

ESTABILIDAD DEL RENDIMIENTO DE GENOTIPOS DE PAPA (*SOLANUM TUBEROSUM* L.)

STABILITY OF TUBER YIELD OF POTATO GENOTYPES (*SOLANUM TUBEROSUM* L.)

Delfina de Jesús Pérez López^{1*}, Luis Miguel Vázquez García¹, Jaime Sahagún Castellanos²
y Antonio Rivera Peña³

¹ Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. El Cerrillo Piedras Blancas, Edo. de México. Apdo. Postal 435. Tel. y Fax: 01 (722) 296-5518. ² Departamento de Fitotecnia, Programa Universitario de Investigación y Servicio en Olericultura, Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carr. México- Texcoco. 56230, Chapingo, Edo. de México. ³ Programa Nacional de Papa, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Metepec, Edo. de México.

* Autor para correspondencia (djpl@uaemex.mx)

RESUMEN

En las Sierras y Valles Altos de México existen problemas serios de abastecimiento de semilla de papa (*Solanum tuberosum* L.) de buena calidad de variedades rendidoras y de comportamiento estable. La identificación de genotipos de alto rendimiento y estables podría ser una alternativa de solución muy importante para estas áreas. Por lo anterior se hizo un estudio con el fin de evaluar el rendimiento y la estabilidad de 10 genotipos de papa mediante 11 índices univariados. Los genotipos se evaluaron en un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones en cada ambiente. Se detectaron efectos significativos ($P \leq 0.01$) de ambientes (A), genotipos (G) e interacción G x A. El rendimiento de tubérculo por hectárea en promedio de los cinco ambientes fluctuó entre 13.28 y 25.04 t ha⁻¹. El parámetro λ_i de Tai clasificó a los genotipos en el mismo orden que los índices de Wricke, Shukla, Huehn, y Eberhart y Russell. Las correlaciones de α_i con b_i , λ_i con Sd_i , W_i con σ_i^2 y $S_i^{(1)}$ con $S_i^{(2)}$ fueron muy cercanas a la unidad ($r \geq 0.99$). El coeficiente de variación de Francis y Kannenberg y la medida de superioridad de un cultivar de Lin y Binns identificaron a los genotipos 'Gigant' y 776943 como estables, pero sólo el índice de Lin y Binns incluyó en este grupo a 'Alpha', 750660 y 779040.

Palabras clave: *Solanum tuberosum*, minitubérculo, interacción genotipo x ambiente, estabilidad, correlación.

SUMMARY

In the Mexican Highlands and mountain ranges there are serious problems in the supply of potato seed (*Solanum tuberosum* L.) of good quality for high yielding and stable varieties. The identification of genotypes bearing these characters might be a very important solution for these problems. In this study we estimated the tuber yield and stability of 10 potato genotypes by means of 11 univariate methods. The genotypes were evaluated in a randomized complete block design with four replications in each environment. Statistical significance ($P \leq 0.01$) for environments (E), genotypes (G), and G x E interaction was found. The tuber yield averaged over five environments ranged from 13.28 to 25.04 t ha⁻¹. The genotypic stability parameter λ_i of Tai classified the genotypes in similar order that Wricke's ecovalence (W_i), Shukla's stability (σ_i^2), Huehn's nonparametric measures ($S_i^{(1)}$ and $S_i^{(2)}$) and Eberhart and Russell's stability parameters. The correlations of parameters α_i with b_i , λ_i with Sd_i , W_i with σ_i^2 , and $S_i^{(1)}$ with $S_i^{(2)}$, were almost 1 ($r \geq 0.99$). The Francis and Kannenberg's coefficient of variation, and Lin and Binns' superiority measure for cultivar, allowed to identify varieties 'Gigant' and 776943 as high yielding and stable genotypes, while the method of Lin and Binns included the varieties 'Alpha', 750660 and 779040 into this group.

Index words: *Solanum tuberosum*, stability, minituber, genotype x environment interaction, correlation.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético de la papa (*Solanum tuberosum* L.) se ha orientado principalmente a generar variedades de alto rendimiento y estables, aún en presencia de factores bióticos y abióticos adversos, lo que ha permitido satisfacer las demandas de calidad de la agroindustria y del mercado para consumo en fresco (Milton y Allen, 1995). La calidad del tubérculo está influenciada por factores genéticos, ambientales, de manejo agronómico y por las interrelaciones entre éstos (Bonierbale *et al.*, 2004), pero sólo la variabilidad genética y la interacción genotipo x ambiente (IGA) son de importancia para el fitomejorador, por lo que es necesario determinar su contribución en el comportamiento del cultivo (el fenotipo observado).

La IGA, entendida como un cambio del comportamiento relativo de los genotipos a través de ambientes cambiantes, causa confusión en la estimación de parámetros genéticos, reduce la respuesta a la selección y dificulta la identificación de genotipos superiores; su análisis e interpretación permite: identificar mega-ambientes al detectar genotipos

estables en un grupo de ambientes diferentes o con el mayor rendimiento en uno de éstos, proponer estrategias de mejoramiento genético y generar tecnología que permita a los agricultores elegir la mejor variedad en una región o para sus condiciones ambientales y de manejo agronómico (Márquez, 1992; Crossa, 1990; Sahagún, 1992; Rodríguez *et al.*, 2002; Yan y Kang, 2003).

En el estudio de la IGA y la estabilidad se han empleado la ecovalencia (W_i) de Wricke (1962), los parámetros (b_i y Sd_i) de Eberhart y Russell (1966), los índices (α_i y λ_i) de Tai (1971), la varianza de estabilidad (σ^2_i) de Shukla (1972), la desviación estándar (S_i) y el coeficiente de variación (CV_i) de Francis y Kannenberg (1978), la medida de superioridad de un cultivar (P_i) de Lin y Binns (1988) y los índices no paramétricos [$S^{(1)}_i$ y $S^{(2)}_i$] de Huehn (1990a, 1990b), entre otros. Lin *et al.* (1986) propusieron que un genotipo es estable si: a) Su varianza entre ambientes es pequeña, a este grupo pertenece S_i y CV_i ; b) Su respuesta al ambiente es paralela a la respuesta promedio de todos los genotipos evaluados, a este grupo pertenecen α_i , b_i , W_i y σ^2_i ; c) El cuadrado medio residual del modelo de regresión sobre el índice ambiental es pequeño, a este grupo pertenecen λ_i y Sd_i .

En las Sierras y Valles Altos del Centro de México existen problemas serios de abastecimiento de semilla de papa de buena calidad de variedades rendidoras y de comportamiento estable; además, predominan condiciones ambientales heterogéneas entre localidades, entre años o entre combinaciones de éstos, por lo que la identificación de genotipos de alto rendimiento y estabilidad podría ser una alternativa de solución muy importante para estas áreas. Recientemente se han liberado varios genotipos de papa, pero en la literatura especializada existe poca información sobre su comportamiento agronómico, así como de su potencial de rendimiento y estabilidad en relación a las variedades empleadas por los agricultores; tampoco existen antecedentes sobre la estimación de variabilidad entre variedades y sobre la interrelación entre métodos de estabilidad. Con base en lo anterior, en este estudio se compararon 11 índices de estabilidad paramétricos y no paramétricos univariados, para identificar los genotipos de mayor rendimiento y estabilidad en cinco ambientes del Estado de México.

MATERIALES Y MÉTODOS

De los cinco ambientes estudiados en el Estado de México, cuatro experimentos se establecieron en condiciones de temporal o secano (ciclo primavera-verano) en Raíces, municipio de Zinacantepec (2004 y 2005) y en Metepec (2004 y 2005), y uno en condiciones de riego (ciclo invierno-otoño 2005) en San Francisco Oxtotilpan, municipio de Temascaltepec. Las características de los cinco sitios se anotan en el Cuadro 1, y fueron obtenidos de Borboa (1999).

Se consideraron 10 genotipos de papa provenientes de minitubérculo: 777091, 7718335, 750660, 779040, 'Zafiro', 676002, 776943 (estos siete proporcionados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, INIFAP), más 'Alpha', 'Atlantic' y 'Gigant' que fueron donados por el Rancho La Providencia, de su área de multiplicación acelerada de papa. Los minitubérculos sembrados corresponden a la generación cero (G_0), por lo que los tubérculos semilla cosechados representan la generación G_1 . La variedad 'Alpha' fue considerada como testigo.

Para la evaluación de los diez genotipos se usó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones por ambiente. La parcela experimental constó de tres surcos de 0.9 m de ancho por 1.8 m de largo, y el surco central se usó como unidad experimental útil. En cada surco se depositaron 10 minitubérculos separados a 0.2 m. Las principales actividades realizadas y el manejo agronómico que se llevó a cabo en los cinco experimentos, se detallan en el Cuadro 2.

Se registró la producción total de tubérculos de la parcela experimental y con estos datos se estimó el rendimiento de tubérculo por hectárea ($RTHAG_1$). Se realizó análisis de varianza combinado, comparación de medias de genotipos (Tukey, $\alpha=0.01$) y se estimó su estabilidad. Los índices paramétricos univariados empleados fueron el coeficiente de variación (CV_i) y la desviación estándar (S_i) de Francis y Kannenberg (1978), la varianza de estabilidad (σ^2_i) de Shukla (1972), la ecovalencia (W_i) de Wricke (1962), los parámetros de estabilidad (b_i y Sd_i) de Eberhart y Russell (1966), los índices de estabilidad (α_i y λ_i) de Tai (1971) y la medida de superioridad de un cultivar (P_i) de Lin y Binns (1988). Los índices no paramétricos univariados utilizados fueron $S^{(1)}_i$ y $S^{(2)}_i$ (Huehn, 1990a, 1990b). Una descripción detallada de los 11 índices de estabilidad fue presentada por Rodríguez *et al.* (2002). Adicionalmente, se calculó el coeficiente de correlación lineal simple para cada par de índices. El análisis de varianza, la comparación de medias de genotipos y el análisis de correlación lineal simple se hicieron con el paquete estadístico Agrobases 21.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hubo significancia estadística ($P \leq 0.01$) para ambientes, genotipos e interacción genotipo x ambiente (IGA) (Cuadro 3). La heterogeneidad entre ambientes estuvo relacionada principalmente con diferencias en altitud, tipo de suelo, temperaturas y precipitación durante los años de estudio (Cuadro 1). Los mejores ambientes para la evaluación de los genotipos fueron Raíces (2004) y Raíces (2005). Las diferencias entre genotipos ($P \leq 0.01$) evidenciaron la existencia de variabilidad genética en rendimiento de tubérculo, y la IGA significativa ($P \leq 0.01$) indicó que los genotipos

difirieron en comportamiento relativo a través de ambientes (Márquez, 1992; Sahagún, 1992; Rodríguez *et al.*, 2002).

De Jong *et al.* (1981) y Tai (1971) sugirieron que la IGA significativa puede estar asociada con un cambio de rango de las medias de los genotipos (IGA cruzada) o con cruzamientos entre líneas a través de los ambientes. Crossa (1990), Márquez (1992), Sahagún (1992) y Rodríguez *et al.* (2002) consideran que la IGA cruzada, como la que se observó en este estudio, es la más relevante en la agricultura porque causa dificultades en la estimación de parámetros genéticos, reduce el progreso de la selección, limita seriamente la posibilidad de identificar los genotipos superiores, y obliga al fitomejorador a ejecutar técnicas de análisis más complejas para caracterizar cultivares en términos de su estabilidad para rendimiento.

El rendimiento promedio de tubérculo (RTHAG₁) de los genotipos estudiados fluctuó entre 13.29 y 25.04 t ha⁻¹ (Cuadro 4). Las medias de ‘Gigant’ (25.04 t ha⁻¹) y ‘Alpha’ (23.57 t ha⁻¹), que corresponden a la variedad de mayor rendimiento y al testigo, superaron ($P \leq 0.01$) a los genotipos

777091, 7718335, ‘Atlantic’, ‘Zafiro’ y 676002 (cuya producción varió entre 13.29 y 16.50 t ha⁻¹). Además de ‘Gigant’ y ‘Alpha’, los genotipos 750660, 779040 y 776943 mostraron un rendimiento de tubérculo superior o igual a la media nacional (20.9 t ha⁻¹). En Raíces 2004, cinco clones fueron estadísticamente iguales al testigo ‘Alpha’ (36 t ha⁻¹), y sólo 7718335, ‘Atlantic’ y ‘Zafiro’ fueron inferiores ($P \leq 0.01$) al testigo; en el 2005, sólo 779040, 776943 y ‘Gigant’ fueron iguales a ‘Alpha’ (39.5 t ha⁻¹), por lo que estos tres genotipos y ‘Alpha’ son los que podrían ser considerados para la producción comercial en Raíces. En Metepec 2004 el genotipo de mayor rendimiento fue 750660 (30.1 t ha⁻¹), el cual superó ($P \leq 0.01$) a ‘Alpha’, ‘Atlantic’ y 777091. En 2005, ‘Gigant’ (23.4 t ha⁻¹) difirió estadísticamente de los clones 777091, 7718335, 779040, y 676002. En San Francisco Oxtotilpan el genotipo 750660 (27 t ha⁻¹) fue igual que ‘Alpha’, ‘Gigant’ y 676002. La superioridad de ‘Alpha’ y ‘Gigant’ también fue detectada por Cadena *et al.* (1999), quienes al evaluar genotipos de papa provenientes de minitubérculo en los Estados de México y Tlaxcala, observaron que ‘Alpha’ produjo entre 20.25 y 39.88 t ha⁻¹, y ‘Gigant’ fluctuó entre 17.0 y 53.0 t ha⁻¹.

Cuadro 1. Características geográficas, climáticas y edáficas de los cinco ambientes donde se realizó la evaluación de los diez genotipos de papa.

Localidad	Año	Ubicación geográfica	Altitud (m)	Temperatura anual (°C)	Precipitación (mm)	Tipo de suelo
Raíces	2004	19° 09.726' N	3550	5 a 12	800	Franco arenoso, pH = 4.5-5.5
	2005	99° 48.180' O				
Metepec	2004	19° 14.866' N	2606	13	785	Profundos, fértiles y ricos en materia orgánica
	2005	99° 35.240' O				
San Francisco	2005	19° 09.609' N	2613	18 a 22	800-1600	Arcillo arenoso, pH 5.5
		95° 54.468' O				

Fuente: Borboa (1999).

Cuadro 2. Manejo agronómico de los cinco ensayos en dos años de evaluación de papa.

Actividades	Raíces	Metepec	San Francisco
Preparación del terreno	Tracción animal	Maquinaria	Tracción animal
Fecha de siembra (día-mes-año)	29-04-04, 27-04-05	15-06-04, 28-06-05	29-01-05
Fertilización (N-P-K)	180-200-150 + 50 kg de estiércol	180-200-150 + 50 kg de estiércol	180-200-150 + 50 kg de estiércol
Control de maleza	Manual + dos aporques en 2004; en 2005 se aplicó Lexone®	Metribuzin® (480 g L ⁻¹) post emergente + un control manual en cada año	Manual
Fechas de aporque	12-07-04 y 5-08-04, 30-06-05 y 15-06-05	17-08-04, 17 y 23-08-05	04-04-05
Corte de follaje (y fecha)	Manual (08-09-04 y 01-10-05)	Manual (20-10-04) y Químico (Paracuat®) en el 2005.	Químico (04-06-05)
Cosecha (y fecha)	Manual (13 y 14-10-04) Manual (25-10-05)	Manual (30-11-04) Manual (22-11-05)	Manual (21-06-05)

Cuadro 3. Análisis de varianza combinado del rendimiento de tubérculo (RTHAG₁) de diez genotipos de papa evaluados en cinco ambientes del Estado de México.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fc	Ftab
Ambientes (A)	4	5149	1287	55.6**	3.47
Repeticiones en (A)	15	809	54	2.3**	2.20
Genotipos	9	3798	422	18.2**	2.56
G x A	36	6296	175	7.6**	1.80
Error	135	3122	23		
Media			19		
C V (%)			26		
H ² (%)			59		

** = $P \leq 0.01$; CV = Coeficiente de variación; H² = Heredabilidad en sentido amplio.

Se detectaron correlaciones lineales con valor absoluto mayor que 0.95 y significativas ($P \leq 0.01$) del rendimiento de tubérculo por hectárea ($RTHAG_i$) con P_i , de α_i con b_i , de λ_i con Sd_i , de W_i con σ^2_i , y de $S_i^{(1)}$ con $S_i^{(2)}$ (Cuadro 5). Esto significa que estos pares de métodos son similares en la caracterización de la estabilidad de genotipos, por lo que para la identificación de genotipos estables se sugiere usar sólo $RTHAG_i$, α_i , λ_i , σ^2_i y $S_i^{(1)}$. La alta correlación negativa que existió entre $RTHAG_i$ y P_i se explica por el hecho de que este último se calculó a partir de suma de cuadrados de las diferencias entre el genotipo de interés con respecto al de máximo rendimiento, en cada ambiente de evaluación (M_j), por lo que al incrementarse $RTHAG_i$ las diferencias con la máxima respuesta fueron más pequeñas (Lin y Binns, 1988).

Los índices α_i y λ_i de Tai (1971) son equivalentes a los parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell (1966), b_i y Sd_i , respectivamente, con la particularidad de que los índices ambientales (I_j) son considerados como términos aleatorios (Lin *et al.*, 1986) y son estimados mediante máxima verosimilitud. Kang *et al.* (1987) demostraron que W_i y σ^2_i corresponden matemáticamente al mismo índice y recomendaron el uso del segundo.

Por otro lado, los índices $S_i^{(1)}$ y $S_i^{(2)}$ de Huehn (1990a, 1990b) se basan en la asignación de rangos; el primero se determina como la suma de los valores absolutos de las diferencias entre el rango del genotipo i y los de los otros genotipos a través de ambientes, y el segundo considera la varianza entre rangos del genotipo i sobre los ambientes; ambos índices están estrechamente relacionados, pero el primero es más fácil de usar y permite una interpretación clara y relevante. Se han encontrado asociaciones de W_i con σ^2_i y de $S_i^{(1)}$ con $S_i^{(2)}$ en trigo (*Triticum aestivum* L.; Huehn, 1990b), remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.; Piepho y Lotito, 1992) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.; Mekbib, 2003); estos índices coincidieron en clasificar a los genotipos ensayados en el mismo orden de estabilidad, lo que explica la alta correlación entre ellos.

En el Cuadro 5 se muestra también que el índice λ_i de Tai (1971) se relaciona estrechamente con: la ecovalencia (W_i) de Wricke (1962), la varianza de estabilidad (σ^2_i) de Shukla (1972), los índices no paramétricos ($S_i^{(1)}$ y $S_i^{(2)}$) de Huehn (1990a, 1990 b), las desviaciones de regresión (Sd_i) de Eberhart y Russell (1966) y con la desviación estándar (S_i) de Francis y Kannenberg (1978). Además, estos índices dieron resultados similares en la definición de genotipos inestables (Cuadro 6). Éstos y los resultados citados previamente sugieren que la identificación de genotipos estables de alto rendimiento podría hacerse con base en el $RTHAG_i$ y ambos índices de Tai (1971), o con sólo uno de los índices, en sustitución de los parámetros de Eberhart y Russell (1966), W_i , σ^2_i , $S_i^{(1)}$, $S_i^{(2)}$ y S_i , debido a que éstos mostraron

la tendencia a clasificar a los genotipos en el mismo orden (Cuadro 6). Otras alternativas para alcanzar este propósito sería emplear al $RTHAG_i$ y al coeficiente de variación de Francis y Kannenberg (1978), o al $RTHAG_i$ y a la medida de superioridad de un cultivar de Lin y Binns (1988).

Sin embargo, el CV_i es más fácil de calcular y su interpretación también es relevante desde el punto de vista biológico y agronómico, como se señala a continuación. Con base en el rendimiento y el coeficiente de variación de Francis y Kannenberg (1978), Adugna y Labuschangne (2003) identificaron genotipos de linaza (*Linum usitatissimum* L.) de alto rendimiento y con estabilidad. Con esta idea, los 10 genotipos de papa evaluados en el presente estudio fueron agrupados en cuatro categorías: la primera categoría incluyó a los genotipos 776943 (21.98 t ha⁻¹, 32.8%), 'Gigant' (25.04 t ha⁻¹, 34.3 %) y 779040 (20.18 t ha⁻¹, 37.1 %), que fueron los de mayor rendimiento y menor coeficiente de variación; la segunda agrupó a 'Alpha' (23.57 t ha⁻¹, 45.6 %) y 750660 (23.30 t ha⁻¹, 46 %), identificados como genotipos de mayor rendimiento y coeficiente de variación alto; la tercera categoría incluyó a los genotipos de menor rendimiento y menor coeficiente de variación, como 676002 (16.41 t ha⁻¹, 31.6 %), 'Zafiro' (16.50 t ha⁻¹, 43.5 %) y 'Atlantic' (13.61 t ha⁻¹, 48.8 %); la cuarta categoría agrupó al resto de los genotipos, que presentaron el menor rendimiento y un coeficiente de variación alto (Cuadro 6).

De acuerdo con Francis y Kannenberg (1978), los genotipos deseables serían los de mayor rendimiento y menor coeficiente de variación, como los agrupados en la primera categoría, cuyo rendimiento de tubérculo también fue igual o superior a la media nacional (20.9 t ha⁻¹). El método de Francis y Kannenberg también permitiría recomendar variedades con rendimiento mayor que la media nacional, estatal o regional, y aunque tuvieran un coeficiente de variación mayor permitiría disminuir los riesgos de pérdidas en ambientes desfavorables; los genotipos que pertenecen a la segunda categoría podrían ser recomendadas para este propósito.

Según la medida de superioridad de un cultivar (P_i) de Lin y Binns (1988), los genotipos más estables fueron los que presentaron valores pequeños de P_i , como 'Gigant', 'Alpha', 776943 y 779040, cuya clasificación coincidió con la que hizo el coeficiente de variación de Francis y Kannenberg (1978); estos genotipos también fueron los de mayor rendimiento y su producción fue igual o mayor que el promedio nacional. No obstante, Lin y Binns (1988) consideraron que si la selección se basara solamente en el valor de P_i que representa el cuadrado medio del efecto conjunto de genotipos e IGA, podría ser descartado un cultivar que es pobre en adaptabilidad general pero bueno en adaptación específica, ya que el valor de P_i representa la superioridad en el sentido de adaptabilidad.

Cuadro 4. Rendimiento promedio ($t\ ha^{-1}$) de diez genotipos de papa evaluados en cinco ambientes del Estado de México.

Genotipos	Raíces			Metepec			San Francisco	Media general
	2004	2005	Media	2004	2005	Media	2005	
777091	29.6 ab	9.5 e	19.5 e	13.2 b	2.4 d	7.8 d	11.6 bcd	13.29 d
7718335	18.3 bc	24.2 bcd	21.3 bc	15.0 ab	7.0 cd	11.8 dc	2.9 d	13.54 d
750660	26.4 abc	12.8 de	19.6 c	30.1 a	20.0 ab	25.0 a	27.0 a	23.30 a
779040	32.0 ab	28.5 abc	30.3ab	17.4 ab	9.6 bcd	13.5 bcd	13.1 bcd	20.18 abc
'Alpha'	36.0 a	39.5 a	37.7 a	11.6 b	12.8 a-d	12.2 bcd	17.7 abc	23.57 a
'Atlantic'	18.2 bc	14.2 cde	16.2 c	12.3 b	11.5 a-d	11.9 dc	11.6 bcd	13.61 d
'Gigant'	27.0 abc	32.8 ab	29.9 ab	19.1 ab	23.4 a	21.2 ab	22.7 ab	25.04 a
'Zafiro'	13.7 c	17.3 cde	15.5 c	23.9 ab	13.0 a-d	18.4abc	14.4 bcd	16.50 bcd
676002	26.4 abc	15.2 cde	20.8 bc	20.6 ab	5.4 cd	12.7 bcd	14.7 a-d	16.41 cd
776943	29.4 ab	34.9 ab	32.2 a	20.6 ab	15.9 abc	18.2abc	8.9 cd	21.98 ab
Tukey (0.01)	15.1	14.5	9.8	15.26	12.64	9.29	12.25	5.52

Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.01).

Cuadro 5. Correlaciones entre once índices de estabilidad univariados[†] estimados en diez genotipos de papa evaluados en cinco ambientes del Estado de México en 2004 y 2005. La variable fue rendimiento total de tubérculo (RTHAG_i).

Índice	α_i	λ_i	P_i	W_i	σ_i^2	$S_i^{(1)}$	$S_i^{(2)}$	b_i	Sd_i	S_i	CV_i
RTHAG _i	0.01	0.33	-0.96**	0.48	0.48	0.44	0.46	0.01	0.35	0.38	-0.58
α_i		0.09	-0.12	-0.12	-0.12	-0.11	-0.13	0.99**	0.07	-0.19	0.01
λ_i			-0.13	0.88**	0.88**	0.85**	0.86**	0.10	0.99**	0.84**	0.30
P_i				-0.28	-0.28	-0.25	-0.26	-0.12	-0.14	-0.16	0.72*
W_i					1.00**	0.79**	0.82*	-0.11	0.89**	0.82*	0.17
σ_i^2						0.79*	0.82*	-0.11	0.89**	0.82*	0.17
$S_i^{(1)}$							0.99**	-0.11	0.85**	0.68	0.02
$S_i^{(2)}$								-0.03	0.86**	0.71*	0.04
b_i									0.08	-0.18	0.01
Sd_i										0.84**	0.30
S_i											0.40

[†] α_i y λ_i , Tai (1972); P_i , Lin y Binns (1988); W_i , Wricke (1962); σ_i^2 , Shukla (1972); $S_i^{(1)}$ y $S_i^{(2)}$, Huehn (1990); b_i y Sd_i , Eberhart y Russell (1966); S_i y CV_i , Francis y Kannenberg (1978). *, ** = Significativo a $P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$.

Cuadro 6. Rendimiento de tubérculo (RTHAG_i) y once índices de estabilidad^{††} aplicados a diez genotipos de papa evaluados en cinco ambientes del Estado de México

Genotipo	RTHAG _i	α_i	λ_i	P_i	W_i	σ_i^2	$S_i^{(1)}$	$S_i^{(2)}$	b_i	Sd_i	S_i	CV_i
777091	13.29 d [†]	0.39	7.42**	190.4	174.1**	195.8**	4.40**	10.24**	1.38	45.22**	8.98	67.6
7718335	13.54 d	0.30	3.80**	162.0	91.6**	92.7**	2.90**	4.24**	1.29	20.27**	7.53	55.7
750660	23.30 a	-1.20	8.55**	81.5	355.4**	423.0**	4.80**	12.56**	-0.14	55.51**	10.72	46.0
779040	20.18 abc	0.73*	0.17	67.8	70.1**	65.8**	2.80**	4.40**	1.70**	-4.42**	4.48	37.1
'Alpha'	23.57 a	1.02	9.21**	53.8	320.6**	378.8**	4.80**	12.24**	1.98	59.05**	10.45	45.6
'Atlantic'	13.61 d	-0.57*	0.21	164.9	45.5	35.0	2.60**	3.76**	0.44**	-4.49	6.65	48.8
'Gigant'	25.04 a	-0.47	3.33**	26.4	97.5**	100.0**	4.00**	8.80**	0.54	16.97*	8.60	34.3
'Zafiro'	16.50 bcd	-0.93	3.53**	129.3	181.9**	205.5**	4.00**	8.56**	0.10	19.46*	7.19	43.5
676002	16.41 cd	0.11	3.77**	125.5	80.3**	78.5**	4.20**	9.44**	1.11	19.65*	5.18	31.6
776943	21.98 ab	0.61	5.28**	53.8	156.4**	173.6**	3.60**	6.96**	1.57	31.15**	7.22	32.8

^{††} Los índices de estabilidad fueron definidos en el Cuadro 5.

[†] Medias con letras iguales en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.01).

* Genotipo inestable a 5 %, ** Genotipo inestable a 1 %.

Con el método de Tai (1971), aún cuando no detectó variedades estables, se observó que 'Zafiro' fue la más cercana a la estabilidad perfecta ($\alpha = -1$ y $\lambda = 1$) y 676002 fue el más cercano a la estabilidad promedio ($\alpha = 0$ y $\lambda = 1$). Este método y los parámetros de Eberhart y Russell (1966) clasificaron a los 10 genotipos como inestables. En varios estudios se ha criticado la técnica de regresión debido a que puede conducir a conclusiones erróneas cuando es muy pequeña la proporción de la IGA debida a la regresión lineal

sobre los índices ambientales (Shukla, 1972; Becker y León, 1988).

Según el coeficiente de variación (CV_i) y la desviación estándar (S_i) de Francis y Kannenberg (1978), los genotipos más estables fueron 779040 y 676002; el primero tuvo un rendimiento promedio igual al del mejor genotipo ('Gigant') y al de la variedad testigo ('Alpha'), pero el clon

676002 fue superado ($P \leq 0.05$) por estos dos genotipos (Cuadro 6).

CONCLUSIONES

Los mejores ambientes para la evaluación de genotipos de papa fueron Raíces (2004) y Raíces (2005). Los índices α_i con b_i , λ_i con S_{di} , W_i con σ^2_{2i} y $S_i^{(1)}$ con $S_i^{(2)}$ mostraron gran similitud en la clasificación de los genotipos; el coeficiente de variación de Francis y Kannenberg y la medida de superioridad de un cultivar de Lin y Binns identificaron a los genotipos 'Gigant' y 776943 como estables, mientras que el índice de Lin y Binns incluyó en este grupo a 'Alpha', 750660 y 779040. En los otros índices, la mayoría de las variedades se clasificaron como inestables.

BIBLIOGRAFÍA

- Adugna W, M T Labuschangne (2003) Parametric and nonparametric measures of phenotypic stability in linseed (*Linum usitatissimum* L.). *Euphytica* 129:211-218.
- Becker H C, J Leon (1988) Stability analysis in plant breeding. *Plant Breed. Rev.* 101:1-23.
- Bonierbale M, W Amoros, J Espinoza, E Mihovilovich, W Roca, R Gómez (2004) Recursos genéticos de la papa: don del pasado, legado para el futuro. *Rev. Latinoam. Papa, Supl.* 1:13-13.
- Borboa R A (1999) Monografía Municipal de Temascaltepec. Instituto Mexiquense de Cultura. Gobierno del Estado de México. 239 p.
- Cadena H M A, M Díaz V, H López D, T E Zavala Q, R Flores L, M Villareal G, A Rivera P, O Rubio C, R Rocha R, H S Azpiroz R, J L Rodríguez O, A Manzo G, S Barrales D (1999) Evaluaciones de variedades de papa para producción de tubérculos semilla en los Estados de México y Tlaxcala. *Agric. Téc. Méx.* 26:97-105.
- Crossa J (1990) Statistical analysis of multilocations trials. *Adv. Agron.* 44:55-85.
- De Jong H, G C C Tai, W A Russell, G R Johnston, K G Proudfoot (1981) Yield potential and genotype – environment interactions of tetraploid (4x-2x) potato hybrids. *Amer. Potato J.* 58:191-199.
- Eberhart S A, W A Russell (1966) Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-40.
- Francis T R, L W Kannenberg (1978) Yield stability studies in short-season maize. I. A descriptive method for grouping genotypes. *Can. J. Plant Sci.* 58:1029-1034.
- Huehn M (1990a) Nonparametric measures of phenotypic stability. Part 1: Theory. *Euphytica* 47:189-194.
- Huehn M (1990b) Nonparametric measures of phenotypic stability. Part 2: Applications. *Euphytica* 47:195-200.
- Kang M S, S D Miller, L L Darrah (1987) A note on relationship between stability variance and ecovalence. *J. Heredity* 78:107.
- Lin C S, M R Binns, L P Lefkovich (1986) Stability analysis; were do we stand? *Crop Sci.* 26:894-900.
- Lin C S, M R Binns (1988) A superiority measure of cultivar performance for cultivar x location data. *Can. J. Plant Sci.* 68:193-198.
- Márquez S F (1992) La interacción genético-ambiental en Genotecnia Vegetal. *In: Memorias del Simposio de Interacción Genético – Ambiental en Genotecnia Vegetal.* 26-27 de marzo. Sociedad Mexicana de Fitogenética. Guadalajara, Jalisco. pp:1-27.
- Mekbib F (2003) Yield stability in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes. *Euphytica* 30:147-153.
- Milton P J, S D Allen (1995) *Breeding Field Crops.* Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA. 494 p.
- Piepho H P, S Lotito (1992) Rank correlation among parametric and non-parametric measures of phenotypic stability. *Euphytica* 64:221-225.
- Rodríguez P J E, J Sahagún C, H E Villaseñor M, J D Molina G, A Martínez G (2002) Estabilidad de siete variedades comerciales de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Rev. Fitotec. Mex.* 25:143-151.
- Sahagún C J (1992) El ambiente, el genotipo y su interacción. *Rev. Chapingo* 79 - 80:5-12.
- Shukla G K (1972) Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. *Heredity* 28:237-245.
- Tai G C C (1971) Genotypic stability analysis and its application to potato regional trials. *Crop Sci.* 11:184 -190.
- Wricke G (1962) Über eine methode zur erfassung der ökologischen streubreite in field versuchen. *Z. Pflanzenzüchtg* 47:92-96.
- Yan W, M S Kang (2003) *GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists.* CRC Press LLC. Boca Raton, FL, USA. 276 p.