



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 100 (1):
11-19; 2023



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Análisis de estabilidad y producción de líneas promisorias de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) en Paraguay

Aníbal Morel Yurenka* y Hideki Kurosaki**

*Centro Regional de Investigación Agrícola (CRIA), Actual; Instituto Paraguayo de Tecnología Agraria (IPTA), Capitán Miranda, Itapúa, R. Paraguay; **Hokkaido Research Organization (HRO), Central Agricultural Experiment Station, Hokkaido, Japón. E-mail: kurosaki-hideki@hro.or.jp

RESUMEN

La estimación de estabilidad de líneas de generación avanzada es importante en un mejoramiento genético para desarrollar un nuevo cultivar. El objetivo de esta investigación fue estudiar la estabilidad y la evaluación del rendimiento de líneas de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) en diferentes zonas de Paraguay. Se sembraron tres líneas de soja (LCM180, LCM168 y LCM176), correspondientes a tres cultivares comerciales, de los cuales uno era un cultivar paraguayo (Aurora) como testigo; y los restantes, dos cultivares generales brasileños. La siembra se hizo en seis localidades de la región productora de soja de Paraguay durante los ciclos 2007/08 y 2008/09. Los análisis estadísticos empleados fueron los métodos de Finlay and Wilkinson (1963), Eberhart and Russell (1966), Muir et al. (1992) y AMMI. El rendimiento y la adaptabilidad de LCM180 no se diferenciaron de los de Aurora. Las adaptabilidades de LCM 168 y LCM 176 fueron superiores a la de Aurora. Sin embargo, el rendimiento de LCM168 fue inferior al de las dos variedades brasileñas en la mayoría de las localidades. Por el contrario, el rendimiento y la estabilidad de LCM176 fueron superiores a los de Aurora. El rendimiento promedio de esta línea no se diferenció del rendimiento de los dos cultivares brasileños; además, su estabilidad resultó superior a la de estos.

Palabras clave: adaptabilidad, cultivares, interacción genotipo×ambiente, soja, rendimiento

ABSTRACT

Analysis of stability and seed yield of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) promising lines in Paraguay

The estimation of stability in promising lines is important in breeding for develop a new variety. The aim of this research was to study stability and the seed yield in soybean (*Glycine max* (L.) Merrill.) lines, sowing in different locations in Paraguay. Three lines (LCM180, LCM168 and LCM176) and three varieties including a Paraguayan variety Aurora and two Brazilian common varieties were tested in six locations of soybean production area in Paraguay during the two growing seasons; 2007/08 and 2008/09. The stability of soybean varieties and lines as regards yields were studied by Finlay and Wilkinson, Eberhart and Russell, Muir methods and AMMI. The yield of LCM180 was almost equal to yield of Aurora and the adaptability of this line is similar to the adaptability of Aurora. The adaptabilities of LCM168 and LCM176 were superior to the adaptability of Aurora. But the yield of LCM168 was lower than the yields of two Brazilian varieties in most of the locations. On the contrary, the yield and stability of LCM176 were better than those of Aurora. The average yield of this line was as equal as the two Brazilian cultivar's yields. In addition, its stability is superior to those Brazilian cultivars.

Key words: adaptability, genotype environment interaction, productivity, soybean, variety

Fecha de
recepción:
23/06/2022

Fecha de
aceptación:
08/11/2022

INTRODUCCIÓN

La producción de soja (*Glycine max* (L.) Merr.) continúa aumentando en Paraguay: en el ciclo 2019/20 abarcó una superficie cercana a 3.631.000 ha y la producción fue de aproximadamente 11.024.460 t (FAOSTAT), siendo un cultivo muy importante para la economía nacional. En Paraguay se requiere soja con rendimientos altos y calidad variada para atender las demandas del mercado externo. Por ejemplo, alto contenido de proteína y buena apariencia son deseados para vender el producto a países extranjeros. Estos requerimientos deberían estar acompañados por el conocimiento de la estabilidad y adaptabilidad de los genotipos en diferentes regiones donde puede desarrollarse el cultivo (Eberhart and Russell, 1966; Miranda *et al.*, 1998). En tal sentido hay contribuciones que consideran la relación genotipo x ambiente, en particular aquellos caracteres cuantitativos como altura de la planta y rendimiento para seleccionar un determinado genotipo (Finlay and Wilkinson, 1963; Lin *et al.*, 1986). Casi un 60 % de la soja paraguaya se exporta para fabricar aceite (FAOSTAT). En la actualidad, el cultivar paraguayo Aurora se exporta a otros países debido, además, a las características de la semilla (alta proteína, buen sabor), que permite elaborar queso de soja o tofu. Rico en proteínas y de elevado valor nutritivo, el tofu no es un alimento de alto consumo en Paraguay, pero sí lo es en otros países, como Estados Unidos, donde valoran sus aportes a la buena salud (Barnes, 1998). Por este motivo se investigó la estabilidad de rendimiento del grano y la adaptabilidad para la fabricación de tofu (Bhardwaj *et al.*, 1999; Rao *et al.*, 2002) en Estados Unidos. Con buena característica para tofu, Aurora se ha cultivado en Paraguay pero los granos no ofrecen estabilidad (datos no presentados) y todavía se cultivan en un área limitada. Por esta razón, en el Centro Regional de Investigación Agrícola (CRIA) se desarrollan materiales genéticos capaces de presentar mayor estabilidad que el cultivar Aurora, conservando a la vez el alto contenido de proteínas.

El rendimiento del grano de soja siempre es influido con fuerza por las condiciones de crecimiento. La estabilidad es la aptitud de los cultivares para expresar su potencial genético bajo una amplia gama de condiciones. El análisis de la interacción entre genotipo x ambiente es importante en el proceso de mejoramiento. Según Fehr (1987), la estabilidad de rendimiento por cada ambiente depende del contenido genético de cada material, y los genotipos responden a cambios en condiciones ambientales como temperatura, lluvia, humedad y tipo de suelo (Falconer and Mackay, 1995). Consecuentemente, los materiales desarrollados en los programas de mejoramiento genético deben ser evaluados en varias localidades durante diferentes ciclos para permitir un análisis adecuado de la interacción genotipo/ambiente antes de recomendar la siembra de aquellos como un nuevo cultivar. Al respecto, Kan *et al.* (2010) señalaron los métodos de Finlay and Wilkinson (1963) y Eberhart and Russell (1966) como los adecuados para analizar la estabilidad de cultivares. Muir *et al.* (1992) propusieron un método alternativo para separar la interacción genotipo x ambiente. El método AMMI (Efectos aditivos e interacción multiplicativa) propuesto por Zobel *et al.* (1988) se ha usado también para estimar la estabilidad de muchos cultivares. Los resultados obtenidos en otras especies asociaron caracteres agrícolas con los valores de interacción. Crossa *et al.* (1991) realizaron

el análisis de rendimiento de ensayos internacionales en el trigo con AMMI. También Van Oosterom *et al.* (1993) relacionaron ideotipos invernales precoces de avena de hábito de crecimiento postrado y coloración oscura con valores bajos de interacción genotipo x ambiente. Romagosa *et al.* (1993), al estudiar líneas isogénicas de cebada que diferían en tres genes mutantes independientes, determinaron una fuerte asociación entre los dos primeros ejes de ACP1 y caracteres fisiológicos.

En la presente investigación, el objetivo fue analizar el rendimiento y la estabilidad de líneas desarrolladas por CRIA con metodologías diferentes y complementarias para la evaluación de la interacción genotipo x ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio se usaron seis cultivares (tres comerciales y tres líneas) de soja, todos ellos de ciclo de maduración medio (aproximadamente a los 140 días desde la siembra hasta la madurez fisiológica). Se utilizaron las líneas Capitán Miranda LCM180, LCM176 y LCM168, desarrolladas en el CRIA, todas ellas seleccionadas para la elaboración de tofu. El testigo fue el cultivar Aurora desarrollado en el CRIA a través de la selección de la línea pura del cultivar ALA-60. Este genotipo se usa como materia prima para la preparación del tofu. LCM180 derivó del cruzamiento de Aurora (madre) y FT109 (padre); LCM176, del cruzamiento de Aurora (madre) y Epps (padre); y LCM168, del cruzamiento de una línea cruzada de Bedford (cultivar de Estados Unidos) por una línea cruzada de Coker6738 (madre) y FT-Estrella por ALA-60 (padre). La metodología para la obtención de las líneas fue el método de Bulk (Morel *et al.*, 2010). Los cultivares comerciales T1 y T2, desarrollados por una empresa brasilera, se usaron con fines comparativos y se cultivaron en numerosas áreas en Paraguay (Morel *et al.*, 2009). Ambos cultivares no son usados para la elaboración de tofu pero se cultivaron mucho en Paraguay por alto rendimiento. El contenido de proteína de grano en las tres líneas (LCM180, LCM176 y LCM168) es similar al de Aurora (42 %) y el porcentaje de proteína en T1 y T2 es inferior al de Aurora.

Los experimentos fueron realizados en las principales seis localidades de soja en Paraguay durante los ciclos 2007/08 y 2008/09 (Figura 1). La descripción de seis localidades y las fechas de siembra son mostradas en la Tabla 1.

En todas las localidades los experimentos se realizaron con el sistema de siembra directa y se fertilizaron con 4 kg/ha⁻¹ de N; 30 kg/ha⁻¹ de P₂O₅; y 10 kg/ha⁻¹ de K₂O. El diseño experimental fue de bloques completos al azar con tres repeticiones, con parcelas de 5 m largo y cuatro hileras con 0,45 m de separación entre ellas, siendo la superficie útil de las parcelas de 3,6 m². Se realizó la cosecha con una cosechadora, exceptuando las dos hileras internas de cada cabecera por efecto borde. Los datos registrados fueron altura de las plantas y rendimiento de granos. Se midió la altura de las plantas maduras, 10 plantas por parcela. El rendimiento es expresado en kg/ha⁻¹ ajustado al 13% de humedad.

Con estos datos se realizó un análisis de variancia por cada localidad y por cada ciclo. Los valores de promedio fueron analizados por la prueba de rango múltiple de Tukey ($p \leq 0,05$) para demostrar diferencia significa-

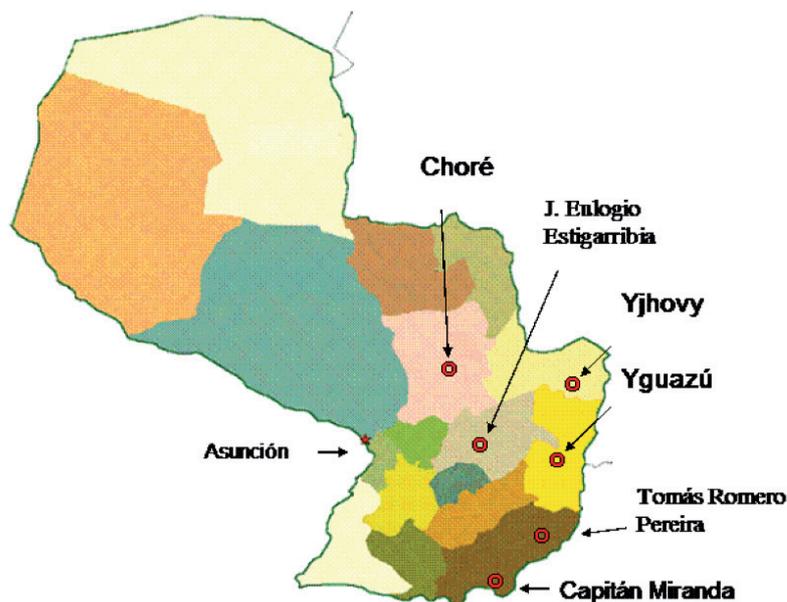


Figura 1. Seis localidades de ensayo comparativos de soja en Paraguay, durante las campañas agrícolas 2007/08 y 2008/09.

Tabla 1. Descripción de seis localidades y las fechas de siembra en 2007/08 y 2008/09.

Localidad	Departamento	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)	Altitud (m)	Fecha de siembra	
					2007/08	2008/09
Capitán Miranda	Itapúa	27° 12'	55° 49'	200	05/11/07	11/11/08
Tomás Romero Pereira	Itapúa	26° 42'	55° 15'	300	13/11/07	10/11/08
J. Eulogio Estigarribia	Caaguazú	25° 24'	55° 33'	297	29/10/07	07/11/08
Yjhovy	Canindeyú	24° 15'	55° 60'	400	31/10/07	04/11/08
Choré	San Pedro	24° 10'	56° 10'	250	30/10/07	05/11/08
Yguazú	Alto Paraná	25° 27'	55° 02'	250	05/11/07	13/11/08

tiva por cada localidad.

Para analizar la estabilidad del rendimiento de los cultivares se empleó el análisis de regresión de línea (Finlay and Wilkinson, 1963):

$$Y_{ge} = \mu + \alpha g + \beta e + \xi g \beta e + \rho g e + \epsilon g e$$

Donde:

Y_{ge}: Rendimiento observado del genotipo g en el ambiente
 μ: Media general
 αg: Desviación genotípica
 βe: Desviación ambiental
 ξg: Pendientes de genotipos
 ρge: Desviación no explicada de la interacción
 εger: Término del error

Un genotipo que tiene su línea de regresión por encima de otra línea en todas las localidades está estimado como material de rendimiento alto en todos los ambientes del experimento, y viceversa. Si un genotipo tiene su línea de regresión cruzando la línea de otro genotipo, está considerado como uno que tiene adaptabilidad en ese ambiente en particular. Además, se utilizó el método de Eberhart and Russell (1966) para mostrar la desviación

de regresión para cada línea y cultivar:

$$Y_{ij} = \mu_i + b_i I_j + d_{ij}$$

Donde:

Y_{ij}: Media de la variedad i, en el ambiente j
 μ_i: Media de la variedad i, en todos los ambientes
 b_i: Coeficiente de regresión
 I_j: Índice ambiental
 d_{ij}: Desviación de regresión

Ellos señalan que para la evaluación de estabilidad de cultivares se toman en consideración los valores de desviación de regresión. Cuanto menor es el valor de desviación de una línea, mejor es la precisión de la línea de regresión.

El método de Muir *et al.* (1992) se utilizó para calcular una partición alternativa de interacción de genotipo y ambiente. Una interacción se puede dividir en Variancia Heterogéneo y Correlación Incompleta que mostramos a continuación:

Un valor del rendimiento de genotipo i en ambiente j: X_{ij}

$$S_i^2 = \sum_j (X_{ij} - X_i)^2$$

$$S_{ii'} = \sum_j (X_{ij} - X_i)(X_{i'j} - X_{i'})$$

$$SC(VH)_i = \sum_{i=1}^g (S_i - S)^2$$

$$SC(CI)_i = 2 \times \sum_{i < j} (1 - r_{ii'}) S_i S_j / g$$

$$r_{ii'} = S_{ii'} / \sqrt{S_i S_{i'}} \quad g: \text{ los números de genotipos}$$

SC (Variancia Heterogéneo) +
SC (Correlación Incompleta) =
SC (genotipo × ambiente).

SC: Suma de cuadrados
Variancia Heterogéneo (VH): Dispersión del rendimiento de variación entre ambientes.
Correlación Incompleta (CI): Cambio de ranking de genotipos depende de una localidad.

Además, se usó el método AMMI para estimar la estabilidad de cultivares según el eje de ACP (Zobel *et al.*, 1988). El modelo es:

$$Y_{ge} = \mu + \alpha g + \beta e + \sum \lambda_n \gamma_{gn} \delta_{en} + p_{ge}$$

Donde:
Y_{ge}: Rendimiento observado del genotipo *g* en el ambiente *e*.
Donde:
 μ : Media general.
 αg : Desviación con respecto a la media general del genotipo *g*.
 βe : Desviación con respecto a la media general del ambiente *e*.
 λ_n : El valor singular para el eje de ACP.
 γ_{gn} : El vector propio unitario del genotipo para eje.
 δ_{en} : El vector propio unitario del ambiente para eje.
 p_{ge} : Residual.

En el ACP los valores de los ejes describen los patrones de respuesta de los genotipos por medio de un índice de sensibilidad.

Los análisis de interacción genotipo × ambiente se realizaron con el programa GEST (Ukai *et al.*, 1996). El programa GEST se ha usado para algunos análisis de la interacción genotipo ambiente en trigo (Tsenov *et al.*, 2006; Shah *et al.*, 2009; Shah *et al.*, 2014; Tsenov *et al.*, 2016).

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Datos climáticos

En el ciclo 2007/08 las condiciones climáticas fueron más favorables para el cultivo que en el ciclo 2008/2009, debido a que en este segundo ciclo hubo escasa precipitación en los sitios de cultivo en Paraguay (Unidad de Gestión de Riesgos, 2009). En la Tabla 2 se muestran los datos climáticos exceptuando los de Ygua-zú. Aunque los datos meteorológicos no están completos para todos los sitios del experimento, la diferencia de temperatura entre 2007/08 y 2008/09 fue mínima, y la precipitación en 2008/09 fue inferior a la de 2007/08.

Efecto de ambientes a altura de planta y rendimiento

En la altura de las plantas puede observarse que en el ciclo 2007/08 existe una diferencia significativa sobre genotipo, ambiente y sus interacciones al nivel $p = 0.01$; y en el ciclo 2008/09 también hubo diferencias significativas en genotipo y ambiente, no así en sus interacciones considerando el mismo nivel significativo (Tabla 3). La altura de las plantas, que es un índice de crecimiento vegetativo, fue afectada por las condiciones ambientales. Los genotipos presentaron una gran diferencia por localidad, demostrando la incidencia de la localidad o el ambiente en esta característica agronómica (Tabla 4). Por ejemplo: T1 presentó

Tabla 2. Datos climáticos por mes en localidades donde se realizaron ensayos comparativos de soja en Paraguay, durante las campañas agrícolas 2007/08 y 2008/09.

Mes	2007/08							2008/09						
	11	12	1	2	3	Promedio Total	11	12	1	2	3	Promedio Total		
CM	Temp. Max. °C	27,8	31,9	31,1	29,6	28,8	29,8	30,2	32,3	30,8	31,0	31,7	31,2	
	Temp. Min. °C	16,4	20,4	21,3	20,6	20,0	19,7	18,8	19,8	19,4	21,1	20,2	19,8	
	Precip. mm	265,0	271,0	48,8	62,2	23,3	(670,3)	148,3	20,8	204,8	158,4	22,5	(554,8)	
TRP	Temp. Max. °C	27,8	32,0	30,3	31,4	31,3	30,6	30,3	32,9	31,5	30,8	32,0	31,5	
	Temp. Min. °C	16,6	19,8	19,8	19,4	18,9	18,9	17,3	19,2	18,7	20,2	19,8	19,1	
	Precip. mm	601,5	472,0	127,0	119,0	49,5	(1369,0)	112,0	29,5	473,0	317,0	55,0	(986,5)	
JEE	Temp. Max. °C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Temp. Min. °C	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	Precip. mm	194,0	192,0	127,0	209,0	74,0	(796,0)	145,0	17,0	143,0	258,0	12,0	(575,0)	
YJ	Temp. Max. °C	30,8	33,2	32,3	34,1	34,5	33,0	-	-	-	-	-	-	
	Temp. Min. °C	18,6	21,2	20,5	22,3	21,8	20,9	-	-	-	-	-	-	
	Precip. mm	272,0	202,0	125,0	266,0	9,0	(874,0)	190,0	54,0	126,0	118,0	0,0	(488,0)	
CH	Temp. Max. °C	31,3	32,6	31,3	32,1	32,1	31,9	31,7	36,1	32,7	33,7	34,7	33,8	
	Temp. Min. °C	19,3	21,0	20,5	21,2	20,7	20,5	20,1	23,2	20,6	20,6	21,1	21,1	
	Precip. mm	242,0	238,0	194,0	271,0	86,0	(1031,0)	143,0	19,0	169,0	228,0	26,0	(585,0)	

Abreviación. Temp. Max: Temperatura Máxima, Temp. Min: Temperatura Mínima; Precip.: precipitación; CM: Capitán Miranda; TRP: Tomás Romero Pereira; JEE: J. Eulogio Estigarribia; YJ: Yjohovy; CH: Choré; -: no determinado

Tabla 3. Valor de F del análisis de la variancia de la altura de las plantas y el rendimiento, correspondiente a seis cultivares de soja de seis localidades de Paraguay en los ciclos 2007/08 y 2008/09.

Ciclo	Factor	GL	Altura de planta	Rendimiento
2007/08	Genotipo (G)	5	25,2**	41,7 **
	Ambiente (A)	5	53,6**	129,8 **
	Interacción (G x A)	25	2,94**	6,78 **
	Repetición	2	6,04**	6,57 **
	Error	70		
	Total	107		
2008/09	Genotipo (G)	5	6,75**	3,85**
	Ambiente (A)	5	106,3**	228,0**
	Interacción (G x A)	25	1,26ns	6,15**
	Repetición	2	0,18ns	0,50 ns
	Error	70		
	Total	107		

GL: grados de libertad,

** : significativo al 0.01 ($p \leq 0,01$), ns: no significativo según el análisis de variancia ($p > 0,05$).

la menor altura de las plantas en el ciclo 2008/09 en la localidad de Tomás Romero Pereira con 32.3 cm; en cambio, en el ciclo 2007/08 exhibió la mayor altura (105.7 cm) en la localidad de Capitán Miranda en comparación con los demás materiales evaluados. Los índices de altura de las plantas en las localidades, excepto J. Eulogio Estigarribia en el ciclo 2007/08 son superiores a los del ciclo 2008/09. Se registró una diferencia significativa entre variedades en todas las localidades, excepto Tomás Romero Pereira e Yjhovy en el ciclo 2007/08; Y se registró la diferencia en J. Eulogio Estigarribia e Yguazú en el ciclo 2008/09.

El rendimiento de granos registró una diferencia significativa en genotipo, ambiente y su interacción al nivel $p \leq 0,01$ en ambos ciclos (Tabla 3). El rendimiento del grano fue también afectado por las condiciones ambientales. Se registró una diferencia significativa entre materiales en todas las localidades, excepto en Choré durante el ciclo 2007/08; e Yjhovy en el ciclo 2008/09 (Tabla 5). Hay tendencia a que los rendimientos de todas las localidades en 2007/08 sean más altos que los de 2008/09, excepto en Yguazú.

Tabla 4. Altura de las plantas (cm) de seis cultivares de soja en seis localidades de Paraguay en los ciclos 2007/08 y 2008/09.

Ciclo	Cultivares	Localidad						Promedio	
		CM	TRP	JEE	YJ	CH	YG	Ciclo	2007-09
2007/08	LCM180	85.4 b	101.6	68.6 cd	70.0	70.0 ab	79.3 bc	79.1	67.0
	LCM176	83.6 b	80.7	62.9 cd	78.3	61.1 bc	61.1 d	71.3	59.9
	LCM168	103.0 a	98.3	71.3 bc	84.3	55.6 cd	71.5 cd	80.7	67.4
	Aurora	81.3 b	89.7	55.4 e	54.4	48.3 cd	66.3 d	65.9	62.5
	T1	105.7 a	99.8	78.4 ab	66.7	76.1 a	85.2 b	85.3	72.5
	T2	98.7 a	99.7	82.2 a	79.2	76.7 a	97.2 a	88.9	75.3
	Promedio	92.9	94.9	69.8	72.2	64.6	76.8		
2008/09	LCM180	50.7	39.3	88.3 a	43.0	39.0	69.1 bc	54.9	
	LCM176	38.7	34.7	74.3 b	39.0	42.3	62.6 c	48.6	
	LCM168	46.7	32.7	85.7 a	47.3	49.3	63.3 c	54.2	
	Aurora	55.7	37.0	85.0 a	47.0	54.7	74.6 abc	59.0	
	T1	53.0	32.3	91.3 a	51.0	43.0	87.3 a	59.7	
	T2	56.3	39.3	87.7 a	55.3	47.3	84.3 ab	61.7	
	Promedio	50.1	35.2	84.8	47.9	47.3	74.4		

Abreviación. Temp. Max: Temperatura Máxima, Temp. Min: Temperatura Mínima; Precip.: precipitación; CM: Capitán Miranda; TRP: Tomás Romero Pereira; JEE: J. Eulogio Estigarribia; YJ: Yjhovy; CH: Choré; -: no determinado. Para cada ciclo, las letras significan diferentes valores (Tukey; $p \leq 0,05$).

Tabla 5. Rendimiento de granos (kg ha^{-1}) de seis cultivares de soja en seis localidades de Paraguay en los ciclos 2007/08 y 2008/09.

Ciclo	Cultivares	Localidad						Promedio	
		CM	TRP	JEE	YJ	CH	YG	Ciclo	2007-09
2007/08	LCM180	2422 c	1772 c	2705 c	2688 d	4094	3124 c	2801	2630
	LCM176	3143 a	2356 b	3397 b	3795 a	4136	4118 a	3491	3054
	LCM168	2794 b	2269 b	3370 b	2777 d	3489	3608 b	3051	2760
	Aurora	2482 c	2106 b	2572 c	2598 d	3799	2938 c	2749	2585
	T1	3240 a	2641 a	3448 b	3417 b	3441	3753 ab	3323	2978
	T2	3190 a	2197 b	4331 a	2941 c	4211	3828 ab	3450	3073
	Promedio	2879	2224	3304	3036	3862	3562		
2008/09	LCM180	2037 c	1576 a	2882 a	1540	3134 bc	3554 ab	2454	
	LCM176	2361 ab	1382 ab	2601 ab	1650	3513 b	4198 a	2617	
	LCM168	2134 bc	1526 a	2938 a	1829	2954 c	3436 b	2470	
	Aurora	2298 ab	1344 ab	2226 b	1757	3674 b	3220 b	2420	
	T1	2467 a	1146 b	3021 a	2177	2769 c	4216 a	2633	
	T2	2014 c	1531 a	2899 a	2127	4259 a	3344 b	2696	
	Promedio	2219	1418	2761	1847	3384	3661		

CM: Capitán Miranda, TRP: Tomás Romero Pereira, JEE: J. Eulogio Estigarribia, CH: Choré, YJ: Yjhovy, YG: Yguazú. Para cada ciclo, las letras significan diferentes valores (Tukey; $p \leq 0,05$).

Tabla 6. El coeficiente de correlación (r) entre la altura de las plantas y el rendimiento.

Cultivares	LCM180	LCM176	LCM168	AURORA	T1	T2	Promedio
Coefficiente de correlación	0.199	0.423	0.329	0.050	0.659*	0.315	0.345

*: significativa al 0.05 ($p \leq 0,05$)

La altura de las plantas y el rendimiento fueron afectados por las condiciones ambientales, pero un aspecto del efecto del ambiente es diferente entre la altura de las plantas y el rendimiento. Se observó una correlación positiva entre la altura de las plantas y el rendimiento en un cultivar brasilero T1 (Tabla 6, $r = 0.659$). Mientras que los coeficientes de correlación de los dos años en otros cultivares son bajos ($r = 0.050-0.423$) y la relación es débil en estos últimos.

Análisis de interacción genotipo x ambiente

Según los resultados del análisis de variancia se observa una diferencia significativa en la interacción genotipo x ambiente para la variable rendimiento. Por eso, el método de Finlay and Wilkinson (1963) fue usado para clasificar el carácter de cada línea y cultivar. Las líneas de regresión de los materiales estudiados por el método de Finlay and Wilkinson (1963) se pueden observar en la Figura 2. La línea de regresión de LCM180 está muy cerca de la línea de Aurora, y está siempre bajo que las líneas de cultivares brasileros. LCM180 se considera como un material que tiene adaptabilidad similar a la de Aurora y tiene una baja adaptabilidad en comparación con los cultivares brasileros. La línea de regresión de LCM168 está siempre por encima de la línea de Aurora, sin embargo la línea LCM168, exceptuando el intervalo 1417-1700 del índice ambiental, está por debajo de las líneas de los cultivares brasileros. LCM168 es considerado como un material que tiene mejor adaptabilidad que la de Aurora, pero inferior que los cultivares brasileros. La línea de regresión de LCM176 está siempre por encima de la línea de Aurora, y esta cruza las líneas de los cultivares brasileros. La adaptabilidad de LCM176 es siempre mejor que Aurora, mejor que la de T1 e igual que la de T2 en lugares de altas producciones. Por otro lado, la de LCM176 es inferior que T1 y T2 en lugares de bajas producciones.

El coeficiente de regresión (método de Finlay y Wilkinson) y la desviación de regresión (método de Muir) se combinaron y visualizaron en la Figura 3. En este experimento los valores del cultivar Aurora y las líneas del CRIA (LCM 180, LCM 176, LCM 168) fueron inferiores a los valores de desviación de los cultivares T1 y T2. Por eso la precisión de la línea de regresión en tres LCM es mejor que la de los cultivares brasileros. El valor de coeficiente de regresión en LCM 180 es el más cercano a 1.0 (el promedio de todos materiales), un poco más alto que Aurora. Esta línea es medianamente susceptible a los factores ambientales entre todas las variedades, y un poco más susceptible que los de Aurora. El valor de coeficiente de regresión en LCM 168 es similar al de Aurora, y el valor

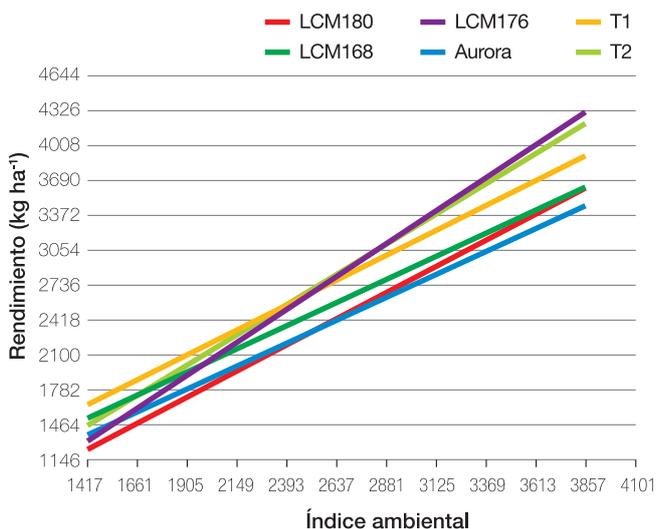


Figura 2. Líneas de regresión de los cultivares de soja evaluados en seis localidades de Paraguay, durante las campañas agrícolas 2007/08-2008/09.

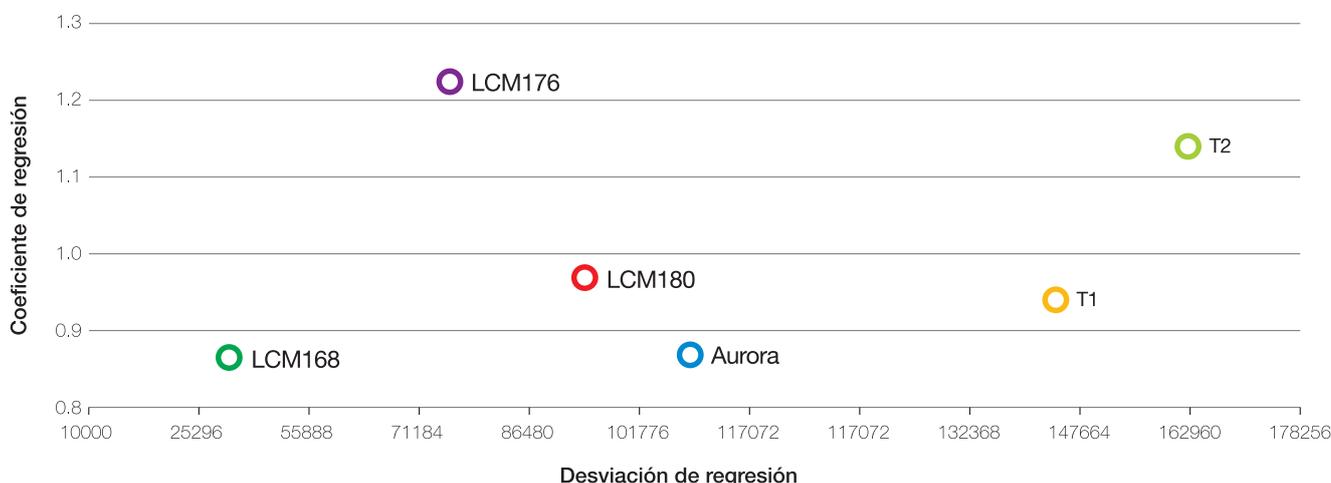


Figura 3. Relación de coeficiente de regresión y desviación de regresión.

de desviación de regresión es el más pequeño entre todas las variedades. Esta línea es la menos susceptible a los factores ambientales. Los valores de los coeficientes de regresión en LCM 176 y T1 son más grandes que otros cultivares y son más susceptibles a los factores ambientales. La línea de regresión de LCM 176 en la Figura 2 está muy cerca de la de la variedad T1. Pero el valor de desviación de regresión en LCM 176 es inferior al de T1, una influencia ambiental peculiar en una localidad de LCM 176 es inferior a la de T1.

Muir *et al.* (1992) mostraron que se puede dividir una interacción de genotipo y ambiente en dos partes. Una es la variancia heterogénea (VH); y otra, la correlación imperfecta (CI). La primera significa un cambio de un grado de rendimiento entre localidades. La segunda, que un cambio del ranking de cultivar depende de las localidades. El resultado de este análisis mostró que la correlación imperfecta ocupó el 88% del total de la suma de los cuadrados de la interacción de genotipo y ambiente (Tabla 7). Un cambio del ranking de cultivares en las localidades es la mayor causa de la interacción. Y los valores de la correlación imperfecta en dos cultivares brasileños (T1 y T2) son más altos que otros. Estos dos cultivares son fáciles de cambiar del ranking relativo. Al contrario, el valor de LCM 168 es inferior, y esta línea es más difícil de cambiar del ranking. Aunque la variancia heterogénea ocupó solo un

Tabla 7. Análisis de partición alternativa de interacción de genotipo y ambiente de cultivares de soja evaluados en seis localidades de Paraguay, durante las campañas agrícolas 2007/08-2008/09.

Cultivares	SC (VH)	(%)	SC (CI)	(%)	SC (GxA)	(%)
LCM180	68717	8,9	869435	15,3	938152	14,6
LCM176	183552	23,9	817264	14,4	1000817	15,6
LCM168	173258	22,5	572898	10,1	746155	11,6
AURORA	115255	15,0	948548	16,7	1063803	16,5
T1	65296	8,5	1208084	21,3	1273379	19,8
T2	162774	21,2	1252798	22,1	1415572	22,0
Total	768852	11,9	5669026	88,1	6437878	100,0

SC: Suma de cuadrados, VH: Variancia heterogénea, CI: Correlación imperfecta, GxA: Interacción genotipo × ambiente

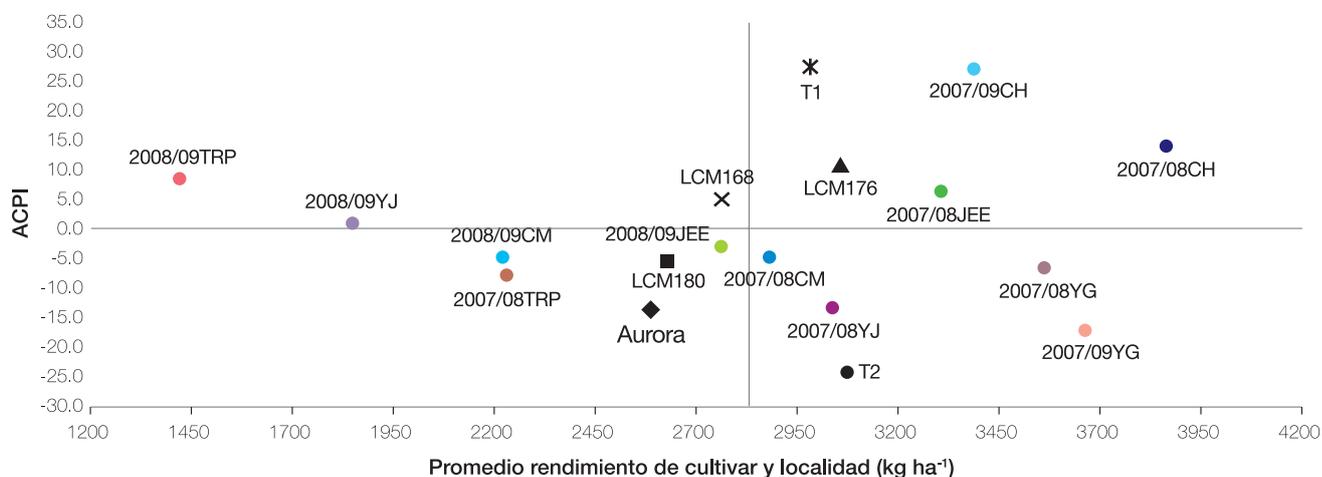


Figura 4. La relación de ACP1 y promedio del rendimiento de cultivares de soja evaluados en seis localidades de Paraguay, durante las campañas agrícolas 2007/08-2008/09. CM: Capitán Miranda, TRP: Tomás Romero Pereira, JEE: J. Eulogio Estigarribia, CH: Choré, YJ: Yjhovy, YG: Yguazú.

12% del total de la interacción, el valor de la suma de los cuadrados de LCM 176 es el valor superior. LCM 176 es el más propenso a cambiar de rendimiento según las localidades. Este resultado coincidió con el análisis del método de Finlay and Wilkinson (Figura 2).

La Figura 4 muestra el rendimiento promedio en función de las coordenadas del primer eje del ACP1 de genotipos y ambientes. Los genotipos y los ambientes con coordenadas elevadas sobre el ACP1, consideradas en valor absoluto, contribuyeron en mayor medida a la interacción genotipo × ambiente. Mientras que los genotipos y los ambientes con ACP1 próximos a 0 lo hicieron mínimamente. Las variedades T1 y T2 fueron las que más aportaron al primer eje de la interacción. Por otro lado, el genotipo más estable con valor ACP1 próximos a 0 fue la línea LCM168. Los valores absolutos de las líneas LCM 176 y LCM180 están más cerca del valor absoluto ACP de LCM168 que T1 y T2, estas dos líneas son también estables. Estos resultados coincidieron con el análisis del método de Muir *et al.* (Tabla 7).

No hay una tendencia constante entre los valores de ACP1 en 2007/08 y en 2008/09 (Figura 4). Los valores de ACP1 correspondientes a cada localidad en 2007/08 no son siempre altos o bajos en 2008/09. Por ejemplo, en TRP (Tomás Romero Pereira) el valor de ACP1, en 2007/08 fue -7.7 y en 2008/09 fue 8.6, mientras que en JEE (J. Eulogio Estigarribia) el valor de ACP1 fue 6.5 en 2007/08 y -2.9 en 2008/09. Como se ha mencionado en la parte inicial de Resultados y Discusión, había mucha diferencia de precipitaciones entre 2007/08 y 2008/09, pero se considera inapreciable la influencia por las precipitaciones sobre ACP1.

Clasificación de LCM

Según la clasificación antes mencionada, los materiales desarrollados por el CRIA podrían clasificarse de la siguiente manera:

LCM180: El rendimiento promedio de esta línea para todas las localidades fue 2630 kg/ha⁻¹. No se diferenció del promedio de Aurora, tiene adaptabilidad similar a la de Aurora y es un poco más susceptible a factores ambientales que Aurora.

LCM168: El rendimiento promedio de esta línea fue 2760 kg/ha-1, un 7% más alto que el de Aurora, pero inferior a T1 y T2. Esta línea tiene mejor adaptabilidad que Aurora y es menos susceptible a factores ambientales que Aurora.

LCM 176: El rendimiento promedio de esta línea fue 3054 kg/ha⁻¹, un 18% más alto que el promedio de Aurora y similar a los promedios de T1 y T2. Esta línea tiene mejor adaptabilidad que Aurora y es más susceptible a factores ambientes que Aurora. Tiene buena adaptabilidad en lugares de alta producción pero su adaptabilidad en lugares de baja producción es inferior.

Dos líneas, LCM 168 y LCM 176, superaron a Aurora en adaptabilidad en los ambientes estudiados. El rendimiento de LCM 168 es inferior a los dos cultivares brasileros en la mayoría de las localidades, mientras que la aptitud del material LCM176 es superior y mejor que la de Aurora. El rendimiento de esta línea es igual al de los dos cultivares brasileros. Además, su estabilidad es superior a estos cultivares brasileros. Pero el rendimiento de LCM176 es menor en localidades con productividad baja. Según el análisis de interacción genotipo × ambiente, hay pocas variedades que tengan las características de alto rendimiento en un buen ambiente y en un mal ambiente en soja (Miladinovic *et al.*, 2006). Es más difícil desarrollar variedades cuyos rendimientos no disminuyan incluso en mal ambiente que variedades que consiguen alto en buen ambiente. Con el propósito de lograr este objetivo, tenemos que pensar esquemas para seleccionar variedades que tengan alto rendimiento en ambientes desfavorables.

CONCLUSIONES

El rendimiento de la LCM 176, desarrollada en Paraguay, superó un 18% más que el de Aurora y fue similar al de los cultivares brasileros generales. La adaptabilidad de esta línea es mejor que la de Aurora y su estabilidad es superior a la de estos cultivares brasileros. Por tanto, se aconseja cultivar esta línea en áreas extensas en Paraguay.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Jorge N. Bordón, Carlos Federico Schulz, Omar Ricardo Arce, Ramón López y Francisco Gómez, en cuyos establecimientos se realizaron los experimentos. A Ada Martínez Paniagua, Agustín Rivarola, Antonio Altamirano, Casiano Altamirano, Rubén Morel y Julio Morel por su apoyo a las investigaciones. A María Jesús Abe y Orlando Noldin por el valioso asesoramiento en la revisión del manuscrito. Agradecemos a las organizaciones, la Oficina de JICA en Paraguay y la Prefectura de Hokkaido.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Barnes, S. 1988. Evolution of the health benefits of soy isoflavones. *Exp. Biol. Med.* 217:386-396.

Bhardwaj, H.L.; A.S. Bhagsari; J. M. Joshi; M. Rangappa; V.T.Sapra and M.S.S. Rao. 1999. Yield and Quality of Soymilk and Tofu Made from Soybean Genotypes

Grown at Four Locations. *Crop Sci.* 39: 401-405.

Crossa, J.; P. N. Fox; W. H. Pfeiffer; S. Rajaram and H. G. Gauch. 1991. AMMI adjustment for statistical analysis of an international wheat yield trial. *Theor. Appl. Genet.* 81: 27-37.

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

Falconer, D. S. and T. F. C. Mackay. 1995. Introduction to Quantitative Genetics. Fourth ed.. Addison Wesley, Longham, Harlow, Essex, UK, pp. 122-143.

FAOSTAT. Statistics of the soybean production. [En línea] Disponible en <http://faostat.fao.org/>

Fehr, W. R. 1987. Principles of Cultivar Development. Vol.1. Theory and technique. Collier Macmillan Publishers, London. pp. 249-259.

Finlay, K. W. and G. N. Wilkinson. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. *Aust. J. Agri. Res.* 14: 742-754.

Kan, A.; M. Kaya; A. Gürbüz; A. Sanli; K. Özcan and C. Y. Cifci. 2010. A study on genotype x environment interaction in chickpea cultivars (*Cicerarietinum* L.) grown in arid and semi-arid conditions. *Scientific Research and Essays* 5: 1164-1171.

Lin, C. S.; M. R. Binns and L. P. Lefkovich. 1986. Stability analysis: where do we stand. *Crop Sci.* 26: 894-900.

Miladinovic, J.; H. Kurosaki; J. W. Burton; M. Hrustic and D. Miladinovic. 2006. The adaptability of shortseason soybean genotypes to varying longitudinal regions. *European J. Agronomy.* 25: 243-249.

Miranda, R.; N. Salomón y M. Poverene. 1998. Adaptabilidad y estabilidad de la calidad industrial de trigo. IV Cong. Nac. de trigo. Mar Del Plata 11: 1-16.

Morel Y, A.; A. Altamirano; C. Altamirano; A. Rivarola y H. Kurosaki. 2009. Resultados de la investigación en el área de mejoramiento genético de soja ciclo 2008/9. MAG-DIA, Paraguay, pp. 7-36.

Morel Y, A.; A. Altamirano; C. Altamirano; A. Martínez; A. Rivarola y H. Kurosaki. 2010. Resultados de la investigación en el área de mejoramiento genético de soja ciclo 2009/10. IPTA, Paraguay. pp. 1-3.

Muir, W. M.; Y. Nyquist and S. Xu. 1992. Alternative partitioning of the genotype by environment interaction. *Theor. Appl. Gen.* 84: 193-200.

Rao, M. S. S.; B. G. Mullinix; M. Rangappa; E. Cebert; A. S. Bhagsari; V.T. Sapra; J. M. Joshi and R.B. Dadson. 2002. Genotype x environment interactions and yield stability of food-grade soybean genotypes. *Agron. J.* 94: 72-80.

Romagosa, I.; P. N. Fox; L. F. García del Moral; J. M. Ramos; B. García del Moral; F. Roca de Togoress and J. L. Molina-Cano.1993. Integration of statistical and physiological analyses of adaptation of near-isogenic barley lines. *Theor. Appl. Genet.* 86: 822-826.

Shah, S. J. A.; I. Muhammad and H. Shaukat. 2009. Phenotypic and Molecular Characterization of Wheat for Slow Rusting Resistance against *Puccinia striiformis* Westend. f.sp. tritici. *Journal of Phytopathology.* 158: 393-402.

Shah, S. J. A.; S. Hussain; M. Ahmad; F. Farhatullah

- and M. Ibrahim 2014.** Characterization of Slow Rusting Resistance against *Puccinia striiformis* f. sp. tritici in Candidate and Released Bread Wheat Cultivars of Pakistan. *Journal of Plant Pathology and Microbiology*.
- Tsenov, N.; T. Gubatov and V. Peeva. 2006.** Study on the Genotype X Environment Interaction in Winter Wheat Varieties II. Grain Yield. *Field Crop Studies* 3: 167-175.
- Tsenov, N.; A. Dobrinka and G. Todor. 2016.** Influence of Environments on the Amount and Stability of Grain Yield in the Modern Winter Wheat Cultivars II. Evaluation of Each Variety. *Ekin Journal of Crop Breeding and Genetics*. 2. 57-73.
- Ukai, Y.; H. Nesumi and Y. Takano. 1996.** GEST A package of computer programs for the statistical analysis of genotype \times environment interaction and stability. *Japanese J. Breeding Sci.* 46: 73-79.
- Unidad de Gestión de Riesgos. 2009.** Estimación preliminar cosecha de soja 2009. *Boletín* 69. ed. MAG, Paraguay, 4 p.
- Van Oosterom, E. J.; D. Kleijn; S. Ceccarelli and M. M. Nachit. 1993.** Genotype by environment interactions of Barley in Mediterranean Region. *Crop Sci.* 33: 669-674.
- Zobel, R. W.; M. J. Wright and H. G. Gauch. 1988.** Statistical analysis of a yield trial. *Agron. J.* 80: 388-393.