



**UNIVERSIDAD DE CHILE**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**

**ESCUELA DE POSTGRADO**

**EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE  
SIETE HÍBRIDOS DE MAÍZ DE GRANO Y SU RELACIÓN CON EL  
INTERVALO SEDA-ANTESIS**

Tesis para optar al Grado de Magister en Ciencias Agropecuarias  
Mención Producción de Cultivos

**LUIS MARDONES FUENTES**

Directores de Tesis  
EDMUNDO ACEVEDO HINOJOSA  
PAOLA SILVA CANDIA

Profesores consejeros  
RICARDO PERTUZÉ CONCHA  
HÉCTOR URIBE MUÑOZ

SANTIAGO-CHILE

2014

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

**EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE SIETE  
HÍBRIDOS DE MAÍZ DE GRANO Y SU RELACIÓN CON EL INTERVALO SEDA-  
ANTESIS**

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Grado de Magíster en  
Ciencias Agropecuarias, Mención Producción de Cultivos.

**LUIS MARDONES FUENTES**

Calificaciones

**DIRECTORES DE TESIS**

Edmundo Acevedo H.,  
Ingeniero Agrónomo, M.S., Ph. D.

Paola Silva C.,  
Ingeniero Agrónomo, M.S., Dra.

**PROFESORES CONSEJEROS**

Ricardo Pertuzé C.,  
Ingeniero Agrónomo, Ph. D.

Héctor Uribe M.,  
Médico Veterinario, M.S., Ph. D.

Santiago, Chile  
2014

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis directores de tesis, Edmundo Acevedo y Paola Silva. Por su tiempo, dedicación y apoyarme en esta tarea.

A Marcela Opazo por su gran ayuda. Siempre animándome.

A Marco Garrido por sus sugerencias y ayuda en las figuras.

A mi familia que siempre me apoyó y por el tiempo robado: Any mi esposa, y mis tesoros Marisol y Daniela, que me dieron la fuerza con sus sonrisas.

A Sociedad Agrícola Winter Seed Ltda. por permitir la realización de este estudio.

A Dios por abrir las puertas y bendecirme y a mi querida Facultad de Ciencias Agronómicas por recibirme.

A mi esposa Ana Luisa,  
por su dulce paciencia y gran amor.

A mi padre en sus 81 años,  
que me enseñó el amor a la tierra.

## ÍNDICE

### Índice de Contenido

<b>CAPÍTULO I: MONOGRAFIA.....</b>	<b>1</b>
Producción de Maíz.....	1
Estabilidad del rendimiento de grano.....	1
Análisis de la estabilidad del rendimiento.....	2
Tolerancia al estrés.....	3
Uso de caracteres secundarios en la selección.....	4
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPITULO II: ARTÍCULO CIENTÍFICO.....</b>	<b>10</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>10</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>HIPÓTESIS.....</b>	<b>14</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>15</b>
Híbridos.....	15
Diseño Experimental.....	15
Localidades.....	15
Ambientes.....	16
Manejo del cultivo .....	17
Mediciones.....	18
Análisis estadístico.....	19
<b>RESULTADOS .....</b>	<b>22</b>
Rendimiento.....	22
Interacción genotipo x ambiente (GxA) del rendimiento en grano .....	23
Estabilidad del rendimiento.....	24
Rendimiento y su asociación con ASI.....	26
Análisis de componentes principales por híbrido.....	28
Análisis de la interacción GxA.....	29
Análisis de regresión por sitio (SREG).....	30
Rendimiento y su asociación con otras variables.....	31
<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>34</b>

<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>37</b>
<b>LITERATURA CITADA</b> .....	<b>38</b>
1. Apéndices.....	41

## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Híbridos a evaluar en los ensayos.....	15
<b>Cuadro 2.</b> Descripción de los ambientes en que se realizaron los ensayos.....	17
<b>Cuadro 3.</b> Rendimiento promedio de granos en los 13 ambientes (considerando el promedio de los siete híbridos evaluados).....	22
<b>Cuadro 4.</b> Rendimiento promedio de granos de los siete híbridos en los 13 ambientes.....	23
<b>Cuadro 5.</b> Suma de cuadrados (SC) y cuadrados medios (CM) de los ambientes, genotipos y fuentes de variación del ANDEVA combinado para rendimiento en grano de los 7 híbridos de maíz en los 13 ambientes.....	24
<b>Cuadro 6.</b> Valores de la pendiente de la regresión, intercepto y $R^2$ obtenidos del análisis de estabilidad de los 7 híbridos en estudio.....	24
<b>Cuadro 7.</b> Valores de ASI agrupados por el total de 13 ambientes, ambientes con estrés y ambientes sin estrés.....	27
<b>Cuadro 8.</b> Correlación entre ASI y rendimiento de granos de los híbridos estudiados..	27
<b>Cuadro 9.</b> Valores promedio por híbrido de las variables evaluadas en los 13 ambientes.....	32
<b>Cuadro 10.</b> Valores promedio por ambiente de las variables evaluadas en los siete híbridos .....	33

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Análisis de la estabilidad del rendimiento de granos de los siete híbridos en los 13 ambientes.....	25
<b>Figura 2.</b> Relación entre adaptación varietal (coeficiente de regresión lineal) y la media de rendimiento de granos sobre todos los ambientes.....	26
<b>Figura 3.</b> Regresión entre ASI y Rendimiento de granos de los 7 híbridos en los 13 ambientes.....	28
<b>Figura 4.</b> Componentes principales del comportamiento de los 7 híbridos respecto del conjunto de variables medidas (vectores) en los 6 ambientes con estrés hídrico y de nitrógeno. Las abreviaturas corresponden a biomasa (B), rendimiento de granos (Rend), índice de cosecha (IC), número de granos $m^{-2}$ (GM2), peso de granos (PG), mazorcas $planta^{-1}$ (MP), hileras $mazorca^{-1}$ (HM), granos $hilera^{-1}$ (GH), altura de plantas (AP), intervalo seda-antésis (ASI) y coeficiente de regresión (b1).....	29
<b>Figura 5.</b> Biplot de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) realizado para el rendimiento de granos de los siete híbridos de maíz en los 13 ambientes.....	30
<b>Figura 6.</b> Biplot GGE para rendimiento de granos de los siete híbridos de maíz evaluados en los 13 ambientes.....	31



## CAPÍTULO I: MONOGRAFÍA

### EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE SIETE HÍBRIDOS DE MAÍZ DE GRANO Y SU RELACIÓN CON EL INTERVALO SEDA-ANTESIS

#### Producción de maíz

El maíz (*Zea mays* L.) es el cereal con mayor volumen global de producción, superando al trigo y al arroz (FAO, 2013). En Chile cubre una superficie de 92.378 hectáreas y una producción total de 1.115.732 toneladas, ubicándose inmediatamente después del trigo en cuanto a superficie y producción (INE, 2013).

El rendimiento medio de maíz a nivel mundial es cercano a 5.000 kg ha<sup>-1</sup> pero en Chile alcanza 10.600 kg ha<sup>-1</sup>, siendo uno de los mayores rendimientos medios en el mundo (FAO, 2013). Sin embargo, aún existe una gran brecha entre el rendimiento promedio nacional alcanzado por los agricultores y el rendimiento potencial de los híbridos utilizados, cuyo rendimiento comercial puede superar 20.000 kg ha<sup>-1</sup> (Faiguenbaum, 2003). Las condiciones climáticas que posee el valle central de Chile le otorgan al crecimiento y desarrollo del cultivo condiciones óptimas, dadas principalmente por una alta radiación solar interceptada, la que determina una alta tasa de fotosíntesis y una baja temperatura media, la que determina menor tasa respiratoria y mayor período de crecimiento. El rendimiento se correlaciona positivamente con el cociente fototermal que involucra las dos variables anteriormente mencionadas. Con 2,78 Mj m<sup>-2</sup> día<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>, el valle central de Chile tiene el mayor valor de este cociente entre 18 localidades estudiadas y a la vez el mayor rendimiento de grano con 18.450 kg ha<sup>-1</sup> (Andrade, 1992).

La principal razón que explica la existencia de una brecha entre el rendimiento potencial y el rendimiento promedio obtenido por los agricultores a nivel nacional, es la falta de agua y baja nutrición durante el período de mayor sensibilidad del maíz, que ocurre entre 2 y 22 días después de la emisión de la seda (Grant *et al.*, 1989). Vasal *et al.* (1997) señalan además a estos estreses como los más ampliamente distribuidos y pueden ocurrir en prácticamente todos los estados de crecimiento del cultivo.

#### Estabilidad del rendimiento de grano

Para Córdova (1991), el principal objetivo en el mejoramiento de maíz es la estabilidad del rendimiento o la respuesta consistente de los híbridos a condiciones óptimas y sub óptimas. Señala que rendimientos sostenidos y duraderos sólo se pueden lograr a través del desarrollo de germoplasma cuya respuesta sea consistente a través de ambientes marginales

y que a su vez respondan positivamente a ambientes favorables. Cuando una serie de genotipos se evalúan a través de años y localidades, el ambiente consiste en numerosos factores físicos, químicos y biológicos que actúan independientemente e interactúan entre ellos.

Los centros internacionales como CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento en Maíz y Trigo) han otorgado una alta prioridad al desarrollo de variedades de maíz de alto rendimiento y alta estabilidad de rendimiento en condiciones de sequía, debido a que una alta proporción del cultivo está sometido a este tipo de estrés, especialmente en ambientes tropicales (Bolaños y Edmeades, 1996).

Tollenaar y Lee (2002) señalan que la mejora genética de rendimiento de maíz en Estados Unidos está asociada al aumento a la tolerancia al estrés, y especulan que esto se debería al resultado de una selección por estabilidad de rendimiento de grano, más que a un aumento del rendimiento potencial debido a heterosis o vigor híbrido. Esta forma de selección ha conducido a un cambio en la evaluación de los híbridos por parte de los fitomejoradores, quienes han reemplazado los ambientes de alto rendimiento por una mayor cantidad de ambientes, distribuidos en un mayor número de localidades y años de cultivo, representando situaciones de estrés probables a nivel comercial. Este tipo de mejoramiento permite identificar genotipos de comportamiento superior en ambientes pobres y ricos.

Se ha asociado comúnmente el alto rendimiento de los híbridos de maíz a una baja estabilidad de rendimiento, sin embargo, estudios realizados con una amplia gama de híbridos liberados entre los años 1930 a 1990 en Estados Unidos, demuestran que, a pesar de haber una suave tendencia hacia una relación inversa entre rendimiento medio y estabilidad de rendimiento, ambos parámetros no son mutuamente excluyentes, encontrándose híbridos estables con un alto rendimiento medio de granos (Tollenaar y Lee, 2002).

La interacción genotipo-ambiente (GxA) tiene gran importancia en la evaluación de cultivares debido a que las diferencias entre ambientes puede cambiar la magnitud de la respuesta relativa de éstos en ambientes contrastantes (Córdova, 1991). El autor señala además que una evaluación del comportamiento de cultivares adaptados a ambientes limitantes y potenciales, debe involucrar localidades en la que la magnitud de la incidencia de factores adversos bióticos y abióticos contribuya a reducir la producción. Romay *et al.* (2010), también señalan que el rendimiento como la estabilidad de rendimiento deben ser considerados en los programas de mejoramiento cuando la interacción GxA es significativa.

### **Análisis de la estabilidad del rendimiento**

La estabilidad del rendimiento se define como la habilidad de un genotipo para mantener un comportamiento en una amplia gama de ambientes (Tollenaar y Lee, 2002). Para determinar este carácter, los centros experimentales prueban los híbridos en estaciones experimentales y en campos de agricultores, para simular las condiciones reales a las que

estarán expuestos, de forma de probar su estabilidad en una amplia diversidad de ambientes (García *et al.*, 2009; Gordón-Mendoza *et al.*, 2010 ; Sharma *et al.*, 2008). De los resultados de los distintos ensayos se obtiene una ecuación de regresión para cada híbrido sobre el promedio de rendimiento de todos los híbridos en cada uno de los ambientes o índice ambiental. De esta forma se obtiene una gráfica con rectas cuya pendiente indica la estabilidad del material en estudio: pendiente mayor a 1 representa híbridos de baja estabilidad o inestables con respecto al promedio y pendiente menor a 1 representa híbridos estables (Finlay y Wilkinson, 1963; Eberhart y Russell, 1966).

Otra herramienta estadística utilizada para determinar la estabilidad de rendimiento de los genotipos es el modelo de regresión de sitios (SREG), que se utiliza para analizar datos provenientes de ensayos multiambientales comparativos de rendimiento, en especial cuando el ambiente (A) es la fuente de variación más importante en relación a la contribución del genotipo (G) y la interacción genotipo-ambiente GxA (Ibañez *et al.*, 2006). Este modelo proporciona un análisis gráfico del comportamiento (rendimiento y estabilidad) de los genotipos denominado biplot GGE, que permite identificar el genotipo de mayor potencial en cada ambiente y agrupar genotipos y ambientes con patrones similares de respuesta. Alwala (2010) señala que, el gráfico biplot GGE basado en datos de ensayos multiambientales de un año, serviría más que el análisis de regresión de Eberhart y Russell (1966) en la identificación de híbridos estables y de alto rendimiento.

Debido a la común incidencia de la sequía y alta pérdida de rendimiento, la selección para mejorar el comportamiento de los híbridos bajo esta condición ha sido de gran prioridad tanto en los centros de investigación (Bolaños y Edmeades, 1996; Bänziger *et al.*, 2006) como en los programas de mejoramiento nacionales y de compañías privadas (Vasal *et al.*, 1997; Zaidi *et al.*, 2004).

### **Tolerancia al estrés**

La tolerancia al estrés hídrico está asociada a una mayor partición de biomasa a la mazorca en desarrollo, de modo que el índice de cosecha y el rendimiento de granos son mayores en aquellas poblaciones seleccionadas bajo condiciones de estrés hídrico (Edmeades *et al.*, 1999), con respecto a las poblaciones originales. Al seleccionar por tolerancia a este tipo de estrés, la ganancia obtenida en rendimiento de grano se explica por un mayor número de mazorcas planta<sup>-1</sup> y un mayor número de granos mazorca<sup>-1</sup> que las poblaciones originales (Monneveux *et al.*, 2006).

El rendimiento en grano se afecta más cuando el estrés ocurre durante la floración del maíz, causando importantes reducciones del número de granos (Otegui *et al.*, 1995; Edmeades *et al.*, 1999). Por esta razón, las poblaciones de floración temprana o genotipos más precoces son capaces de escapar al estrés hídrico severo, logrando un mayor rendimiento que genotipos más tardíos, a pesar que estos últimos logran mayor rendimiento en condiciones de riego.

La selección bajo sequía también conduce a ganancias de rendimiento en condiciones de

baja disponibilidad nitrógeno (Monneveux *et al.*, 2006), lo que sugiere un mecanismo común de tolerancia al estrés (Tollenaar and Lee, 2002).

Para lograr mejorar el rendimiento de granos y la estabilidad del rendimiento en maíz, se debe seleccionar por tolerancia a limitantes abióticas en el ambiente deseado, principalmente con déficit de agua y nitrógeno (Zaidi *et al.*, 2004). Bänzinger *et al.* (2000) mejoraron el comportamiento de los híbridos de maíz en ambientes de bajo nitrógeno seleccionando el material en ambientes de estrés hídrico.

### **Uso de caracteres secundarios en la selección**

Para la selección de genotipos en condiciones de sequía o estrés hídrico y estrés de bajo nitrógeno, el uso de caracteres secundarios otorga una mayor eficiencia a la selección debido a la mayor heredabilidad que algunos de estos caracteres poseen en ambientes de estrés, en comparación con el rendimiento de grano (Edmeades *et al.*, 1997), mejorando además la precisión para seleccionar genotipos tolerantes (Bänzinger *et al.*, 2000).

Uno de los caracteres secundarios más utilizados en los programas de selección para tolerancia a estrés en maíz, es el intervalo de tiempo seda-antesis, conocido como ASI (su sigla del inglés). Este carácter se caracteriza por poseer una heredabilidad alta bajo estrés severo en floración, y bajo estas mismas condiciones está altamente relacionado con rendimiento de grano, carácter de reconocida baja heredabilidad (Bänzinger *et al.*, 2000).

En condiciones que inhiben el crecimiento de la planta, la floración femenina se retrasa en relación a la masculina, resultando en un aumento del ASI o del tiempo que separa la emisión de sedas con la emisión de los granos de polen (Borrás *et al.*, 2007). Esta asincronía es parcialmente responsable de una reducción del número de granos en la punta de la mazorca, característica que difiere entre los híbridos (Cárcova *et al.*, 2003). Según estudios realizados por Bolaños y Edmeades (1993), el único carácter secundario que registró un cambio significativo cuando se seleccionó por mayor rendimiento de granos y más estables, fue la reducción del ASI bajo sequía, asociado con un mayor número de granos  $m^{-2}$ . Según Vasal *et al.* (1997), esto ocurre con prácticamente todos los tipos de estrés, como sequía, baja fertilidad de nitrógeno y fósforo, exceso de humedad, suelos ácidos, deficiencias de hierro, estrés bióticos de prefloración y alta densidad de plantas.

Bänzinger *et al.* (2000) propusieron el ASI y la senescencia foliar como caracteres secundarios para mejoramiento de maíz para ambientes de bajo nitrógeno, encontrando que el 85% del aborto de granos ocurre durante los primeros 20 días posterior a la floración en ambientes con bajo nitrógeno en el suelo. Respuesta similar se observó en ambientes con déficit hídrico, donde un 75% de los granos abortados fue durante los 20 días posteriores a la floración (Monneveux *et al.*, 2006). Además en estos ensayos, el aumento de ASI produjo un aborto de 40 óvulos por cada día de aumento de este intervalo ( $r = 0,674$ ,  $p \leq 0,05$ ), durante los 30 días de llenado de grano. Tollenaar *et al.* (2002) señalan que podría haber un mecanismo común que mejora la tolerancia a una variedad de estreses, lo que es confirmado por observaciones realizadas por Bänzinger *et al.* (1999) sobre poblaciones de

maíces tropicales de media estación seleccionadas para rendimiento bajo estrés hídrico, los cuales también mostraron aumentos en la tolerancia a estrés de nitrógeno. Estos mecanismos se relacionarían con cambios morfológicos y fisiológicos que ocurren en las poblaciones seleccionadas bajo estrés hídrico y que representarían una ventaja en condiciones de bajo nitrógeno, como son un mayor largo de raíces y mayor biomasa, retraso en la senescencia foliar y movilización de nitrógeno desde las hojas hacia los granos (Bänziger *et al.*, 1999).

Edmeades *et al.* (1997), observaron una fuerte dependencia del rendimiento de grano bajo estrés con ASI, cerca del 25 al 35% de la variación en rendimiento de grano bajo condiciones de estrés se asoció con la variación de ASI, dejando un 65 a 75% de esta variación para ser explicada por otras causas. Chapman y Edmeades (1999), confirmaron el potencial uso del ASI para identificar genotipos tolerantes a estrés, encontrando una fuerte correlación entre esta característica y el rendimiento de granos, mazorcas planta<sup>-1</sup> y granos mazorca<sup>-1</sup> ( $r = -0,89, -0,93, -0,90; p \leq 0,001$ ).

Bänziger *et al.* (2002) plantean que la tolerancia a estrés hídrico provoca cambios morfológicos y fisiológicos que aumentan el rendimiento y la estabilidad de rendimiento no sólo bajo esta condición, sino también a través de diferentes niveles de nitrógeno disponible. Al seleccionar bajo sequía, los autores lograron también un aumento consistente en el rendimiento de grano en ambientes con bajo nivel de nitrógeno debido tanto al aumento del número de mazorcas planta<sup>-1</sup> como el peso de los granos. Los autores asociaron además, el mayor número de mazorcas planta<sup>-1</sup> con un ASI más corto, seleccionado en los ciclos de sequía y que fue menor en condiciones de bajo nitrógeno.

Los estudios mencionados anteriormente se han realizado en maíces tropicales o cultivados en condiciones de secano y no se dispone de antecedentes que indiquen la relación entre ASI y la estabilidad de rendimiento en maíces de alto rendimiento como los utilizados en Chile, por lo que es necesario realizarlos.

## LITERATURA CITADA

- Andrade, F.H.; L. Echarte; R. Rizzalli; A.Della Maggiora and M. Casanovas. 2002. Kernel number prediction in maize under nitrogen or water stress. *Crop Science* 42:1147-1179.
- Andrade, F. H. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Boletín técnico 106. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Buenos Aires, Argentina.
- Alwala, S.; T. Kwolek; M. McPherson; J. Pellow and D. Meyer. 2010. A comprehensive comparison between Eberhart and Russel joint regression and GGE biplot analyses to identify stable and high yielding maize hybrids. *Field Crops Research* 119:225-230.
- Balzarini, M.; C. Bruno y A. Arroyo. 2005. Análisis de Ensayos Agrícolas Multiambientales. Ejemplos en Info - Gen. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. 141p.
- Bänziger, M.; P. Setimela, D. Hodson and B. Vivek. 2006. Breeding for improved abiotic stress tolerance in maize adapted to southern Africa. *Agricultural Water Management* 80: 212-224.
- Bänziger, M.; G.O. Edmeades and H.R. Laffitte. 2002. Physiological mechanisms contributing to the increased N stress tolerance of tropical maize selected for drought tolerance. *Field Crops Research* 75: 223-233.
- Bänziger, M.; G.O. Edmeades; D. Beck and M. Bellon. 2000. Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize. From theory to practice. CIMMYT, México. pp. 39-46.
- Bänziger, M.; G.O. Edmeades and H.R. Laffitte. 1999. Selection for drought tolerance increases maize yields across a range of nitrogen levels. *Crop Science* 39:1035-1040.
- Betrán, F. J.; D. Beck; M. Bänzinger and G.O. Edmeades. 2003. Secondary traits in parental inbreds and hybrids under stress and non-stress environments in tropical maize. *Field Crops Research* 83:51-65.
- Bolaños, J. and G.O. Edmeades. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research* 48:65-80.
- Borrás, L.; M.E. Westgate; P. Astini and L. Echarte. 2007. Coupling time to silking with plant growth rate in maize. *Field Crops Research* 102: 73-85.
- Chapman, S.C. and G.O. Edmeades. 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: II. Direct and correlated responses among secondary traits. *Crop Science* 39: 1315-1324.

Cárcova, J.; B. Andrieu and M.E. Otegui. 2003. Silk elongation in maize: relationship with flower development and pollination. *Crop Science* 43:914-920.

Córdova, H. 1991. Estimación de parámetros de estabilidad para determinar la respuesta de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) a ambientes contrastantes de Centro América, Panamá y México. *Agronomía Mesoamericana* 2: 01-10.

Eberhart, S.A. and W.A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6: 36-40.

Edmeades, G.O., M. Bänzinger, D. Beck, J. Bolaños and A. Ortega. 1997. Development and *per se* performance of CIMMYT maize populations as drought-tolerant sources. P. 254-262. In G.O. Edmeades, M. Bänzinger, H.R. Mickelson and C.B. Peña-Valdivia, (eds.). 1997. Developing drought and low-N tolerance maize. Proceedings of a symposium, march 25-29, 1996. CIMMYT, El Batán, Mexico. Mexico, D.F.:CIMMYT.

Edmeades, G.O., J. Bolaños and S.C. Chapman. 1997. Value of secondary traits selecting for drought tolerance in tropical maize. P. 222-234. In G.O. Edmeades, G.O., Bänzinger, M., H.R. Mickelson and C.B. Peña-Valdivia, (eds.). 1997. Developing drought and low-N tolerance maize. Proceedings of a symposium, march 25-29, 1996. CIMMYT, El Batán, Mexico. Mexico, D.F.:CIMMYT.

Edmeades, G.O.; J. Bolaños; S.C. Chapman; H.R. Lafite and M. Bänzinger. 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: I. Gains in biomass, grain yield and harvest index. *Crop Science* 39: 1306-1315.

Escobar, M.; M. Berti; I. Matus; M. Tapia and B. Johnson. 2011. Genotype x Environment interaction in canola (*Brassica napus* L.) seed yield in Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 71(2):175-186.

Faiguenbaum, H. 2003. Maíz. (cap 5, pp. 137-218). *En su* : Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile. Chile: Vivaldi y Asociados, 760p.

FAO (Food and agriculture organization). 2013. Recuperado en: <<http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>>. Consultado el: 01 de agosto de 2014.

Finlay K.W. and G.N. Wilkinson. 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research* 14: 742-754.

García, P.J.; S.R. Cabrera; A.A. Pérez; R.J. Silva; R.M. Álvarez; C.A. Marín. *et. al.* 2009. Estabilidad del rendimiento y potencial agronómico de cultivares de maíz de endospermo normal y qpm en zonas agroecológicas de Venezuela. *Agronomía Tropical* 59(4): 433-443.

Gordón-Mendoza, R.; J. Franco-Barrera y L. Camargo-Buitrago. 2010. Adaptabilidad y estabilidad de 20 variedades de maíz, Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 21(1):11-20.

Ibañez, M.A.; M.M. Cavanagh; N.C. Bonamico y M.A. di Renzo. 2006. Análisis gráfico

mediante biplot del comportamiento de híbridos de maíz. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 35: 83-93.

INE (Instituto nacional de estadísticas). 2013. Santiago, Chile. Recuperado en: <[http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario\\_de\\_publicaciones/pdf/agropecuarias\\_informe\\_anual\\_2013.pdf](http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario_de_publicaciones/pdf/agropecuarias_informe_anual_2013.pdf)>. Consultado el: 08 de enero de 2015.

Monneveux, P.; C. Sánchez; D. Beck and G.O. Edmeades. 2006. Drought tolerance improvement in tropical maize source populations: evidence of progress. *Crop Science* 46:180-191.

Moser, S. B., B. Feil, S. Jampatong and P. Stamp. 2006. Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. *Agricultural Water Management* 81: 41-58.

Novoa, R. y S. Villaseca. 1989. Mapa Agroclimático de Chile. INIA. Proyecto Agrometeorológico.

Otegui, M.E., F.H. Andrade and E.E. Suero. 1995. Growth, water use and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research* 40: 87-94.

Romay, M.C., R.A. Malvar, L. Campo, A. Alvarez, J.A. Moreno-González, A. Ordás and P. Revilla. 2010. Climatic and genotypic effects for grain yield in maize under stress conditions. *Crop Science* 50:51-58.

Setimela, P.S.; V. Vivek; M. Bänzinger; J. Crossa and F. Maiden. 2007. Evaluation of early to medium maturing open pollinated maize varieties in SAC region biplot based on the SREG model. *Field Crops Research* 103:161-169.

Sharma D.; R.C.Sharma; R. Dhakal; N.B. Dhami; D.B. Gurung; R.B. Katuwal. *et. al.* 2008. Performance stability of maize genotypes across diverse hill environments in Nepal. *Euphytica* 164: 689-698.

Tollenaar, M. and E.A. Lee. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. *Field Crops Research* 75: 161-169.

Vasal, S.K., H. Córdova, D.L. Beck and G.O. Edmeades. 1997. Choices among breeding procedures and strategies for developing stress tolerant maize germplasm. P. 338-347. In G.O. Edmeades, G.O., M. Bänzinger, H.R. Mickelson and C.B. Peña-Valdivia, (eds.). 1997. Developing drought and low-N tolerance maize. Proceedings of a symposium, march 25-29, 1996. CIMMYT, El Batán, Mexico. Mexico, D.F.:CIMMYT.

Westgate, M.E. and J.S. Boyer. 1986. Reproduction at low silk and pollen water potentials in maize. *Crop Science* 26:951-956.

Yan, W. and N. A. Tinker. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles



and applications. *Canadian Journal Plant Science* 86: 623-645.

Zaidi, P. H., Srinivasan, G., H.S. Córdova and C. Sanchez. 2004. Gains from improvement for mid-season drought tolerance in tropical maize (*Zea mays* L.). *Field Crops Research* 89: 135-152.

Zinselmeier, C.; M.J. Lauer and J.S. Boyer. 1995. Reversing drought-induced losses in grain yield: sucrose maintains embryo growth in maize. *Crop Science* 35:1390-1400.

## CAPÍTULO II: ARTÍCULO CIENTÍFICO

### EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE SIETE HÍBRIDOS DE MAÍZ DE GRANO Y SU RELACION CON EL INTERVALO SEDA- ANTESIS

#### RESUMEN

La estabilidad del rendimiento en maíz tropical es una medida utilizada para determinar la adaptación que tienen los híbridos a una amplia gama de ambientes, este indicador se asocia al intervalo seda-antesís (ASI), el que a su vez se asocia a tolerancia a estrés. Esto no ha sido evaluado en los híbridos de alto rendimiento comercializados en Chile. Con el objetivo de analizar la estabilidad del rendimiento y su asociación con el ASI en siete híbridos de maíz, se realizaron 13 experimentos en los años 2011 y 2012 en cuatro localidades de la zona central. El rendimiento medio de los experimentos fluctuó entre 4.594 kg ha<sup>-1</sup> y 16.572 kg ha<sup>-1</sup>, y hubo interacción híbrido x ambiente. En el análisis de regresión hubo cuatro híbridos estables: Río Maipo, NK703, Lerma y Río Negro, destacándose el híbrido NK 703 por tener un rendimiento de granos superior al promedio en la mayoría de los ambientes. En contraste, los híbridos Río Cisnes y Río Trancura tuvieron un rendimiento inestable y a su vez los mayores valores de ASI, variable que en el análisis de componentes principales (ACP) se asoció positivamente al coeficiente de regresión originado de la prueba de estabilidad utilizado como indicador de estabilidad ( $R^2=0,87$ ). Por lo tanto la mayor estabilidad de los híbridos comerciales utilizados en este ensayo se asoció a un menor ASI y la selección de híbridos como NK703, que destaca por su alto rendimiento y alta estabilidad, permitirían disminuir la brecha de rendimiento entre los productores y las estaciones experimentales.

#### Palabras claves

SREG- Interacción genotipo x ambiente – Mega ambientes

# EVALUATION OF YIELD STABILITY AND ANTHESIS-SILKING INTERVAL OF HIGH YIELDING MAIZE HYBRIDS

## ABSTRACT

The yield stability in tropical maize is a measure used to determine the adaptation that hybrids have to a wide range of environments. This indicator is associated with the anthesis silking interval (ASI), which in turn is associated with stress tolerance. The ASI value has not been evaluated in the high-yielding hybrids sold in Chile. In order to analyze the stability of performance and its association to ASI, seven maize hybrids were planted in 13 experiments in 2011 and 2012 at four locations in central Chile. The mean yield of the experiments ranged from 4,594 kg ha<sup>-1</sup> to 16,572 kg ha<sup>-1</sup>, and hybrid x environment interaction was found. Using regression analysis, four stable hybrids were identified: Río Maipo, NK703, Lerma and Río Negro, the hybrid NK 703 having an above average grain yield in most environments. By contrast, the hybrids Río Cisnes and Río Trancura had unstable performance and high ASI values. The ASI values were positively associated with the regression coefficient originated from the stability test ( $R^2 = 0.87$ ) in a PCA analysis. Therefore, the increased stability of the commercial hybrids used in this trial was associated to a lower ASI. It is proposed that the selection of hybrids like NK703, having high performance and high stability, would reduce the yielding gap between farmers and experiment station.

### Keywords

SREG- genotype x environment interaction - mega environments

## INTRODUCCIÓN

Los híbridos de maíz utilizados en Chile se caracterizan por su alto rendimiento, siendo la zona central una de las áreas donde se obtienen los mayores rendimientos globales. Andrade (1992) informó un rendimiento promedio de  $18.450 \text{ kg ha}^{-1}$  para Chile central, explicado por la alta radiación solar existente en la zona y el alto cociente fototermal, que determinan una alta tasa de crecimiento. Sin embargo, existe una gran variabilidad en el rendimiento obtenido por los productores, en que la media nacional no supera  $12.000 \text{ kg ha}^{-1}$  (INE, 2013) y está muy distante de los resultados obtenidos en los ensayos realizados por las distintas compañías comercializadoras, que supera  $20.000 \text{ kg ha}^{-1}$  (Faiguenbaum, 2003). Esta gran variabilidad del rendimiento de maíz se asocia principalmente a falta de riego y deficiencias de nitrógeno durante la floración y llenado de granos (Zaidi *et al.*, 2004).

En Chile no se conoce la estabilidad de los híbridos a través de distintas localidades y condiciones de manejo, lo que permitiría determinar si existen algunos que tengan un comportamiento más estable para las distintas condiciones de cultivo, como para ser recomendados cuando las condiciones para el desarrollo del cultivo no sean las óptimas, considerando que el cultivar ideal podría ser aquel con un alto rendimiento de granos y una alta estabilidad del rendimiento (Yan *et al.*, 2007).

La estabilidad del rendimiento es una herramienta muy utilizada por los centros de investigación de maíces tropicales como una medida para determinar la adaptación que tienen los híbridos a una amplia gama de ambientes (Setimela *et al.*, 2007). Esto ha permitido que los híbridos modernos de maíz alcancen mayores rendimientos que poblaciones antiguas, en un amplio rango de ambientes contrastantes (Tollenar y Lee, 2002). Para esto, se deben montar ensayos multi-ambientales en distintas zonas de cultivo y condiciones de manejo con el objeto de identificar los mejores cultivares para una localidad determinada y determinar si las localidades pueden agruparse en mega-ambientes (Yan *et al.*, 2000).

La estabilidad de rendimiento es además un indicador que se asocia al intervalo sedantes (ASI), el que a su vez se asocia a tolerancia a estrés. Se ha demostrado que la selección en ambientes con estrés hídrico o de nitrógeno en maíces tropicales permite seleccionar materiales que tendrán un mejor comportamiento a distintos niveles de estrés que aquellos materiales sólo seleccionados en ambientes óptimos (Bäzinger *et al.* (2000). La selección por mejor comportamiento bajo sequía en poblaciones tropicales ha sido acompañada de importantes reducciones del ASI (Bolaños y Edmeades, 1993; Bolaños y Edmeades, 1996), valor que se correlaciona con mayor producción de granos y menor proporción de plantas estériles, lo que explicaría el mayor rendimiento de grano alcanzado por los híbridos de menor ASI.

En los híbridos comercializados en Chile que se caracterizan por su alto rendimiento potencial (Faiguenbaum, 2003), no ha sido evaluada la estabilidad del rendimiento, siendo de gran interés la selección de material cuyo comportamiento sea superior tanto en ambientes limitantes (con deficiencias hídricas o nutricionales principalmente) o

potenciales (Córdova, 1992).Lo mismo ocurre con el ASI, carácter muy estudiado en maíces tropicales y del cual no se dispone información para los híbridos utilizados en Chile.

El principal objetivo de este estudio fue evaluar la estabilidad del rendimiento de granos de los híbridos utilizado en el valle central de Chile (Región Metropolitana, VI y VII). Para ello se utilizaron híbridos de maíz de ciclo intermedio, que corresponde a los híbridos recomendados para la zona central de Chile.

## **HIPÓTESIS**

- Los híbridos comerciales utilizados en Chile con rendimiento estable tienen un menor intervalo seda-antesís (ASI).

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Analizar la estabilidad del rendimiento y su asociación con el intervalo seda-antesís de siete híbridos comerciales de maíz grano usados en Chile.

### **Objetivos específicos**

- Determinar el rendimiento y componentes de rendimiento de siete híbridos comerciales de maíz para grano en distintos ambientes de la zona central de Chile.
- Determinar la estabilidad del rendimiento de siete híbridos de maíz para grano.
- Determinar el intervalo seda-antesís (ASI) de siete híbridos de maíz cultivados en ambientes con diferentes niveles de estrés hídrico y estrés de nitrógeno (sin y con aplicación de nitrógeno).
- Analizar la asociación existente entre ASI y la estabilidad del rendimiento de los híbridos estudiados.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Híbridos

Se evaluaron 7 híbridos de maíz de distintas compañías productoras/comercializadoras de semilla, todos de precocidad intermedia, los que se presentan en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Híbridos evaluados en los ensayos.

Nombre Comercial	Compañía	Precocidad
DK 619	Anasac	Intermedia
Lerma	Winter Seed	Intermedia
NK 703	Syngenta	Intermedia
Río Cisnes	Winter Seed	Intermedia
Río Maipo	Winter Seed	Intermedia
Río Negro	Winter Seed	Intermedia
Río Trancura	Winter Seed	Intermedia

### Diseño Experimental

Los tratamientos tuvieron un diseño experimental de bloques completos aleatorizados con 4 repeticiones. El tamaño de la parcela fue de 18 m<sup>2</sup> (cuatro hileras distanciadas a 0,75 m x 6 m de largo). Entre cada parcela o unidad experimental se dejó un camino de 1 m. La unidad de observación donde se realizaron las mediciones correspondió a las 2 hileras centrales por 4 m de largo.

### Localidades

Los ensayos se sembraron en cuatro sitios experimentales de la zona centro y centro sur de Chile, detallados a continuación:

- Estación Experimental Antumapu de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, Santiago (33°34' 4,09" LS y 70°38' 12,02" LO, altitud de 604 m). El régimen térmico de esta localidad se caracteriza por una temperatura media anual de 13,9°C, con máxima media del mes más cálido (enero) de 29,0°C y mínima del mes más frío (julio) de 2,8°C. El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 370 mm y una evaporación de bandeja de 1.374 mm anuales con un máximo mensual en enero de 238,5 mm (Novoa y Villaseca, 1989).

- Estación Experimental María Paz de la Sociedad Agrícola Winter Seed Ltda., km 1 Camino La Punta, San Francisco de Mostazal, Región de O'Higgins (34°00'17,50" LS y 70° 41' 34,88" LO, altitud de 502 m). El régimen térmico de esta localidad se caracteriza por una temperatura media anual de 13,7°C, con máxima media del mes más cálido (enero) de 28,1°C y mínima del mes más frío (julio) de 2,9°C. El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 582 mm y una evaporación de bandeja de 1.230 mm anuales con un máximo mensual en enero de 230 mm (Novoa y Villaseca, 1989).
- Localidad de Nancagua, provincia de Colchagua, Región de O'Higgins (34° 39,6' 76" LS y 70° 07' 54" LO, altitud de 242 m). El régimen térmico de esta localidad se caracteriza por una temperatura media anual de 14,9°C, con máxima media del mes más cálido (enero) de 27,7°C y mínima del mes más frío (julio) de 5,8°C. El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 439 mm y una evaporación de bandeja de 1.730 mm anuales con un máximo mensual en enero de 292 mm (Novoa y Villaseca, 1989).
- Estación Experimental San Clemente, provincia del Maule, Región del Maule (35° 34'59,22" LS y 71° 25' 52,87" LO, altitud de 256 m). El régimen térmico de esta localidad se caracteriza por una temperatura media anual de 14,9°C, con máxima media del mes más cálido (enero) de 30,8°C y mínima del mes más frío (julio) de 3,8°C. El régimen hídrico se caracteriza por una precipitación anual de 735 mm y una evaporación de bandeja de 1.108 mm anuales con un máximo mensual en diciembre de 215 mm (Novoa y Villaseca, 1989).

## **Ambientes**

Los ensayos se evaluaron en 2 temporadas: 2011-12 y 2012-13, y con el fin de generar mayor variabilidad ambiental, algunos ensayos fueron manejados sin fertilización nitrogenada y con restricción de riego. Cada una de estas condiciones se consideró como un ambiente, generando un total de 13 ambientes. Los ambientes sin aplicación de nitrógeno o riego se realizaron con el fin de tener ambientes limitantes, es decir, de bajo rendimiento para el conjunto de los híbridos y a su vez, retrasar la emisión de sedas con respecto a la emisión de anteras, producto del estrés, para determinar diferencias de ASI entre los híbridos. En los ambientes con reducción de riego, este se realizó 20 días antes de la floración para llegar a esta misma con un nivel de déficit suficiente para provocar un retraso en la emisión de sedas con respecto a la emisión de polen (Bazinger *et al.*, 2002). En el Cuadro 2 se detallan los ambientes correspondientes a las 2 temporadas en que se realizaron los ensayos.



**Cuadro 2.** Descripción de los ambientes en que se realizaron los ensayos.

Localidad	Año	Ambiente	Riego		Nitrógeno (kg ha <sup>-1</sup> )
			(%)	Período	
Antumapu	2012	A_12	100	Completo	500
Nancagua	2012	N_12	100	Completo	500
Mostazal	2012	M_12	100	Completo	500
Talca	2012	T_12	100	Completo	500
Antumapu	2012	A_12-N	100	Completo	0
Talca	2012	T_12 -N	100	Completo	0
Mostazal	2012	M_12-Rpc	0	20 DAF - 20DDF	500
Mostazal	2013	M_13	100	Completo	500
Nancagua	2013	N_13	100	Completo	500
Talca	2013	T_13	100	Completo	500
Mostazal	2013	M_13 - Rpc	0	20 DAF-20 DDF	500
Mostazal	2013	M_13 -Rllg	50	20 DAF-MF	500
Mostazal	2013	M_13-N	100	Completo	0

DAF: Días antes de floración. DDF: Días después de floración. MF: Madurez fisiológica. 20 DAF-20 DDF o Rpc: corresponde a período crítico del maíz (Grant *et al.*, 1989). 20 DAF-MF o Rllg: Abarca el período crítico y el llenado de granos. A: Antumapu. N: Nancagua. M: Mostazal. T: Talca. Mostazal 2013; N\_13: Nancagua 2013; M\_12: Mostazal 2012; N\_12: Nancagua 2012; T\_13: Talca 2013; T\_12: Talca 2012; A\_12: Antumapu 2012; T\_12-N: Talca 2012 sin nitrógeno; M\_13-N: Mostazal 2013 sin nitrógeno; M\_13-Rllg: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a madurez fisiológica; M\_13-Rpc: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración; A\_12-N: Antumapu 2012 sin nitrógeno; M\_12-Rpc: Mostazal 2012 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración.

Con el fin de obtener ambientes con fuerte estrés hídrico y lograr un aumento en el ASI, en los ambientes M\_12-Rpc y M\_13 - Rpc (Mostazal 2012 y 2013 sin riego en período crítico), no se aplicó agua durante los 20 días antes de floración y 20 días después de floración. En el ambiente M\_13 -Rllg, el riego se redujo a un 50% de la evapotranspiración de cultivo entre 20 días antes de floración y madurez fisiológica. El momento en que se aplicó la reducción de riego, se basó en la precocidad de los híbridos y las unidades térmicas acumuladas, de modo de provocar el estrés durante el período más sensible del maíz, es decir, floración y llenado de grano (Grant *et al.*, 1989).

### Manejo del cultivo

Previo a la siembra se aplicó 1,3 L ha<sup>-1</sup> de Dual Gold 960 EC (S-Metolacoloro) para el control de malezas anuales de hoja ancha y angosta y de 5 L ha<sup>-1</sup> de Lorsban 4 E (clorpirifos) para el control de insectos del suelo. En el momento de la siembra se aplicó 600 kg de una mezcla fertilizante N-P-K (17-20-20), en todos los tratamientos, exceptuando los tratamientos sin fertilización nitrogenada. En el momento de la aporca (estado V7-V8) se realizó una aplicación de 300 kg N ha<sup>-1</sup> en forma de urea en los tratamientos con aplicación nitrogenada.

La dosis de nitrógeno fue la misma para todos los ambientes con nitrógeno, basado en el

cálculo de Rodríguez *et al.*, (2001) y un rendimiento de 20.000 kg ha<sup>-1</sup>.

$$\text{Dosis de N} = \frac{(\text{demanda de N}) - (\text{suministro de suelo})}{\text{eficiencia de la fertilización N}}$$

Se consideró un aporte del suelo de 120 kg N ha<sup>-1</sup>, correspondiente al aporte medio de un suelo de alto rendimiento con incorporación de rastrojos, Rodríguez *et al.*, (2001).

Se controló gusanos del suelo en postemergencia con 0,2 L ha<sup>-1</sup> de Engeo 247 SC (thiametoxam + lambdacihalotrina) al atardecer. Para el control de malezas de hoja ancha o de hoja angosta en sus primeros estados se aplicó 2 L atrazina ha<sup>-1</sup> y 2 L ha<sup>-1</sup> aceite miscible.

La siembra se realizó en forma manual en un suelo previamente arado, rastreado, fertilizado y encamado. La profundidad de siembra fue de 5 a 6 cm, con una dosis de 10 semillas m<sup>-1</sup>. Para lograr la población aproximada de 98000 plantas ha<sup>-1</sup> se realizó un raleo que dejó 7,4 plantas m<sup>-1</sup>. Esta práctica se realizó cuando las plantas tenían 2 a 3 hojas expandidas.

La cosecha se realizó cuando la humedad promedio de los granos de las hileras bordes alcanzó entre 14 y 16%.

## Mediciones

### Mediciones en el cultivo

**Emergencia:** número de días entre siembra y cuando el 50% de las plantas tuvo el coleoptilo completamente visible. Se realizó conteos durante el período de emergencia hasta que todos los tratamientos alcanzaron este estado.

**Floración femenina:** número de días entre siembra y el momento en que el 50 % de las plantas tuvo a lo menos 1 estilo visible (Borrás *et al.*, 2007). Se realizaron observaciones diarias de emisión de estilos hasta que todos los tratamientos alcanzaron este estado.

**Floración masculina:** número de días entre siembra y momento en que el 50 % de las plantas tuvo a lo menos 1 antera visible (Borrás *et al.*, 2007). Se realizaron observaciones diarias de emisión de anteras hasta que todos los tratamientos alcanzaron este estado.

**Madurez fisiológica:** número de días entre siembra y cuándo los granos alcanzaron una humedad de 37%. Se realizaron mediciones de humedad en forma semanal desde 50 días después de floración con un determinador de humedad Motomco modelo 919, México.

**Biomasa:** La unidad de muestreo correspondió a las 2 hileras centrales por 4 m de largo. Posterior a la cosecha de las mazorcas, las plantas se cortaron desde su base y fueron pesadas para determinar la materia verde. Luego se picaron para tomar una muestra y determinar el contenido de humedad y a su vez determinar la materia seca total (Moser *et*

*al.*, 2006).

**Rendimiento de grano:** La unidad de muestreo correspondió a las 2 hileras centrales por 4 m de largo. Las mazorcas cosechadas de cada unidad experimental fueron desgranadas y los granos fueron pesados. La información se expresó en  $\text{kg ha}^{-1}$  a 14,5 % de humedad. Las corontas se pesaron para incluirlas en la materia verde.

**Número de mazorcas planta<sup>-1</sup>:** previo a la cosecha se realizó un conteo de las plantas por hilera y el número de mazorcas cosechadas.

**Plantas infértiles:** Previo a la cosecha se realizó un conteo del número de plantas sin mazorcas.

**Intervalo seda-anteses (ASI):** Mediante las mediciones de floración masculina y femenina se determinó el ASI, correspondiente a la diferencia en días entre la floración femenina y masculina ( $\text{ASI} = \text{días a 50\% sedas} - \text{días a 50\% anteses}$ ) (Bolaños y Edmeades, 1996).

**Humedad de granos a la cosecha:** Se determinó el % de humedad de una muestra de los granos cosechados con un determinador de humedad (modelo 919, Motomco, México).

**Peso de granos:** se contó 250 granos y se pesó en una balanza de precisión (AWS Analytic, USA).

**Granos hilera<sup>-1</sup>:** Se contó el número de granos a lo largo de la mazorca, desde la base hasta la punta en 10 mazorcas escogidas al azar.

**Hileras mazorca<sup>-1</sup>:** Se contó el número de hileras de grano de la mazorca en 10 mazorcas escogidas al azar.

## **Variables de Suelo**

Previo a la siembra, en cada sitio experimental se tomó una muestra de suelo para determinar contenido de materia orgánica, pH, conductividad eléctrica, contenido de nitrógeno, fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) y potasio ( $\text{K}_2\text{O}$ ). Los datos se presentan en el anexo XIV.

## **Análisis Estadístico**

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando el programas InfoStat (Infostat, 2008). Se verificó que los datos cumplieran los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas.

**Análisis combinado de varianza (ANDEVA):** Se realizó un análisis combinado de varianza para determinar si hubo interacción significativa entre los genotipos y los ambientes evaluados ( $\text{G} \times \text{A}$ ) y cuantificar la contribución del ambiente, el genotipo y de la

interacción GxA a la variabilidad total en cada una de las variables evaluadas. Se estimó además la proporción de la suma de cuadrados de cada fuente de variación con respecto a la variación total. El modelo estadístico fue el siguiente:

$$y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + A_j > B_{k(j)} + G_i A_j + \epsilon_{ijk}$$

dónde:  $y$  es la variable de respuesta,  $\mu$  es la media general,  $G$  es el efecto debido al genotipo,  $A$  es el efecto debido al ambiente,  $A > B$  es el efecto de los bloques anidados dentro de cada ambiente,  $G_i A_j$  es el efecto de la interacción entre los efectos de genotipo y ambiente,  $\epsilon$  es un término de error aleatorio.

**Análisis de estabilidad de genotipos:** Se realizó un análisis de estabilidad de rendimiento de grano mediante una regresión lineal simple del rendimiento de cada genotipo sobre un índice ambiental (IA). El índice ambiental, correspondió al rendimiento promedio de los 7 híbridos en cada uno de los 13 ambientes. Se obtuvo 7 regresiones lineales cuya pendiente fue considerada como indicador de la estabilidad de los híbridos (Eberhart y Russell, 1966).

**Modelo de efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI):** La ecuación correspondiente a este modelo lineal-bilineal para la respuesta de un genotipo en un ambiente dado puede expresarse de la siguiente manera (Crossa *et al.*, 1995; Crossa y Cornelius, 1997):

$$y = \mu + G_i + A_j + \sum_{n=1}^r \lambda_n \xi_{ni} \eta_{nj} + \rho_{ij} + \epsilon_{ij}$$

Donde  $G_i$  es el efecto del genotipo  $i$ ,  $A_j$  es el efecto del ambiente  $j$ ,  $\sum_{n=1}^r \lambda_n \xi_{ni} \eta_{nj}$  es la sumatoria de términos multiplicativos que modela la interacción GxA, compuesta por el parámetro de la interacción del  $j$ -ésimo ambiente, denotado por  $\eta_{nj}$ , del  $i$ -ésimo genotipo para la misma componente o eje, denotado por  $\xi_{ni}$  y el autovalor (medida de variación asociado al eje y denotado por  $\lambda_n$ ). El parámetro  $\rho_{ij}$  representa la porción del  $ij$ -ésimo término de interacción GxA no explicado por el modelo multiplicativo y  $\epsilon_{ij}$  es el término del error aleatorio. El término  $\xi_{ni}$  puede ser interpretado como sensibilidad genotípica a los factores ambientales latentes, los cuales son representados por  $\eta_{nj}$  en el  $j$ -ésimo ambiente.

**Modelo de regresión por sitios (Sites Regression Model o SREG):** Se realizó un análisis de regresión de sitios para determinar los híbridos de alto rendimiento y de alta estabilidad de rendimiento mediante la interpretación del gráfico biplot GGE (Yan y Tinker, 2006) para determinar si en el grupo de genotipos evaluados existen híbridos estables y de alto rendimiento. El modelo utilizado fue el siguiente:

$$y_{ijkl} = \mu + L_j + B(L)_{k(j)} + C_l + G_i + GL_{(ij)} + GC_{(il)} + GLC_{(ijl)} + \epsilon_{ijkl}$$

donde  $y_{ijkl}$  es la respuesta (rendimiento) del híbrido  $i$ , en el ambiente  $j$ , bloque  $k$  en la temporada  $l$ ;  $\mu$  es la media general;  $L_j$  es el efecto del ambiente  $j$  con  $j=1\dots 13$ ;  $B(L)_{k(j)}$  es el efecto del bloque  $k$  dentro del ambiente  $j$  con  $k=1\dots 4$ ;  $C_l$  es el efecto de la temporada  $l$  con  $l=1..2$ ;  $G_i$  es el efecto del híbrido  $i$  con  $i=1\dots 7$ ;  $GL_{(ij)}$  es el efecto de la interacción genotipo con el ambiente  $j$ ;  $GC_{(il)}$  es el efecto de la interacción del genotipo  $i$  con la temporada  $l$ ;  $GLC_{(ijl)}$  es el efecto de la interacción del genotipo  $i$  con el ambiente  $j$  y la temporada  $l$  y  $\epsilon_{ijkl}$  es el término de error aleatorio asociado a la observación  $y_{ijkl}$ .

**Análisis de componentes principales (ACP):** Con el fin de explicar la variabilidad de los genotipos y de los ambientes en relación a todas las variables en estudio, se realizó un análisis de componentes principales, que consistió en construir variables no observables (componentes) a partir de variables observables (las variables a analizar). Las nuevas variables (componentes principales) fueron obtenidas como combinaciones lineales de las variables originales y fueron representadas en un Biplot (Balzarini *et al.*, 2005). Se realizaron dos análisis de ACP: el primero considerando los 7 híbridos de maíz y 10 variables (biomasa, rendimiento, índice de cosecha, N° granos  $m^{-2}$ , peso de granos, mazorcas  $planta^{-1}$ , hileras  $mazorca^{-1}$ , granos  $hilera^{-1}$ , altura de plantas y ASI) y el segundo considerando los 13 ambientes y las 10 variables consideradas en el análisis anterior.

**Análisis de correlación:** Para determinar si existe asociación entre ASI y estabilidad de rendimiento de granos se realizó un análisis de correlación entre ASI y la pendiente de la recta obtenida del análisis de regresión de cada híbrido.

## RESULTADOS

### Rendimiento

Se observó una amplia variación en el rendimiento de grano en los distintos ambientes evaluados (Cuadro 3), lo que demuestra la existencia de heterogeneidad ambiental, dada por un error estándar (EE) de 1.054 kg ha<sup>-1</sup>, cuatro veces mayor que la observada entre los genotipos (EE de 240 kg ha<sup>-1</sup>). Los ambientes de mayor rendimiento se ubicaron en la localidad de Mostazal en los años 2012 y 2013 y Nancagua en el año 2013, mientras que el peor ambiente fue el de Mostazal con déficit hídrico en período completo en el año 2012. En todos los ambientes con algún nivel de estrés se observaron rendimientos significativamente menores a los obtenidos en los ambientes en que no se aplicó estrés.

**Cuadro 3.** Rendimiento promedio de granos de los 13 ambientes (considerando el promedio de los siete híbridos evaluados).

Ambientes	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )
M_13	16.572 a
N_13	16.451 a
M_12	16.325 a
N_12	15.158 b
T_13	14.321 b
T_12	13.081 c
A_12	12.802 c
T_12 -N	11.324 d
M_13-N	10.423 e
M_13 -Rllg	10.247 e
M_13 - Rpc	9.621 e
A_12-N	6.482 f
M_12-Rpc	4.594 g
<b>Media</b>	12.108
<b>EE</b>	1.054

Letras diferentes en sentido vertical indican que existen diferencias significativas de acuerdo a la prueba de comparación múltiple DGC ( $p \leq 0,05$ ). EE: Error estándar. M\_13: Mostazal 2013; N\_13: Nancagua 2013; M\_12: Mostazal 2012; N\_12: Nancagua 2012; T\_13: Talca 2013; T\_12: Talca 2012; A\_12: Antumapu 2012; T\_12-N: Talca 2012 sin nitrógeno; M\_13-N: Mostazal 2013 sin nitrógeno; M\_13-Rllg: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a madurez fisiológica; M\_13-Rpc: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración; A\_12-N: Antumapu 2012 sin nitrógeno; M\_12-Rpc: Mostazal 2012 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración.

El rendimiento promedio de los híbridos (Cuadro 4) fluctuó de 11.250 kg ha<sup>-1</sup> (Lerma) a 13.234 kg ha<sup>-1</sup> (NK703).

**Cuadro 4.** Rendimiento promedio de granos de los siete híbridos en los 13 ambientes.

<b>Variedades</b>	<b>Rendimiento (kg ha<sup>-1</sup>)</b>
DK619	11.881 b
Lerma	11.250 c
NK703	13.234 a
Río Cisnes	11.723 b
Río Maipo	12.335 b
Río Negro	12.452 b
Río Trancura	11.878 b
Media	12.108
EE	240

Letras diferentes en sentido vertical indican que existen diferencias significativas de acuerdo a la prueba de comparación múltiple DGC ( $p \leq 0,05$ ). EE: Error experimental.

#### **Interacción genotipo x ambiente (GxA) del rendimiento en grano**

El análisis combinado de varianza (ANDEVA) del rendimiento de los 7 híbridos de maíz de grano en los 13 ambientes, mostró un efecto altamente significativo de ambientes, híbridos y en la interacción GxA ( $p < 0,001$ ), como también en todas las variables estudiadas (Apéndice I). El ambiente capturó el 90,8% de la suma de cuadrados total para la variable rendimiento (Cuadro 5), lo que indica que los ambientes fueron diferentes y contrastantes, con importantes diferencias en la magnitud de la respuesta de las medias ambientales.

En la misma variable de rendimiento, la interacción GxA fue casi tres veces mayor que el efecto del híbrido en la variabilidad total (Cuadro 5), donde este último sólo capturó el 2,4% de la suma de cuadrados. Esto explica las inconsistencias del desempeño de los híbridos a través de los ambientes expresado en el cambio de ranking de los genotipos en los distintos ambientes evaluados. El híbrido con mejor rendimiento promedio no fue el mejor en todos los ambientes.

**Cuadro 5.** Suma de cuadrados (SC) y cuadrados medios (CM) de los ambientes, genotipos y fuentes de variación del ANDEVA combinado para rendimiento en grano de los siete híbridos de maíz en los 13 ambientes.

FV	gl	SC	Variación (%)	CM	F	p-valor
Ambiente	12	6.642.552.884	90,8	553.546.074	85,1	< 0,0001
Híbrido	6	172.646.567	2,4	28.774.428	18,4	< 0,0001
Ambiente>Bloques	39	253.655.438		6.503.986	4,2	< 0,0001
Híbrido*Ambiente	72	502.832.097	6,9	6.983.779	4,5	< 0,0001
Error	234	365.473.751		1.561.854		

FV: Fuente de variación. gl: Grados de libertad. SC: Suma de cuadrados. CM: Cuadrados medios.

### Estabilidad del rendimiento

En el Cuadro 6 se muestran los valores de parámetros de la regresión individual de cada híbrido para rendimiento de grano, sobre el promedio del rendimiento de los híbridos en cada ambiente. En todos los híbridos, la regresión explicó cerca del 90% de la variación observada (los valores de  $R^2$  fluctuaron entre 0,89 y 0,97).

**Cuadro 6.** Valores de la pendiente de la regresión, intercepto y  $R^2$  obtenidos del análisis de estabilidad de los siete híbridos en estudio.

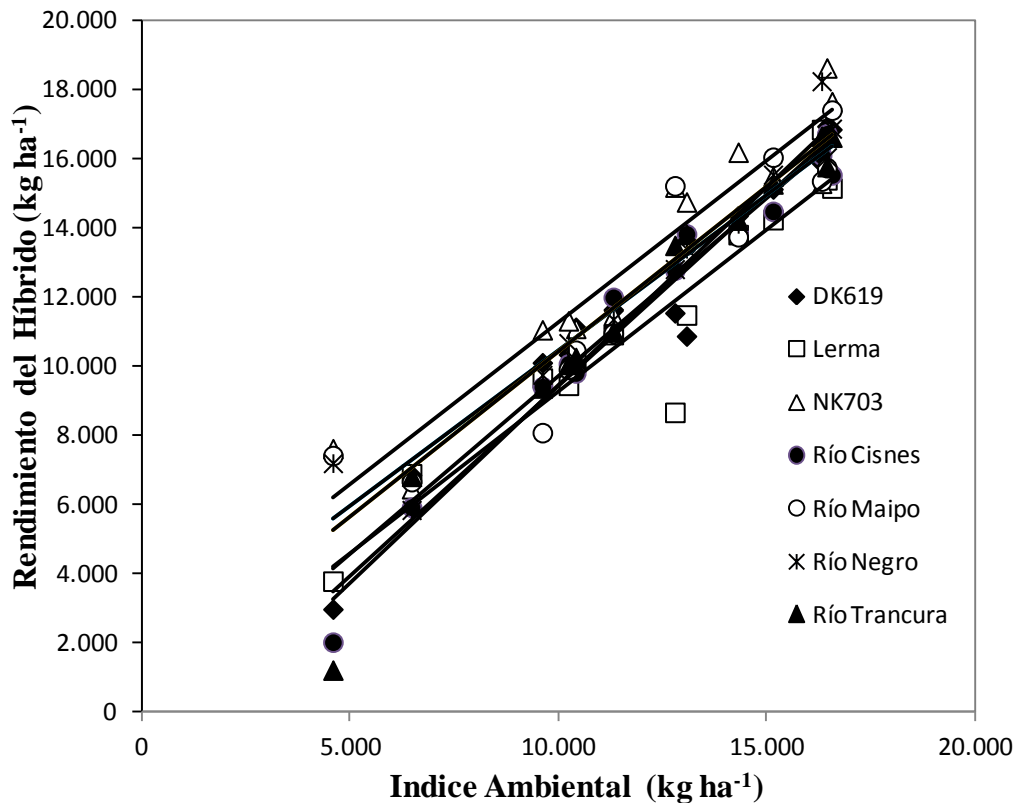
Híbrido	Rendimiento Promedio (kg ha <sup>-1</sup> )	Pendiente de la regresión (b)	Intercepto (a)	$R^2$
DK619	11.881	1,03	-618	0,95
Lerma	11.250	0,94	- 81	0,91
NK703	13.234	0,94	1.898	0,91
Río Cisnes	11.723	1,10	-1.580	0,97
Río Maipo	12.335	0,90	1.450	0,89
Río Negro	12.452	0,95	905	0,94
Río Trancura	11.878	1,14	-1.973	0,96

En la Figura 1, se observa la estabilidad de los híbridos. El híbrido NK703 destaca por su alto rendimiento promedio, observándose como el híbrido de mayor rendimiento en gran parte de los ambientes, además de poseer una pendiente de 0,94, clasificándolo en el grupo de híbridos estables dentro del conjunto evaluado. Algo similar ocurre con los híbridos Río Maipo y Río Negro, por lo que serían híbridos con una adaptación a una amplia gama de ambientes.

Se observa cruzamiento de las rectas entre los híbridos DK619, Río Cisnes, Río Trancura y Lerma cuando el índice ambiental alcanza 11.000 kg ha<sup>-1</sup>. Los híbridos DK619, Río Cisnes y Río Trancura, con coeficientes de regresión mayores a 1, alcanzaron altos rendimientos



en ambientes potenciales mientras que en ambientes con limitaciones sus rendimientos fueron bajos. A diferencia de Lerma que obtuvo un bajo rendimiento en ambientes potenciales mientras que en ambientes con limitantes alcanzó el cuarto lugar.

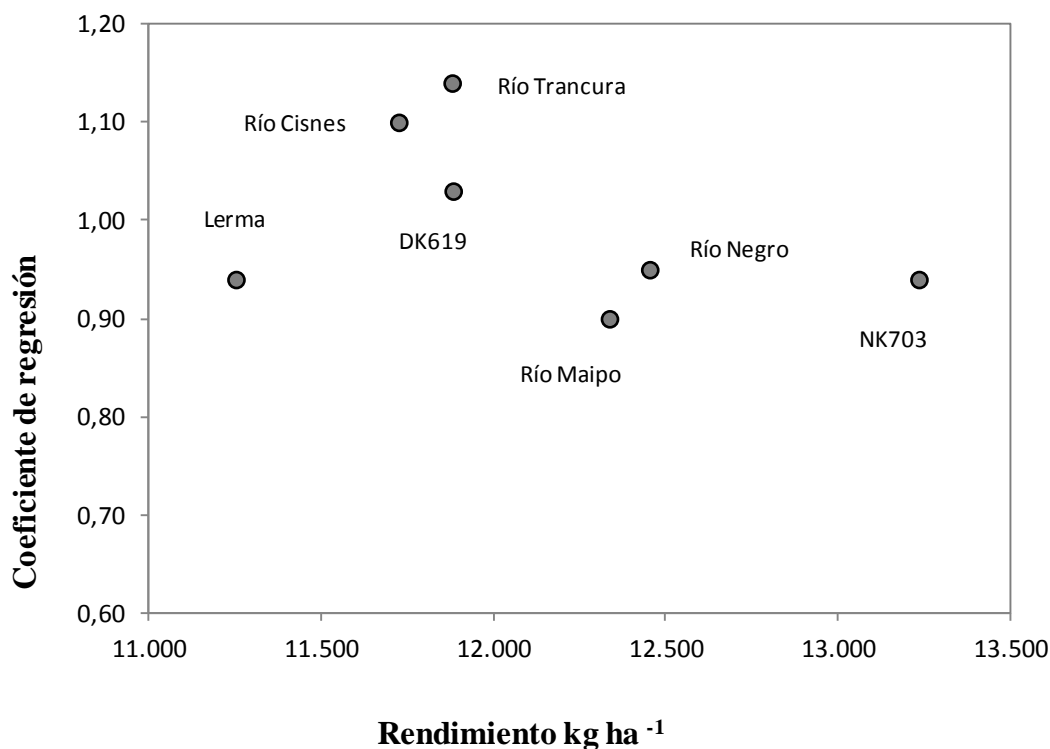


**Figura 1.** Análisis de estabilidad del rendimiento de granos de los siete híbridos en los 13 ambientes.

Según Finlay y Wilkinson (1963), en este tipo de análisis, la media de rendimiento de cada híbrido sobre todos los ambientes es otro índice que debe ser considerado (Figura 2). En el caso del híbrido NK703 con un coeficiente de regresión lineal menor a 1,0 y una media sobre todos los otros híbridos, indica que se trata de un híbrido con estabilidad sobre la media con mayor resistencia a cambios ambientales. También clasifican dentro de este grupo los híbridos Río Negro y Río Maipo, aunque con rendimientos menores.

Opuesto a estos resultados se encuentran los híbridos Río Trancura y Río Cisnes, con altos coeficientes de regresión lineal, lo que indica híbridos con una sensibilidad creciente a los cambios ambientales y mayor especificidad a ambientes de alto rendimiento.

En el caso de Lerma, se trataría de un híbrido pobremente adaptado a la mayoría de los ambientes, por alcanzar una media de rendimiento menor a todos los híbridos analizados.



**Figura 2.** Relación entre adaptación varietal (coeficiente de regresión lineal) y la media de rendimiento de grano sobre todos los ambientes.

### **Rendimiento y su asociación con ASI**

La mayor variabilidad en los valores de ASI de los híbridos estudiados, se observó en los ambientes con estrés, ya que en estos últimos, el EE es cuatro veces mayor que en los ambientes sin estrés, con valores de 1,6 a 3,0 días y una media de 2,2 días, mientras que en los ambiente sin estrés la media de ASI fue de 1,0 días (Cuadro 7). En los ambientes con estrés, los híbridos Río Cisnes y Río Trancura, tuvieron los mayores valores de ASI, con valores 3,0 y 2,7 días respectivamente. Los menores valores se observaron en los híbridos Río Maipo y Río Negro, ambos con un ASI de 1,6 días.

**Cuadro 7.** Valores de ASI agrupados por el total de 13 ambientes, ambientes con estrés y ambientes sin estrés.

Híbrido	ASI 13 ambientes (n=13) (días)	ASI ambientes con estrés (n=6) (días)	ASI ambientes sin estrés (n=7) (días)
DK619	1,6 a	2,2 b	1,2 n.s
Lerma	1,5 a	2,1 b	1,0 n.s
NK703	1,6 a	2,1 b	1,2 n.s
Río Cisnes	1,8 a	3,0 a	0,8 n.s
Río Maipo	1,2 b	1,6 b	0,9 n.s
Río Negro	1,2 b	1,6 b	0,8 n.s
Río Trancura	1,7 a	2,7 a	1,0 n.s
Promedio	1,5	2,2	1,0
EE	0,05	0,19	0,04

Letras diferentes en sentido vertical indican que existen diferencias significativas de acuerdo a la prueba de comparación múltiple DGC ( $p \leq 0,05$ ). EE: Error experimental.

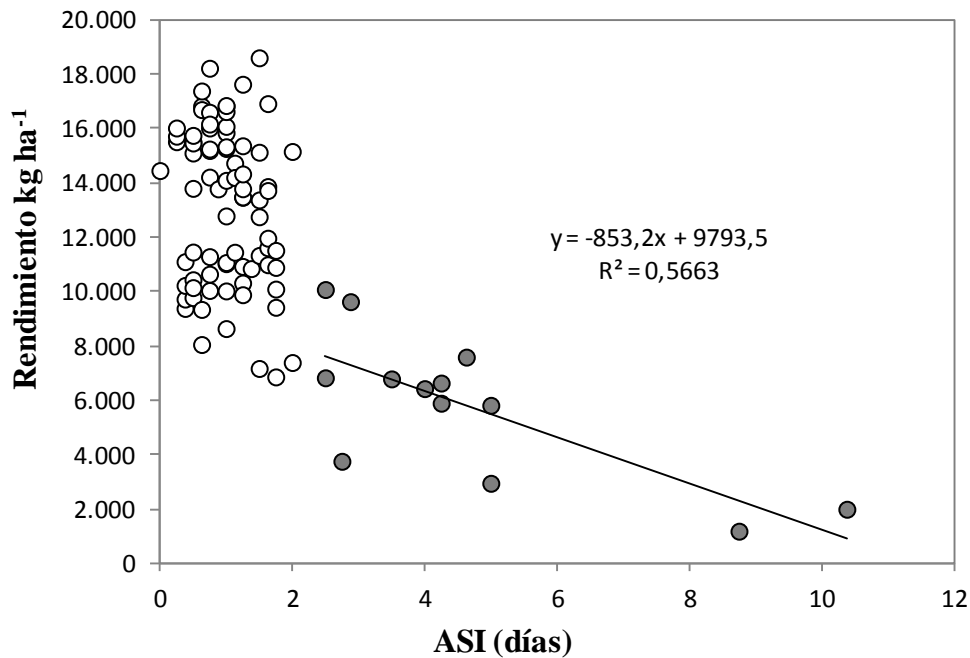
El rendimiento en granos de todos los híbridos se correlacionó negativamente con ASI (Cuadro 8). Esto se explica porque el menor rendimiento de los híbridos fue en los ambientes con déficit hídrico y de nitrógeno, donde se obtuvieron los mayores valores de ASI.

**Cuadro 8.** Correlación entre ASI y rendimiento de granos en cada uno de los híbridos estudiados (n=13ambientes).

Híbrido	Coefficiente de correlación
DK619	- 0,80 ***
Lerma	-0,62 *
NK703	-0,64 *
Río Cisnes	-0,79 ***
Río Maipo	-0,59 *
Río Negro	-0,58 *
Río Trancura	-0,81 ***

ns: no significativo; \*:significativo ( $p < 0,05$ ) ; \*\*:muy significativo ( $p < 0,01$ ); \*\*\*:altamente significativo ( $p < 0,001$ )

En la Figura 3 se observa que cuando el ASI de los híbridos fue mayor a 2 días, el rendimiento disminuyó en  $853 \text{ kg ha}^{-1}$  por cada día de aumento de ASI. Estos valores de ASI fueron observados en los ambientes con estrés donde también se obtuvo los menores rendimientos. Con valores de ASI inferiores a 2 días la variabilidad del rendimiento de los híbridos se debió a otros factores y no es explicado por el valor de ASI.



**Figura 3.** Regresión entre ASI y Rendimiento de granos de los 7 híbridos en los 13 ambientes. ○ ASI ≤ a 2 días. ● ASI > a 2 días.

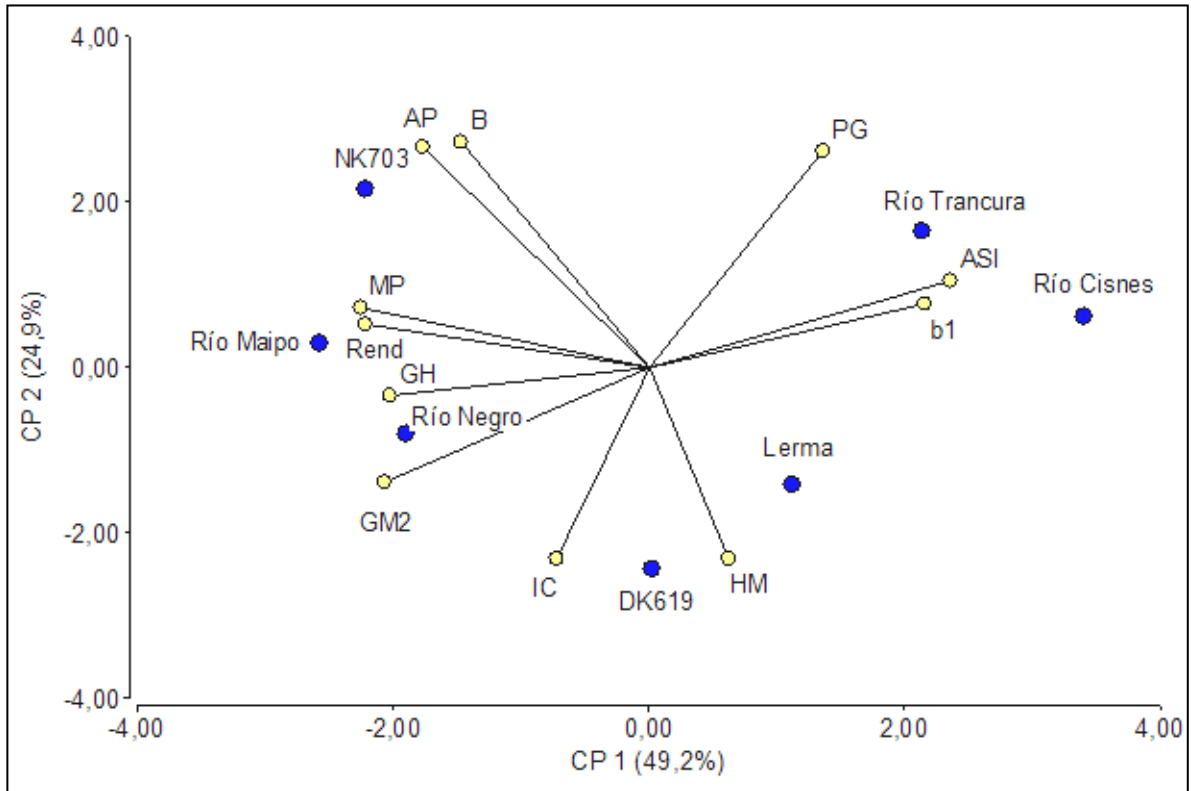
### Análisis de componentes principales por híbridos

En el ACP de los híbridos en los 6 ambientes con estrés, se observó que un 74,1% de la variabilidad total fue explicada por los componentes principales 1 y 2 (CP1 y CP2), donde el CP1 explicó el 49,2% de la variabilidad total (Figura 4).

El ASI se asoció positivamente al coeficiente de regresión obtenido en la prueba de estabilidad ( $b_1$ ), es decir, los híbridos que presentaron un mayor valor de coeficiente de regresión y por lo tanto una mayor inestabilidad en sus rendimientos, tuvieron los mayores valores de ASI. Los híbridos asociados a un mayor valor de éstas variables fueron Río Cisnes y Río Trancura, con coeficientes de regresión de 1,10 y 1,14 respectivamente, y también con los mayores valores de ASI del conjunto de híbridos estudiados, con 3,0 y 2,7 días respectivamente. También se puede agregar que el ASI se asoció negativamente con rendimiento, granos m<sup>-2</sup> y el número de granos hilera<sup>-1</sup>, presentando sus mayores valores en los híbridos Río Cisnes, Río Trancura, DK619 y Lerma.

Los híbridos NK703, Río Maipo y Río Cisnes se asociaron positivamente a rendimiento de granos, granos m<sup>-2</sup>, mazorcas planta<sup>-1</sup>, altura de planta y biomasa y negativamente a ASI y

coeficiente de regresión de la prueba de estabilidad, lo que indica que los híbridos de mayor rendimiento fueron los que presentaron un menor ASI y una mayor estabilidad.



**Figura 4.** Componentes principales del comportamiento de los 7 híbridos respecto del conjunto de variables medidas (vectores) en los 6 ambientes con estrés hídrico y de nitrógeno. Las abreviaturas corresponden a biomasa (B), rendimiento de granos (Rend), índice de cosecha (IC), granos  $m^{-2}$  (GM2), peso de granos (PG), mazorcas  $planta^{-1}$  (MP), hileras  $mazorca^{-1}$  (HM), granos  $hileras^{-1}$  (GH), altura de plantas (AP), intervalo seda-antesis (ASI) y coeficiente de regresión (b1).

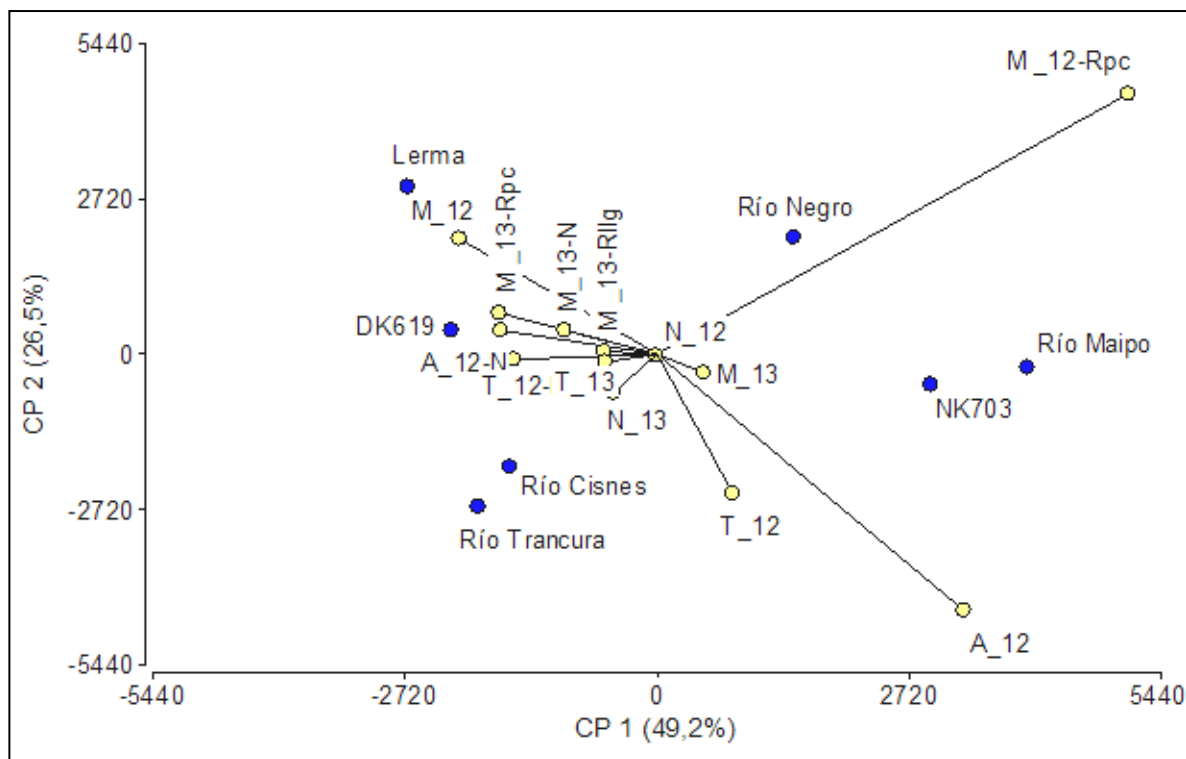
### Análisis de la Interacción GxA

En el análisis AMMI para el rendimiento de granos en los 13 ambientes (Figura 5), las dos primeras componentes principales explicaron el 75,7% de la variabilidad (CP1 49,2% y CP2 26,5). Río Maipo y Lerma fueron los híbridos más extremos en el CP1 y por lo tanto los que más aportan a la interacción.

Con respecto a los ambientes, los que más aportan a la interacción son M\_12-Rpc y A\_12, ambos de la temporada 2012. Esto se observa por ser los más extremos en el CP1, lo que indica que los cambios más importantes en las diferencias de rendimiento entre los híbridos

son observados en estos ambientes.

Los híbridos Río Maipo y NK703 tienen valor positivo en la CP1 y tuvieron interacción positiva con los ambientes T<sub>12</sub>, A<sub>12</sub> y M<sub>12</sub>-Rpc.

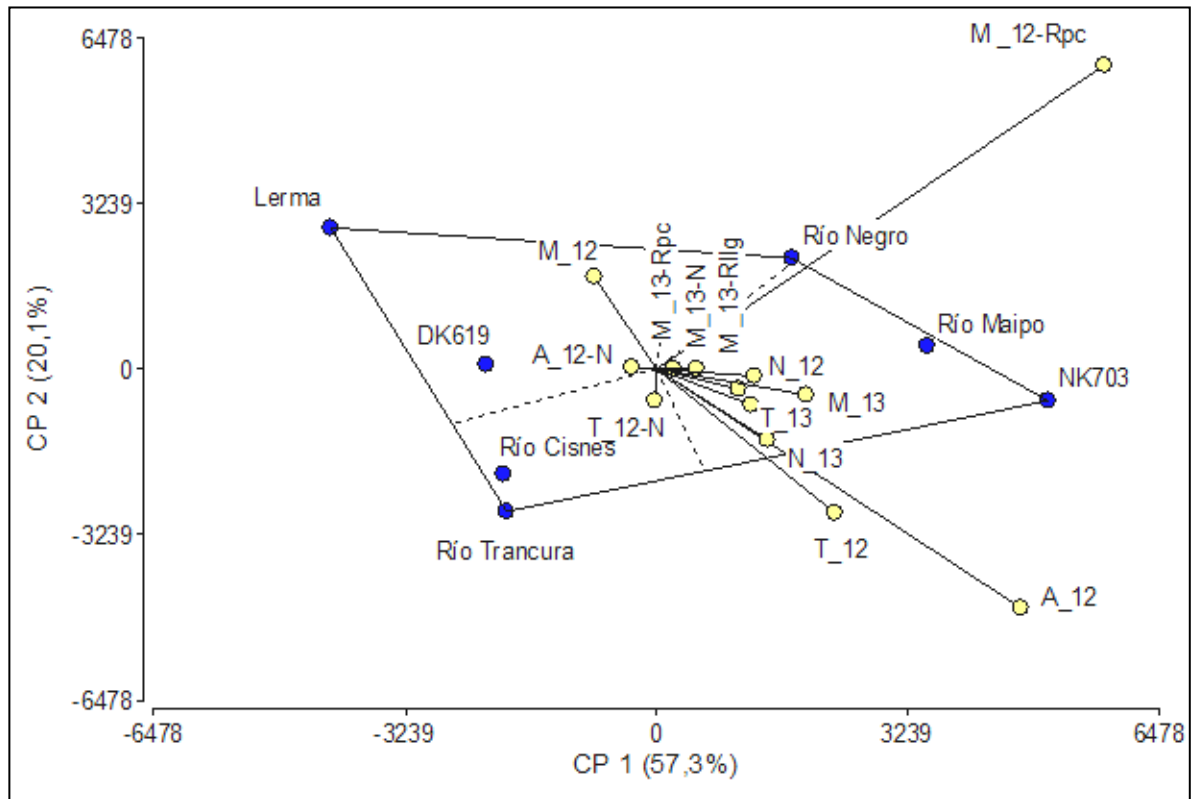


**Figura 5.** Biplot GGE efectos principales aditivos e interacción multiplicativa (AMMI) realizado para el rendimiento de granos de los siete híbridos de maíz en los 13 ambientes. M<sub>13</sub>: Mostazal 2013; N<sub>13</sub>: Nancagua 2013; M<sub>12</sub>: Mostazal 2012; N<sub>12</sub>: Nancagua 2012; T<sub>13</sub>: Talca 2013; T<sub>12</sub>: Talca 2012; A<sub>12</sub>: Antumapu 2012; T<sub>12</sub>-N: Talca 2012 sin nitrógeno; M<sub>13</sub>-N: Mostazal 2013 sin nitrógeno; M<sub>13</sub>-Rllg: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a madurez fisiológica; M<sub>13</sub>-Rpc: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración; A<sub>12</sub>-N: Antumapu 2012 sin nitrógeno; M<sub>12</sub>-Rpc: Mostazal 2012 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración.

### Análisis de regresión por sitio (SREG)

En el gráfico biplot GGE para el rendimiento de granos en los 13 ambientes (Figura 6), las dos primeras componentes principales explicaron el 77,4% de la variabilidad (CP1 57,3% y CP2 20,1%). Los ambientes estudiados se agruparon en tres mega ambientes. En el mega ambiente compuesto por M<sub>12</sub> y A<sub>12</sub>-N destaca Lerma como el híbrido de mayor rendimiento. El segundo mega ambiente compuesto por el ambiente T<sub>12</sub>-N, Río Trancura

alcanza el mayor rendimiento de granos. El tercer mega ambiente conformado por el resto de ambientes estudiados, NK703 tuvo el mayor rendimiento.



**Figura 6.** Biplot GGE para rendimiento de granos de los siete híbridos de maíz evaluados en los 13 ambientes. M\_13: Mostazal 2013; N\_13: Nancagua 2013; M\_12: Mostazal 2012; N\_12: Nancagua 2012; T\_13: Talca 2013; T\_12: Talca 2012; A\_12: Antumapu 2012; T\_12-N: Talca 2012 sin nitrógeno; M\_13-N: Mostazal 2013 sin nitrógeno; M\_13-Rllg: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a madurez fisiológica; M\_13-Rpc: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración; A\_12-N: Antumapu 2012 sin nitrógeno; M\_12-Rpc: Mostazal 2012 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración.

### Rendimiento y su asociación con otras variables

En el Cuadro 9 se observa el valor promedio de las variables evaluadas para cada uno de los 7 híbridos, y Río Maipo y Río Negro obtuvieron los menores valores de ASI entre los híbridos evaluados. En el cuadro 10 se muestra el valor promedio de las variables evaluadas en los 13 ambientes, y hubo una alta variabilidad para ASI, con un E.E. dos veces mayor que el observado en los híbridos. Lo señalado está dado por la respuesta de los ambientes M\_12-Rpc (Mostazal 2012 sin riego en período crítico) y A\_12-N (Antumapu 2012 sin nitrógeno), donde los híbridos obtuvieron un ASI de 5,0 y 3,6 días respectivamente y a su vez el menor rendimiento promedio de granos.

**Cuadro 9.** Valores promedio por híbrido de las variables evaluadas en los 13 ambientes.

Ambiente	Rendimiento de granos (kg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa Total (kg ha <sup>-1</sup> )	Índice Cosecha	Nº granos m <sup>-2</sup>	Peso granos (g)	Mazorcas Planta <sup>-1</sup>	Hileras Mazorca <sup>-1</sup>	Granos Hilera <sup>-1</sup>	Altura Planta (m)	ASI (días)
NK703	13.234 a	31.046 a	0,43 b	4.081 b	339 a	1,07 a	15 b	34 b	3,02 a	1,6 a
Río Negro	12.452 b	29.048 b	0,43 b	4.329 a	298 c	1,03 b	16 a	35 b	2,92 b	1,2 b
Río Maipo	12.335 b	28.842 b	0,43 b	4.312 a	303 c	1,02 b	15 b	40 a	2,95 b	1,2 b
DK619	11.881 b	25.480 d	0,47 a	4.326 a	299 c	1,01 b	17 a	35 b	2,67 e	1,6 a
Río Trancura	11.878 b	27.656 c	0,44 b	3.809 c	337 a	0,98 c	15 b	35 b	2,85 c	1,7 a
Río Cisnes	11.723 b	27.070 c	0,43 b	3.760 c	339 a	0,93 d	16 a	33 c	2,76 d	1,8 a
Lerma	11.250 c	24.703 d	0,46 a	3.624 c	316 b	0,93 d	15 b	35 b	2,65 e	1,5 a
NK703	13.234 a	31.046 a	0,43 b	4.081 b	339 a	1,07 a	15 b	34 b	3,02 a	1,6 a
<b>Promedio</b>	12.108	27.692	0,44	4.034	319	1,00	16	36	2,90	1,50
<b>EE</b>	240	826	0,01	114	7	0,02	11	0,3	0,90	0,05

Letras diferentes en sentido vertical indican que existen diferencias significativas de acuerdo a la prueba de comparación múltiple DGC ( $p \leq 0,05$ ). EE: Error Estándar.



**Cuadro 10.** Valores promedio por ambiente de las variables evaluadas en los siete híbridos.

Ambiente	Rendimiento de granos (kg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa Total (kg ha <sup>-1</sup> )	Índice Cosecha	Nº granos m <sup>-2</sup>	Peso granos (g)	Mazorcas Planta <sup>-1</sup>	Hileras Mazorca <sup>-1</sup>	Granos Hilera <sup>-1</sup>	Altura Planta (m)	ASI (días)
M_13	16.572 a	34.050 a	0,49 a	4.760 b	362 a	1,1 b	16,6 a	37,3 b	2,8 c	0,9 c
N_13	16.451 a	31.114 b	0,53 a	5.313 a	352 a	1,3 a	15,3 b	40,9 a	3,1 a	0,9 c
M_12	16.325 a	32.212 b	0,52 a	4.492 b	337 b	1,0 c	16,3 a	39,2 a	3,1 a	1,0 c
N_12	15.158 b	31.798 b	0,49 a	4.031 c	360 a	0,9 c	15,4 b	40,2 a	3,1 a	0,5 c
T_13	14.321 b	29.224 c	0,49 a	3.880 c	363 a	1,0 c	14,8 c	35,4 b	2,7 d	1,2 c
T_12	13.081 c	28.722 c	0,47 a	4.278 c	305 d	1,0 c	16,0 a	36,8 b	3,1 a	1,1 c
A_12	12.802 c	28.605 c	0,45 b	4.008 c	320 c	1,0 c	15,7 b	35,3 b	2,9 b	1,3 c
T_12 -N	11.324 d	22.636 d	0,49 a	3.350 d	326 c	1,0 c	14,9 c	30,7 c	2,4 e	1,5 c
M_13-N	10.423 e	23.556 d	0,44 b	4.589 b	271 e	1,0 c	16,5 a	38,5 a	2,8 c	0,7 c
M_13 -Rllg	10.247 e	28.147 c	0,37 c	4.274 c	286 e	1,0 c	15,8 b	37,9 b	2,9 b	1,1 c
M_13 -Rpc	9.621 e	26.753 c	0,36 c	4.096 c	278 e	1,0 c	16,2 a	36,3 b	2,9 b	1,2 c
A_12-N	6.482 f	15.347 e	0,43 b	3.204 d	274 e	1,0 c	15,6 b	28,4 d	2,4 e	3,6 b
M_12-Rpc	4.594 g	27.835 c	0,16 d	2.174 e	311 d	0,8 e	14,5 c	24,9 e	2,7 d	5,0 a
<b>Promedio</b>	12.108	27.692	0,44	4.034	319	1,00	16,0	36,0	2,9	1,5
<b>EE</b>	1.054	1.363	0,03	219	9,6	0,03	24,0	0,3	1,4	0,1

Letras diferentes en sentido vertical indican que existen diferencias significativas de acuerdo a la prueba de comparación múltiple DGC ( $p \leq 0,05$ ). EE: Error estándar. M\_13: Mostazal 2013; N\_13: Nancagua 2013; M\_12: Mostazal 2012; N\_12: Nancagua 2012; T\_13: Talca 2013; T\_12: Talca 2012; A\_12: Antumapu 2012; T\_12-N: Talca 2012 sin nitrógeno; M\_13-N: Mostazal 2013 sin nitrógeno; M\_13-Rllg: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a madurez fisiológica; M\_13-Rpc: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración; A\_12-N: Antumapu 2012 sin nitrógeno; M\_12-Rpc: Mostazal 2012 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración.

## DISCUSIÓN

Los estudios de estabilidad del rendimiento requieren de la evaluación de un grupo de genotipos en un gradiente de ambientes que generen diferencias en el rendimiento (Finlay y Wilkinson, 1963; Eberhart y Russell, 1966; Córdova, 1991; Ibáñez *et al.*, 2006; Yan *et al.*, 2007; Sharma *et al.*, 2008; García *et al.*, 2009; Balestre *et al.*, 2009; Gordón-Mendoza *et al.*, 2010). En este trabajo se evaluaron siete híbridos comerciales de maíz de grano en 13 ambientes distribuidos desde Santiago a Talca, sometidos a distintos manejos durante dos años. Los rendimientos promedios entre ambientes fluctuaron entre 4.594 y 16.572 kg ha<sup>-1</sup> (Cuadro 4), donde el ambiente capturó el 90,8% de la suma de cuadrados para la variable rendimiento (Cuadro 5), lo que demuestra la amplia variación ambiental a la que estuvieron sometidos los híbridos.

La interacción GxA para la variable rendimiento fue significativa, siendo la variabilidad debido a la interacción GxA casi tres veces mayor que el efecto híbrido (Cuadro 5), lo que explica el cambio de ranking de los híbridos en los distintos ambientes. Este resultado logrado con híbridos comerciales de alto rendimiento es similar a lo señalado en estudios hechos con maíces tropicales en USA (Alwala, 2010); Centro América y el Caribe (Córdova, 1991); México (Zaidi *et al.*, 2004); China (Fan *et al.*, 2007), Nepal (Sharma *et al.*, 2008) y Brasil (Balestre *et al.*, 2009)

El análisis de estabilidad del rendimiento de los híbridos tuvo altos valores de R<sup>2</sup>, superiores a 0,89 (cuadro 6). Con este análisis se lograron destacar tres grupos de híbridos:

- Estables y de alto rendimiento promedio, compuesto por los híbridos NK703, Río Maipo y Río Negro.
- Inestables de menor rendimiento promedio, con un mejor comportamiento en buenos ambientes que en malos, compuesto por los híbridos DK619, Río Cisnes y Río Trancura.
- Estable y de bajo rendimiento promedio, pero con un buen comportamiento en malos ambientes, compuesto por el híbrido Lerma.

Dentro del primer grupo destaca NK703 por alcanzar el mayor rendimiento, logrando el primer lugar en siete de los 13 ambientes estudiados (Figura 1). El comportamiento de este genotipo es poco usual y muy cercano al comportamiento ideal de un genotipo estable y de rendimiento superior al resto de los híbridos estudiados (Blum, 2011; Yan *et al.*, 2007). En este sentido, Romay *et al.* (2010) observaron que híbridos de maíz con alto rendimiento fueron también los genotipos más estables, lo que coincide también con Tollenaar y Lee (2002), quienes señalan que los híbridos modernos tienen un mayor rendimiento y estabilidad de rendimiento que viejas poblaciones de maíz, debido a que el foco de los programas de mejoramiento ha estado en la estabilidad de los híbridos. El uso de este tipo de material de alto rendimiento y alta estabilidad de rendimiento permitiría disminuir la brecha que a nivel mundial va de 20 a 80% entre el rendimiento promedio de los productores y el potencial de los híbridos (Lobell *et al.*, 2009). Estos mismos autores observaron una brecha de rendimiento de hasta 9 Mg ha<sup>-1</sup> en el estado de Nebraska, Estados

Unidos.

El resto de los genotipos se comportó de manera similar a otros ensayos, como lo observado por Córdova (1992) al evaluar 36 híbridos en 20 ambientes contrastantes de Latinoamérica, donde el análisis de estabilidad permitió identificar grupos de híbridos inestables que respondían bien en ambientes de alto rendimiento y con bajo rendimiento en ambientes limitantes, e híbridos estables cuya mejor respuesta era en ambientes con limitaciones (pobres o sub óptimos).

El rango de ASI en los 13 ambientes fluctuó entre 0,5 y 5,0 días, similar a lo observado por Betrán *et al.* (2003) en materiales tropicales en condiciones de riego y sequía, donde ASI varió entre 0,8 a 8,2 días en los híbridos y entre 0,9 a 6,5 días en las líneas puras. En los siete ambientes sin estrés y con rendimientos promedios superiores a 12.800 kg ha<sup>-1</sup>, el ASI tuvo un valor promedio de 1,0 día, con un rango entre 0,8 y 1,2 días, el cual no provoca cambios en el rendimiento (Cuadro 7). En cambio en los ambientes con déficit hídrico y de nitrógeno, que tuvieron rendimientos menores a 11.324 kg ha<sup>-1</sup>, ASI tuvo un valor que fluctuó entre 1,6 y 3,0 días (Cuadro 7).

Dentro de los ambientes con déficit, destaca M\_12-Rpc (Mostazal 2012 M sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración) y A\_12-N (Antumapu 2012 sin nitrógeno), donde el rendimiento promedio de granos fue de 4.594 y 6.482 kg ha<sup>-1</sup> debido al mayor nivel de déficit hídrico para Mostazal y de nitrógeno para Antumapu. En estos ambientes se observaron los mayores valores de ASI, correspondiente a 5,0 y 3,6 días, respectivamente (Cuadro 10). Según lo planteado por Bänzinger *et al.* (2000), para realizar selección por estrés hídrico, los valores de ASI en ambientes con estrés hídrico debieran fluctuar entre 4 y 8 días para permitir hacer una correcta selección del material estudiado, por lo que los ambientes más estresados M\_12-Rpc y A\_12-N estarían dentro de este rango. En maíces tropicales seleccionados por tolerancia a sequía, Chapman y Edmeades (1999) y Zaidi *et al.* (2004) observaron un aumento de ASI desde 1,0 día en condiciones de riego a 4,5 días en condiciones de estrés hídrico.

En cada uno de los híbridos se observó una correlación negativa y estadísticamente significativa entre ASI y rendimiento de granos, con correlaciones de -0,58 a -0,81 (cuadro 8). Lo anterior también se observó en el ACP de los ambientes con estrés, donde el rendimiento y ASI tuvieron una correlación de -0,64 (apéndice II). Edmeades *et al.* (1996c) observaron correlaciones de -0,64 entre ASI y rendimiento de granos con maíces tropicales en ambientes con sequía en llenado de granos y de -0,60 cuando la sequía abarcaba desde floración a llenado de granos.

En los híbridos comercializados en Chile y caracterizados por su alto rendimiento potencial usados en este trabajo, se pudo observar que cuando el ASI fue menor a 2 días, la variabilidad de los rendimientos no se debió a ASI ni a los genotipos, sino a otros factores. Cuando el valor de ASI superó los 2 días, la disminución del rendimiento se asoció al aumento de ASI, observándose una reducción de rendimiento de 853 kg ha<sup>-1</sup> por cada día de aumento en el ASI (Figura 2).

Es importante destacar que el ASI tuvo una mayor correlación con la estabilidad del

rendimiento de los híbridos estudiados (figura 3) con un  $r = 0,87$  muy significativo (apéndice II). En este sentido, los genotipos con mayor ASI fueron los que tuvieron un rendimiento más inestable, destacando en este caso los híbridos Río Cisnes y Río Trancura. El genotipo con rendimiento más estable y un menor ASI fue Río Maipo.

## CONCLUSIONES

- Se observó una alta variabilidad ambiental en el rendimiento lo que permitió observar interacción GxA y variabilidad para el ASI.
- La mayor estabilidad de los híbridos comerciales utilizados en este ensayo se asoció a un menor ASI, lo que mantiene la hipótesis.
- La selección de híbridos como NK703, que destaca por su alto rendimiento y alta estabilidad, permitirían disminuir la brecha entre el rendimiento comercial y potencial de los híbridos.

## LITERATURA CITADA

- Andrade, F. H. 1992. Radiación y temperatura determinan los rendimientos máximos de maíz. Boletín técnico 106. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce, Buenos Aires, Argentina
- Alwala, S.; T. Kwolek; M. McPherson; J. Pellow and D. Meyer. 2010. A comprehensive comparison between Eberhart and Russel joint regression and GGE biplot analyses to identify stable and high yielding maize hybrids. *Field Crops Research* 119:225-230.
- Balestre, M.; J. Candido de Souza; R. García Von Pinho; R. Lunizzo de Oliveira and J. M. Valente Paes. 2009. Yield stability and adaptability of maize hybrids based on GGE biplot analysis characteristics. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 9:219-228.
- Balzarini, M.; C. Bruno y A. Arroyo. 2005. Análisis de Ensayos Agrícolas Multiambientales. Ejemplos en Info - Gen. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. 141p.
- Bänziger, M.; G.O. Edmeades and H.R. Laffitte. 2002. Physiological mechanisms contributing to the increased N stress tolerance of tropical maize selected for drought tolerance. *Field Crops Research* 75: 223-233.
- Bänziger, M.; G.O. Edmeades; D. Beck and M. Bellon. 2000. Breeding for drought and nitrogen stress tolerance in maize. From theory to practice. CIMMYT, México. pp. 39-46.
- Betrán, F. J.; D. Beck; M. Bänzinger and G.O. Edmeades. 2003. Secondary traits in parental inbreds and hybrids under stress and non-stress environments in tropical maize. *Field Crops Research* 83:51-65.
- Blum, A. 2011. Plant water relations, water stress and plant production. (cap 2, pp 11-52) In: Plant Breeding for water limited environments. 258p.
- Bolaños, J. and G.O. Edmeades. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research* 48:65-80.
- Borrás, L.; M.E. Westgate; P. Astini and L. Echarte. 2007. Coupling time to silking with plant growth rate in maize. *Field Crops Research* 102: 73-85.
- Chapman, S.C. and G.O. Edmeades. 1999. Selection improves drought tolerance in tropical maize populations: II. Direct and correlated responses among secondary traits. *Crop Science* 39: 1315-1324.
- Córdova, H. 1991. Estimación de parámetros de estabilidad para determinar la respuesta de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) a ambientes contrastantes de Centro América, Panamá y

México. *Agronomía Mesoamericana* 2: 01-10.

Córdova, H. 1992. Respuestas diferenciales para rendimiento de híbridos de maíz evaluados en ambientes contrastantes de Latinoamérica PCCMCA 1990\* *Agronomía Mesoamericana* 3: 01-08.

Crossa, J. and P. Cornelius. 1997. Sites regression and shifted multiplicative model clustering of cultivar trial sites under heterogeneity of error variance. *Crop Science*, 37(2): 405-415.

Eberhart, S.A. and W.A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6: 36-40.

Edmeades, G.O., M. Bänzinger, D. Beck, J. Bolaños and A. Ortega. 1996a. Development and *per se* performance of CIMMYT maize populations as drought-tolerant sources. (pp 254-262). In G.O. Edmeades, M. Bänzinger, H.R. Mickelson and C.B. Peña-Valdivia, (eds.). 1997. Developing drought and low-N tolerance maize. Proceedings of a symposium, march 25-29, 1996. CIMMYT, El Batán, Mexico. Mexico, D.F.:CIMMYT.

Edmeades, G.O., M. Bänzinger, D. Beck and M. Cortés. 1996b. Drought and low N testing networks-past, present and future. (pp 405-414). In G.O. Edmeades, M. Bänzinger, H.R. Mickelson and C.B. Peña-Valdivia, (eds.). 1997. Developing drought and low-N tolerance maize. Proceedings of a symposium, march 25-29, 1996. CIMMYT, El Batán, Mexico. Mexico, D.F.:CIMMYT.

Edmeades, G.O., J. Bolaños and S.C. Chapman. 1996c. Value of secondary traits selecting for drought tolerance in tropical maize. (pp 222-234). In G.O. Edmeades, G.O., Bänzinger, M., H.R. Mickelson and C.B. Peña-Valdivia, (eds.). 1997. Developing drought and low-N tolerance maize. Proceedings of a symposium, march 25-29, 1996. CIMMYT, El Batán, Mexico. Mexico, D.F.:CIMMYT.

Fan, X.; M.S. Kang; H. Chen; Y. Zhang; J.Tan and C. Xu. 2007. Yield stability of maize hybrids evaluated in multi-environment trials in Yunnan, China. *Agronomy Journal* 99:220-228.

Faiguenbaum, H. 2003. Maíz. (cap 5, pp. 137-218). *En su : Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile*. Chile: Vivaldi y Asociados, 760p.

Finlay K.W. and G.N. Wilkinson. 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research* 14: 742-754.

García, P.J.; S.R. Cabrera; A.A. Pérez; R.J. Silva; R.M. Álvarez; C.A. Marín. *et. al.* 2009. Estabilidad del rendimiento y potencial agronómico de cultivares de maíz de endospermo normal y qpm en zonas agroecológicas de Venezuela. *Agronomía Tropical* 59(4): 433-443.

Gordón-Mendoza, R.; J. Franco-Barrera y L. Camargo-Buitrago. 2010. Adaptabilidad y estabilidad de 20 variedades de maíz, Panamá. *Agronomía Mesoamericana* 21(1):11-20.

Ibañez, M.A.; M.M. Cavanagh; N.C. Bonamico y M.A. di Renzo. 2006. Análisis gráfico mediante biplot del comportamiento de híbridos de maíz. Revista de Investigaciones Agropecuarias 35: 83-93.

InfoStat. 2008. Infostat versión 2008. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

INE (Instituto nacional de estadísticas).2013 . Santiago, Chile. Recuperado en: <[http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario\\_de\\_publicaciones/pdf/agropecuarias\\_informe\\_anual\\_2012.pdf](http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario_de_publicaciones/pdf/agropecuarias_informe_anual_2012.pdf)>. Consultado el: 08 de enero de 2013.

Moser, S. B.; B. Feil, S. Jampatong and P. Stamp. 2006. Effects of pre-anthesis drought, nitrogen fertilizer rate, and variety on grain yield, yield components, and harvest index of tropical maize. Agricultural Water Management 81: 41-58.

Novoa, R. y S. Villaseca. 1989. Mapa Agroclimático de Chile. INIA. Proyecto Agrometeorológico.

Rodriguez, J.; Pinochet D. y F. Matus. 2001. La dosis de fertilización. (cap 1, pp. 9-13). *En Su: La fertilización de los cultivos*. Chile, LOM Ediciones. 117 p.

Romay, M.C., R.A. Malvar, L. Campo, A. Alvarez, J.A. Moreno-González, A. Ordás and P. Revilla. 2010. Climatic and genotypic effects for grain yield in maize under stress conditions. Crop Science 50:51-58.

Setimela, P.S.; V. Vivek; M. Bänzinger; J. Crossa and F. Maiden. 2007. Evaluation of early to medium maturing open pollinated maize varieties in SAC region biplot based on the SREG model. Field Crops Research 103:161-169.

Sharma D., R.C.Sharma; R. Dhakal; N.B. Dhami; D.B. Gurung; R.B. Katuwal. *et. al.*, 2008. Performance stability of maize genotypes across diverse hill environments in Nepal. Euphytica 164: 689–698.

Tollenaar, M. and E.A. Lee. 2002. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. Field Crops Research 75: 161-169.

Yan, W. and N. A. Tinker. 2006. Biplot analysis of multi-environment trial data: Principles and applications. Canadian Journal Plant Science 86: 623-645.

Yan, W., M. Kang, B. MA, S. Woods and P. Cornelius. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. Crop Science 47: 643-653.

Zaidi, P. H., Srinivasan, G., H.S. Córdova and C. Sanchez. 2004. Gains from improvement for mid-season drought tolerance in tropical maize (*Zea mays* L.). Field Crops Research 89: 135-152.



## APÉNDICES

### I. Suma de cuadrados de las variables en estudio.

FV	B	Rend	IC	GM2	PG	MP	GM	HM	GH	AP
Ambiente	73,3***	90,6***	83,7***	76,7***	69,0***	59,1***	77,8***	32,9***	72,3***	83,0***
Híbrido	13,4***	2,4***	2,3***	10,4***	19,8***	13,6***	8,0***	37,8***	15,2***	11,6***
HibxAmb	13,3***	6,9***	14,0***	12,9***	11,2***	27,3***	14,2***	29,3***	12,5***	5,4***

**ns: no significativo \* : significativo (p<0,05) \*\* : muy significativo (p<0,01) \*\*\* : altamente significativo (p<0,001).**

Las abreviaturas corresponden a: Biomasa (B), rendimiento de granos (Rend), índice de cosecha (IC), número de granos m<sup>-2</sup> (GM2), peso de granos (PG), mazorcas por planta (MP), granos por mazorca (GM), hileras por mazorca(HM), Granos por hilera (GH), Altura de plantas (AP).

### II. Matriz de correlación/Coeficientes del ACP de híbridos en los seis ambientes con estrés.

	B	Rend	IC	GM2	PG	MP	HM	GH	AP	ASI	b1
B	1,00										
Rend	0,58	1,00									
IC	-0,46	0,43	1,00								
GM2	0,31	0,65	0,34	1,00							
PG	0,18	-0,13	-0,3	-0,74	1,00						
MP	0,7	0,89	0,25	0,75	-0,24	1,00					
HM	-0,37	-0,16	0,19	0,36	-0,32	-0,16	1,00				
GH	0,25	0,4	0,11	0,51	-0,64	0,46	-0,46	1,00			
AP	0,94	0,69	-0,3	0,29	0,16	0,74	-0,58	0,45	1,00		
ASI	-0,3	-0,64	-0,32	-0,76	0,76	-0,63	0,12	-0,81	-0,40	1,00	
b1	-0,19	-0,69	-0,42	-0,54	0,51	-0,48	0,26	-0,77	-0,41	0,87	1,00

Las abreviaturas corresponden a biomasa (B), rendimiento de granos (Rend), índice de cosecha (IC), granos m<sup>-2</sup> (GM2), peso de granos (PG), mazorcas planta<sup>-1</sup> (MP), hileras mazorca<sup>-1</sup> (HM), granos hilera<sup>-1</sup> (GH), altura de plantas (AP), intervalo seda-antesis (ASI) y coeficiente de regresión (b1).

III. Matriz de correlación/Probabilidades del ACP de híbridos en los seis ambientes con estrés.

	B	Rend	IC	GM2	PG	MP	HM	GH	AP	ASI	b1
B											
Rend	0,17										
IC	0,30	0,34									
GM2	0,49	0,12	0,46								
PG	0,71	0,79	0,51	0,06							
MP	0,08	0,01	0,59	0,05	0,60						
HM	0,42	0,72	0,68	0,42	0,48	0,74					
GH	0,59	0,37	0,81	0,24	0,12	0,30	0,30				
AP	0,00	0,09	0,52	0,53	0,73	0,06	0,18	0,32			
ASI	0,52	0,12	0,48	0,05	0,05	0,13	0,80	0,03	0,37		
b1	0,68	0,09	0,35	0,21	0,24	0,28	0,57	0,04	0,37	0,01	

Las abreviaturas corresponden a Biomasa (B), rendimiento de granos (Rend), índice de cosecha (IC), granos m<sup>-2</sup> (GM2), peso de granos (PG), mazorcas planta<sup>-1</sup> (MP), hileras mazorca<sup>-1</sup> (HM), granos hilera<sup>-1</sup> (GH), altura de plantas (AP), intervalo seda-antesis (ASI) y coeficiente de regresión (b1).

IV. Autovalores del ACP de híbridos.

Lambda	Valor	Proporción	Prop Acum
1	5,41	0,49	0,49
2	2,74	0,25	0,74
3	1,38	0,13	0,87
4	1,09	0,10	0,96
5	0,30	0,03	0,99
6	0,09	0,01	1,00
7	0,00	0,00	1,00
8	0,00	0,00	1,00
9	0,00	0,00	1,00
10	0,00	0,00	1,00
11	0,00	0,00	1,00

V. Autovectores del ACP de híbridos.

Variables	e1	e2
B	-0,24	0,45
Rend	-0,37	0,09
IC	-0,12	-0,38
GM2	-0,34	-0,23
PG	0,23	0,43
MP	-0,37	0,12
HM	0,1	-0,38
GH	-0,34	-0,06
AP	-0,29	0,44
ASI	0,39	0,17
b1	0,36	0,12

VI. Correlaciones de CP1 y CP2 con las variables originales híbridos.

Variables	CP 1	CP 2
B	-0,56	0,74
Rend	-0,85	0,14
IC	-0,28	-0,63
GM2	-0,79	-0,38
PG	0,52	0,71
MP	-0,87	0,20
HM	0,24	-0,64
GH	-0,78	-0,09
AP	-0,68	0,73
ASI	0,91	0,28
b1	0,83	0,21

Componente principal 1 (CP1) y componente principal 2 (CP2).

VII. Matriz de correlación/Coeficientes del ACP de los 13 ambientes.

	B	Rend	IC	GM2	PG	MP	HM	GH	AP	ASI
B	1,00									
Rend	0,72	1,00								
IC	0,18	0,81	1,00							
GM2	0,48	0,79	0,69	1,00						
PG	0,70	0,75	0,47	0,25	1,00					
MP	0,18	0,61	0,69	0,82	0,25	1,00				
HM	0,15	0,31	0,3	0,63	-0,27	0,25	1,00			
GH	0,59	0,80	0,64	0,92	0,31	0,62	0,55	1,00		
AP	0,64	0,57	0,26	0,52	0,24	0,14	0,44	0,65	1,00	
ASI	-0,47	-0,8	-0,76	-0,85	-0,31	-0,59	-0,52	-0,92	-0,45	1,00

Las abreviaturas corresponden a biomasa (B), rendimiento de granos (Rend), índice de cosecha (IC), granos m<sup>-2</sup> (GM2), peso de granos (PG), mazorcas planta<sup>-1</sup> (MP), hileras mazorca<sup>-1</sup> (HM), granos hilera<sup>-1</sup> (GH), altura de plantas (AP), intervalo seda-antesís (ASI).

VIII. Matriz de correlación/Probabilidades del ACP de los 13 ambientes.

	B	Rend	IC	GM2	PG	MP	HM	GH	AP	ASI
B										
Rend	0,01									
IC	0,56	0,00								
GM2	0,10	0,00	0,01							
PG	0,01	0,00	0,11	0,40						
MP	0,56	0,03	0,01	0,00	0,40					
HM	0,61	0,30	0,32	0,02	0,37	0,40				
GH	0,03	0,00	0,02	<0,0001	0,30	0,02	0,05			
AP	0,02	0,04	0,38	0,07	0,42	0,64	0,13	0,02		
ASI	0,10	0,00	0,00	0,00	0,30	0,03	0,07	<0,0001	0,12	

Las abreviaturas corresponden a Biomasa (B), rendimiento de granos (Rend), índice de cosecha (IC), granos m<sup>-2</sup> (GM2), peso de granos (PG), mazorcas planta<sup>-1</sup> (MP), hileras mazorca<sup>-1</sup> (HM), granos hilera<sup>-1</sup> (GH), altura de plantas (AP), intervalo seda-antesís (ASI).

IX. Autovalores del ACP de los ambientes.

Lambda	Valor	Proporción	Prop. Acum
1	5,93	0,59	0,59
2	1,67	0,17	0,76
3	1,30	0,13	0,89
4	0,44	0,04	0,93
5	0,34	0,03	0,97
6	0,28	0,03	1,00
7	0,04	$4,1 \times 10^{-3}$	1,00
8	$3,5 \times 10^{-3}$	$3,5 \times 10^{-4}$	1,00
9	$1,5 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-4}$	1,00
10	$2,2 \times 10^{-4}$	$2,2 \times 10^{-5}$	1,00

X. Autovectores del ACP de los ambientes.

Variables	e1	e2
B	0,27	0,43
Rend	0,39	0,22
IC	0,32	-0,05
GM2	0,38	-0,22
PG	0,21	0,63
MP	0,29	-0,17
HM	0,21	-0,51
GH	0,39	-0,11
AP	0,26	0,06
ASI	-0,37	0,13

Las abreviaturas corresponden a Biomasa (B), rendimiento de granos (Rend), índice de cosecha (IC), granos  $m^{-2}$  (GM2), peso de granos (PG), mazorcas planta<sup>-1</sup> (MP), hileras mazorca<sup>-1</sup> (HM), granos hilera<sup>-1</sup> (GH), altura de plantas (AP), intervalo seda-antesi (ASI).

XI. Correlaciones de CP1 y CP2 con las variables originales ambientes.

Variables	CP 1	CP 2
B	0,65	0,56
Rend	0,94	0,28
IC	0,78	-0,06
GM2	0,93	-0,28
PG	0,51	0,81
MP	0,71	-0,22
HM	0,51	-0,65
GH	0,94	-0,15
AP	0,63	0,08
ASI	-0,90	0,17

Las abreviaturas corresponden a Biomasa (B), rendimiento de granos (Rend), índice de cosecha (IC), granos m<sup>-2</sup> (GM2), peso de granos (PG), mazorcas planta<sup>-1</sup> (MP), hileras mazorca<sup>-1</sup> (HM), granos hilera<sup>-1</sup> (GH), altura de plantas (AP), intervalo seda-antesis (ASI), componente principal 1(CP1) y componente principal 2 (CP2).

XII. Autovalores análisis de regresión de sitios (SREG).

Lambda	Valor	Proporción	Prop. Acum
1	11784834,01	0,57	0,57
2	4134334,12	0,20	0,77
3	2388537,56	0,12	0,89
4	1326775,00	0,06	0,95
5	628849,26	0,03	0,98
6	311533,73	0,02	1,00
7	0,00	0,00	1,00
8	0,00	0,00	1,00
9	0,00	0,00	1,00
10	0,00	0,00	1,00
11	0,00	0,00	1,00
12	0,00	0,00	1,00
13	0,00	0,00	1,00

XII. Escores fila análisis de regresión de sitios (SREG).

Variables	e1	e2
DK619	-2.183,48	75,58
Lerma	-4.201,24	2.750,26
NK703	5.049,71	-606,39
Río Cisnes	-1.969,77	-2.059,83
Río Maipo	3.481,06	448,85
Río Negro	1.752,80	2.169,54
Río Trancura	-1.929,08	-2.778,01

XIII. Escores columna análisis de regresión de sitios (SREG).

Variables	e1	e2
A_12	0,56	-0,55
A_12-N	-0,04	$3,5 \times 10^{-03}$
M_12-Rpc	0,68	0,70
M_13-Rllg	0,12	-0,05
M_13-Rpc	0,03	$-3,7 \times 10^{-04}$
M_12	-0,09	0,21
M_13	0,23	-0,06
M_13-N	0,06	$1,1 \times 10^{-03}$
N_12	0,15	-0,02
N_13	0,17	-0,16
T_12	0,27	-0,33
T_12-N	$-2,3 \times 10^{-03}$	-0,07
T_13	0,14	-0,08

M\_13: Mostazal 2013; N\_13: Nancagua 2013; M\_12: Mostazal 2012; N\_12: Nancagua 2012; T\_13: Talca 2013; T\_12: Talca 2012; A\_12: Antumapu 2012; T\_12-N: Talca 2012 sin nitrógeno; M\_13-N: Mostazal 2013 sin nitrógeno; M\_13-Rllg: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a madurez fisiológica; M\_13-Rpc: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración; A\_12-N: Antumapu 2012 sin nitrógeno; M\_12-Rpc: Mostazal 2012 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración.

XIV. Autovalores análisis de efectos aditivos e interacción multiplicativa (AMMI).

Lambda	Valor	Proporción	Prop. Acum.
1	7.539.830,92	0,49	0,49
2	4.052.286,78	0,26	0,76
3	1.872.529,52	0,12	0,88
4	1.224.352,97	0,08	0,96
5	367.270,90	0,02	0,98
6	260.202,88	0,02	1,00
7	0,00	0,00	1,00
8	0,00	0,00	1,00
9	0,00	0,00	1,00
10	0,00	0,00	1,00
11	0,00	0,00	1,00
12	0,00	0,00	1,00
13	0,00	0,00	1,00

XII. Escores fila análisis de efectos aditivos e interacción multiplicativa (AMMI).

Variables	e1	e2
DK619	-2.218,38	429,11
Lerma	-2.689,86	2.925,86
NK703	2.950,28	-524,40
Río Cisnes	-1.584,80	-1.982,89
Río Maipo	3.992,79	-239,65
Río Negro	1.481,31	2.053,93
Río Trancura	-1.931,33	-2.661,96



XIII. Escores columna análisis de efectos aditivos e interacción multiplicativa (AMMI).

Variabes	e1	e2
A_12	0,46	-0,62
A_12-N	-0,23	0,06
M_12-Rpc	0,70	0,63
M_13-Rllg	-0,08	0,01
M_13-Rpc	-0,24	0,10
M_12	-0,30	0,28
M_13	0,07	-0,04
M_13-N	-0,14	0,06
N_12	$-2,4 \times 10^{-03}$	$-3,7 \times 10^{-03}$
N_13	-0,07	-0,09
T_12	0,11	-0,34
T_12-N	-0,21	-0,01
T_13	-0,08	-0,02

M\_13: Mostazal 2013; N\_13: Nancagua 2013; M\_12: Mostazal 2012; N\_12: Nancagua 2012; T\_13: Talca 2013; T\_12: Talca 2012; A\_12: Antumapu 2012; T\_12-N: Talca 2012 sin nitrógeno; M\_13-N: Mostazal 2013 sin nitrógeno; M\_13-Rllg: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a madurez fisiológica; M\_13-Rpc: Mostazal 2013 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración; A\_12-N: Antumapu 2012 sin nitrógeno; M\_12-Rpc: Mostazal 2012 sin riego 20 días antes de floración a 20 días después de floración.

XIV. Resultado de análisis de suelo medidas en las distintas localidades previo a los ensayos.

Variable	Unidades	Localidad					
		Antumapu 2012	Mostazal 2012	Nancagua 2012	Talca 2012	Mostazal 2013	Talca 2013
pH	en agua	7,5	6,0	5,6	5,7	6,3	5,5
CE	mmhos cm <sup>-1</sup>	0,37	0,40	0,25	0,14	0,13	0,16
MO	%	2,4	3,4	2,7	2,4	2,6	2,4
N	mg kg <sup>-1</sup>	15	15	10	10	11	13
P	mg kg <sup>-1</sup>	5	55	22	13	45	27
K	mg kg <sup>-1</sup>	95	268	196	107	163	147

Las variables medidas corresponden a acidez (pH), conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), nitrógeno disponible (N), fósforo disponible (P), potasio disponible (K).