	9323 B	11128 C	8713 B	6689 B	5930 B C	11519		

<sup>1</sup> En estos ensayos, se corrieron análisis adicionales de modelos lineales mixtos con correcciones por heterocedasticidad no encontrándose efectos significativos. En TULC-2008-24, se corrigió por heterogeneidad de varianza del genotipo.

Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos (Test LSD, p<0.05).

Con el objetivo de evaluar el efecto del ambiente (combinación de año y localidad) y las potenciales interacciones entre prácticas de manejo y ambiente, los experimentos fueron agrupados según su tipo: Tipo I (distancias entre surcos de 0.52 y 0.7 m) y Tipo II (0.52, 0.7 y 1.04 m entre surcos). En ambos tipos de experimentos, los efectos principales del ambiente y prácticas de manejo fueron significativos. Las interacciones triples y cuádruples fueron no significativas, removiéndose del análisis (Tabla 5).

En el conjunto de experimentos, y considerando los factores principales e interacciones significativas, el ambiente fue el factor de mayor peso en la definición

del rendimiento, explicando el 36 (Exp Tipo I) al 78% (Exp Tipo II) de la varianza total. A través de ambientes, el genotipo explicó entre el 12 y el 28% de la variación del rendimiento (Tabla 5). La densidad de plantas y el distanciamiento exhibieron, a través de ambientes, los mismos patrones explicados dentro de cada localidad. Sin embargo, el análisis conjunto permitió concluir con mayor robustez que el incremento de la densidad de 5 a 7 p m<sup>-2</sup> incrementó significativamente el rendimiento (media de 9.4%, Tabla 5). Por otro lado, el acortamiento de la distancia entre surcos de 0.70 a 0.52 m incrementó el rendimiento en promedio entre el 6 y 8%. Para el conjunto donde se analizó el espaciamiento 0.52 vs. 1.04, la ganancia de rendimiento fue del 5 % (p<0.05).

La consideración del peso de las interacciones es fundamental para interpretar correctamente los efectos principales. En todos los experimentos, existieron interacciones dobles significativas, siendo las del ambiente con el genotipo, distancia o densidad las más importantes. La interacción del ambiente con el genotipo explicó entre el 3 (Tipo I) y el 12% (Tipo II) de la variación del rendimiento. La interacción entre ambiente y distanciamiento fue significativa pero debida a cambios de magnitud en las respuestas, contribuyendo con menos del 1% a la varianza del rendimiento. A través de calidad de ambientes, se encontró tendencia de que la respuesta al acortamiento fuera más importante en ambientes de mayor calidad (Figura 19).

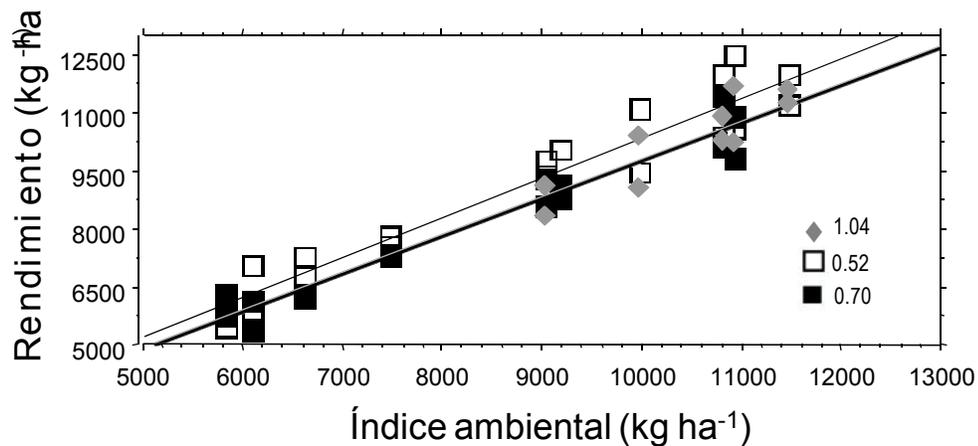


Figura 19. Respuesta del rendimiento de maíz a la disminución de la distancia entre surcos en función del índice ambiental. Modelos lineales ajustados a través de experimentos (p<0.0001). Los interceptos fueron no significativos. La pendiente fue  $1.03 \pm 0.015$ ,  $0.97 \pm 0.013$  y  $0.98 \pm 0.017$  a 0.52, 0.70 y 1.04 m, respectivamente.

Tabla 5. Análisis de la varianza para los efectos de prácticas de manejo (Experimento, Distancia entre surcos, Densidad de plantas y Genotipo) e interacciones, y medias del rendimiento de maíz (Kg ha<sup>-1</sup>). Experimentos conducidos en diez ambientes del NOA argentino durante 2007-10 (Códigos en Tabla 1).

Factor	Tipo I §		Tipo II	
	P value	% de la varianza no debida al error	P value	% de la varianza no debida al error
Experimento	<0.0001	78.20	<0.0001	36.17
Distancia entre surcos	<0.0001	1.43	<0.0001	3.53
Densidad de plantas	<0.0001	2.75	<0.0001	12.30
Genotipo	<0.0001	11.71	<0.0001	27.23
Experimento * Genotipo	<0.0001	2.87	<0.0001	14.66
Experimento * Distancia entre surcos	<0.0001	0.96	0.03565	0.63
Experimento * Densidad de plantas	<0.0001	1.13	<0.0001	3.88
Distancia entre surcos * Genotipo	0.005	0.50	NS	0.42
Densidad de plantas * Genotipo	NS	0.28	NS	0.67
Distancia * Densidad de plantas	0.019	0.16	NS	0.51

§ Experimentos con distancias entre surcos de 0.52 y 0.7 m (Tipo I) y 0.52 y 1.04 m (Tipo II)

Las interacciones entre prácticas de diseño espacial (densidad o distancia entre surcos) fueron de menor significancia y se deberían principalmente a cambios de magnitud de las respuestas (contribuyeron con sólo el 0.2 y 1% de la varianza del rendimiento), considerándose, por ello, como no importantes.

Analizando en conjunto todos los experimentos donde se evaluó el efecto de la distancia entre plantas (5842 > rendimientos medios <11481 kg ha<sup>-1</sup>; Tabla 4), se encontraron efectos significativos de la distancia entre surcos, la densidad de plantas y el genotipo, con interacciones entre factores (Tabla 6). A través de estos ambientes, el mayor rendimiento fue observado en la combinación de menor distancia y mayor densidad de plantas (Tabla 6).

No se observó respuesta diferencial de los genotipos ante modificaciones de la distancia entre surcos.

Tabla 6. Análisis de la varianza para los efectos de prácticas de manejo (Distancia entre surcos, Densidad de plantas y Genotipo) e interacciones, y medias del rendimiento de maíz (Kg ha<sup>-1</sup>). Experimentos conducidos en diez ambientes del NOA argentino durante 2007-10.

Factor	P value
Distancia entre surcos	<0.0001
Densidad de plantas	<0.0001
Genotipo	<0.0001
Distancia * Densidad de plantas	0.040
Densidad de plantas * Genotipo	0.117
Distancia entre surcos * Genotipo	0.002

Rendimiento promedio por DES y densidad de plantas<sup>§</sup>

DES	d	Medias y EE
0.52	7	9455 ± 672.9 A
1.04	7	8871 ± 680.2 B
0.70	7	8723 ± 675.7 B
0.52	5	8399 ± 672.9 C
0.70	5	8047 ± 675.7 D
1.04	5	8041 ± 680.2 D

Rendimiento promedio por genotipo y densidad de plantas<sup>§</sup>

Genotipo	d	Medias y EE
DK390MG	7	10003 ± 676.8 A
2B710HX	7	9492 ± 677 B
DK390MG	5	9432 ± 676.8 B
AW190MG	7	8973 ± 720.3 BC
MASS636HX	7	8913 ± 680.4 C
2B710HX	5	8621 ± 676.6 CD
MASS636HX	5	8508 ± 680.5 CD
AX1013MG	7	8381 ± 685.6 CD
DK910MG	7	8334 ± 676.1 D
AX1013MG	5	7919 ± 685.6 E
DK910MG	5	7413 ± 676.4 F
AW190MG	5	7080 ± 720.3 F

<sup>§</sup> Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p \leq 0.05$ ; Test DGC). Análisis mediante modelos lineales mixtos considerando a Experimento y repetición como factores aleatorios.

Considerando la fecha de siembra de los experimentos como potencial variable descriptora de la calidad ambiental, se encontró que la misma explicó el 86% de la varianza total del rendimiento a través de experimentos ( $p < 0.0001$ ). Se encontró una asociación robusta y significativa (modelo logístico en Figura 20) entre la fecha de siembra y el rendimiento a través de experimentos. Durante diciembre, no se visualizó impacto de la fecha de diciembre, con rendimientos entre 9000 y 13000 kg. Aquellos experimentos sembrados después de la segunda quincena de enero fueron los que tendieron a exhibir rendimientos menores.

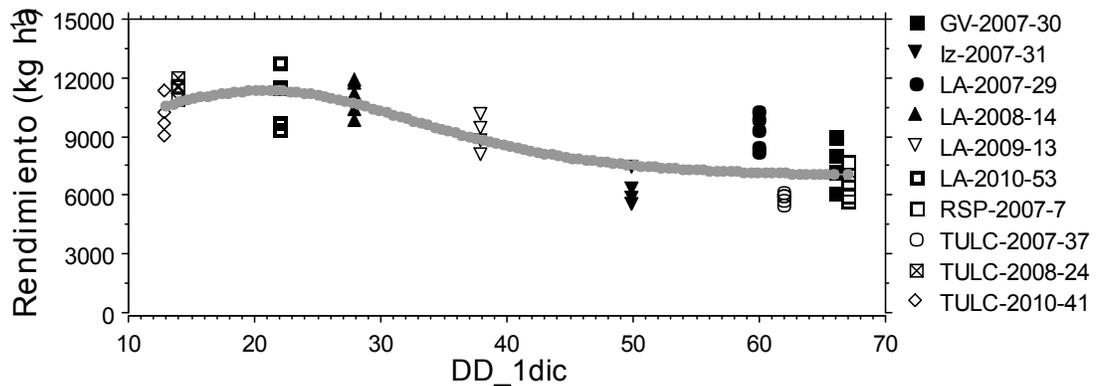


Figura 20. Rendimiento en grano ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) de cultivos de maíz sembrados en diez ambientes (siglas de los experimentos incluyen el código de la localidad, el año de evaluación y el número identificador). Localidades con sus rendimientos promedios ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) entre paréntesis: GV-2007-30: General Vedia (7491); Iz-2007-31: Izcayacu (6096); LA-2007-29: Los Altos (9192); LA-2008-14: Los Altos (10942); LA-2009-13: Los Altos (9047); LA-2010-53: Los Altos (10824); RSP-2007-7: Roque Sáenz Peña (6632); TULC-2007-37: La Cruz (5842); TULC-2008-24: La Cruz (11481); TULC-2010-41: La Cruz (9986). Experimentos diseñados para valorar el efecto de la distancia entre surcos y la densidad de plantas. El modelo ajustado fue una función logística ( $\text{Rendimiento} = 6960 / [1 + \exp^{-4385(20.7 - \text{DD}_{1\text{dic}})] + 8.7$ ).

Sin embargo, es importante rescatar que en algunos casos -como General Vedia (GV-2007-30) o Los Altos-, siembras de principios de febrero lograron rindes cercanos a los  $9000 \text{ kg ha}^{-1}$ .

Para identificar comportamientos de los genotipos a través de los ambientes distintos a los esperados bajo un modelo aditivo (es decir, cuando existen interacciones  $G \times A$ ), se ajustó un modelo AMMI (Balzarini and Di Rienzo, 2003). Con este tipo de análisis se pueden explorar mejor las causas de la interacción ambiente\*genotipo (significativas en estos experimentos; Tabla 5).

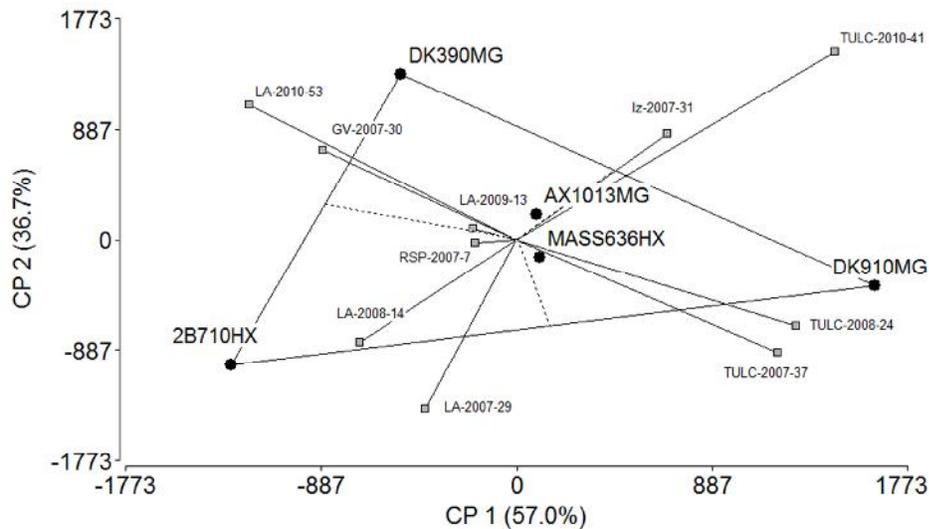


Figura 21. Biplot (AMMI 2) para visualizar las causas de la interacción genotipo y ambiente (efecto localidad y año) en experimentos diseñados para valorar el efecto de la distancia entre surcos y la densidad de plantas. Las siglas de los experimentos incluyen el código de la localidad, el año de evaluación y el número identificatorio. Códigos de Localidades con sus rendimientos promedios (Kg ha<sup>-1</sup>) entre paréntesis: GV-2007-30: General Vedia (7491); Iz-2007-31: Izcayacu (6096); LA-2007-29: Los Altos (9192); LA-2008-14: Los Altos (10942); LA-2009-13: Los Altos (9047); LA-2010-53: Los Altos (10824); RSP-2007-7: Roque Sáenz Peña (6632); TULC-2007-37: La Cruz (5842); TULC-2008-24: La Cruz (11481); TULC-2010-41: La Cruz (9986).

El 93.7% de la varianza debida a interacciones G\*A fue explicada por dos componentes principales del modelo AMMI (Figura 21). La CP1 discriminó como ambientes que más contribuyeron a la interacción a los casos Tulc-2010-41 (interacción con cambio de rango del genotipo 2B710HX), LA-2010-53 (por magnitud de la respuesta de los genotipos) y TULC-2008-24 (ambiente de mayor rendimiento que no respondió a ninguna práctica de manejo; Tabla 4).

Los genotipos que explicaron en mayor medida interacciones con el ambiente fueron DK910MG (con ensayos LA-2010-53 y GV-2007-30) y 2B710HX (con TULC-2010-41).

En resumen, debido a que la biomasa de los cultivos y el rendimiento en grano están estrechamente asociados con la cantidad de radiación solar interceptada, aquellas prácticas de manejo que mejoren su captura por el mayor tiempo posible serán las de mayor eficiencia para la construcción del rendimiento en grano. En estos experimentos diseñados para estudiar las interacciones entre distancia entre surcos, densidad de plantas y genotipo fue posible distinguir el peso relativo de cada factor sobre la varianza del rendimiento. La densidad de plantas y la distancia entre surcos explicaron entre el 1.4 al 3% de la varianza del rendimiento a través de experimentos. El genotipo y, sobre todo, el ambiente fueron los factores de mayor peso. Sin embargo, nuevamente fue claro el efecto positivo del incremento de la densidad para el conjunto de ambientes, aunque como se discute en sección anterior, las mayores respuestas ocurrirían en ambientes de mejor calidad (este hecho explica las

interacciones ambiente\*densidad de plantas). Asimismo, la respuesta al acortamiento de la distancia entre surcos habría sido más importante en los ambientes de mayor calidad, asociados principalmente con fechas de siembra tempranas donde posiblemente la captura de la radiación solar haya sido mejorada con la menor distancia entre hileras. Sin embargo, no se puede demostrar que en ambientes menos favorables la captura de radiación no haya sido óptima.

Estudios en Tucumán, Santiago del Estero y Catamarca (Graneros and Uhart, -Anexo p. 99-) encontraron respuestas opuestas al acortamiento entre hileras en distintas combinaciones con densidades poblacionales. En Catamarca, las mayores coberturas logradas con alta densidad o distanciamientos menores mejoraron la intercepción de la radiación solar escasamente por arriba de los altos rangos ya logrados en las situaciones de menor cobertura (90%). Esto explicaría la falta de respuesta al acortamiento lograda. En La Virginia, por el contrario, se encontró menor rendimiento en surcos angostos, postulándose que mayores coberturas habrían provocado un mayor consumo de agua en etapas vegetativas en desmedro de reservas hídricas para las etapas críticas.

En Paraná (Valentinuz et al., 2003), densidades de 7 a 11 p m<sup>2</sup> combinadas con distancias entre surcos de 0.52 y 0.7 m en dos genotipos contrastantes en arquitectura foliar no implicaron diferencias en el rendimiento ni interacciones significativas entre factores de manejo a favor de un determinado distanciamiento. Probablemente, estas respuestas se debieron a que el manejo bajo riego y fertilización contribuyó a un canopeo óptimo y similar entre tratamientos para la captura de radiación solar; respuesta similar a la observada en el estudio en Catamarca (Graneros and Uhart, -Anexo p. 99-).

Estudios en zonas templadas han demostrado que las respuestas al acortamiento entre hileras sólo son observables cuando mayores distanciamientos no permiten alcanzar una intercepción de radiación máxima durante la etapa crítica (Andrade et al., 2002). En estos casos, la menor distancia entre surcos mejora la intercepción de la radiación y la tasa de crecimiento del cultivo.

Se ha sugerido que en ambientes marginales, o en campañas con restricciones hídricas, distancias entre surcos mayores a 0.52 (0.70 y 1m) instalan tempranamente coberturas vegetales que pueden agotar la disponibilidad hídrica del suelo en etapas críticas. Sin embargo, en este estudio sólo uno de diez casos (el sitio de menor índice ambiental) exhibió tendencia a menores rendimientos en los surcos más estrechos, no pudiéndose discriminar las potenciales causas para dicha respuesta.

### 3.5. Fecha de siembra y determinación del rendimiento

Debido al clima subtropical con una característica época sin precipitaciones, la fecha de siembra del maíz en el NOA es generalmente tardía (diciembre – enero) para disminuir la probabilidad de estrés hídrico y térmico durante la etapa crítica de floración. Si bien es conocido que fechas tempranas se asocian con mayor calidad ambiental (i.e. Q), la siembra del maíz se realiza generalmente en seco y está condicionada por el inicio de las lluvias que recargan los perfiles del suelo a partir de octubre (Pascale and Lamelas, 2009). Como se mencionara en la primera sección, siembras durante diciembre e inicios de enero exponen al período crítico del maíz a una similar condición en términos del cociente fototérmico, por lo que el número de granos por unidad de superficie podría ser similar para dicho rango de fechas. Sin embargo, fechas más tardías pueden estar asociadas con mayores probabilidades de estreses durante el llenado de granos que desencadenan, en casos extremos, la senescencia prematura del cultivo, acortamientos de la duración del llenado, quebrado y vuelco de tallos (Eslava et al., 2007; Eslava et al., 2008a; Eslava et al., 2008b). Adicionalmente, no se conoce aún con precisión el efecto de combinaciones de manejo (por ej. densidad, genotipo, distancia entre surcos) sobre la determinación del rendimiento en maíces sembrados en distintas fechas.

Un experimento adicional, externo al Protocolo inicial de MAIZAR, fue conducido por la empresa Nidera S.A. durante la campaña 2006/07 (405 UE en la localidad de La Cruz). El objetivo de este ensayo fue evaluar los efectos principales e interacciones de tres factores de manejo: fecha de siembra (FS), densidad de plantas (d) y genotipos (G).

Todos los efectos principales y las interacciones dobles entre prácticas de manejo fueron significativos (Tabla 7). Sin embargo, la varianza del rendimiento fue explicada en más del 67% por el factor fecha de siembra. El genotipo y la interacción FS\*G explicaron el 17 y 12% de la variación, respectivamente (Figura 22 y Tabla 7).

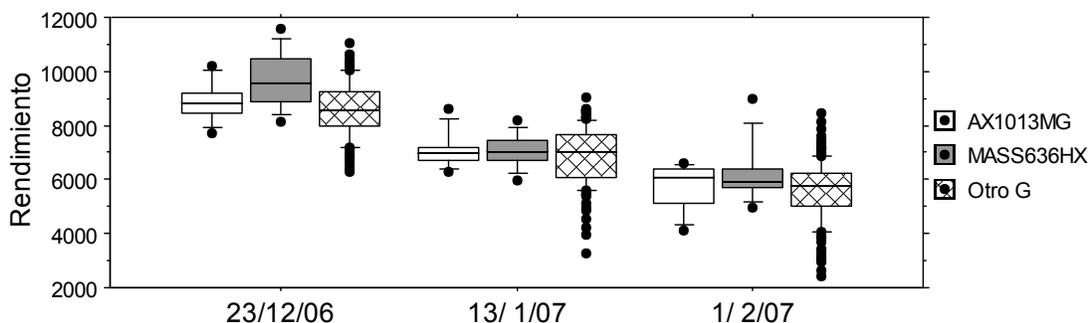


Figura 22. Variación del rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) en respuesta a la fecha de siembra en distintos genotipos de maíz. Bajo la categoría Otro G, se promedió el rendimiento de 13 genotipos (3 comerciales y 10 experimentales).

Fechas de siembra tardías, desfasadas en 21 y 40 días a partir del 23 de diciembre (primera fecha usada en este ensayo), redujeron el rendimiento en 21 y 35%, respectivamente.

Los cambios en la fecha de siembra básicamente modificaron la calidad ambiental alrededor de la floración. En fechas de siembra tardía, los días a floración aumentaron respecto a la tempranas (2-9%) debido principalmente a la disminución de la temperatura, con casos extremos floreciendo en abril (Figura 23). Similares resultados de cambios en la duración de fases fueron observados en otros experimentos ejecutados en el marco de esta red de ensayos. Por ej. en El Tunal, Salta (Tunal-2010-54; Tabla 1), fechas de siembra hacia fines de enero exhibieron una duración de la fase siembra-floración extendida hasta 72 días. En un estudio acerca del tiempo a floración en maíces de distinto ciclo en Tucumán Lamelas *et al.*, (1992) encontraron que la tasa de desarrollo a floración fue función de la temperatura media y que el menor número de días a floración ocurrió con siembras de inicio de diciembre, con fases extendiéndose en fechas anteriores y posteriores.

A medida que se atrasó la fecha de floración, entonces, tanto el período crítico como el llenado de granos ocurrieron con calidad ambiental disminuida, en particular por baja radiación solar (Figura 1).

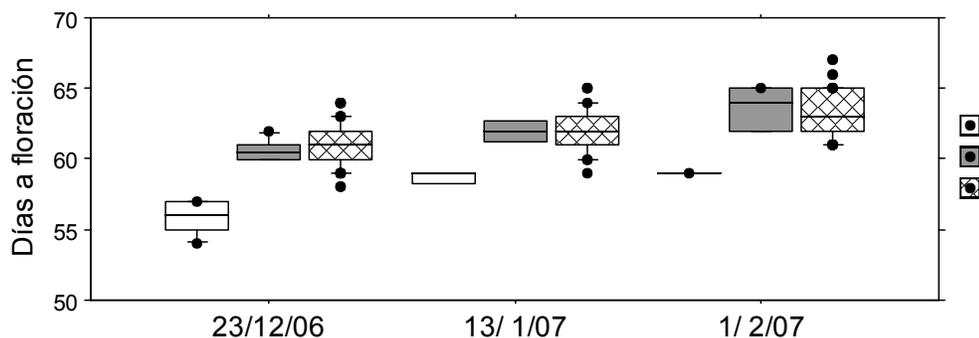


Figura 23. Variación de los días a floración en respuesta a la fecha de siembra en distintos genotipos de maíz. Bajo la categoría Otro G, se promedió el rendimiento de 13 genotipos (3 comerciales y 10 experimentales).

Respecto a otros factores de manejo, este estudio encontró que la densidad poblacional y su interacción con el G explicaron apenas el 0.7 y 2%, respectivamente, de la variación del rendimiento (Tabla 7). La densidad más baja ( $5 \text{ p m}^{-2}$ ) fue la de menor rendimiento (4% menor respecto a las densidades más altas).

La fecha de siembra tuvo mayor importancia relativa que la densidad de plantas. Sólo en la primera fecha de siembra, la densidad más baja exhibió el menor rendimiento (Figura 24). Aunque la interacción entre FS y densidad fue significativa, ésta se debió principalmente a cambios en la magnitud de la respuesta (Figura 26C).

Tabla 7. Análisis de la varianza, rendimiento (14% H) según efectos principales (genotipo) e interacción entre prácticas de manejo (fecha de siembra y densidad de plantas) en cultivos de maíz sembrados en La Cruz, campaña 2006-07

Factor	P value	% de la Varianza no debido al error
Fecha de siembra	<0.0001	67.3
Densidad	0.0022	0.7
Genotipo	<0.0001	16.7
Fecha de siembra*Densidad	0.0014	1.1
Fecha de siembra*Genotipo	<0.0001	12.1
Densidad*Genotipo	0.0288	2.2
Fecha de siembra*Densidad*Genotipo	0.4608	

Rendimiento promedio por Genotipo (kg ha <sup>-1</sup> ) <sup>§</sup>	
AX892MG	5622
EXP 9	6217
EXP 4	6236
EXP 10	6637
NK120TDMAX	7019
EXP 1	7097
EXP 5	7122
EXP 2	7193
AX1013MG	7234
EXP 7	7303
EXP 8	7463
EXP 3	7559
DK842MG	7642
MASS636HX	7667
EXP 6	7983

Rendimiento promedio (kg ha <sup>-1</sup> ) por Fecha de siembra y densidad de plantas*		
Fecha de siembra	Densidad (pm <sup>-2</sup> )	Rendimiento
23/12/2006	8	8971 E
	6.5	8802 E
	5	8225 D
13/01/2007	6.5	7048 C
	5	6848 B
	8	6770 B
01/02/2007	6.5	5749 A
	5	5633 A
	8	5549 A

<sup>§</sup> No se indica comparación de medias por la existencia de interacciones significativas entre factores.

\* Letras distintas indican diferencias significativas entre medias (Test DGC; p< 0.05).

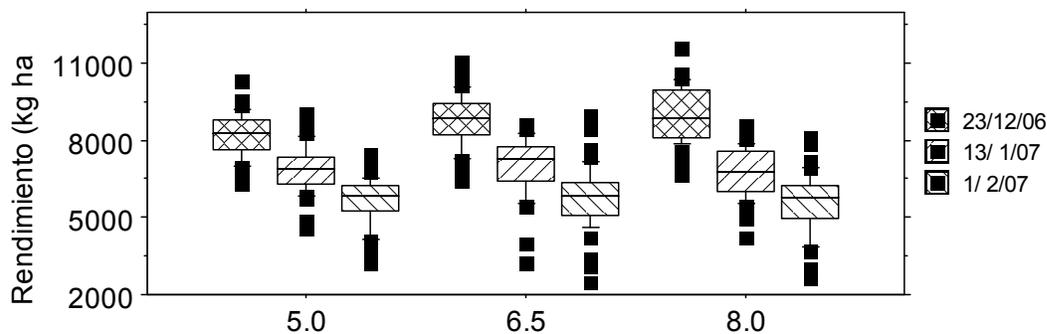


Figura 24. Gráfico de cajas para visualizar los rangos de rendimiento logrados en 15 genotipos de maíz sembrados bajo la combinación de densidades de plantas (5, 6.5 y 8 p m<sup>-2</sup>) y tres fechas de siembra. La línea horizontal en el centro de la caja indica el valor más frecuente observado. Los puntos indican valores extremos. Ensayo conducido en la localidad de La Cruz, Tucumán, campaña 2006-07.

Según sus rendimientos promedios, los genotipos se agruparon en seis categorías (Test DGC;  $p < 0.05$ ; PCALT=377 kg ha<sup>-1</sup>) destacándose AX892MG y EXP 6 como los de menor y mayor rendimiento, respectivamente (Tabla 7).

El rango de fechas utilizado no permitió visualizar el punto (fecha umbral) a partir del cual el rendimiento disminuyó. Es probable que la transición sea similar a la modelada en base a distintos ambientes y discutida en Figura 3. En Figura 25, se presenta la variación observada a través de todas las unidades experimentales valoradas en este experimento.

Teniendo en cuenta el modelo sigmoide propuesto en secciones anteriores, es notoria la variabilidad y la tendencia de los rendimientos a ser menores que el modelo general. Esto podría deberse a que estos ensayos incluyeron genotipos experimentales, no necesariamente bien adaptados a las zonas del NOA.

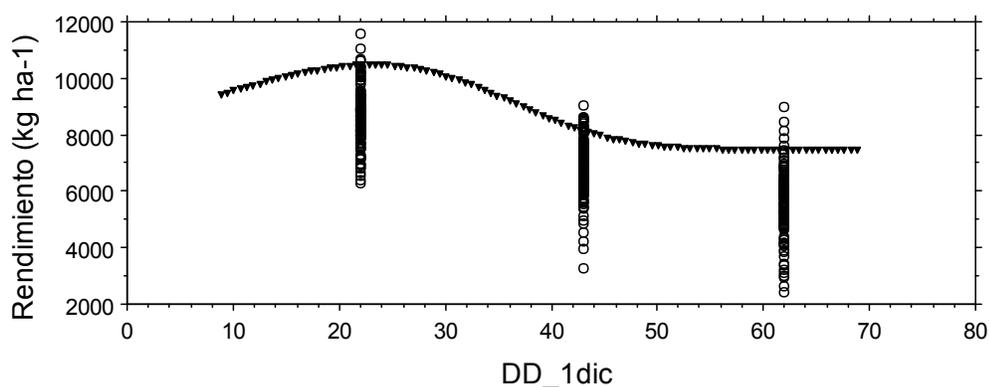


Figura 25. Rendimiento promedio de 15 genotipos en función de fechas de siembras y modelo sigmoide propuesto de Figura 3.

Sin embargo, modelos de regresión lineales (por ej. del tipo en Figura 26) pueden ser útiles para estimar una tasa máxima de pérdida diaria con cada día de

atraso en la fecha de siembra. En el promedio, los genotipos disminuyeron 76 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> entre las dos primeras fechas de siembra. Sin embargo, entre genotipos, el rango de disminución del rendimiento fluctuó entre 33 y 144 kg ha<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (Tabla 8).

En algunos casos, se visualizó que la pérdida fue de tipo curvilínea (parámetros del modelo polinómico ajustado se presentan en Tabla 8), indicando que para un rango de fechas respecto al otro, la pérdida fue mayor (i.e. AX892MG y DK842MG) o menor (Exp 5, 8 y 10) que lo predicho por un modelo lineal. Los genotipos AX892MG y DK842MG disminuyeron rápidamente su rendimiento entre la primera y segunda fecha (parámetro b polinómico negativo; Tabla 8). Por el contrario, los genotipos Exp 5, 8 y 10 fueron relativamente estables entre primera y segunda fecha, disminuyendo en mayor proporción su rendimiento entre la segunda y tercera fecha de siembra.

El uso de modelos alternativos polinómicos (que describen disminuciones no lineales del rendimiento ante el atraso en la fecha de siembra; Tabla 8) mejoró el ajuste (R<sup>2</sup>) en 4/15 genotipos evaluados (incremento del R<sup>2</sup> desde el 8 al 16%, y con componente cuadrático significativo a p<0.05). En 14/15 casos, los modelos ajustados fueron muy significativos (p<0.0001; excepto Exp 3 con p<0.05).

Tabla 8. Parámetros de modelos lineales y polinómicos para la relación entre el rendimiento y la fecha de siembra (considerado como días desde el 1 de diciembre, DD\_1dic) en 15 genotipos sembrados en tres fechas de siembra en La Cruz, Tucumán (2006-07). En todos los casos, los parámetros lineales fueron significativos a p<0.0001 y los polinómicos a p<0.05. Para los casos en que el componente cuadrático de los modelos ajustados fue significativo, se presentan ambos modelos ajustados.

Genotipo	Parámetro b lineal <sup>1</sup>	Parámetro b polinómico <sup>2</sup>	Parámetro c polinómico <sup>2</sup>
EXP 4	-33.12		
EXP 9	-54.15		
EXP 6	-55.16		
EXP 7	-55.27		
EXP 3	-57.86		
NK120TDMAX	-60.24		
EXP 2	-64.69		
EXP 5	-70.37	82.09	-1.82
EXP 8	-73.35	57.58	-1.57
AX1013MG	-78.52		
MASS636HX	-86.23		
EXP 10	-89.47	98.45	-2.25
DK842MG	-93.32	-362.99	3.22
EXP 1	-120.01		
AX892MG	-144.01	-370.11	2.70
Promedio Genotipos	-75.72		

<sup>1</sup> Modelo lineal: Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) = a + b\* DD\_1dic

<sup>2</sup> Modelo polinómico: Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>) = a + b\* DD\_1dic + c\* DD\_1dic

Las distintas tasas de pérdida del rendimiento entre fechas y entre genotipos explican la significativa interacción encontrada para la fecha de siembra y el genotipo. Dicha interacción explicó el 12 % de la varianza total del rendimiento.

Debido a la existencia de interacciones significativas entre prácticas de manejo y genotipos (Tabla 7, Tabla 8, Figura 26), se realizaron estudios de interacción basados en análisis de componentes principales -biplots tipo AMMI, GEE y GGE; (Balzarini and Di Rienzo, 2003)-. Para ello, los datos fueron agrupados en ambientes resultantes de la combinación de fecha de siembra y densidad de plantas.

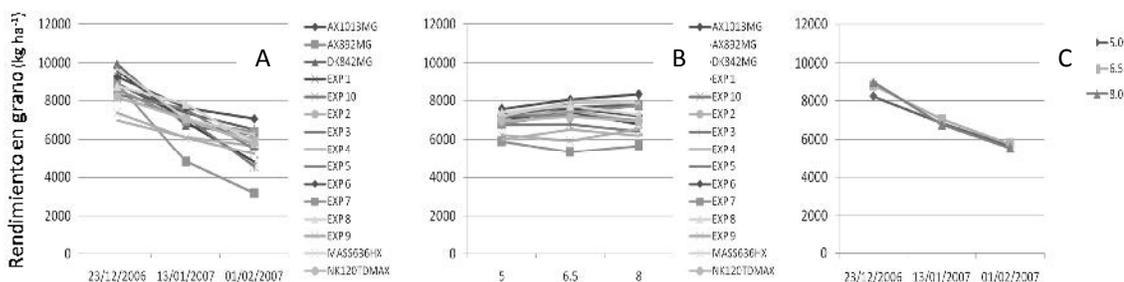


Figura 26. Interacciones entre genotipo y fecha de siembra (A), genotipo y densidad de plantas (B) y fecha de siembra y densidad de plantas (C) como determinantes del rendimiento en grano. Ensayos conducidos en La Cruz, campaña 2006-07.

Análisis gráficos biplots tipo AMMI mostraron que el 80% de la varianza de la interacción entre ambiente y genotipo fue explicada por dos componentes principales (ejes CP1 y CP2; Figura 27). La CP1 discriminó ambientes principalmente asociados con el factor fecha de siembra, con alto (a la derecha y asociados con fecha de siembra temprana) y bajo rendimiento (izquierda, fechas tardías).

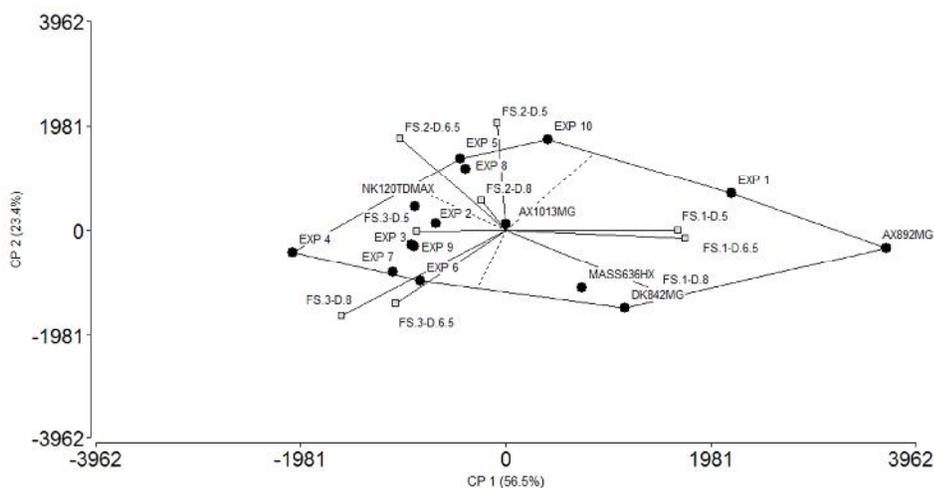


Figura 27. AMMI (2) entre ambiente y genotipo para explicar cuáles genotipos influyeron más en la varianza asociada con la interacción G\*A. Experimentos conducidos en tres fechas de siembra (FS.1; FS.2; y FS.3, Tabla 7) en la localidad de La Cruz, Tucumán.

Los genotipos extremos y que más contribuyeron a la interacción genotipo\*ambiente fueron AX892MG y Exp1 con una disminución del rendimiento cercana al 64% y 50, respectivamente, entre la primera y última fecha de siembra. Ante el atraso de su fecha de siembra, estos genotipos fueron los de máxima pérdida diaria de rendimiento (ver parámetro b lineal en Tabla 8), 120 y 144 kg d<sup>-1</sup>, respectivamente. En el otro extremo, Exp 4 contribuyó fuertemente a la interacción G\*A ya que fue el de menor rendimiento en la fecha de siembra más temprana pero el de menor reducción relativa en la más tardía (sólo disminuyó 19% su rendimiento entre la primera y última fecha de siembra, a una tasa diaria de 33 kg ha<sup>-1</sup>, mínima entre todos los genotipos evaluados).

Los genotipos Exp 7, 3 y 6 tuvieron buenos rendimientos (media 8852 kg ha<sup>-1</sup>) y disminuciones moderadas (25% entre primera y última fecha de siembra a tasa diaria de 56 kg). AX 1013 y Exp 2 explicaron en mínima medida la interacción (cercanos a cero en la CP1; Figura 27) y serían los más adaptados al conjunto de ambientes ensayados. Los genotipos Exp 10, 5 y 8 fueron los de más rinde en la fecha 2 (rango entre 7174 y 7830 kg ha<sup>-1</sup>), con disminuciones relativas de 11% entre primera y segunda fecha. Una característica adicional de estos genotipos fue que la relación entre rendimiento y DD\_1dic fue de tipo curvilínea (Tabla 8), con disminuciones más acentuadas hacia la tercer fecha de siembra.

Para identificar ambientes que i) contribuyeron más a la interacción genotipo\*ambiente y ii) que fueron “ganadores” dentro de mega-ambientes favorables para determinados grupos de genotipos, se utilizó un análisis gráfico GEE (Figura 28). El 95% de la varianza fue explicada por dos CP que discriminaron ambientes por su rendimiento (CP1) en estrecha asociación con la fecha de siembra, tempranas a la derecha (promedio 8666 kg ha<sup>-1</sup>) y tardías a la izquierda (promedio 6266 kg ha<sup>-1</sup>).

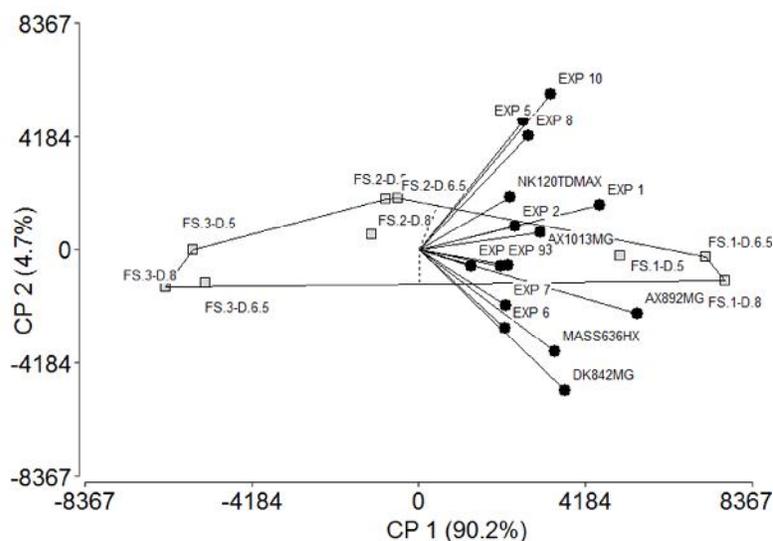


Figura 28. Biplot GEE para interpretar interacciones G\*A y detección de mega-ambientes y genotipos asociados.

En el mega-ambiente de fechas tardías, ningún genotipo fue “ganador”. En el mega-ambiente de fecha temprana (y en cualquier densidad), los 4 genotipos ganadores fueron AX892MG, EXP 1, DK842MG, MASS636HX.

La cercanía de los vectores para los distintos grupos indicarían comportamientos similares de los genotipos. Es interesante, por ej., rescatar que los genotipos EXP 5, 8 y 10 se ordenaron cercanamente y que estuvieron a su vez más asociados al ambiente de fecha de siembra intermedia. Según fuera descripto más arriba, estos genotipos exhibieron respuestas del rendimiento curvilineales ante el atraso de la fecha de siembra, y por ello, junto a EXP 3 (con otro ordenamiento en el biplot), fueron los de mayor rendimiento en fechas tardías.

### 3.5.1. ANÁLISIS GGE

El 80% de la varianza debida a la interacción fue explicada por el modelo lineal-bilineal GGE (Figura 29). Como en los análisis anteriores, dos ambientes fueron distinguidos teniendo en cuenta la fecha de siembra: uno asociado a las siembras tempranas (i.e. 23 de diciembre en este ensayo) y otro asociado con las tardías. Del análisis gráfico, el genotipo DK482MG y EXP 6 fueron los “ganadores” en el ambiente de siembras tempranas y tardías, respectivamente. Ningún otro genotipo ganó en estos ni otros ambientes.

El gráfico permitió detectar cuatro genotipos contrastantes (EXP 4; EXP 6, DK482MG, y AX892MG ubicados en los vértices del polígono envolvente). En fechas tempranas, MASS636HX y DK842MG fueron los genotipos ganadores, pero en tardías EXP 6, EXP 3 y EXP 7 fueron los de mayor rendimiento. En contraste, los peores fueron EXP 4 en fecha temprana y AX892MG en fecha tardía. Los genotipos de menor inercia (o más estables) fueron los cercanos a CP2=0, EXP 2, EXP 5, EXP 8, AX1013MG. Contrastando con resultados presentados en Tabla 8, estos genotipos tuvieron una tasa diaria de pérdida de rendimiento promedio de 72 k ha<sup>-1</sup>, siendo el rendimiento promedio en la mejor fecha de siembra igual a 8635 kg ha<sup>-1</sup>

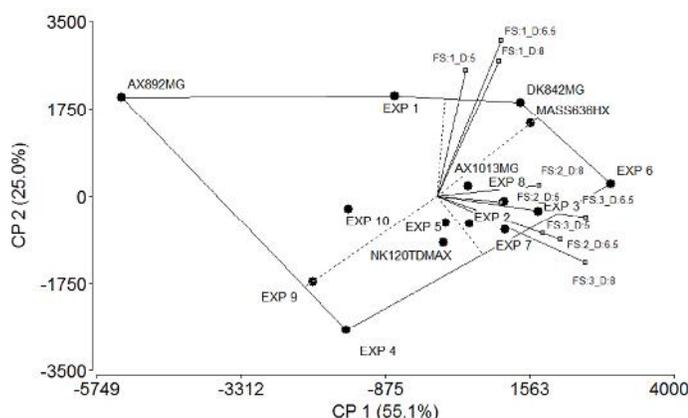


Figura 29. GGE para detectar los mejores genotipos en ambientes modulados por la fecha de siembra.

En resumen, el rendimiento disminuyó significativamente ante atrasos en la fecha de siembra pero en distinta magnitud según el genotipo (interacción FS\*G). La fecha de siembra explicó más del 67% de la variación del rendimiento y reflejaría la declinante condición ambiental durante la etapa crítica (floración a inicios de abril en la fecha más extrema). La densidad de plantas ejerció un efecto comparativamente menor (sólo explicó un 0.7% de la varianza del rendimiento), siendo relativamente más importante en fechas tempranas (en este caso, la densidad poblacional más baja fue la de menor rendimiento). Otros estudios refuerzan esta respuesta al demostrar similarmente que la respuesta a la densidad de plantas sería más importante en fechas tempranas (Suárez et al., -Anexo p. 35-). La interacción entre densidad de plantas y genotipo fue de mínima importancia en este estudio, respuesta similar a la encontrada y discutida en secciones anteriores.

Por el contrario, la interacción entre la fecha de siembra y el genotipo fue muy importante, con casos de tipo cross-over (con cambios en el rango). El uso de análisis específicos para la interacción permitió la identificación de genotipos de respuesta contrastante a atrasos en la fecha de siembra. En fechas tempranas, MASS636HX y DK842MG fueron los genotipos ganadores, y en tardías, los genotipos EXP 6, EXP 3 y EXP 7 fueron los de mayor rendimiento. Estudios específicos sobre los mecanismos de generación del rendimiento en genotipos contrastantes en respuesta a la fecha de siembra permitirían caracterizar aspectos fenotípicos que contribuyen a la estabilidad del rendimiento en ambientes de menor calidad ambiental durante etapas críticas o de llenado de granos.

En el NOA, estudios que compararon la respuesta del rendimiento en genotipos con germoplasma tropical, templado y tropical\*templado (Suárez et al., -Anexo p. 35-) demostraron que siembras desfasadas en 45 días a partir de inicios de diciembre redujeron el rendimiento en 18 y 44% en genotipos con germoplasma tropical y templado, respectivamente. En el NEA, Metzler *et al.*, (2008) demostraron que la disminución del rendimiento ante el atraso de la fecha de siembra fue más importante (16%) en un híbrido templado que en uno tropical o tropical\*templado (11%).

Ambos estudios demuestran que existen interacciones entre la fecha de siembra y el genotipo (en este caso origen de su germoplasma) y destacan la necesidad de profundizar estudios que determinen las causas de dicha variación. Es conocido que las fechas de siembra también pueden alterar las relaciones fuente-destino durante el llenado de granos con consecuencias de magnitud distinta entre genotipos sobre procesos como la duración del llenado de granos, la removilización de asimilados desde tallos, el quebrado y vuelco (Eslava et al., 2007; Eslava et al., 2008a; Eslava et al., 2008b; Metzler, 2008). Otro aspecto no valorado en este experimento y que también podría haber influido en la interacción genotipo\*fecha de siembra es el sanitario. Es conocido que atrasos en la fecha de siembra pueden exponer a los genotipos a cargas diferenciales de enfermedades y que genotipos con germoplasma

templado son más susceptibles (Suárez et al., -Anexo p. 35-). Limitaciones en el funcionamiento fotosintético del maíz durante el llenado debidas a enfermedades foliares impactan fuertemente sobre la duración del llenado, el peso de granos y el rendimiento (Pronczuk et al., 2004).

En el marco de estos resultados, es importante destacar que estudios acerca del impacto de fechas de siembra sobre el rendimiento en el NOA son relativamente escasos (al menos publicados) o no examinan rangos amplios de fechas dentro de localidad. En un estudio paralelo realizado por integrantes de MAIZAR donde se compararon dos fechas de siembra dentro de localidad en Chaco, Salta, Catamarca y Tucumán (Uhart, -Anexo p. 110-) se encontró que siembras desfasadas en 15 días dentro de cada localidad no redujeron significativamente el rendimiento (sólo en 6.5% en promedio), valores inferiores a los encontrados en este set de experimentos que analizó desfases entre fechas más amplios. En dicho estudio, siembras a partir de fines de diciembre hasta el 20 de enero demostraron que la fecha de siembra tuvo relativamente menor impacto que el genotipo y la interacción G\*localidad dentro del rango de fechas estudiado. En las fechas más tardías, los rendimientos fluctuaron entre 9000 (Las Lajitas y Charata) y 11500 (Los Altos y Monte Redondo). Un aspecto adicional del uso de distintos sitios permitió detectar que su calidad ambiental estuvo asociada con las fechas de siembras usadas, explicando este factor de manejo el 53% de la variación del rendimiento a través de localidades (el rendimiento mayor en aquella localidad donde las siembras fueron más tempranas con única excepción para el sitio Charata, donde la fecha más temprana se asoció con disminución del rendimiento por menor nivel hídrico en suelo).

Otros estudios en el NEA (Metzler, 2008; Anexo, p. 60) donde se compararon fechas de octubre, noviembre y diciembre- demostraron que las primeras exhibieron mayores tasas de crecimiento de cultivo (hasta 35% superiores), debido a mayores índices de área foliar y cocientes fototérmicos durante el período crítico alrededor de la floración. Estos componentes ecofisiológicos que se asociaron con mayor captura y eficiencia en el uso de la radiación solar fueron los principales determinantes del mayor número de granos por unidad de superficie y rendimiento en las fechas de octubre y noviembre ( $\cong 8000 \text{ kg ha}^{-1}$ ) en comparación con las de diciembre ( $\cong 7000 \text{ kg ha}^{-1}$ ). En un único experimento en Leales donde se comparó la respuesta de genotipos con distinto germoplasma, se encontró que la tasa de pérdida de rendimiento entre dos fechas de siembras (5/12 vs. 19/1) fue de  $56 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  en el genotipo tropical y tropical\*templado y el doble ( $117 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ) en el genotipo templado (Suárez et al., -Anexo p. 35-).

#### 4. CONCLUSIONES

Cuarenta ensayos fueron sembrados durante 2006 a 2010 en diecisiete localidades de seis provincias del NOA a partir de inicios de diciembre hasta inicios de febrero (UE= 2088). La diversidad de situaciones generó un amplio rango de índices ambientales, con rendimientos fluctuando entre 3218 y 15100 Kg ha<sup>-1</sup> (variación superior al 450%). La variación del índice ambiental permitió discriminar distintas respuestas a factores de manejo como la fecha de siembra, la densidad de plantas y el distanciamiento entre surcos. En combinaciones particulares de fecha de siembra, densidad y genotipo, pudieron observarse rendimientos máximos cercanos o superiores a los teóricos calculados en base cocientes fototérmicos, lo que concretamente permite establecer los límites máximos que actualmente pueden ser alcanzados en el NOA.

El análisis de distintas combinaciones de manejo mostró que la varianza del rendimiento fue explicada mayoritariamente por el ambiente (60-80%). Sólo el factor de manejo fecha de siembra explicó la varianza del rendimiento en forma comparable. Puesto que los índices ambientales estuvieron estrechamente asociados con las fechas de siembra de los ensayos, éste sería un factor de manejo de muy alto peso relativo a través de ambientes.

Aunque la tendencia fue generalizada, veinte de veintisiete casos demostraron que el rendimiento fue mínimo a 5 p m<sup>-2</sup>. El efecto positivo del incremento de la densidad de plantas sobre el rendimiento fue claro (rango de 10-27%) y consistente a través de localidades, ambientes asociados con la fecha de siembra y en todos los genotipos (la interacción entre éste y la densidad fue mínima, explicando menos del 0.5% de la varianza del rendimiento). Es de destacar que nunca se observó disminución del rendimiento en la máxima densidad de plantas (análisis de 147 combinaciones de densidad\*genotipo), excepto una única tendencia no significativa en el caso ET-2010-54. Fue claro, sin embargo, que las densidades de 6.5 y 8 p m<sup>-2</sup> no difirieron en su rendimiento en muchas situaciones por lo que los óptimos para el amplio rango de ambientes analizados se encontraría entre estos valores de densidades poblacionales. Hubo una relación significativa entre la magnitud de la respuesta al incremento de la densidad de plantas por arriba de 5 p m<sup>-2</sup> y el índice ambiental, fluctuando entre 1005 a 1190 kg ha<sup>-1</sup> por cada 1000 kg ha<sup>-1</sup> de incremento en el IA. Relativamente, sin embargo, los factores que explicaron en mayor medida la varianza del rendimiento fueron el ambiente (60%), el genotipo (12%) y interacción entre estos dos factores (15%). La densidad de plantas explicó en cuarto lugar la varianza del rendimiento (8%). El análisis de las interacciones genotipo\*ambiente permitió detectar comportamientos de genotipos contrastantes en respuesta a la calidad ambiental. DK390MG, 2B710HX y MASS636HX sobresalieron en el mega-ambiente de mayor cantidad de sitios analizados y fueron los de máximo rendimiento en ambientes de alta calidad. AW190MG se asoció positivamente con casos de bajo índice ambiental.

AX1013MG y DK910MG se asociaron con ambientes donde no existió respuesta al genotipo.

Por otro lado, el acortamiento de la distancia entre surcos incrementó el rendimiento significativamente sólo en 3/10 casos analizados, con ganancias promedio entre el 5 al 8%. La densidad de plantas y la distancia entre surcos sólo explicaron entre el 1.4 al 3% de la varianza del rendimiento a través de experimentos. Como en el caso de la respuesta a la densidad de plantas, los factores de mayor peso fueron el genotipo y, sobre todo, el ambiente (27 y 36-78% de la varianza total, respectivamente). Para el caso de distancias 0.52 vs. 0.70, las interacciones dobles fueron de menor significancia (contribuyeron con sólo el 0.2 y 1% de la varianza del rendimiento) y se deberían principalmente a cambios de magnitud de las respuestas, considerándose, por ello, como no importantes.

La fecha de siembra correlacionó significativamente con el índice ambiental a través de experimentos ( $r = -0.68$ ). En el experimento diseñado para valorar la interacción entre las prácticas de manejo fecha de siembra, densidad y genotipo, se encontró que todos los efectos principales e interacciones dobles fueron significativas. Sin embargo, la varianza del rendimiento fue explicada en más del 67% por el factor fecha de siembra, reflejando probablemente la declinante condición ambiental que se instala durante la etapa crítica ante el atraso de la fecha de siembra (floración a inicios de abril en la fecha más extrema). Claramente, el rendimiento disminuyó ante atrasos en la fecha de siembra, pero en distinta magnitud según el genotipo. La densidad de plantas ejerció un efecto comparativamente menor (0.7% de la varianza total), siendo su efecto más importante en fechas tempranas. La interacción entre densidad de plantas y genotipo fue de mínima importancia en este estudio, respuesta similar a la encontrada en los otros experimentos. El genotipo y la interacción FS\*G explicaron el 17 y 12% de la variación, respectivamente. Estos resultados resaltan la variable respuesta genotípica ante atrasos en la fecha de siembra con casos de tipo cross-over (cambios en el rango) nunca observados bajo otras combinaciones de manejo. Éste es un importante nicho de conocimiento que se necesita profundizar.

## 5. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abacus Concepts. 1996. StatView for Windows version 4.57. Abacus Concepts, Inc., Berkley, CA.
- Andrade, F.H. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Boletín Técnico N° 106. EEA Balcarce (INTA), Balcarce, Bs. As., Argentina.
- Andrade, F.H., P. Calvino, A. Cirilo, and P. Barbieri. 2002. Yield responses to narrow rows depend on increased radiation interception. *Agronomy Journal* 94:975-980.
- Andrade, F.H., V.O. Sadras, C.R.C. Vega, and L. Echarte. 2005. Physiological determinants of crop growth and yield in maize, sunflower and soybean: Their application to crop management, modeling and breeding. *Journal of Crop Improvement* 14:51-101.
- Balzarini, M., and J. Di Rienzo. 2003. Info-Gen: Software para análisis estadístico de datos genéticos. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba. Argentina.
- Balzarini, M.G., L. Gonzalez, M. Tablada, F. Casanoves, J.A. Di Rienzo, and C.W. Robledo. 2008. InfoStat Software Estadístico. Manual del Usuario Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Cantarero, M.G., S. Luque, and C.R.C. Vega. 2009. Ambiente y manejo en busca de alta productividad en soja y maíz. Primer congreso sobre cultivos de verano para el norte argentino EEAOC-CREA-Sembrando Satelital, Cevil Redondo, Tucumán.
- Cicchino, M., J.I.R. Edreira, M. Uribelarrea, and M.E. Otegui. 2010. Heat Stress in Field-Grown Maize: Response of Physiological Determinants of Grain Yield. *Crop Sci* 50:1438-1448.
- Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. 2008. *InfoStat, versión 2008*. Release 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba.
- Eslava, F., C.R.C. Vega, and S. Vargas Gil. 2007. Relación fuente-destino durante el llenado de granos y su asociación con la susceptibilidad al quebrado de tallos y el vuelco en maíz., p. 10-11, *In* B. Kruk and R. Serrago, eds. Workshop Internacional. Eco Fisiología Vegetal Aplicada al Estudio de la Determinación del Rendimiento y la Calidad de los Cultivos de Granos. FA-UBA; INTA; FCA-UNMdP, Mar del Plata.
- Eslava, F., C.R.C. Vega, and S. Coria. 2008a. Progreso temporal del quebrado y vuelco de tallos en maíz bajo condiciones fuente-destino contrastantes, p. 65, *In* SAFV, ed. XIII Reunión Latinoamericana - XXVII Reunión Argentina de Fisiología Vegetal (SAFV), Vol. 21-24 Septiembre 2008. SAFV, Rosario.
- Eslava, F., C.R.C. Vega, S. Vargas Gil, and G. March. 2008b. Relación fuente/destino durante el llenado de granos y expresión de signos de la podredumbre del tallo en maíz, p. 148 (382), *In* Asociación Argentina de Fitopatólogos, ed. Primer Congreso Argentino de Fitopatología, Córdoba.
- Fischer, K.S., and A.F.E. Palmer. 1984. Tropical Maize, p. 213-248, *In* P. R. Goldsworthy and N. M. Fisher, eds. The physiology of tropical field crops. J. Wiley & Sons Ltd., Avon.
- Graneros, I., and S. Uhart. Efecto de la distancia entre surcos y la densidad poblacional sobre el rendimiento de híbridos de maíz de diferente estructura de planta en el norte argentino, pp. 99. MAIZAR Anexo compilado.
- Jandel Scientific. 1994. Table Curve, User's Manual Version. Jandel Scientific: AISN Software. Corte Madera, C.A. .
- Lamelas, C.M., J.D. Forcitini, and C. Funes. 2006. Enfoque agroecológico del cultivo de la soja en el noroeste argentino, p. 25-48, *In* M. R. Devani, et al., eds. Producción de Soja en el Noroeste Argentino. . EEAOC Aceitera General Deheza, Tucumán, Argentina.
- Lamelas, C.M., D.E. Gamboa, A. Pascale, and L. Suárez. 1992. Requerimientos térmicos del subperíodo siembra-panojamiento de cultivares de Maíz sembrados en Tucumán-

- Argentina. RIAT 69:97-104.
- Mercau, J.L. Capacidad de desarrollar conocimiento y tecnología para el cultivo de maíz en el norte argentino: el estado actual, pp. 1. MAIZAR Anexo compilado.
- Metzler, M.J. 2008. Fecha de siembra y densidad poblacional en maíz: una comparación entre híbridos tropicales y templados. Grado Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Entre Ríos, Oro Verde, Entre Ríos.
- Pascale, A.J., and C.M. Lamelas. 2009. 25 años de labor agrometeorológica en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres [Online] [http://www.eeaoc.org.ar/informes/25años\\_agromet\\_eeaoc.pdf](http://www.eeaoc.org.ar/informes/25años_agromet_eeaoc.pdf) (verified 29/9/2010).
- Pronczuk, M., J. Bojanowski, and R. Warzecha. 2004. Effect of leaf infection by *Kabatiella zae* on stalk rot prevalence and grain yield of maize hybrids. *Journal of Phytopathology* 152:410-415.
- Sadras, V.O. 2007. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *Field Crops Research* 100:125-138.
- Suárez, A., L.G. Gómez, and S. Uhart. Efecto de la época de siembra y la densidad poblacional sobre el desarrollo, crecimiento y rendimiento de híbridos de maíz con germoplasma tropical, tropical \* templado y templado en el noroeste argentino, pp. 35. MAIZAR Anexo compilado.
- Uhart, S. Oportunidades de mejora en maíz para la región norte de argentina, pp. 27. MAIZAR Anexo compilado.
- Uhart, S. Evaluación de cultivares de maíz, fecha de siembra y densidad poblacional en el norte argentino, pp. 110. MAIZAR Anexo compilado.
- Valentinuz, O., P. Barbagelata, and O. Papparotti. 2003. Row spacing in maize (*Zea mays* L.) hybrids with different plant structure. *Revista Científica Agropecuaria* 7:7-11.
- Vega, C.R., and F.H. Andrade. 2002. Densidad de plantas y espaciamiento entre hileras, p. 97-135, *In* F. H. Andrade and V. O. Sadras, eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. INTA-FCA (UNMdP), Balcarce, Argentina.
- Vega, C.R.C., F.H. Andrade, and V.O. Sadras. 2001a. Reproductive partitioning and seed set efficiency in soybean, sunflower and maize. *Field Crops Research* 72:163-175.
- Vega, C.R.C., F.H. Andrade, V.O. Sadras, S.A. Uhart, and O.R. Valentinuz. 2001b. Seed number as a function of growth. A comparative study in soybean, sunflower, and maize. *Crop Science* 41:748-754.
- Zaidi, P.H., G. Srinivasan, and C. Sanchez. 2003. Morpho-physiological traits associated with variable field performance of different types maize germplasm across multiple environments. *Maydica* 48:207-220.