

# Estimación del comportamiento de híbridos de maíz mediante modelos mixtos

Biasutti, C.A. y M. Balzarini

## RESUMEN

La selección de cultivares superiores se basa en el comportamiento de éstos en los llamados ensayos multiambientales. El problema de la correcta elección de cultivares se incrementa cuando estos ensayos dan lugar a datos fuertemente desbalanceados, sumado a la presencia de la interacción genotipo x ambiente. Para identificar los mejores cultivares se ha empleado la mejor predicción insesgada o BLUP, empleando modelos lineales mixtos para el análisis de datos fenotípicos unidos a datos de relaciones de parentesco. Los objetivos del presente trabajo fueron: estimar el comportamiento de híbridos de maíz partir de datos desbalanceados, con y sin la inclusión del parentesco genético, y determinar el poder predictivo de los años de evaluación sobre el comportamiento de los genotipos. Se emplearon datos de rendimiento de 49 híbridos de maíz, desde 2006 hasta 2009, para las estimaciones de los BLUPS de cada genotipo. La inclusión de las relaciones de coancestría en el cálculo de los BLUPs permitió una mejor discriminación del material genético. Para la correcta discriminación de híbridos es recomendable el empleo de los tBLUP basados en más de 2 años, incluyendo ambientes de evaluación donde los cultivares experimentales puedan expresar su potencial de rendimiento.

**Palabras clave:** rendimiento, BLUPs, maíz

Biasutti, C.A. and M. Balzarini, 2012. Estimation of maize hybrids performance using mixed models. *Agriscientia* XXIX (2): 59-68

## SUMMARY

The selection of superior cultivars is based on its performance in the so-named multienvironments trials. The problem of the correct choice of cultivars is increased when these trials give rise to heavily unbalanced data in addition to the presence of the genotype x environment interaction. To identify the best cultivars, the best unbiased prediction or BLUP has been proposed, using linear mixed models for the analysis of phenotypic data together with data of kinship. The objectives of this study were: to estimate the performance of maize hybrids from unbalanced data, with or without the inclusion of the genetic kinship, and to determine the predictive power of the years of assessment on the performance of the genotypes. Performance data for 49 hybrids of maize

from 2006 to 2009 were used for the estimates of the BLUPs of each genotype. The consideration of relations of coancestry in the calculation of the BLUPs allowed a better discrimination between the genetic material. To improve the discrimination of hybrids according to their performance, the use of the tBLUP based on more than 2 years, including evaluation in environments which allow a better expression of the yield potential of experimental hybrids is recommended.

**Key words:** yield, BLUPs, maize.

*C.A. Biasutti (Mejoramiento Genético Vegetal) y M. Balzarini (Estadística y Biometría): Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, C.C 509, 5000 Córdoba, Argentina. Correspondencia a C.A. Biasutti: biasutti@agro.unc.edu.ar*

## INTRODUCCIÓN

La selección de cultivares superiores se basa en su comportamiento en los llamados ensayos multiambientales, principalmente teniendo en cuenta el rendimiento y otros caracteres de importancia agronómica. Estos ensayos permiten que los cultivares sean sometidos a la influencia de la variabilidad ambiental propia de la región objetivo. Por esta razón, este tipo de pruebas son adoptadas por programas de mejoramiento con la mayoría de los principales cultivos en todo el mundo. El análisis correcto y la efectiva interpretación de estos ensayos constituyen una parte fundamental de todo programa de mejoramiento genético vegetal.

En la mayoría de las ocasiones los ensayos de evaluación de cultivares experimentales no son perfectamente balanceados, es decir, no todos tienen la totalidad de los genotipos bajo ensayo o el mismo número de repeticiones; además, los cultivares de pobre desempeño son descartados tempranamente y continuamente se agregan nuevos cultivares cada año, lo que da lugar a bases de datos fuertemente desbalanceadas. Este serio problema de evaluación de genotipos para los programas de mejoramiento de maíz se refleja en que menos del 1% de los híbridos evaluados en ensayos de campo llegan a constituir cultivares comerciales (Hallauer, 1990).

Para valorar correctamente un cultivar, Sprague & Eberhart (1977) recomendaron realizar dos repeticiones por localidad y contar con tres a cinco ambientes para la evaluación de híbridos de maíz,

debido a que la interacción de los factores aditivos con el ambiente es usualmente significativa. Incrementando el número de ambientes se reduce la contribución sobre la varianza fenotípica, tanto del error combinado como de la interacción aditivaxambiente, mientras que al incrementar el número de repeticiones solamente se reduce el error experimental (Eberhart *et al.*, 1995).

Para identificar los mejores cultivares y aquellos híbridos promisorios, Bernardo (1994) abogó por el empleo de la mejor predicción insesgada o BLUP, empleando modelos lineales mixtos para el análisis de datos fenotípicos unidos a datos de relaciones de parentesco entre los genotipos.

El procedimiento MIXED consiste en la estimación o predicción de una combinación lineal de efectos fijos y aleatorios para los términos especificados del modelo, resultando en la valoración ajustada de los efectos fijos y de las componentes de varianza asociadas a los efectos aleatorios obteniendo, de esta manera, los BLUP. Este procedimiento estima los parámetros asociados a los efectos aleatorios ( $R_i$ ) utilizando el método de máxima verosimilitud (ML) o el método de máxima verosimilitud restringida (REML), aunque en el contexto de los modelos lineales mixtos, este último es más recomendado para la estimación de componentes de varianzas. La predicción de los efectos aleatorios se realiza vía BLUP, ya que éste predictor es el de menor error cuadrático medio entre los predictores lineales; el BLUP representa una contracción hacia el promedio de los efectos fijos ( $\bar{y}_j$ ) estimados a través de los métodos de mínimos cuadrados. Para ensayos multiambientales donde se prueban

varios genotipos en cada ambiente, el corrimiento o ajuste del estimador de la media se realiza en función de la razón entre la varianza genética y la varianza total del carácter en estudio:

$$R_i = y_i \left( \frac{\sigma_g^2}{\sigma_g^2 + \sigma_w^2/n} \right) = y_i \cdot H_i$$

donde  $\sigma_g^2$  varianza genética;  $\sigma_w^2$  componentes de varianza de efectos aleatorios (efectos ambientales);  $n$  número de ensayos en los cuales el genotipo es evaluado.

De acuerdo a la expresión anterior,  $R_i$  se relaciona, es decir, tiende al valor de la media general, con  $y_i$  de acuerdo a  $H_i$ , el cual es de hecho la heredabilidad en sentido amplio (DeLacy *et al.*, 1996) o repetibilidad del carácter a lo largo de diferentes ensayos (Piepho, 1994). Para un valor dado de  $\sigma_g^2$ , la contracción es más fuerte cuanto mayor es el error experimental  $\sigma_w^2$  en relación a la varianza genética. Lo mismo ocurre para cultivares probados en pocos o en muchos ensayos ( $n$ ). Debido a esto, la prueba basada en efectos aleatorios se considera más conservadora para cultivares poco evaluados, y altamente discriminatoria para cultivares probados convenientemente, lo que constituye una excelente propiedad de la metodología para la evaluación de cultivares (Piepho, 1994). Estos modelos pueden ser empleados para identificar genotipos superiores con datos desbalanceados y probados en un número reducido de ambientes, lo que generalmente acontece en programas públicos de mejora.

El problema de la correcta elección de cultivares se acentúa cuando las variaciones ambientales son marcadas, como ocurre en la zona semiárida de la provincia de Córdoba. Esto da lugar a una alta interacción genotipo x ambiente, lo cual dificulta la identificación de genotipos superiores.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1, estimar el comportamiento de híbridos de maíz partir de datos desbalanceados, con y sin la inclusión del parentesco genético; 2, determinar el poder predictivo de los años de evaluación sobre el comportamiento de los genotipos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Cuarenta y nueve híbridos simples de maíz se dispusieron en ensayos en bloque completos aleatorizados con dos repeticiones. Los genotipos se sembraron el 5 de noviembre y el 15 de

diciembre en los ciclos agrícolas 2005/2006 y 2006/2007, correspondiendo ambas fechas a una época tardía de siembra. Durante los ciclos 2007/2008 y 2008/2009 las fechas de siembra fueron el 15 de septiembre, correspondiendo a una siembra temprana, y el 11 de octubre considerada como fecha de siembra normal, respectivamente. El tamaño de parcela fue de dos surcos de 5 m de longitud, con una distancia entre surcos de 0,7 m. La distancia entre plantas dentro del surco fue en todos los casos de 0,25 m. Se sembraron dos semillas por golpe, raleándose al estado de dos/tres hojas a una planta por golpe. Se aplicó un herbicida de preemergencia (atrazina) para control de las malezas. Después de la emergencia las malezas se controlaron manualmente. El rendimiento en grano se calculó sobre la base del peso total de la parcela ajustado a un contenido de humedad de 14%. Se analizaron los datos de rendimiento en grano de los 49 híbridos evaluados en las cuatro campañas agrícolas mediante el procedimiento MIXED de SAS (SAS, 2004), que permite ajustar modelos lineales mixtos. Para la estimación de los componentes de varianza, la variación debida a los híbridos, los años de evaluación, la interacción híbrido x año y las repeticiones anidadas dentro del factor año fueron considerados como efectos aleatorios. Si bien existe en la literatura un considerable debate acerca de la razonabilidad de considerar el factor genotipo como de efecto aleatorio, en este trabajo la suposición se fundamentó en el hecho de considerar que los genotipos en evaluación pueden ser entendidos como una muestra aleatoria de una población de individuos de la cual han resultado seleccionados (Piepho & Möhring, 2006).

En este trabajo se obtuvieron los BLUPs para cada genotipo híbrido evaluado. Estos BLUPs estimados representan el valor de rendimiento predicho para cada genotipo con respecto a la media general. Para evaluar la presencia de interacción entre los efectos híbrido y año, se consideraron como factores de efectos aleatorios no sólo al genotipo sino también a la interacción. La prueba estadística realizada evalúa si la diferencia de un valor predicho, positivo o negativo, de BLUP (que representa un desvío de la variable respuesta en relación a la media general) es significativo o no. La prueba se realizó mediante el estadístico  $t$  para el BLUP empírico, es decir, el BLUP predicho usando estimadores de los componentes de varianza obtenidos de los mismos datos (tBLUP). El estadístico  $t$  es la relación entre el valor de BLUP empírico predicho y el error de predicción asociado (Yan & Rajcan, 2002).

Se realizó un análisis de cada campaña por

separado para evaluar la influencia de cada ambiente en particular sobre los BLUPs estimados de cada híbrido. La relación entre los tBLUPs estimados para cada combinación híbrido-año se estudió mediante la correlación de Spearman, con un nivel de significación del 5%.

Complementariamente al análisis descrito también se evaluó el comportamiento de los 49 híbridos, incorporando la información sobre parentesco entre los híbridos. Esta información fue obtenida a partir del cálculo del coeficiente de coancestría (Falconer, 1981). Para tal fin se empleó el procedimiento INBREED de SAS, que permite obtener la coancestría entre cada par de genotipos en evaluación según la identificación de la línea usada como parental femenino y como parental masculino en cada caso. La matriz de coeficientes generada se incluyó en el análisis de los híbridos con el procedimiento MIXED de SAS, a través de una opción que permite especificar que la matriz de varianzas y covarianzas de los efectos aleatorios está conformada como elementos constituidos a partir de combinaciones lineales de componentes de varianza y donde la varianza es ponderada por la relación de parentesco.

El número de híbridos experimentales fue variable a lo largo de las campañas de evaluación, ya que algunos fueron descartados por pobre desempeño y, además, se fueron agregando nuevos híbridos experimentales, fundamentalmente en los dos últimos años de evaluación (Tabla 1).

Para estudiar la dispersión de híbridos y su relación con los ambientes de evaluación se emplearon los modelos de regresión por sitio denominados SREG, (Cornelius *et al.*, 1996; Crossa & Cornelius, 1997), utilizando el programa Info Gen (Balzarini *et al.*, 2004).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rendimiento mostró un rango que estuvo comprendido entre un mínimo de 42,03 q/ha y un máximo de 125,99 q/ha, mientras que el valor medio observado fue de 77,86 q/ha. La variación del rendimiento en las cuatro campañas fue marcadamente diferente, lo que pone de manifiesto la gran variabilidad ambiental producida por los diferentes años de evaluación, el diferente número de genotipos incluidos en ensayos y la variación en las épocas de siembra.

En todas las campañas, mediante el análisis de la varianza se detectaron diferencias altamente significativas ( $p > 0,01$ ) entre los híbridos analizados. Los valores de  $R^2$  y del coeficiente de variación (CV) fueron de 0,9 y 7,92; 0,92 y 6,54; 0,94 y 4,75 y 0,92 y 4,59 para las cuatro campañas respectivamente.

Los componentes de varianza estimados mediante el modelo mixto ajustado con el procedimiento MIXED de SAS se muestran en las Tabla 2. Los años (ambientes) de evaluación y la interacción híbrido x año fueron las fuentes de variación más importantes en el análisis en conjunto de los cuatro años de evaluación. La variación estimada correspondiente a los híbridos fue del 16,25% del total; la de los años, de 39,62%, y la de la interacción híbrido x año, del 37,58%.

**Tabla 2.** Componentes de varianza para híbridos, años, interacción híbrido x año, bloques y residuo en 49 híbridos de maíz evaluados durante 4 años

| Fuente de Variación | Varianza |
|---------------------|----------|
| Híbridos            | 50,78    |
| Años                | 123,78   |
| Híbrido x Año       | 117,42   |
| Bloques (Años)      | 1,37     |
| Residuo             | 19,03    |

**Tabla 1.** Denominación y cantidad de híbridos experimentales de maíz evaluados en distintas campañas agrícolas.

| Campaña                        | 2005/2006   | 2006/2007   | 2007/2008  | 2008/2009  |
|--------------------------------|---|---|--|--|
| Híbridos                       | 213, 216, 217, 218,<br>225, 227, 228, 229,<br>230, 239, 240, 241,<br>242, 245, 246, 250,<br>251, 258, 283 | 205, 213, 216, 217,<br>218, 225, 227, 228,<br>229, 230, 239, 240,<br>241, 242, 244, 245,<br>246, 248, 249, 250,<br>251, 252, 253, 602 | 205, 213, 225, 227, 228,<br>229, 230, 239, 240, 241,<br>242, 244, 245, 246, 250,<br>251, 258, 269, 270, 271,<br>272, 273, 274, 275, 276,<br>277, 278, 279, 280, 281,<br>283, 284, 285, 286, 600,<br>601, 602, 603, 604, 607,<br>608, 609 | 205, 213, 225, 241, 244,<br>246, 250, 269, 272, 274,<br>276, 277, 278, 281, 284,<br>286, 600, 601, 602, 603,<br>604, 607, 608, 609 |
| Cantidad de híbridos evaluados | 19  | 25  | 42   | 23   |

Estos valores indican una gran influencia del ambiente sobre el comportamiento de los cultivares y un cambio en el ranking u orden de mérito de los genotipos en los años de evaluación. Ello es esperable teniendo en cuenta la variación entre las campañas, propias de una región semiárida, y también la eliminación de híbridos inferiores y la incorporación de nuevos genotipos.

En la Tabla 3 se muestran los estimadores del efecto aleatorio de cada híbrido, referido como el BLUP en relación a la media general, el error de predicción de los BLUP o error estándar (EE), los grados de libertad, el valor de t asociado al BLUP, y la probabilidad asociada a cada valor de t. Los valores BLUP variaron entre -10,6972 y 9,7497, lo que indica una gran desviación de los rendimientos individuales respecto a la media general. Sin embargo, de todos los genotipos evaluados, un solo híbrido, el 242, mostró un comportamiento estadísticamente inferior a la media (P<0,05), demostrado por el valor del tBLUP (-2,22). Con respecto a los que mostraron un valor alto y positivo de BLUP, indicando la superioridad sobre la media general, solamente el híbrido 604, producto de la cruce de líneas templadasxsubtropicales, mostró un valor de tBLUP de 1,85 significativo a un nivel de significación del 10%.

Independientemente de la significancia estadística de los valores de BLUP para cada híbrido, (tBLUP>1,88), es factible estimar la diferencia entre dos híbridos en particular según sus estimadores BLUP. Yan & Rajcan (2002) propusieron adoptar el estadístico t que es empleado para la comparación de los efectos fijos entre dos genotipos, la diferencia entre los BLUP de dos genotipos puede ser evaluado mediante el siguiente estadístico t:

$$t_{12} = \frac{BLUP_1 - BLUP_2}{\sqrt{SE_1^2 + SE_2^2}}$$

Aproximadamente  $SE_1 \approx SE_2$ , luego:

$$t_{12} = \sqrt{t_1 - t_2}$$

Así el valor de t para comparar los BLUPs de dos cultivares puede ser estimado por la diferencia entre los valores t de cada uno de los cultivares. Para estimar si esa diferencia es significativa, Yan & Rajcan (2002) mencionan que, al nivel de significación del 5%, el valor de t debe ser igual o mayor a 2, o sea que:

**Tabla 3.** Efectos aleatorios para rendimiento estimados en 49 híbridos de maíz a partir de ensayos en 4 años.

| Híbrido | BLUP     | EE     | g.l. | t Valor | Pr >  t |
|---------|----------|--------|------|---------|---------|
| 205     | 5,4090   | 4,8070 | 105  | 1,13    | 0,2631  |
| 213     | 0,6382   | 4,4649 | 105  | 0,14    | 0,8866  |
| 216     | 0,5359   | 5,2814 | 105  | 0,10    | 0,9194  |
| 217     | -0,6416  | 5,2814 | 105  | -0,12   | 0,9035  |
| 218     | 3,4395   | 5,2814 | 105  | 0,65    | 0,5163  |
| 225     | 4,8797   | 4,4649 | 105  | 1,09    | 0,2769  |
| 227     | 0,9520   | 4,8151 | 105  | 0,20    | 0,8437  |
| 228     | -2,3027  | 4,8151 | 105  | -0,48   | 0,6335  |
| 229     | -3,2785  | 4,8151 | 105  | -0,68   | 0,4975  |
| 230     | 1,9865   | 4,8151 | 105  | 0,41    | 0,6808  |
| 239     | -5,8755  | 4,8151 | 105  | -1,22   | 0,2251  |
| 240     | -8,1347  | 4,8151 | 105  | -1,69   | 0,0941  |
| 241     | -0,8275  | 4,4649 | 105  | -0,19   | 0,8533  |
| 242     | -10,6972 | 4,8151 | 105  | -2,22   | 0,0285  |
| 244     | 1,3375   | 4,8070 | 105  | 0,28    | 0,7814  |
| 245     | -8,9211  | 4,8151 | 105  | -1,85   | 0,0667  |
| 246     | 1,5644   | 4,4649 | 105  | 0,35    | 0,7267  |
| 248     | 1,5618   | 5,8924 | 105  | 0,27    | 0,7915  |
| 249     | 1,7177   | 5,8924 | 105  | 0,29    | 0,7712  |
| 250     | 0,1968   | 4,4649 | 105  | 0,04    | 0,9649  |
| 251     | -3,7979  | 4,8151 | 105  | -0,79   | 0,4320  |
| 252     | 0,03621  | 5,8924 | 105  | 0,01    | 0,9951  |
| 253     | -1,4828  | 5,8924 | 105  | -0,25   | 0,8018  |
| 258     | -6,4894  | 5,2664 | 105  | -1,23   | 0,2206  |
| 269     | 4,0417   | 5,2616 | 105  | 0,77    | 0,4441  |
| 270     | -2,4718  | 5,8769 | 105  | -0,42   | 0,6749  |
| 271     | -2,8033  | 5,8769 | 105  | -0,48   | 0,6343  |
| 272     | 3,8379   | 5,2616 | 105  | 0,73    | 0,4674  |
| 273     | 0,9876   | 5,8769 | 105  | 0,17    | 0,8669  |
| 274     | -0,9057  | 5,2616 | 105  | -0,17   | 0,8637  |
| 275     | -8,1132  | 5,8769 | 105  | -1,38   | 0,1704  |
| 276     | 2,0836   | 5,2616 | 105  | 0,40    | 0,6929  |
| 277     | -0,2913  | 5,2616 | 105  | -0,06   | 0,9559  |
| 278     | 0,3366   | 5,2616 | 105  | 0,06    | 0,9491  |
| 279     | -5,0818  | 5,8769 | 105  | -0,86   | 0,3892  |
| 280     | 4,2765   | 5,8769 | 105  | 0,73    | 0,4684  |
| 281     | -3,5189  | 5,2616 | 105  | -0,67   | 0,5051  |
| 283     | 6,0143   | 5,2664 | 105  | 1,14    | 0,2560  |
| 284     | 0,8361   | 5,2616 | 105  | 0,16    | 0,8741  |
| 285     | -2,1376  | 5,8769 | 105  | -0,36   | 0,7168  |
| 286     | -1,1345  | 5,2616 | 105  | -0,22   | 0,8297  |
| 600     | 3,6028   | 5,2616 | 105  | 0,68    | 0,4950  |
| 601     | 8,5805   | 5,2616 | 105  | 1,63    | 0,1059  |
| 602     | 0,7419   | 5,2573 | 105  | 0,14    | 0,8880  |
| 603     | 7,2702   | 5,2616 | 105  | 1,38    | 0,1700  |
| 604     | 9,7497   | 5,2616 | 105  | 1,85    | 0,0667  |
| 607     | 2,1505   | 5,2616 | 105  | 0,41    | 0,6836  |
| 608     | -4,0208  | 4,8070 | 105  | -0,84   | 0,4048  |
| 609     | 4,1629   | 5,2616 | 105  | 0,79    | 0,4306  |

Referencias: Blup: mejor predictor lineal insesgado; EE: error de predicción del Blup; GL: grados de libertad; t: Blup/EE; Pr > |t|: probabilidad del valor de t.

$$(t_1 - t_2) \geq 2\sqrt{2} \approx 2,828 \approx 3$$

Por lo tanto, dos genotipos pueden ser considerados diferentes si sus valores de tBLUPs difieren en 3 o más unidades. De acuerdo a lo anterior, el cultivar 604, que mostró el valor más alto de tBLUP, superó estadísticamente a seis cultivares, los híbridos 239, 240, 242, 245, 258, y 275.

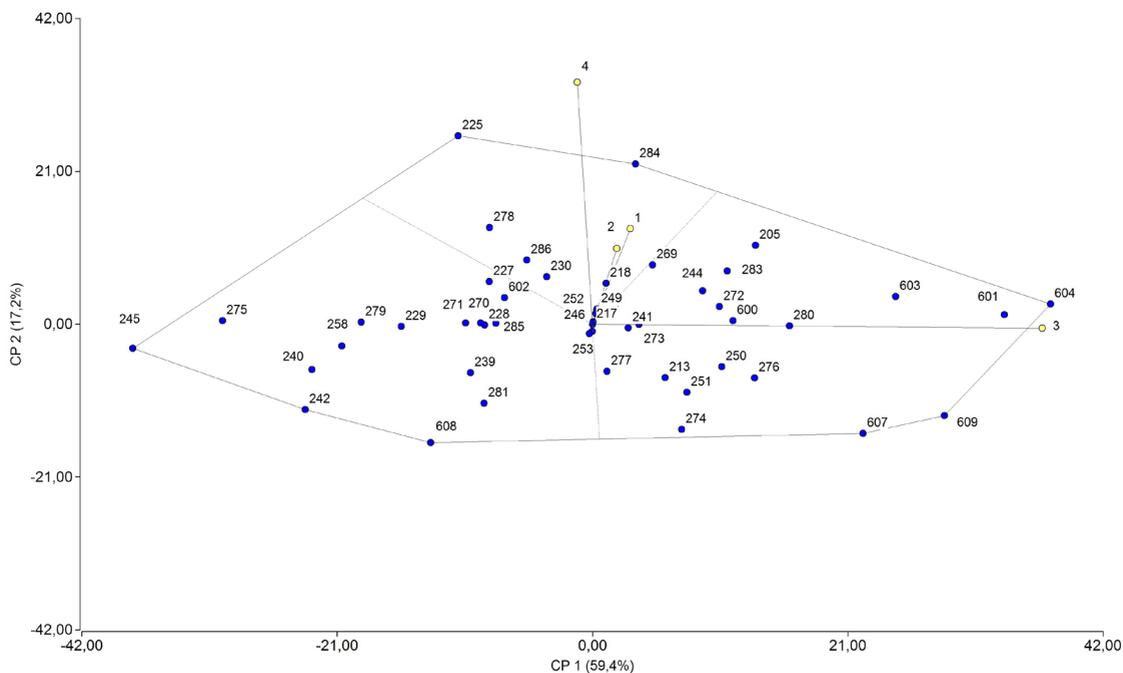
En la Figura 1 se observa una gran variabilidad para rendimiento de acuerdo a la componente principal 1 (CP1), que explicó el 59% de la variación total, donde resulta manifiesta la diferencia entre los años 3 y 4, que no presentan correlación entre sí según el ángulo de casi 90° entre los vectores de ambos. Los híbridos asociados a ellos fueron el 604, 601, 609, 603 y 607 para el año 3 y los híbridos 225, 284 y 278 en el año 4. Los años 1 y 2, fueron de menor poder discriminatorio para los híbridos y relacionados entre sí, según sugiere el ángulo agudo observado entre sus respectivos vectores.

La mayor discriminación entre los genotipos, observada en el año 3, puede estar asociada al mayor número de genotipos evaluados, lo que representó una mayor variabilidad para el rendimiento y, además, constituyó el ambiente donde los cultivares se sembraron anticipadamente con respecto a los otros 3 años de evaluación.

Los efectos aleatorios estimados para la interacción híbrido-año (datos no mostrados) mostraron que algunos híbridos presentaron un comportamiento diferente según el año de evaluación. Teniendo en cuenta sólo los valores de tBLUP significativos, en el año 3 de evaluación se observaron 13 híbridos que presentaron valores de tBLUP significativos, tres híbridos con valores de tBLUP significativos en los años 4 y 1 y dos híbridos con valores tBLUP significativos en el año 2.

Tres híbridos presentaron valores positivos de tBLUP en uno de los años de evaluación y negativos en otro. El híbrido 225, -3,00 en el año 3 y 3,52 en el año 4; el híbrido 251, -2,07 en el año 1 y 2,27 en el año 3 y el híbrido 607, 3,10 en el año 3 y -2,10 en el año 4. De los mencionados, dos, el 225 y el 251, son producto de la cruce de líneas templadas, y el restante 607, es producto de la cruce de líneas subtropicales, todas ellas selectas por componentes del rendimiento.

Los híbridos 251, 601, 603, 604, 607 y 609 presentaron valores de BLUPs positivos y significativos, superiores a la media general, en el año 3. Cabe destacar que, salvo el 251, los restantes híbridos mencionados corresponden a los últimos híbridos incorporados a la evaluación, es decir sus líneas parentales ya habían sido probadas en otras combinaciones.



**Figura 1.** Biplot GGE de 49 híbridos de maíz evaluados para rendimiento en grano en 4 campañas (1: 2005/2006, 2: 2006/2007, 3: 2007/2008 y 4: 2008/2009).

### Análisis del rendimiento por año de evaluación

Los análisis en cada año se realizaron considerando los híbridos y las repeticiones como efectos aleatorios, empleando el procedimiento MIXED de SAS. El año 3, ambiente en el cual los genotipos fueron implantados en forma más temprana que en los otros, presentó la mayor variación entre los híbridos evaluados y el menor error experimental (Tabla 4). Este ambiente de evaluación fue en el que se probaron mayor cantidad de genotipos, 42 híbridos, lo que indudablemente contribuyó a incrementar la varianza entre genotipos en comparación con los otros tres ambientes.

**Tabla 4.** Componentes de varianza para híbridos, bloques y residuo experimental según campaña de evaluación.

| Fuente de Variación | Varianza |       |        |       |
|---------------------|----------|-------|--------|-------|
|                     | Año 1    | Año 2 | Año 3  | Año 4 |
| Híbridos            | 102,62   | 96,61 | 268,68 | 92,79 |
| Bloques             | 0,00     | 2,51  | 1,65   | 0,74  |
| Residuo             | 27,16    | 17,46 | 16,63  | 18,62 |

Los híbridos con valores superiores a la media general en el primer año de evaluación fueron los híbridos 283, 225, 230, 213 y 227. Los híbridos promisorios en el año 2, de acuerdo al valor de tBLUP, fueron los híbridos 218, 246, 602, 227 y 225. En el año 3 se destacaron los híbridos 205, 244, 250, 251, 272, 276, 280, 283, 285, 601, 603, 604, 607 y 609. Los híbridos 205, 225 y 269 se destacaron del resto de los genotipos por sus valores de tBLUP significativos y positivos durante la evaluación en el año 4. Los híbridos 225 y 227 se destacaron en las dos primeras campañas de evaluación, las de menor rendimiento. El cultivar 225 también mostró un buen comportamiento en la última campaña.

Para determinar el poder discriminatorio de cada año de evaluación comparado con la evaluación conjunta, se clasificó a los híbridos en superiores (valor 1) –cuando el valor de tBLUP fue significativamente superior a la media general, de acuerdo al correspondiente nivel de probabilidad–, inferiores (-1) e intermedios (0) (Tabla 5).

De los 35 híbridos que fueron evaluados en dos o más años, 28 (80%) no mostraron valores opuestos (1 y -1) de tBLUP. Los siete restantes (20%) presentaron valores opuestos en alguno de los años de evaluación. Yan & Rajcan (2003), evaluando genotipos de soja, encontraron que si un cultivar mostraba un valor de 1, en los otros años mostraba 1 también o al menos 0, pero no -1. Lo mismo acontecía si el cultivar mostraba un valor de -1, luego alcanzaba valores de 0, pero no de 1. Con base en esto, y a pesar de mostrar bajos

**Tabla 5.** Clasificación de 49 híbridos de maíz de acuerdo al valor de tBLUP obtenidos en años individuales y a través de los distintos años agrícolas.

| Híbridos | Años de evaluación |    |    |    | Cuatro Años |
|----------|--------------------|----|----|----|-------------|
|          | 1                  | 2  | 3  | 4  |             |
| 205      | #                  | 0  | 1  | 1  | 0           |
| 213      | 1                  | 0  | 0  | -1 | 0           |
| 216      | 0                  | 0  | #  | #  | 0           |
| 217      | 0                  | 0  | #  | #  | 0           |
| 218      | 0                  | 1  | #  | #  | 0           |
| 225      | 1                  | 1  | -1 | 1  | 0           |
| 227      | 0                  | 1  | -1 | #  | 0           |
| 228      | 0                  | 0  | -1 | #  | 0           |
| 229      | 0                  | 0  | -1 | #  | 0           |
| 230      | 1                  | 0  | 0  | #  | 0           |
| 239      | 0                  | -1 | -1 | #  | 0           |
| 240      | 0                  | -1 | -1 | #  | 0           |
| 241      | 0                  | -1 | 0  | 0  | 0           |
| 242      | -1                 | -1 | -1 | #  | -1          |
| 244      | #                  | 0  | 1  | 0  | 0           |
| 245      | 0                  | 0  | -1 | #  | 0           |
| 246      | 0                  | 1  | 0  | 0  | 0           |
| 248      | #                  | 0  | #  | #  | 0           |
| 249      | #                  | 0  | #  | #  | 0           |
| 250      | -1                 | 0  | 1  | 0  | 0           |
| 251      | -1                 | -1 | 1  | #  | 0           |
| 252      | #                  | 0  | #  | #  | 0           |
| 253      | #                  | 0  | #  | #  | 0           |
| 258      | 0                  | #  | -1 | #  | 0           |
| 269      | #                  | #  | 0  | 1  | 0           |
| 270      | #                  | #  | -1 | #  | 0           |
| 271      | #                  | #  | -1 | #  | 0           |
| 272      | #                  | #  | 1  | 0  | 0           |
| 273      | #                  | #  | 0  | #  | 0           |
| 274      | #                  | #  | 0  | -1 | 0           |
| 275      | #                  | #  | -1 | #  | 0           |
| 276      | #                  | #  | 1  | 0  | 0           |
| 277      | #                  | #  | 0  | 0  | 0           |
| 278      | #                  | #  | -1 | 0  | 0           |
| 279      | #                  | #  | -1 | #  | 0           |
| 280      | #                  | #  | 1  | #  | 0           |
| 281      | #                  | #  | -1 | -1 | 0           |
| 283      | 1                  | #  | 1  | #  | 0           |
| 284      | #                  | #  | 0  | 0  | 0           |
| 285      | #                  | #  | -1 | #  | 0           |
| 286      | #                  | #  | 0  | 0  | 0           |
| 600      | #                  | #  | 1  | 0  | 0           |
| 601      | #                  | #  | 1  | 0  | 0           |
| 602      | #                  | 1  | -1 | 0  | 0           |
| 603      | #                  | #  | 1  | 0  | 0           |
| 604      | #                  | #  | 1  | 0  | 1           |
| 607      | #                  | #  | 1  | -1 | 0           |
| 608      | #                  | #  | -1 | -1 | 0           |
| 609      | #                  | #  | 1  | -1 | 0           |

Referencias: 1 significativamente superior a la media general; -1 significativamente inferior a la media general y 0 no significativamente diferente. # No evaluado

coeficientes de correlación entre los ambientes de evaluación, los autores concluyeron que los datos de un ambiente eran suficientemente confiables para predecir el comportamiento de los cultivares en el siguiente año. Con esto podían recomendar el descarte de aquellos cultivares que presentaron un valor de -1, pues seguramente presentarían igual comportamiento en los años subsiguientes de evaluación; es decir, un cultivar que se comportaba bien en un año, era muy probable que se comportara de la misma forma en las evaluaciones siguientes. Lo mismo con un cultivar de pobre desempeño: si mostraba un valor de -1, luego podía llegar a mostrar un valor de 0, pero no de 1.

Cross & Helm (1986) encontraron que la selección de híbridos basadas en datos provenientes de uno o dos años fue más eficiente que la realizada con base en tres años previos. Bowman (1998) comparó la probabilidad de predicción de las mejores variedades de maíz basados en dos años previos, y encontró que los datos de un año con varias localidades fueron los que permitieron la mejor selección de híbridos de maíz. Esto justifica la práctica común en los mejoradores de descartar genotipos de pobre comportamiento basados en los resultados de un ensayo realizado en un solo año.

De acuerdo a los valores observados en este trabajo, un 20% de los híbridos presentó valores opuestos (1 y -1) a lo largo de dos o más años de evaluación. El ambiente de evaluación puede haber influido en el comportamiento, dado que los ambientes 1 y 2 fueron de siembra tardía y estuvieron caracterizados por bajos rendimientos, mientras que los ambientes 3 y 4 fueron sembrados más tempranamente y presentaron rendimientos superiores a los ambientes 1 y 2.

Con respecto a los cultivares que mostraron un valor de 0, éstos pueden haber presentado un comportamiento similar a la media general o pueden haber sido no suficientemente evaluados, lo que causa que los BLUPs se aproximen al valor medio (Yan & Rajcan, 2003). La correlación entre los valores de tBLUP de los híbridos a través de los años de evaluación, mostrada en la Tabla 6, fue no significativa, salvo el coeficiente entre los años 1 y 2 de  $r=0,54$  ( $P<0,05$ ).

Tabla 6. Coeficientes de correlación de Spearman entre valores de tBLUP para rendimiento en grano obtenidos en 4 años.

| Años de Evaluación | 1     | 2    | 3    | 4 |
|--------------------|-------|------|------|---|
| 1                  | 1     |      |      |   |
| 2                  | 0,54* | 1    |      |   |
| 3                  | 0,20  | 0,06 | 1    |   |
| 4                  | 0,15  | 0,40 | 0,26 | 1 |

\*: significativo al 5%.

Sobre la base de estos resultados no es posible fundamentar la decisión de descartar o, por el contrario, seleccionar un cultivar híbrido de acuerdo a un solo año de evaluación. Con respecto al trabajo de Yan & Rajcan (2003), es necesario remarcar que en dicho estudio se utilizaron como predictores ensayos en un solo año, pero incluyendo varios ambientes o localidades, mientras que en este estudio sólo se evaluaron los híbridos en un solo ambiente por año.

### Estimación del comportamiento de los híbridos incluyendo las relaciones de parentesco

Los resultados del análisis incluyendo las relaciones de parentesco se muestran en la Tabla 7. De acuerdo a estos resultados los genotipos que mostraron un valor inferior a la media general fueron los híbridos 217, 229, 239, 242, 245, 251 y 258. Los cultivares que se mostraron superiores a la media fueron los híbridos 269, 272, 600, 601, 603, 604 y 609. Analizando los genotipos que mostraron valores significativos de tBLUP, y por lo tanto son considerados inferiores o superiores a la media general (Tabla 8), se observa que la inclusión de las relaciones de parentesco decididamente tuvo una marcada influencia en la diferenciación de los cultivares. Con relaciones de parentesco incluidas se identificaron 16 híbridos (32%), siempre considerando aquellos cultivares evaluados al menos en dos ambientes como mínimo, contra 2 (4%) sin incluir relaciones. De los genotipos identificados con la inclusión de las relaciones de parentesco, el 81% correspondió a aquellos que fueron evaluados en 2 o más años. Piepho *et al.* (2008) argumentaron que si el propósito es solamente la estimación del valor genotípico, como cuando el material será usado como genotipo final, las estimaciones de los BLUP sin el empleo de las relaciones de parentesco son perfectamente viables. Sin embargo, en este trabajo se observa claramente que la inclusión de las relaciones de coancestría permitió una mejor discriminación del material genético, al identificar genotipos inferiores y superiores a la media. Una característica de los BLUP es su habilidad para utilizar las relaciones entre genotipos al explotar las correlaciones genéticas a partir de los datos de pedigrí. Cuanto mayor sea la correlación entre los genotipos, en este caso dado por aquellos híbridos que compartan líneas parentales, mayor será la información que será extraída del fenotipo.

En conclusión, la inclusión de las relaciones de coancestría para el cálculo de los BLUPs claramente permitió una mejor discriminación

Tabla 7. Predicción del mérito genético para 49 híbridos de maíz incluyendo las relaciones de parentesco entre híbridos

| Híbrido | Blup     | EE     | DF  | t Value | Pr >  t |
|---------|----------|--------|-----|---------|---------|
| 205     | 9,4782   | 4,9276 | 168 | 1,92    | 0,0561  |
| 213     | -1,1914  | 4,4420 | 168 | -0,27   | 0,7889  |
| 216     | -9,0166  | 5,7050 | 168 | -1,58   | 0,1159  |
| 217     | -11,3066 | 5,7050 | 168 | -1,98   | 0,0491  |
| 218     | -3,3699  | 5,7050 | 168 | -0,59   | 0,5555  |
| 225     | 5,2604   | 4,4420 | 168 | 1,18    | 0,2380  |
| 227     | -3,3775  | 4,9276 | 168 | -0,69   | 0,4940  |
| 228     | -8,8185  | 4,9276 | 168 | -1,79   | 0,0753  |
| 229     | -10,4497 | 4,9276 | 168 | -2,12   | 0,0354  |
| 230     | -1,6481  | 4,9276 | 168 | -0,33   | 0,7384  |
| 239     | -14,7913 | 4,9276 | 168 | -3,00   | 0,0031  |
| 240     | -18,5679 | 4,9276 | 168 | -3,77   | 0,0002  |
| 241     | -3,4209  | 4,4420 | 168 | -0,77   | 0,4423  |
| 242     | -22,8517 | 4,9276 | 168 | -4,64   | <,0001  |
| 244     | 2,6718   | 4,9276 | 168 | 0,54    | 0,5884  |
| 245     | -19,8827 | 4,9276 | 168 | -4,04   | <,0001  |
| 246     | 0,2175   | 4,4420 | 168 | 0,05    | 0,9610  |
| 248     | -5,2619  | 7,2267 | 168 | -0,73   | 0,4676  |
| 249     | -4,8580  | 7,2267 | 168 | -0,67   | 0,5024  |
| 250     | -1,8629  | 4,4420 | 168 | -0,42   | 0,6755  |
| 251     | -11,3180 | 4,9276 | 168 | -2,30   | 0,0229  |
| 252     | -9,2154  | 7,2267 | 168 | -1,28   | 0,2040  |
| 253     | -13,1518 | 7,2267 | 168 | -1,82   | 0,0706  |
| 258     | -14,0822 | 5,7050 | 168 | -2,47   | 0,0146  |
| 269     | 13,9990  | 5,7050 | 168 | 2,45    | 0,0152  |
| 270     | -1,2331  | 7,2267 | 168 | -0,17   | 0,8647  |
| 271     | -2,0922  | 7,2267 | 168 | -0,29   | 0,7725  |
| 272     | 13,6028  | 5,7050 | 168 | 2,38    | 0,0182  |
| 273     | 7,7317   | 7,2267 | 168 | 1,07    | 0,2862  |
| 274     | 4,3778   | 5,7050 | 168 | 0,77    | 0,4439  |
| 275     | -15,8525 | 7,2267 | 168 | -2,19   | 0,0296  |
| 276     | 10,1912  | 5,7050 | 168 | 1,79    | 0,0758  |
| 277     | 5,5726   | 5,7050 | 168 | 0,98    | 0,3301  |
| 278     | 6,7938   | 5,7050 | 168 | 1,19    | 0,2354  |
| 279     | -7,9968  | 7,2267 | 168 | -1,11   | 0,2701  |
| 280     | 16,2548  | 7,2267 | 168 | 2,25    | 0,0258  |
| 281     | -0,7040  | 5,7050 | 168 | -0,12   | 0,9019  |
| 283     | 10,2338  | 5,7050 | 168 | 1,79    | 0,0746  |
| 284     | 7,7651   | 5,7050 | 168 | 1,36    | 0,1753  |
| 285     | -0,3671  | 7,2267 | 168 | -0,05   | 0,9596  |
| 286     | 3,9328   | 5,7050 | 168 | 0,69    | 0,4915  |
| 600     | 13,1456  | 5,7050 | 168 | 2,30    | 0,0224  |
| 601     | 22,8257  | 5,7050 | 168 | 4,00    | <,0001  |
| 602     | -1,0129  | 5,7050 | 168 | -0,18   | 0,8593  |
| 603     | 20,2776  | 5,7050 | 168 | 3,55    | 0,0005  |
| 604     | 25,0994  | 5,7050 | 168 | 4,40    | <,0001  |
| 607     | 10,3212  | 5,7050 | 168 | 1,81    | 0,0722  |
| 608     | -6,2858  | 4,9276 | 168 | -1,28   | 0,2038  |
| 609     | 14,2347  | 5,7050 | 168 | 2,50    | 0,0136  |

Referencias: Blup: mejor predictor lineal insesgado; EE: error de predicción del Blup; GL: grados de libertad; t: Blup/EE; Pr > |t|: probabilidad del valor de t.

Tabla 8. Valores de tBLUP significativos en híbridos analizados sin y con relaciones de parentesco.

| Híbrido | tBLUP          |                |
|---------|----------------|----------------|
|         | Sin Parentesco | Con Parentesco |
| 217     | 0              | -1             |
| 229     | 0              | -1             |
| 239     | 0              | -1             |
| 242     | -1             | -1             |
| 245     | 0              | -1             |
| 251     | 0              | -1             |
| 258     | 0              | -1             |
| 269     | 0              | 1              |
| 272     | 0              | 1              |
| 275     | 0              | -1             |
| 280     | 0              | 1              |
| 600     | 0              | 1              |
| 601     | 0              | 1              |
| 603     | 0              | 1              |
| 604     | 1              | 1              |
| 609     | 0              | 1              |

Referencias: 1 significativamente superior a la media general; -1 significativamente inferior a la media general y 0 no significativamente diferente.

del material genético, al identificar genotipos inferiores y superiores a la media. Para la correcta discriminación de híbridos es recomendable el empleo de los tBLUP basados en más de 2 años incluyendo ambientes de evaluación donde los cultivares experimentales puedan expresar su potencial de rendimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Balzarini, M.; C. Bruno y A. Arroyo, 2004. Análisis de ensayos agrícolas multiambientales. Ejemplos con Info-Gen. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Córdoba. Argentina, Ed. Brujas, 141 pp.
- Bernardo, R., 1994. Prediction of maize single cross performance using RFLPs and information from related hybrids *Crop Sci.* 34:20-25.
- Bowman, D.T., 1998. Using crop performance data to select hybrids and varieties. *J. Prod. Agric.* 11:256-259.
- Cornelius, P.L.; J. Crossa and M.S. Seyedsadr, 1996. Statistical test and estimators of multiplicative models for genotype-by-environment interaction. En: *Genotype-by-Environment Interaction*. Kang M.S. and H.G. Gauch (eds.) CRC Press, Boca Raton, FL., pp. 199-234.
- Cross, H.Z. and J.L. Helm, 1986. Hybrid maize selection strategies based on state yield trials. *J. Agron. Educ.* 15:110-113.

- Crossa, J. and P.L. Cornelius, 1997. Sites regression and shifted multiplicative model clustering of cultivar trials sites and their heterogeneity of variants. *Crop Sci.*, 37: 406-415.
- DeLacy, I.H.; K.E. Basford, M. Cooper, J.K. Bull and C.G. McLaren, 1996. Analysis of multi-environment trials—a historical perspective. In: *Plant adaptation and crop improvement*. Cooper M. and G. L. Hammer (eds.) CAB Int., Wallingford, Oxon, UK., pp. 39–124.
- Eberhart, S.A.; W. Salhuana; R. Sevilla and S. Taba, 1995. Principles for tropical maize breeding. *Maydica*, 40: 339-355.
- Falconer, D.S., 1981. *Introducción a la Genética Cuantitativa*. 2nd Ed. Longman Inc. New York., 430 pp.
- Hallauer, A.R., 1990. Methods used in developing maize inbreds. *Maydica* 35: 1-16.
- Piepho, H.P., 1994. Best linear unbiased prediction (BLUP) for regional yield trials: A comparison to additive main effects and multiplicative interaction (AMMI) analysis. *Theor. Appl. Genet.* 89:647–654.
- Piepho, H.P. and J. Möhring, 2006. Selection in cultivar trials—is it ignorable? *Crop Sci.* 146:193–202.
- Piepho, H.P.; J. Möhring, A.E. Melchinger and A. Büchse, 2008. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica* 161: 209–228.
- SAS Institute. 2004. *SAS User's Guide*. SAS Inst. Cary, NC.
- Sprague, G.F. and S.A Eberhart, 1977. Corn breeding. En: Sprague, G.F. (Ed.) *Corn and corn improvement*. 2ed. Madison: American Society of Agronomy, pp.305-363.
- Yan, W. and I. Rajcan, 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybeans in Ontario. *Crop Sci.* 42: 11-20.
- Yan, W. and I. Rajcan, 2003. Prediction on cultivar performance based on single versus multiple year tests in soybean. *Crop Sci.* 43: 549-555.