

Evaluación de la Estabilidad de Cultivares de *Triticum aestivum* L.¹

J. Lúquez*, J.C. Suárez**

ABSTRACT

Yield data from nine wheat cultivars obtained from experiments conducted in 15 locations during three years, were used to estimate type-four yield stability. These type-four stability estimators were compared to the type-two and type-three estimators. Type-four stability estimator methodology requires two analyses: a) a regression analysis based on location effects averaged over several years, assuming that the means of location represent predictable variability, and b) an analysis of variance, where stability is defined by the square of the mean for years in each location for each cultivar, which is regarded as a non-predictable variable. With a), the range of locations in which a cultivar is well adapted can be determined. With b), the most stable cultivars can be selected. Type-four stability for one cultivar is independent of the other cultivars included for comparison, and from the regression coefficient estimated for predictable variability. The classification of cultivar stability according to the three different methods of calculation was compared.

RESUMEN

A partir de los datos sobre rendimiento en nueve cultivares de trigo para pan, que provenían de un grupo de Ensayos Comparativos de Rendimiento (ECR) (30 años y 15 localidades), se analizó la estabilidad del rendimiento de tipo 4 y se la comparó con las estimaciones de estabilidad de tipos 2 y 3. La estabilidad de tipo 4 propone dos análisis: uno, de regresión basado en los efectos promediados de la localidad sobre los años, suponiendo que las medias de localidad representan la variación predecible; otro, de cálculo de la estabilidad con base en los cuadrados medios de años dentro de las localidades, y asume que significan la variación no predecible. A través del primero se puede determinar el rango de localidades en que un cultivar estará bien adaptado, y con el segundo se pueden elegir los cultivares más estables. Existen algunas coincidencias en la clasificación de genótipos estables según los tres métodos analizados. La estabilidad de tipo 4, calculada para cada cultivar, es independiente de los otros cultivares incluidos en el ensayo y presenta un coeficiente de regresión estimado para la variación predecible.

Palabras clave: Interacción genótipo-ambiente, estabilidad, *Triticum aestivum* L.

INTRODUCCION

Para que un cultivar se difunda debe mantener un buen comportamiento en el rango de ambientes en el que se cultiva. La presencia de interacciones genótipo-ambiente reduce la correlación entre genótipo y fenótipo, y dificulta la apreciación del potencial genético. Con el objeto de determinar la magnitud de tal interacción, los mejoradores de plantas realizan pruebas de comportamiento de genótipos en distintas localidades y años.

La estabilidad de un cultivar se refiere a la consistencia de su comportamiento en los ambientes, y se ve afectada por la presencia de interacciones genótipo-ambiente. En este caso, es posible estimar parámetros de estabilidad para determinar la superioridad de genótipos individuales en el rango de ambientes. Los datos estadísticos de la estabilidad, en la literatura, se han clasificado en tres tipos (Lin *et al.* 1986); tipo 1: un genótipo es estable si su variancia entre ambientes es pequeña; tipo 2: un genótipo es estable si su respuesta a los ambientes es paralela a la respuesta media de todos los genótipos en el ensayo; tipo 3: un genótipo es estable si el cuadrado medio de las desviaciones de la regresión sobre un índice ambiental es pequeño. Los parámetros de estabilidad de cultivares de Finlay y Wilkinson (1963), y Perkin y Jinks (1968) pertenecen a los tipos 1 ó 2, dependiendo de cómo se defina un genótipo estable, y los de Eberhart y Russell (1966) al tipo 3.

¹ Recibido para publicación el 1 de setiembre de 1991.

* Facultad Ciencias Agrarias, Universidad Nacional, Mar del Plata, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Arg.

** Dpto. Producción Vegetal, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Balcarce, Arg.

La estabilidad del tipo 1 se considera homóloga al concepto de homeóstasis y se llama estabilidad biológica (Becker 1981), para diferenciarla de la estabilidad agronómica que es la de tipo 2. La primera, a pesar de ser teóricamente la más ortodoxa, es la menos usada por los mejoradores de plantas, quienes pretenden no sólo encontrar cultivares con buena adaptación a todos los ambientes, sino también con altos rendimientos. Es una estabilidad asociada a una respuesta pobre y a bajos rendimientos en ambientes que son de alto rendimiento para otros cultivares. Además es difícil en la práctica alcanzar un alto nivel de desempeño en un amplio rango de ambientes, y, si se lograra, el esfuerzo podría ser innecesario, pues algunos cultivares con más restricciones para adaptarse pueden crecer separadamente en distintos ambientes y dar una producción máxima. Por lo tanto, emplear este tipo de estabilidad es beneficioso si el rango de ambientes del experimento es pequeño.

La estabilidad de tipo 2 es una medida relativa de los genotipos incluidos en la prueba; así su alcance de inferencia se limita a ellos y no se generaliza.

La estabilidad de tipo 3 agrega al concepto anterior que, ante una interacción genotipo-ambiente significativa, se realiza una regresión entre rendimiento e índice ambiental, y si se cuantifica la estabilidad por medio de un coeficiente b de regresión, se obtendrá una parte residual de la variación por la respuesta del genotipo al ambiente, que no se explica por la regresión y se mide en forma de desvíos de la misma (s^2d) (Lin *et al.* 1986).

Entonces, la variabilidad de un genotipo con respecto al ambiente puede subdividirse en una parte predecible y, a veces, controlable debido a la regresión, y en otra que no lo es, la cual corresponde al cuadrado medio de la desviación. En los experimentos cultivar x localidad x año es frecuente encontrar interacciones significativas en el análisis de variancia (ANOVA), causadas por variaciones importantes del efecto ambiental local de año a año. Esta variación impredecible dificulta la recomendación de un cultivar en una región.

El efecto ambiental sobre un genotipo está constituido por el clima y suelo de la zona, en forma persistente, y por la variación del tiempo cada año, en forma no persistente (Lin y Binns 1988). Se propone entonces dividir la interacción genotipo-ambiente en

componentes predecibles y no predecibles, que permitiría recomendar cultivares con adaptación específica a ambientes determinados predecibles, así como a variaciones ambientales no predecibles. Por eso, se necesitarían dos criterios distintos para la recomendación de un cultivar, según lo propuesto por el método de estabilidad de tipo 4: 1) si la media de cultivar x localidad promediada sobre años fuera el equivalente biológico de cultivar x variación predecible, se usaría el análisis de regresión de la interacción genotipo x localidad (promediada sobre años) para recomendar cultivares adaptados a localidades específicas. 2) En el caso de que el factor años dentro de las localidades fuera equivalente al cultivar por la variación no predecible, entonces se aplicarían los cuadros medios de "años" dentro de localidades como una medida de estabilidad. Los cultivares serán más estables cuanto más pequeño sea el cuadrado medio.

El objetivo de este trabajo fue analizar un grupo de ECR de cultivares de trigo para pan al calcular la estabilidad de tipo 4 de los mismos (Lin y Binns 1988) y compararla con las estimaciones de estabilidad de tipo 2 y 3.

MATERIALES Y METODOS

Se utilizaron los datos de ECR obtenidos en 15 localidades de distintas zonas ecológicas con cultivo de trigo para pan, en Argentina (Rafaela, Reconquista, Pergamino, Bellocq, Paraná, Balcarce, La Dulce, Necochea, Miramar, La Banda, Anguil, Carhué, Bordenave, Coronel Suárez y Gral. Pico), durante tres años (1985, 1986 y 1987). De los resultados de esos ensayos, se usaron los promedios de rendimiento de nueve de los cultivares: Cooperación Cabildo, Buck Pangaré, Cochicó INTA, Victoria INTA, Las Rosas INTA, Klein Criollo, Klein Cartucho y Klein Chamacó (Cuadro 1).

Se realizaron dos análisis de variancia. En el primero se consideraron como fuentes de variación los cultivares, los 45 ambientes y la interacción cultivar x ambiente (C x A). Esta última se subdividió en fuentes de variación por la regresión y las desviaciones de la regresión (residuales) (Eberhart y Rusell 1966). En el segundo análisis, las fuentes de variación consideradas fueron los cultivares, las localidades y los años dentro de las localidades (A/L) y se utilizó la interacción cultivar por año dentro de localidad (C x A/L) como error. En este análisis se abrió la interacción C x A como una fuente de variación

Cuadro 1. Rendimiento promedio (kg/ha) de nueve cultivares de trigo pan en tres años y 15 localidades. Índices ambientales calculados según Lin y Binns (1988).

	Pangare	Coehico	Cartucho	Victoria	Chamaco	Las Rosas	Criollo	La Paz	Cabildo	Promedio	I. A.
ANGUIL	1 205	1 114	1 074	1 027	995	996	1 189	766	902	1 030	-1 483
GRAL. PICO	1 250	1 377	1 068	1 141	1 175	1 470	1 207	1 213	1 330	1 248	-1 265
LA BANDA	1 660	1 205	1 321	1 583	1 368	1 486	1 325	1 639	777	1 374	-1 139
RECONQUISTA	1 901	1 637	1 972	1 689	2 013	1 969	1 572	1 663	1 107	1 725	-788
PARANA	2 092	1 510	2 602	2 099	2 210	2 020	1 953	1 072	1 069	1 847	-666
CARHUE	1 445	2 482	1 914	2 030	1 892	1 822	1 886	1 818	2 089	2 042	-471
BELLOCQ	2 423	1 998	2 525	2 538	2 485	1 870	2 115	2 138	1 908	2 222	-291
CNEL SUAREZ	2 013	2 799	2 643	2 645	1 918	2 045	2 580	2 473	1 792	2 323	-190
PERGAMINO	2 735	2 597	2 761	2 464	2 372	3 021	2 658	1 869	2 265	2 527	14
RAFAELA	2 741	2 434	3 108	2 709	2 988	3 121	2 718	1 815	1 670	2 589	76
BORDENAVE	2 975	3 481	3 380	3 165	3 206	2 368	2 565	2 999	2 434	2 953	440
BALCARCE	3 365	3 174	3 009	3 459	3 335	2 897	2 931	3 333	2 696	3 133	620
LA DULCE	3 955	3 622	3 028	3 307	3 425	3 170	2 860	3 532	3 213	3 346	833
MIRAMAR	3 753	4 204	3 475	3 309	3 369	3 795	3 488	3 797	3 201	3 599	1 086
NECOCHEA	6 233	6 099	5 732	5 903	5 791	5 334	5 419	5 918	5 396	5 758	3 245
PROMEDIOS	2 717	2 649	2 641	2 604	2 570	2 492	2 431	2 403	2 123	2 513	

ante la interacción cultivar x localidad (C x L) (predecible) y la interacción C x A/L (Lin y Binns 1988).

Se estimaron los tipos 2, 3 y 4 de estabilidad para cada cultivar. Los tipos 2 y 3 se calcularon con base en un análisis de regresión para cada cultivar. En estos análisis, se usó un índice ambiental (IA) como variable independiente (x) y el promedio de rendimiento del cultivar como variable dependiente (y). El IA se definió como la diferencia entre el promedio de rendimiento de los cultivares en cada ambiente y el promedio de rendimiento general. En este caso se tomaron en cuenta 45 ambientes.

La estabilidad de tipo 2 se definió en función de los coeficientes de regresión obtenidos (Finlay y Wilkinson 1963), y la estabilidad de tipo 3 en función de los cuadrados medios de las desviaciones a partir de la regresión (Eberhart y Rusell 1966).

La estabilidad de tipo 4 se definió en función de los cuadrados medios de años dentro de las localidades para cada cultivar, determinados en el segundo análisis de variancia. Para estimar la respuesta de los cultivares a la variación predecible, se realizó un análisis de regresión. La variable independiente fue un IA definido como la diferencia entre la media de los rendimientos de la localidad, obtenidos durante el transcurso de los años y la media general. Se consi-

deraron 15 ambientes para este análisis y se utilizaron como variables las medias de rendimiento de cada cultivar en las diferentes localidades promediadas a través de los años. La pendiente de regresión de cada cultivar se usó como indicador para recomendar variedades para cada localidad.

RESULTADOS

En el Cuadro 2 se presenta el ANOVA de donde surgen los genótipos estables de tipo 3. Este análisis muestra que los b son homogéneos, es decir que no se detectaron diferencias genéticas entre variedades para su regresión sobre el índice ambiental. No fue posible hacer la prueba de significancia de las diferencias entre las desviaciones de la recta de regresión de cada variedad (s^2d), porque no se disponía de los valores del error para cada uno de los años del experimento, que sirven para construir el error conjunto.

El Cuadro 3 presenta el ANOVA del experimento 9 x 15 x 3 y el Cuadro 4, las medias de rendimiento (kg/ha), los coeficientes de regresión (b) calculados según los métodos de la estabilidad de tipos 3 y 2 (experimento 9 x 45) y tipo 4 (Lin y Binns 1988) (experimento 9 x 15 x 3), los cuadrados medios residuales y los cuadrados medios de años dentro de localidades (CM A/L) para todos los cultivares del ensayo.

Cuadro 2. ANOVA del experimento 9 x 45.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Genótipo	8	416 000 (1) ** M1
Ambiente	44	
G x A	353	1 250 000
Ambiente (lineal)	1	729 493 076
G x A (lineal)		
o heterogeneidad b's	8	123 178 (2) NS M2
Desviaciones conjuntas	387	123 000 (3) M3

** Significativa al 1%

Cuadro 3. ANOVA del experimento 9 x 15 x 3.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios
Genótipo	8	1 449 936.83**
Localidades	14	37 619 227.03**
Años (A)/L.	30	6 316 865 33**
G x L	112	257 303.57**
G x L.	240	147 775.4

** Significativa al 1%

Cuadro 4. Media de rendimiento (kg/ha), coeficiente de regresión (b), CM A/L y CM residual para nueve cultivares de trigo para pan (*T. aestivum* L.).

Genótipo	Media (kg/ha)	Experimento 9 x 45*		Experimento 9 x 15 x 3**	
		b	CM residual	b	CM A/L.
Pangaré	2 743	0.99	190 930	1.07	1 033 626
Cochicó	2 649	1.04	180 000	1.10	578 169
Cartucho	2 607	0.97	100 000	0.95	633 109
Victoria	2 597	0.03	68 372	1.00	921 976
Chamaco	2 570	0.98	136 046	0.99	764 274
Las Rosas	2 515	0.93	4 093	0.89	827 651
Criollo	2 431	0.94	81 395	0.90	861 432
La Paz	2 403	1.08	23 488	1.09	946 896
Cabildo	2 176	0.93	325 581	0.98	683 294

* En este experimento se usaron los promedios de rendimiento de los cultivares en cada uno de los 45 ambientes.

** Se usaron los promedios de rendimiento de la localidad promediados a través de los años

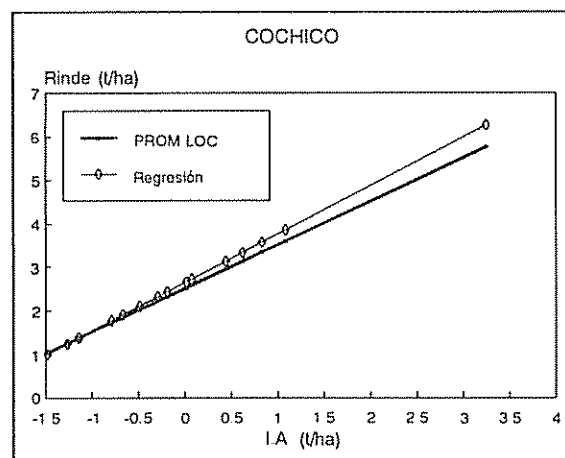


Fig. 1. Regresión del rendimiento medio del cultivar Cochicó en cada localidad sobre el I.A. para esa localidad en el experimento 9 x 15 x 3.

Se observaron las regresiones para cada cultivar según el método de la estabilidad de tipo 4 (Figs. 1 a 9), comparadas con la regresión de $b = 1$, y los CM A/L. (Fig. 10) así como los coeficientes de regresión de las nueve variedades de trigo para pan estudiadas.

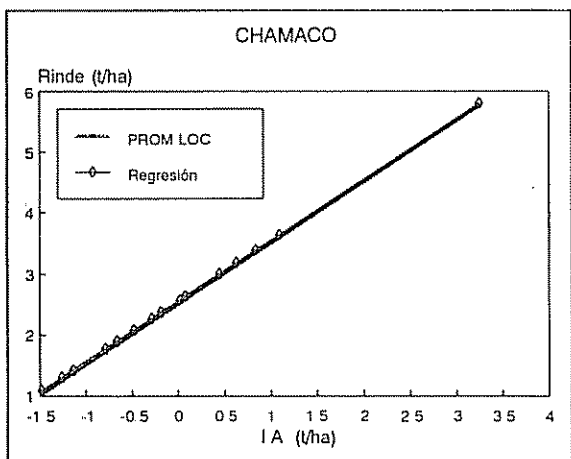


Fig. 2. Regresión del rendimiento medio del cultivar Chamaco en cada localidad sobre el I.A. para esa localidad en el experimento 9 x 15 x 3.

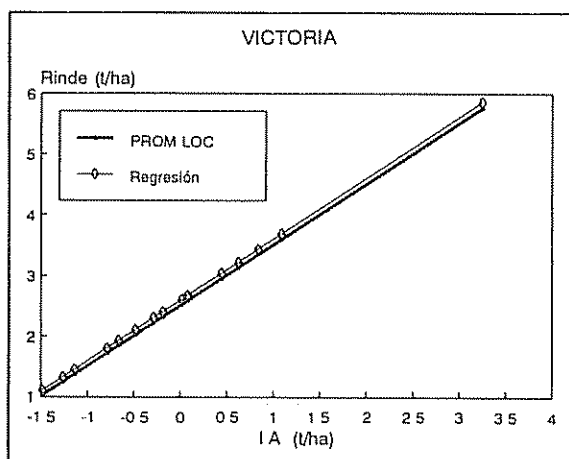


Fig. 5. Regresión del rendimiento medio del cultivar Victoria en cada localidad sobre el I.A. para esa localidad en el experimento 9 x 15 x 3.

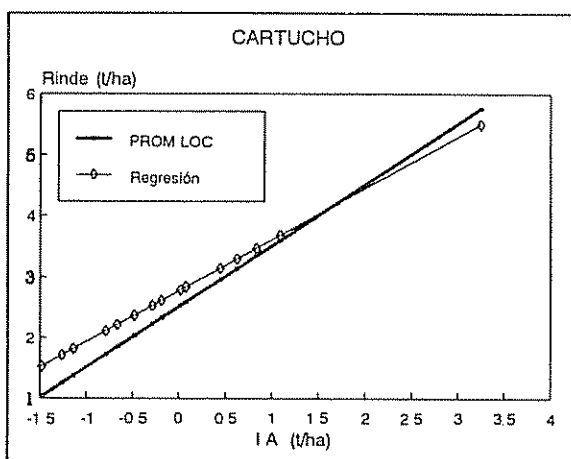


Fig. 3. Regresión del rendimiento medio del cultivar Cartucho en cada localidad sobre el I.A. para esa localidad en el experimento 9 x 15 x 3.

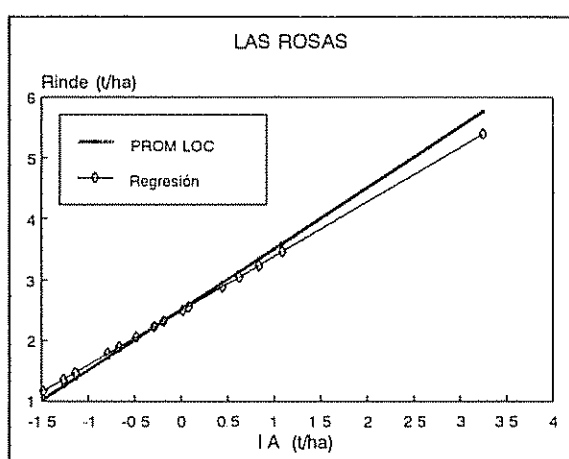


Fig. 6. Regresión del rendimiento medio del cultivar Las Rosas en cada localidad sobre el I.A. para esa localidad en el experimento 9 x 15 x 3.

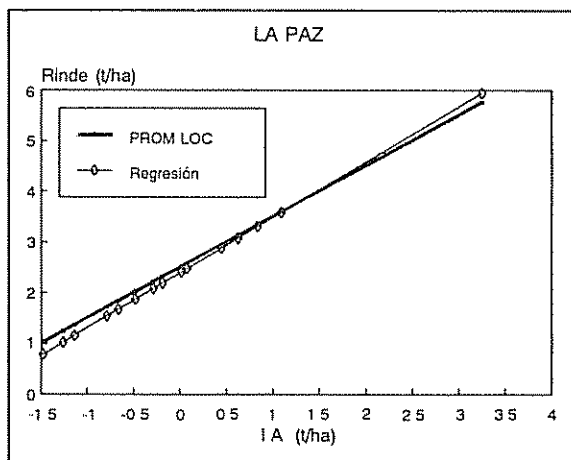


Fig. 4. Regresión del rendimiento medio del cultivar La Paz en cada localidad sobre el I.A. para esa localidad en el experimento 9 x 15 x 3.

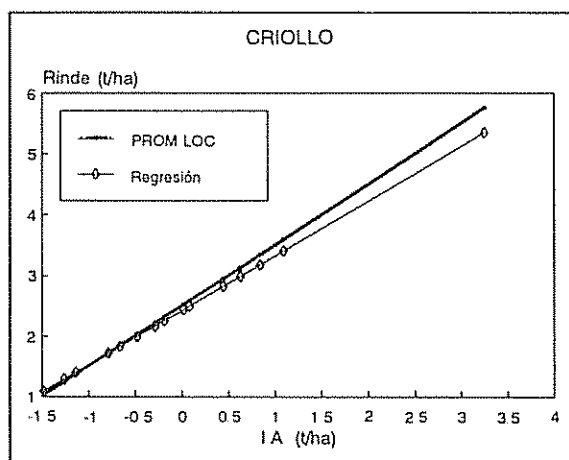


Fig. 7. Regresión del rendimiento medio del cultivar Criollo en cada localidad sobre el I.A. para esa localidad en el experimento 9 x 15 x 3.

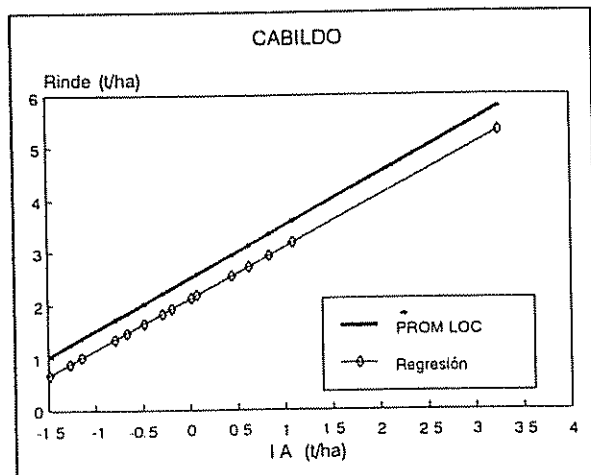


Fig. 8. Regresión del rendimiento medio del cultivar Cabildo en cada localidad sobre el I.A. para esa localidad en el experimento 9 x 15 x 3.

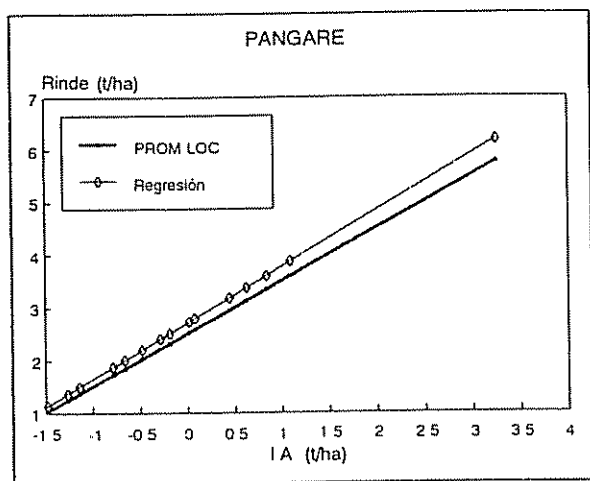


Fig. 9. Regresión del rendimiento medio del cultivar Pangaré en cada localidad sobre el I.A. para esa localidad en el experimento 9 x 15 x 3.

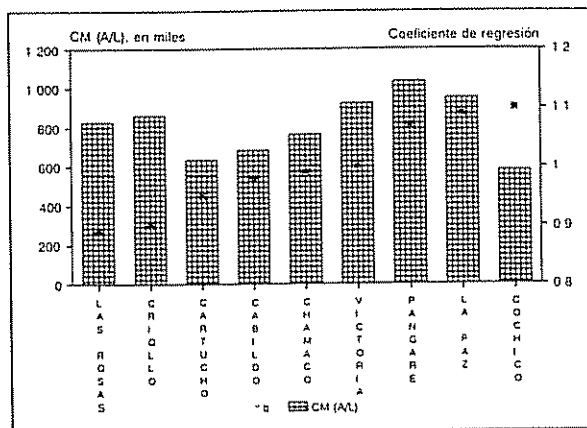


Fig. 10. Cuadrados medios de años dentro de localidades (CM (A/L)) y coeficientes de regresión de nueve cultivares de trigo pan.

DISCUSION

Como ejemplo del uso del análisis de la estabilidad de tipo 4, se seleccionan cultivares según su coeficiente de regresión y con alta estabilidad, o sea con un valor pequeño de CM A/L en el análisis 9 x 15 x 3. En este experimento, los cultivares más promisorios fueron Cochicó y Chamaco para ambientes de alto rendimiento (alto b), y Cartucho para los de bajo rendimiento (bajo b). Según el análisis de tipo 3, y de acuerdo con los valores correspondientes de b, los cultivares que mostraron una alta capacidad de respuesta al estímulo ambiental ($b > 1$) fueron 'La Paz', 'Victoria' y 'Cochicó', aunque en relación con sus CM residuales fueron sólo relativamente estables en primeros. De acuerdo con este parámetro, Las Rosas sería el cultivar más estable. En cambio, siguiendo el concepto de estabilidad de tipo 2, los cultivares más estables serían los que tienen un $b > 1$, y 'Las Rosas', 'Criollo', 'Cabildo', 'Cartucho', 'Chamaco' y 'Pangaré', los más promisorios.

La diferencia conceptual entre el análisis de estabilidad de tipo 4 y los otros, reside en que el primero separa la variación ambiental en predecible y no predecible. Esto es importante, ya que la variación predecible puede controlarse, por ejemplo, haciendo una selección de los cultivares adaptados a localidades específicas. Puede resultar, entonces, que los cultivares seleccionados para ambientes de alto rendimiento rindan en forma oscilante con el transcurso de los años según su capacidad homeostática.

Un ejemplo lo constituye el cultivar Pangaré que tiene el mayor rendimiento medio en todos los ambientes. Según el concepto de estabilidad de tipo 2 este sería un cultivar con adaptabilidad general. Además, el concepto de estabilidad de tipo 3, si bien responde a los estímulos ambientales por el valor de su b, es uno de los cultivares más inestables de acuerdo al valor de su CM residual, y, para quienes proponen la estabilidad de tipo 4, sería el cultivar más inestable por su valor CM A/L que lo hace incapaz para enfrentar la variación impredecible. Los cultivares Cartucho y Chamaco, también, tienen valores de b muy cercanos a 1, lo mismo que los rendimientos medios relativamente altos, y presentan adaptabilidad general de acuerdo con la definición de estabilidad de tipo 2. Son, por el concepto de estabilidad de tipo 4, relativamente estables por sus valores de CM A/L, pero, 'Cartucho' estaría más adaptado a ambientes de bajos rendimientos.

'Cochicó' es el más estable por su valor de CM A/L, recomendable para ambientes de alto rendimiento según el valor de b en el análisis 9 x 15 x 3; no tiene adaptabilidad general de acuerdo con el valor de b en el análisis 9 x 45 (Finlay y Wilkinson 1963) y es uno de los más inestables según el valor de su CM residual.

El cultivar Cabildo es de tipo 2 de adaptabilidad general, por el concepto de estabilidad; también, según lo definido como estabilidad de tipo 3 (el mayor CM residual), es el más inestable y uno de los más estables según lo expuesto para estabilidad de tipo 4. No sería recomendable debido a sus bajos rendimientos.

Si bien los resultados de la regresión en los tres análisis son similares, la diferencia entre ellos es la medida de la estabilidad. Mientras algunos investigadores (Eberhart y Russell 1966; Finlay y Wilkinson 1963) utilizan un análisis de regresión sobre todos los ambientes; otros (Lin y Binnes 1988) usan un análisis de regresión sobre las localidades promediadas a través de los años, y el parámetro de estabilidad se define como el CM A/L de una parte de los datos estructuralmente independientes del análisis de regresión y de los otros genótipos del experimento.

CONCLUSIONES

Los datos utilizados en este trabajo permitieron comparar tres métodos de estabilidad (1 ó 2, 3 y 4) y observar los alcances de cada uno de ellos. Los tres métodos usan distintos parámetros para determinar si un cultivar es estable cuando se compara con otros en un experimento. Los métodos propuestos por quienes definen la estabilidad de tipo 2 y 3 son los más populares ante los numerosos trabajos publicados sobre los métodos estadísticos propuestos por ellos para estimar la estabilidad. Sin embargo, en los

últimos años se han revisado los métodos mencionados y han puesto en evidencia limitaciones en la metodología y conclusiones (Lin *et al.* 1986). La propuesta de la estabilidad de tipo 4 es pura desde el punto de vista estadístico, ya que es independiente del análisis de regresión y de los otros genótipos incluidos en la prueba. Además es interesante el parámetro que estima la estabilidad de tipo 4 para la variación impredecible, lo que también hace el s_d^2 en el análisis de estabilidad de tipo 3 (Piatti *et al.* 1985), pero con las limitaciones ya mencionadas.

LITERATURA CITADA

- BECKER, H.C. 1981 Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica* 30:835-840
- EBERHART, S.A.; RUSSELL, W.A. 1966 Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science* 6:36-40
- FINLAY, K.W.; WILKINSON, G.N. 1963 The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Australian Journal of Agricultural Research* 14:342-354
- LIN, C.S.; BINNS, M.R.; LEFKOVITCH, L.P. 1986 Stability analysis: Where do we stand? *Crop Science* 26:894-900
- LIN, C.S.; BINNS, M.R. 1988. A method of analyzing cultivar x location x year experiments: A new stability parameter. *Theoretical Applied Genetics* 76:425-430.
- PERKINS, J.; JINKS, J. ¿1959? Environmental and genotype-environmental components of variability. III. Multiple lines and crosses. *Heredity* 23:339-348
- PIATTI, F.; MARIOTTI, J.; VAN BECELEARE, R.; FRUTOS, E. 1985 Respuesta al ambiente y estabilidad del rendimiento en cultivares comerciales de maíz (*Zea mays* L.). *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 20(2):55-68.