

ESTABILIDAD DE SIETE VARIEDADES COMERCIALES DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.) DE TEMPORAL

STABILITY OF SEVEN COMMERCIAL VARIETIES OF WHEAT (*Triticum aestivum* L.) FOR RAINFED CONDITIONS

Juan Enrique Rodríguez Pérez¹*, Jaime Sahagún Castellanos¹, Héctor Eduardo Villaseñor Mir², José Domingo Molina Galán³ y Ángel Martínez Garza³

¹ Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Fitotecnia. Km 38.5 Carr. México-Texcoco, CP. 56230. Chapingo, Estado de México. Tel y Fax: 01(595)952-1642. Correo electrónico: jerodrig@taurus1.chapingo.mx. ² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, Campo Experimental Valle de México, Programa de Trigo. Apartado Postal 10, CP 56230. Chapingo, Estado de México. ³ Colegio de Postgraduados, Instituto de Recursos Genéticos y Productividad e Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, respectivamente. Km 36.5 Carr. México-Texcoco. CP. 56230. Montecillo, Estado de México.

*Autor responsable

RESUMEN

Con el propósito de estudiar la estabilidad fenotípica del rendimiento de grano de siete variedades de trigo (*Triticum aestivum* L.) recomendadas para siembras de temporal o secano (por el programa de trigo del Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias), se aplicaron diez metodologías de análisis a la información experimental generada en 50 evaluaciones de campo bajo condiciones de temporal de tales variedades en el periodo de 1988 a 1996. Las variedades de reciente liberación, Batán F96 y Romoga F96, mostraron en términos generales mayor estabilidad, apegándose a una respuesta lineal y bajos índices de variabilidad. Las variedades Zacatecas VT74, Pavón F96 y Gálvez M87 mostraron menor estabilidad fenotípica, lo cual puede estar asociado, entre otros factores, a la susceptibilidad a royas (*Puccinia triticina* y *P. striiformis*). Temporalera M87 tuvo un comportamiento contrastante al obtener altos rendimientos a pesar de ser susceptible a royas, y presentó alta variación, entre y dentro de ambientes. El empleo de dos métodos multivariados permitió la agrupación de genotipos con estabilidad similar. Es indispensable estudiar la estabilidad fenotípica con diferentes métodos, ya que permite una selección más adecuada para las condiciones de producción.

Palabras clave: *Triticum aestivum* L., interacción genotipo ambiente, índices de estabilidad fenotípica, serie de experimentos.

SUMMARY

In order to study the phenotypic stability of grain yield of seven wheat varieties (*Triticum aestivum* L.), recommended for rainfed conditions by the wheat program of the Campo Experimental Valle de México of the Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias, ten methodologies were used to analyze the experimental information of 50 field trials performed on these varieties under rainfed conditions, from 1988 to 1996. Recent-released varieties, Batán F96 and Romoga F96, were more stable in general terms, because they showed a linear response and low variability indexes. The varieties Zacatecas VT74, Pavón F76, and Gálvez M87 had a low phenotypic stability, which could be associated, among other factors, to rust susceptibility (*Puccinia triticina* and *P. striiformis*). Temporalera M87 had a contrasting performance because it showed a high yield, despite being susceptible to rust. Furthermore, it showed a high environmental variation, both between and within. Two multivariate

methods allowed to group genotypes with similar stability. It is then necessary to study the phenotypic stability with several methods because they allow adequate genotype selection according to the environmental conditions.

Index words: *Triricum aestivum* L., genotype environment interaction, phenotypic stability indexes, experiment series.

INTRODUCCIÓN

La interacción genotipo x ambiente, entendida como el cambio del comportamiento diferencial de genotipos a través de condiciones ambientales cambiantes, ha sido uno de los principales factores, si no el más importante, que ha obligado la generación de diferentes metodologías de mejoramiento genético. Este concepto es preponderante tanto en las fases de selección de poblaciones segregantes como en la evaluación de líneas avanzadas. En el primer caso, la alternancia de diferentes ambientes para la selección del germoplasma, y en el segundo, el establecimiento de ensayos uniformes en la más amplia variedad de condiciones, persiguen la obtención de genotipos estables. Esto es debido a que las variedades mejoradas deben responder favorablemente a las condiciones de producción a que serán sometidas.

La estabilidad fenotípica del rendimiento ha tenido varias interpretaciones. Becker (1981) propuso dos conceptos: el biológico, cuyo ideal es el genotipo de mínima variación a través de ambientes, mostrando un rendimiento constante en cualquier condición de producción (varianza estadística mínima), y el agronómico, que representa una mínima interacción genotipo ambiente, lo cual está asociado a la pretensión de obtener un incremento del rendimiento en respuesta a mejoras ambientales.

Lin *et al.* (1986) describen tres tipos de estabilidad. El primero es referido a una mínima varianza entre ambientes (Francis y Kannenberg, 1978); el segundo define a un genotipo como estable si su respuesta es paralela a la de la media de todos los genotipos ensayados (Plainsted y Peterson, 1959; Shukla, 1962; Finlay y Wilkinson, 1963), y un tercero asociado al ideal del genotipo que tenga un cuadrado medio de desviaciones de regresión pequeño, considerando al índice ambiental como variable independiente (parámetro S_d de Eberhart y Russell, 1966; parámetro λ_i de Tai, 1971). Posteriormente, Lin y Binns (1988) definieron un cuarto concepto de estabilidad referido a variaciones pequeñas de un genotipo en una misma localidad pero en diferentes años.

Existen dos posibilidades para el desarrollo de variedades con baja interacción genotipo x ambiente: subdividir las áreas en regiones relativamente homogéneas donde los genotipos requieran adaptación específica, o bien generar materiales de gran estabilidad con comportamiento adecuado en una amplia gama de ambientes (Tai, 1971).

En el caso de áreas trigueras de temporal en México, a pesar de ser pequeñas zonas aisladas, las variaciones ocurridas entre sitios y ciclos agrícolas por efectos climáticos, de manejo, tipo de suelo, etc., favorecen la segunda opción. Sin embargo, combinar altos rendimientos con estabilidad es una tarea difícil, pues típicamente ambas características se asocian en forma inversa. Por tal motivo, en forma empírica se han definido tres condiciones de producción: favorable, intermedia y crítica, con las que se pretenden abarcar la mayoría de las posibles situaciones a que se enfrentan las variedades (Moreno y Villaseñor, 1993); así, los dos enfoques pueden ser considerados.

El programa de mejoramiento genético de trigo para temporal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP), ha recomendado desde 1974 variedades específicas para siembras en secano y han sido utilizadas como testigos para continuar el proceso de mejoramiento; tal es el caso de las variedades Zacatecas VT74, Gálvez M87, Temporalera M87, Verano S91 (Villaseñor y Rodríguez, 1996), y más recientemente las variedades Romoga F96 y Batán F96, las cuales han mostrado un comportamiento consistente en cuanto al rendimiento de grano, de acuerdo a las evaluaciones realizadas en diferentes ambientes, mismas que permitieron su identificación y selección (Villaseñor y Espitia, 2000).

El objetivo de esta investigación fue estudiar la estabilidad fenotípica del rendimiento de grano de siete variedades de trigo, liberadas entre 1974 y 1996, y recomendadas por el programa de trigo del Campo Experimental Valle de México del INIFAP para áreas de temporal. Para tal fin

fueron empleados los resultados de 50 experimentos de temporal, realizados entre 1988 y 1996, y diez metodologías para la cuantificación de la estabilidad fenotípica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó la información del rendimiento generada con siete variedades comerciales de trigo recomendadas para áreas de temporal o secano: Zacatecas VT74¹, Pavón F75, Gálvez M87, Temporalera M87, Verano S91, Batán F96 y Romoga F96. Los datos de rendimiento de grano, expresados en kg ha, corresponden a evaluaciones realizadas en 50 ambientes de temporal por el programa de trigo del INIFAP, entre 1988 y 1996 en 24 localidades de los estados de México, Tlaxcala, Puebla, Hidalgo, Guanajuato, Aguascalientes, Zacatecas, Jalisco, Michoacán y Oaxaca. Las parcelas experimentales tuvieron dimensiones entre 2.7 y 6.0 m². El diseño utilizado fue el de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Las fechas de siembra y el manejo agronómico fueron los recomendados por el INIFAP de acuerdo a la zona de producción.

Los datos fueron sometidos a las pruebas de normalidad de Shapiro y Wilk y la de homogeneidad de varianzas de Bartlett (Steel y Torrie, 1980). Posteriormente fueron aplicados diez métodos para determinar la estabilidad fenotípica (Cuadro 1).

En los análisis estadísticos se utilizó el paquete SAS, versión 6.11 para Windows. En el caso del análisis AMMI, se empleó el programa elaborado por Vargas y Crossa (2000) y en el de parámetros de estabilidad, el programa de Mastache y Martínez (1998).

Descripción de métodos

Estadísticas simples. La desviación estándar (S_i) y el coeficiente de variación (CV_i) de los genotipos, representan el nivel de adaptación de éstos a condiciones variantes. Aquí no es considerado el efecto ambiental pero valores pequeños de tales estadísticas, representan mayor estabilidad (Francis y Kannenberg, 1978).

Análisis de varianza y regresión conjunta. El análisis de varianza, considerando por ejemplo, un diseño de bloques completos al azar para evaluar genotipos en varios ambientes se basa en el modelo estadístico (Sahagún, 1998):

$$Y_{ijk} = \mu + A_j + R(A)_{k(j)} + G_i + (GA)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

¹La literal y números anexos al nombre de la variedad, indican el tipo de gluten y año de liberación, respectivamente.

Cuadro 1. Índices de estabilidad fenotípica considerados.

Índice de estabilidad y autores	Fórmulas	
Desviación Estándar	$S_i = \left[\sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y}_{.j})^2 / (a-1) \right]^{1/2}$	
Coefficiente de Variación (Francis y Kannenberg, 1978)	$CV_i = [S_i / \bar{y}_i] \times 100$	
Varianza de Estabilidad (Shukla, 1972)	$\sigma_i^2 = g(g-1) \sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..})^2 - \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..})^2 / (a-1)(g-1)(g-2)$ $s_i^2 = \frac{g}{(g-2)(a-2)} \left[S_i^2 - \sum_{i=1}^g \frac{S_i}{g(g-1)} \right]$ donde: $S_i = \sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..} - b_i Z_j)^2$; $b_i = \left[\sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y}_{.j}) Z_j \right] / \sum_{j=1}^a Z_j^2$; $Z_j = \bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..}$	
Parámetros de Estabilidad Eberhart y Russell, 1966	$\beta_i = \sum_{j=1}^a y_{ij} Z_j / \sum_{j=1}^a Z_j^2$	$S_{di}^2 = \left[\sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y}_{ij})^2 - \beta_i^2 \sum_{j=1}^a Z_j^2 \right] / (g-2)$
Parámetros de Tai (1971)	$\hat{\alpha}_i = \frac{\sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..}) Z_j}{[CM(A) - CM(R/A)] / gr}$	$\hat{\lambda}_i = \frac{\sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..}) \alpha_i \sum_{j=1}^a (y_{ij} - \bar{y}_{i.} - \bar{y}_{.j} + \bar{y}_{..}) Z_j}{(g-1)CME / gr}$
Medida de Superioridad de Lin y Binns (1988)	$P_i = \frac{\sum_{j=1}^a (y_{ij} - M_j)^2}{2a}$	donde: M_j es el rendimiento máximo obtenido en el ambiente j
Estadísticas no paramétricas de Hühn (Nassar y Hühn, 1987)	$S_i^{(1)} = 2 \sum_{j=1}^{a-1} \sum_{j'=j-1}^a r_{ij} - r_{ij'} / [a(a-1)]$	$S_i^{(2)} = \sum_{j=1}^{a-1} (r_{ij} - \bar{r}_{i.})^2 / (a-1) \quad \text{donde } \bar{r}_{i.} = \sum_{j=1}^a r_{ij} / a$
Análisis AMMI (Gauch y Zobel, 1988)	$Y_{ij} = \mu + G_i + a_j + \sum_{k=1}^k \lambda_k \alpha_{ik} \gamma_{jk} + \varepsilon_{ij}$ donde: μ = media general; G_i = efecto de genotipo; a_j = efecto de ambiente; λ_k = valor propio del componente principal k; α_{ij}, γ_{jk} = valores de componente principal k de genotipo y localidad; ε_{ij} = término de error	
Análisis de agrupamiento (Fox y Rosielle 1982)	$d_{ii'} = \sum_{j=1}^a \left(\frac{y_{ij} - \bar{y}_{i.}}{S_i} - \frac{y_{i'j} - \bar{y}_{i'.}}{S_{i'}} \right)^2$	$d_{ii'}$ = distancia estandarizada.

g = número de genotipos; a =número de ambientes; r = número de repeticiones; $y_{ij} = \sum_{k=1}^r y_{ijk} / r$ media de rendimiento por ambiente.

CM(A), CM(R/A) son cuadrados medios de ambientes y repeticiones dentro de ambientes, respectivamente.

donde: μ es la media general; G_i , A_j y $(GA)_{ij}$ son los efectos de genotipos, ambientes y de interacción genotipo x ambiente, respectivamente; $R(A)_{k(j)}$ es el efecto de repeticiones anidadas dentro de ambientes; y ε_{ijk} el error experimental asociado a la ijk -ésima observación.

Al considerar a genotipos como factor de efectos fijos y a ambientes y repeticiones como factores de efectos aleatorios, las pruebas de F coinciden con las presentadas por Sahagún (1998), considerando al modelo con restricciones sobre los parámetros de efectos fijos (genotipos).

Para realizar el análisis de regresión conjunta (Baker, 1969; Freeman, 1973), la suma de cuadrados de la interacción genotipo x ambiente es dividida en dos componentes o fuentes de variación: heterogeneidad de los coeficientes de regresión lineal, el cual es un término lineal usado para determinar si existen diferencias entre coeficientes de regresión de genotipos; y la desviación de regresión individual, un término no lineal. Las regresiones para cada genotipo se basan en la descomposición de los efectos de la interacción genotipo x ambiente:

$$(GA)_{ij} = b_i + a_i + d_{ij}$$

Donde: b_i es el coeficiente de regresión lineal del genotipo i ; a_i el efecto ambiental y d_{ij} las desviaciones de regresión correspondientes.

Una partición adicional de la heterogeneidad puede realizarse al asignar 1 grado de libertad que determina la convergencia de las rectas de regresión hacia un punto. El residuo es asignado a la falta de convergencia o desviaciones de convergencia. Los términos empleados en la obtención de los valores de F respectivos fueron presentados por Eagles *et al.* (1977).

Parámetros de estabilidad de Eberhart y Russell (1966). En este caso, se incluye al coeficiente de regresión β_i , calculado con base en el efecto ambiental (índice ambiental), considerado fijo, y a la varianza de las desviaciones de regresión por genotipo δ_{di}^2 . β_i representa la respuesta de un genotipo al mejorar la condición ambiental, en tanto que el segundo ofrece una medida de variabilidad, interpretada como falta de estabilidad. Un genotipo es considerado estable si su coeficiente de regresión es igual a 1 y las desviaciones de regresión son iguales a cero. Este análisis provee pruebas de hipótesis para determinar las dos condiciones de estabilidad, así como la presencia de diferencias de medias entre genotipos.

Parámetros $\hat{\alpha}_i$ y $\hat{\lambda}_i$ de Tai (1971). Estos índices son prácticamente equivalentes a los de Eberhart y Russell (1966), con la particularidad que los índices ambientales son considerados términos aleatorios (Lin *et al.*, 1986) y son estimados mediante máxima verosimilitud. En este caso $\hat{\alpha}_i$ representa la respuesta lineal de los genotipos a los efectos ambientales, en tanto que $\hat{\lambda}_i$ corresponde a las desviaciones de la respuesta lineal. Una variedad es considerada como perfectamente estable si: $\hat{\alpha}_i = -1$ y $\hat{\lambda}_i = 1$; en tanto que a un genotipo con estabilidad promedio le corresponden valores de 0 y 1, respectivamente. Tai (1971)

presenta la forma de construcción de intervalos de confianza para ambos índices y los representa gráficamente, lo que ayuda a la interpretación de los resultados.

Varianza de estabilidad de Shukla (1972). Se basa en la descomposición de la interacción genotipo x ambiente en g genotipos llamada varianza de estabilidad (σ_i^2). Es igual a la varianza ambiental *dentro* (σ_0^2) más la varianza ambiental *entre* para cada genotipo ($\sigma_i'^2$), corregida por efectos aditivos de ambientes. Si $\sigma_i'^2 = \sigma_0^2$, implica que $\sigma_i'^2 = 0$; se tendrá entonces un genotipo estable. Una extensión del modelo involucra una varianza que incluye las desviaciones de regresión y el error residual (s_i^2), considerando como covariable al efecto ambiental (Z_j). Si después de declarar un genotipo estable con respecto a σ_i^2 , y posteriormente s_i^2 resulta ser igual a cero, esto indica que la inestabilidad observada es debida al efecto lineal de la covariable Z_j . Esta metodología determina la estabilidad en el sentido estático (Lin *et al.*, 1986).

Índice de superioridad de Lin y Binns (1988). El origen de este índice es la necesidad de contar con una medida de estabilidad cuando se carece de una estructura experimental rígida en el sentido de mantener el mismo experimento o los mismos testigos en las evaluaciones realizadas. El índice de superioridad (P_i) se calcula a partir de la suma de cuadrados de las diferencias entre el genotipo de interés con respecto al genotipo de máximo rendimiento de cada ambiente de evaluación (M_j); por lo que representa al cuadrado medio del efecto conjunto de genotipos y la interacción genotipo ambiente y al ser calculado con referencia a la máxima respuesta, determina la adaptabilidad en un sentido general. Los autores propusieron una prueba empírica para la discriminación de P_i , donde se genera un valor crítico con el que se determina la igualdad con la máxima respuesta.

Así mismo propusieron un segundo índice asociado únicamente a la interacción genotipo x ambiente; si este cuadrado medio no es superior al del error, implica paralelismo entre la respuesta máxima y el genotipo en cuestión, lo que permite la selección de genotipos con base en P_i únicamente. En caso contrario, se deberá examinar la adaptabilidad de cada genotipo de acuerdo con las condiciones ambientales.

Índices no paramétricos $S_i^{(1)}$ y $S_i^{(2)}$ de Hühn (Nassar y Hühn, 1987). Se basan en la asignación de rangos por ambiente; posteriormente se calcula la suma de

diferencias absolutas de los rangos del genotipo i con respecto a otros genotipos a través de ambientes ($S_i^{(1)}$) y la varianza entre rangos de genotipo i sobre ambientes ($S_i^{(2)}$). Una variedad es estable si sus rangos son similares a través de ambientes y presenta mínima varianza; es decir si $S_i^{(1)}=0$ y $S_i^{(2)}=0$. Al no depender de distribuciones probabilísticas, estos índices son fáciles de utilizar e interpretar, además de permitir la pérdida de algunas observaciones. Es posible realizar pruebas estadísticas aproximadas para ambos índices, basadas en la distribución normal. Inicialmente se realiza una prueba global considerando los índices de los i genotipos mediante una χ^2 ; sólo en caso de ser significativa esta prueba, se procede al análisis individual de genotipos.

Análisis AMMI. El análisis AMMI (additive main effects and multiplicative interaction method), explica inicialmente los efectos principales de genotipos y ambientes mediante un análisis de varianza convencional y posteriormente describe la parte no aditiva correspondiente a la interacción genotipo x ambiente por medio de un análisis multivariado de componentes principales (Crossa, 1990). A partir del primer componente principal, en caso de representar un porcentaje aceptable de la interacción, es posible generar una gráfica junto con el rendimiento de grano (biplot) y representar las similitudes de genotipos o de ambientes.

Análisis de agrupamientos de Fox y Rosielle (1982). Se basa en la aplicación de la técnica de análisis multivariado de agrupamientos, considerando tanto efectos ambientales como los de interacción genotipo x ambiente mediante el cálculo de distancias euclidianas cuadradas a partir de datos estandarizados (media cero, varianza uno) dentro de cada ambiente. La construcción de agrupamientos emplea la técnica de mínima varianza de Ward. Esta

metodología fue propuesta inicialmente para definir similitudes entre ambientes y posteriormente aplicada al estudio de genotipos (Lin *et al.*, 1986).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Cuadro 2 contiene los resultados de los ocho métodos de medición de estabilidad fenotípica aplicados. Las medias de rendimiento (kg ha^{-1}) fueron mayores en las variedades más recientes, saliendo de esta tendencia Temporalera M87 por mostrar una respuesta adecuada en condiciones de temporal (Villaseñor y Rodríguez, 1996).

Estadísticas simples. La Figura 1a muestra la respuesta conjunta de la desviación estándar y el rendimiento promedio, mostrando una asociación lineal de importancia (Francis y Kannenberg, 1978), con un coeficiente de correlación de 0.89 ($P \leq 0.01$). Es decir, el incremento del rendimiento estuvo asociado a un aumento en su variabilidad, indicando una menor estabilidad fenotípica (Baker, 1969; Lin *et al.*, 1986). Sin embargo, al considerar al coeficiente de variación (CV) como una función de ambos términos, los incrementos de S (variación) con respecto a los incrementos de la media representaron porcentajes de menor magnitud (Cuadro 2), sin presentar asociación significativa con el rendimiento (-0.32). Bajo este enfoque son deseables los genotipos de mayor rendimiento con bajo CV, lo cual corresponde al cuadrante IV de la Figura 1b, en donde se localizan las variedades mejoradas de liberación más reciente: Batán F96, Romoga F96 y Verano S91, considerándolas estables. En el cuadrante I se ubica Temporalera M87 con alto rendimiento y alto CV, valores que la clasifican como una variedad menos consistente. Las variedades más antiguas: Zacatecas VT74, Gálvez M87 y Pavón F76 resultaron inestables al obtener bajo rendimiento y alto CV.

Cuadro 2. Índices de estabilidad de ocho metodologías de cuantificación de estabilidad fenotípica de rendimiento de grano de siete variedades de trigo de temporal evaluadas en 50 ambientes de temporal durante el periodo de 1988 a 1996.

Genotipo	Media (kg ha^{-1})	S_i	CV_i (%)	Eberhart y Russell		Shukla		Tai		Lin y Binns		Hühn			
				β_1	$S^2 d_i$ ($\times 10^3$)	σ_i^2 ($\times 10^4$)	S_i^2 ($\times 10^4$)	α_i	λ_i	P_i ($\times 10^4$)	$CM(GxA)$ ($\times 10^4$)	$S_i^{(1)}$	$Z_i^{(1)}$	$S_i^{(2)}$	$Z_i^{(2)}$
Zacatecas VT74	3457 d ¹	1778	51.4 ³	0.91*	129.0*	27.7**	24.7**	-0.0891	3.01	66.4*	24.1*	2.43	1.07	4.52	0.03
Pavón F76	3688 bc	1956	53.0 ³	1.02	69.2*	16.1**	16.3**	0.022	2.14	39.9*	16.1	2.25	0.03	3.87	0.01
Gálvez M87	3612 cd	1850	51.2 ³	0.96	93.7*	19.9**	19.8**	-0.039	2.50	47.6*	18.2	2.17	0.54	3.64	0.02
Temporalera M87	3982 a	2078	52.1 ⁴	1.07	194.0*	35.4**	33.8**	0.073	3.95	18.1	10.3	2.60	4.84*	5.19	0.20
Verano S91	3789 b	1926	50.8 ⁵	0.99	147.0*	26.5**	27.2**	-0.007	3.27	35.6*	18.2	2.22	0.14	3.77	0.01
Batán F96	4003 a	1986	49.6 ⁶	1.04	50.4*	14.1	13.8	0.042	1.88	12.2	5.1	2.13	1.10	3.50	0.03
Romota F96	3814 b	1912	50.1 ⁵	0.99	58.9*	14.4	14.9	-0.003	1.99	26.8*	10.9	2.22	0.19	3.72	0.01
	3764 ²					$\sigma_o^2 = 11.1$				23.4 ⁶	23.5 ⁷				

¹ Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey, 0.05); ² Media general; ³ No estable; ⁴ Inconsistente; ⁵ Estable;

⁶ Punto de corte de P_i : $PC(P_i) = CM(\text{desv. reg.}) F_{GL(\text{desv. reg.}), \alpha}^{\alpha}$; ⁷ Punto de corte de $CM(GxA)$: $PC[CM(GxA)] = CM(\text{desv. reg.}) F_{GL(\text{desv. reg.}), \alpha}^{\alpha-1}$

* significativo con $\alpha \leq 0.05$; ** significativo con $\alpha \leq 0.01$.

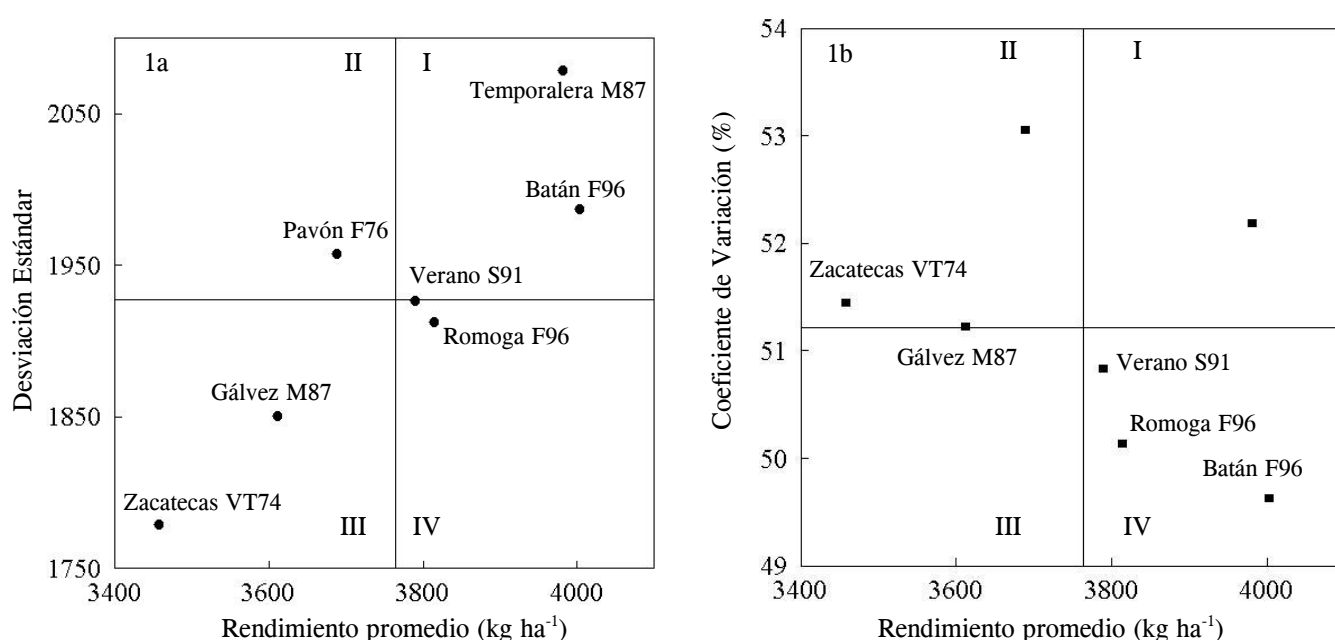


Figura 1. Representación gráfica de la desviación estándar (1a) y el coeficiente de variación (1b) con respecto al rendimiento promedio de grano de siete variedades de trigo evaluadas en 50 ambientes de temporal durante el periodo de 1988 a 1996).

Análisis de varianza y regresión conjunta. A partir de 200 observaciones por genotipo, mediante la prueba de Shapiro y Wilk (Steel y Torrie, 1980), se encontró que los rendimientos de los siete genotipos por separado, son una muestra aleatoria de una distribución normal; así mismo, con la prueba de Bartlett (Steel y Torrie, 1980), se determinó que sus varianzas fueron homogéneas.

El análisis de varianza conjunto (Cuadro 3) detectó diferencias significativas ($\alpha \leq 0.01$) tanto para ambientes como para genotipos; es decir, al menos un genotipo mostró respuesta diferente al de los demás; lo mismo puede afirmarse sobre los ambientes. La significancia de la interacción genotipo x ambiente, implica que existe una respuesta diferencial cambiante de los genotipos a través de ambientes. De aquí que se justifique el análisis de regresión conjunta, en donde se relacionan los efectos de genotipos en forma independiente dentro de cada ambiente, con los efectos ambientales.

Debido a la significancia de la heterogeneidad (Cuadro 3), al menos un genotipo tiene diferente grado de estabilidad al mostrar un coeficiente de regresión diferente; así mismo, las rectas de regresión convergen a un punto común; sin embargo, al observar el porcentaje que representa la suma de cuadrados de la heterogeneidad con respecto a la suma de cuadrados de la interacción genotipo ambiente, corresponde sólo a 4.3 %, indicando que la caracterización de genotipos mediante regresión no es muy efectiva, ya que la variación restante no es explicada por la regresión

(Baker, 1969; Shukla, 1972). Las pendientes de regresión obtenidas son discutidas en el apartado dedicado al método de parámetros de estabilidad, por ser equivalentes.

Cuadro 3. Análisis de varianza y regresión conjunta del rendimiento de grano de siete variedades de trigo de temporal evaluadas en 50 ambientes de temporal durante el periodo de 1988 a 1996.

Fuente de Variación	GL	SC (x10 ⁷)	% de SC	CM(x10 ⁵)	F ₀
Ambiente (Amb)	49	457.28	87.4 ¹	933.22**	204.90
Rep./Amb	150	6.83	1.3 ¹	4.55	
Genotipo (Gen)	6	4.60	0.9 ¹	76.79**	8.69
Gen x Amb	294	25.95	4.9 ¹	8.82**	2.81
Heterogeneidad	6	1.11	4.3 ²	18.60**	5.91
Convergencia	1	1.01	90.9 ³	101.53**	60.25
Desv. de Conv.	5	0.10	9.1 ³	2.02	0.64
Desv. de Regresión	288	24.83	95.7 ²	1.67**	0.53
Error	900	28.32	5.4 ¹	3.14	
Total	1399	522.99			

¹ Porcentaje respecto a la SC Total, ² Porcentaje respecto a la SC Genotipo x Ambiente ³ Porcentaje respecto a la SC Heterogeneidad. ** Significativo con $P \leq 0.01$

Parámetros de estabilidad (Eberhart y Russell, 1966). Sólo la variedad Zacatecas VT74 obtuvo un coeficiente de regresión inferior a la unidad (Cuadro 2), presentando adaptación relativa a ambientes desfavorables; las pendientes del resto de los genotipos tuvieron valor igual a uno, indicando que responden de manera adecuada a mejoras ambientales. Con respecto a las varianzas de las desviaciones de regresión $S^2 d_i$, en todos los casos fueron diferentes de cero, por lo que el modelo lineal no es apropiado para describir la respuesta de los genotipos en función del efecto ambiental; según este criterio, los genotipos

no son estables, debido a variaciones no predecibles. Las variedades Batán F96 y Romoga F96 tuvieron los valores más bajos de $S^2 d_i$.

Varianza de estabilidad de Shukla (1972). Las variedades Romoga F96 y Batán F96 fueron las únicas estables ante cambios ambientales, en el sentido estático (Lin y Binns, 1988), al no presentar significancia en σ_i^2 (Cuadro 2); es decir, la varianza *entre* ambientes de estos genotipos fue igual a cero. El análisis de regresión adicional (s_i^2) apoyó los resultados iniciales.

Índice de superioridad de Lin y Binns (1988). Las variedades Temporalera M87 y Batán F96 presentaron comportamiento paralelo a la máxima respuesta a través de ambientes, siendo los genotipos con mayor rendimiento, por lo que este índice asigna la estabilidad a altos rendimientos; además, presentaron los valores mínimos en CM (GxA) lo que indica adaptación general a los ambientes estudiados (Cuadro 2). El punto crítico de corte para el cuadrado medio de la interacción genotipo x ambiente fue superado sólo por el de Zacatecas VT74, lo que implica que tiene adaptación específica en ciertos ambientes; esto corresponde con la pendiente menor a uno en los parámetros de estabilidad, al adaptarse con mayor eficiencia a ambientes críticos.

Método de Tai (1971). Los valores de $\hat{\alpha}_i$ y $\hat{\lambda}_i$ de los genotipos estudiados aparecen en el Cuadro 2. La Figura 2 presenta los intervalos de confianza a 95 % para $\alpha = 0$ y para diferentes valores de λ . Ninguna de las variedades incluidas en el estudio se localizó dentro de los intervalos de confianza que corresponden a variedades con estabilidad promedio: $\alpha = 0$ y $\lambda = 1$. La variedad Temporalera M87 presentó un valor elevado de $\hat{\lambda}$ y $\hat{\alpha} > 0$, siendo la de menor estabilidad; Zacatecas VT74 presentó un $\hat{\alpha} > 0$. El resto de genotipos no mostraron diferencias estadísticas con respecto a su respuesta lineal al ubicarse dentro del intervalo de confianza a 95 % para $\alpha = 0$. Las variedades Batán F96, Romoga F96, Pavón F76 y Gálvez M87, por encontrarse dentro del intervalo para $\lambda = 2$, no alcanzaron la categoría de estabilidad promedio. La menor desviación a la respuesta lineal de Batán F96 sugiere que este genotipo es el más próximo a la estabilidad.

Índices no paramétricos $S_i^{(1)}$ y $S_i^{(2)}$ de Hühn (Nassar y Hühn, 1987). En virtud de que las estadísticas de las pruebas de hipótesis ($\sum_{i=1}^g Z_i^{(m)}$; $m = 1, 2$) no fueron signi-

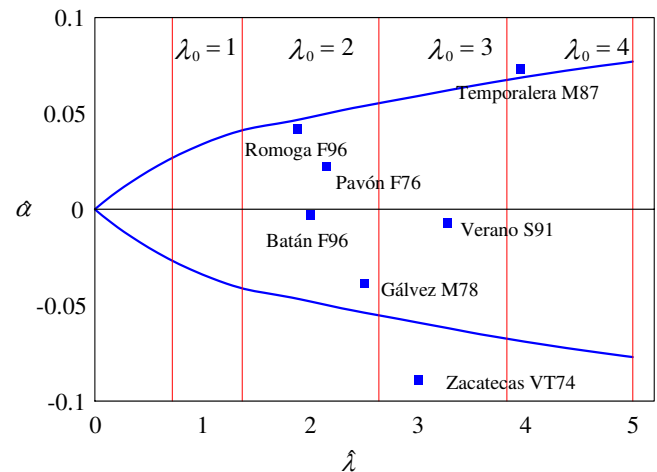


Figura 2. Índices de estabilidad de Tai (1971) de siete variedades de trigo de temporal evaluadas en 50 ambientes (1988-1996).

ficativas, todos los genotipos deben ser considerados como estables (Cuadro 2), por presentar un ordenamiento similar a través de ambientes, con variación mínima de estos rangos.

La significancia observada de $S_i^{(1)}$ en Temporalera M87, indica variaciones en su ordenamiento a través de los ambientes de prueba; sin embargo, debido a que la prueba global es más robusta, estas variaciones son atribuidas al azar (Nassar y Hühn, 1987), a pesar que este valor supera en forma numérica e importante al resto de las variedades. De acuerdo con los resultados de esta técnica, Batán F96 y Gálvez M87 fueron las variedades más estables.

Análisis AMMI. Los resultados mostraron que de acuerdo con la prueba de Gollob (Vargas y Crossa, 2000), cinco componentes principales representan variabilidad de importancia; el primer componente sólo considera 30.3 % de la variabilidad de la interacción genotipo x ambiente, o bien de la suma de cuadrados de esta fuente de variación, por lo que la discriminación de genotipos mediante esta técnica, en este estudio, puede ser limitada. La Figura 3a muestra la distribución de los genotipos en función de su rendimiento y del primer componente principal, asociado con el grado de interacción del genotipo con el ambiente; los valores cercanos a cero representan menor magnitud de ésta (Zobel *et al.*, 1988); así, Pavón F76 y Batán F96 por presentar menor magnitud de interacción son consideradas las más estables; con estabilidad intermedia aparecen Romoga F96 y Verano S91. Las variedades Gálvez M87, Zacatecas VT74 y Temporalera M87 fueron catalogadas como inestables.

Método de Agrupamiento (Fox y Rossielle, 1982). Este análisis aglutina genotipos de comportamiento similar a través de ambientes; los genotipos más parecidos por su

interacción genotipo x ambiente, fueron Pavón F76 y Romoga F96 (Figura 3b); un segundo grupo lo conforman Zacatecas VT74 y Gálvez M87. Al grupo inicial, pueden ser agregados Batán F96, Verano S91 y Temporalera M87 por su semejanza en estabilidad.

En términos generales, la variedad Batán F96, de reciente liberación, además de presentar el máximo rendimiento de grano, fue la variedad más estable, ya que tuvo los valores menores de los índices de variabilidad en la mayoría de las metodologías (CV_i , $S^2 d_i$, σ_i^2 , s_i^2 , λ_i , $CM(GxA)$ y $S_i^{(2)}$); es decir, su rendimiento en los diferentes ambientes fue el de menor variación; además de mostrar una tendencia lineal (β_1 , α_i , P_i y $S_i^{(1)}$) del comportamiento del rendimiento a través de ambientes.

Romoga F96, con menor rendimiento, tuvo comportamiento muy similar al de Batán F96. Así mismo, Pavón F76 tuvo tendencia similar, aunque con CV_i y α_i mayores y bajo rendimiento.

La variedad Gálvez M87, siguió en orden de valores próximos correspondientes a genotipos estables, aunque según su P_i mostró pobre respuesta, debido a que este índice está asociado al rendimiento. De acuerdo con los métodos empleados, Zacatecas VT74 fue la variedad de menor estabilidad, debido a las variaciones dentro de ambientes, en donde los índices correspondientes fueron altos; además, presentó adecuada adaptación en ambientes críticos. La variedad Verano S91, presentó comportamiento promedio en los diferentes métodos.

Temporalera M87 contrastó con el resto de los genotipos estudiados, ya que a pesar de no ser estable, por no presentar un comportamiento lineal a través de ambientes (alto β_1 y α_i) y tener alta variación dentro de éstos (CV_i , $S^2 d_i$, σ_i^2 , s_i^2 , λ_i , $CM(GxA)$ y $S_i^{(2)}$), su rendimiento de grano se ubicó en el primer grupo de significancia, junto con Batán F96 (Cuadro2) y en el caso del índice único de superioridad, mostró rendimientos paralelos a la máxima respuesta. Esto es congruente con los excelentes resultados que en condiciones de temporal ha tenido esta variedad.

Las ventajas observadas de las variedades más recientes pueden ser atribuidas, al menos parcialmente, a la mayor resistencia a enfermedades foliares (*Helminthosporium*, *Fusarium* y *Septoria*, principalmente) que ocurren en ambientes favorables, y a royas de la hoja (*Puccinia tritricina*) y lineal (*P. striiformis*) en ambientes intermedios. Las pérdidas de rendimiento causadas por royas en condiciones de temporal son del orden de 16, 8 y 19 % en Batán F96, Romoga F96 y Verano S91; en tanto que en variedades antiguas (Gálvez M87, Temporalera M87 y Pavón F76), son superiores a 25 % (Villaseñor *et al.*, 2000). Caso similar ocurre con enfermedades foliares; Pavón F76 y Gálvez M87 tuvieron disminuciones de 25 % y Romoga F96 y Batán F96 de 8 y 16 %, respectivamente; por su parte, Temporalera M87 aún mantiene su resistencia con disminución de 14 % (Villaseñor *et al.*, 2000).

La estabilidad observada en la variedad Batán F96, puede ser atribuida a los ambientes de selección empleados

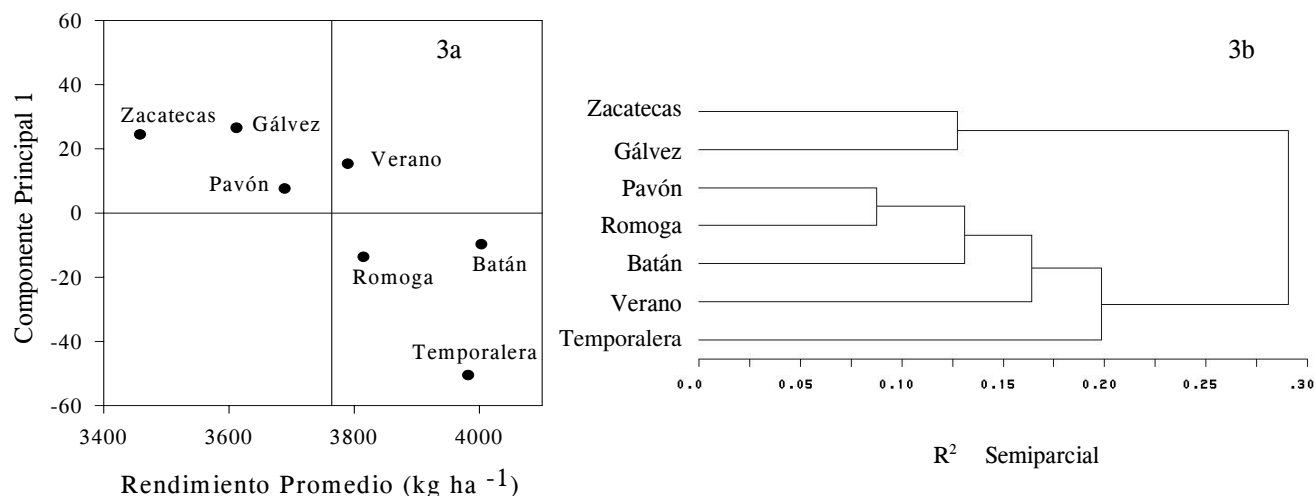


Figura 3. Representación gráfica de métodos multivariados AMMI (3a) y agrupamiento (3b) de siete variedades de trigo de temporal evaluadas en 50 ambientes (1988-1996).

durante el proceso de segregación, ya que entre las generaciones F₂ y F₆ esta variedad fue seleccionada en cuatro ambientes muy contrastantes (Cd. Obregón, Son., Yanhuatlán, Oax., Tecamac, Méx y Roque, Gto.), permitiendo la identificación de genes que confieren tanto resistencia a factores adversos como potencial de rendimiento, lo que constituye una estrategia eficiente en trigo para la obtención de variedades con amplia adaptación (Rajaram *et al.*, 1983). Por otra parte, el alto número de evaluaciones utilizadas para la selección de las variedades, por ejemplo entre 49 y 55 en el caso de Batan F96, Romoga F96, Verano S91, Gálvez M87 y Temporalera M87, permite una cuantificación exhaustiva de la resistencia a factores adversos y del potencial de rendimiento de los materiales, adquiridos durante el proceso de segregación. Sin embargo, la respuesta de la estabilidad de estos genotipos fue contrastante, a pesar de haberse considerado en el momento de su liberación como variedades estables, basándose en la determinación de coeficientes de regresión principalmente. Por tal motivo la cuantificación de la estabilidad fenotípica debe realizarse con varias metodologías, de tal forma que sea analizada desde diferentes enfoques permitiendo así una recomendación de materiales más robusta.

CONCLUSIONES

En el contexto de las condiciones en que se desarrolló el presente estudio, es posible concluir que las variedades de reciente liberación del programa de trigo de temporal, tienen mayor estabilidad del rendimiento, debida a una respuesta lineal y baja variabilidad a través de ambientes. Es probable que esa estabilidad esté asociada fuertemente a la resistencia a enfermedades; sin embargo, las características de Temporalera M87 sugieren que este factor no es el único.

La utilización de diversos métodos de evaluación de la estabilidad es necesaria debido a que proporcionan información complementaria, aunque existe similitud en los resultados obtenidos entre las metodologías de Eberhart y Russell (1966), de Shukla (1972) y la de Lin y Binns, (1988).

BIBLIOGRAFÍA

- Baker R J (1969) Genotype-environment interaction in yield wheat. *Can J. Plant Sci.* 49:743-751.
- Becker H C (1981) Correlations among some statistical measures of phenotypic stability. *Euphytica* 30:835-840
- Crossa J (1990) Statistical analysis of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44:55-85.
- Eagles H A, P N Hinz, K J Frey (1977) Selection of superior cultivars of oats by using regression coefficients. *Crop Sci.* 17: 101-105.
- Eberhart S A, W A Russell (1966) Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6:36-40.
- Finlay K W, A A Wilkinson (1963) The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. *Austr. J. Agric. Res.* 14:742-754.
- Fox P N, A A Rosielle (1982) Reducing the influence of environmental main-effects on pattern analysis of plant breeding environments. *Euphytica* 31:645-656.
- 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.
- Freeman G H (1973) Statistical methods for the analysis of genotype-environment interactions. *Heredity* 31(3):339-354.
- Gauch H G, R W Zobel (1988) Predictive and postdictive success of statistical analyses of yield trials. *Theor. Appl. Genet.* 76:1-10.
- 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.
- Lin C S, M R Binns, L P Lefkovitch (1986) Stability analysis: Where do we stand? *Crop Sci.* 26:894-900.
- Lin C S, MR Binns (1988) A method for analyzing cultivar x location x year experiments: A new stability parameter. *Theor. Appl. Genet.* 76:425-430.
- Mastache L A A, A Martínez G (1998) Un algoritmo computacional para obtener los indicadores de estabilidad de Eberhart y Russell. Serie Comunicaciones en Socioeconomía Estadística Cómputo. Vol 2 N° 1. Colegio de Postgraduados. México. 30 p.
- Moreno G R, H E Villaseñor M (1993) Trigo de temporal. In: Márquez S F (Ed.). Producción y Genotecnia de Plantas Autógamas. AGT Editor, S. A. México. pp: 195-211.
- Nassar R, M Hühn (1987) Studies on estimation of phenotypic stability: Test of significance for non parametric measures of phenotypic stability. *Biometrics* 43:45-53.
- Plainsted R L, L C Peterson (1959) A technique for evaluating the ability of selection to yield consistently in different locations or seasons. *Amer. Potato J.* 36:381-385.
- Rajaram S, Ch E Mann, G Ortiz-Ferrara, A Mujeeb-Kazi (1983) Adaptation stability and high yield potential of certain 1B/1R CIMMYT wheats. *Proc 6th Int. Wheat Genet. Symp. Kyoto, Japan.* pp: 613-621.
- Sahagún C J (1998) Evaluaciones genotípicas en series de experimentos. *Germen No. 14.* Sociedad Mexicana de Fitogenética. 40 p.
- Shukla G K (1972) Some statistical aspects of partitioning genotype-environmental components of variability. *Heredity* 29(2):237-245.
- Steel R G D, J H Torrie (1980) Bioestadística: Principios y Procedimientos. 2ª. Ed. McGraw Hill. Colombia.
- Tai G C C (1971) Genotypic stability analysis and its application on potato regional trials. *Crop Sci.* 11:184-190.
- Vargas H M, J Crossa (2000) El análisis AMMI y la gráfica del biplot en SAS. Unidad de biometría. CIMMYT. México. (www.cimmyt.cgiar.org/biometrics).
- Villaseñor M H E, J E Rodríguez P (1996) Respuesta de variedades de trigo (*Triticum aestivum* L.) como testigos en poblaciones segregantes. *Rev. Fitotec. Mex.* 19:163-176.
- Villaseñor M H E, E Espitia R (2000) Variedades de trigo recomendadas para siembras de temporal en México. In: El trigo de temporal en México. Ed. H E Villaseñor M y E Espitia R. INIFAP, CIR-Centro, CEVAMEX. pp: 151-176.
- Villaseñor M H E, E Espitia R, J Huerta E, R González I, E Solís M, L Osorio A, D Aguirre M (2000) Juchi F2000. Nueva variedad de trigo para siembras de temporal en México. Folleto Técnico N° 3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. México. 21 p.
- Zobel R W, M J Wright, G Gauch Jr (1988) Statistical analysis of a yield trial. *Agron J.* 80:388-393.