

ESTUDIO METODOLÓGICO DE ADAPTACIÓN DE CULTIVARES DE MAÍZ PARA SILO A LAS CONDICIONES DE URUGUAY

Medina M.¹, Abadie T.¹, Vilaró D.², Ceretta S.².

Recibido: 30/04/01 Aceptado: 03/08/01

RESUMEN

Debido al gran aumento del uso de maíz para silo se plantea la necesidad de estudiar la adaptación de este cultivo a las condiciones de Uruguay. Se contó con los datos de rendimiento en materia seca total de 133 cultivares evaluados en el período 1992/93 – 1998/99. La estimación de los componentes de varianza se realizó utilizando el método REML. Para el estudio del comportamiento de los cultivares en los ambientes de evaluación se utilizó un análisis de Regresión de Sitios. Para la caracterización de dichos ambientes se realizó un Análisis de Componentes Principales. Siendo que los componentes de varianza que afectan al genotipo son significativos, la elección de un cultivar no es una decisión menor. Dentro de los cultivares evaluados en el país existen tres grupos, uno de ellos que presenta adaptación general, otro que presenta adaptación específica, y finalmente otro pobremente adaptado. La adaptación específica se encuentra evidenciada sólo en los ambientes de alto rendimiento. Las variables ambientales vinculadas a la disponibilidad de agua explican el rendimiento en materia seca total y podrían explicar parte de la IGA. Esto sugiere que sería posible seleccionar cultivares con adaptación específica a situaciones de producción de alto potencial como sistemas bajo riego.

PALABRAS CLAVE: Adaptación, interacción genotipo por ambiente, maíz silo.

SUMMARY

METHODOLOGICAL STUDY OF ADAPTATION OF SILAGE CORN CULTIVARS TO THE URUGUAYAN CONDITIONS

In recent years maize for silage has become very important in the Uruguayan intensive production systems. It is necessary to study the adaptation of this crop to choose cultivars with accuracy. The data consisted in yield of total dry matter of 133 cultivars evaluated between 1992/93 – 1998/99. The variance components were estimated using REML. Sites Regression Analysis was performed to evaluate the behaviour of the cultivars in the evaluation environments. Principal Component Analysis was performed to characterise these environments. The variance components affecting the genotype are significant, so the cultivar selection is an important decision. There is a group of cultivars with broad adaptation to our conditions, there are other cultivars that show narrow adaptation, and finally there are an important number of cultivars poorly adapted. The narrow adaptation it expressed in high yielding environments. The total dry matter yield is explained by environmental variables associated with water availability, and could explain part of the GxE interaction. Selection of cultivars with specific adaptation for high potential production systems, like irrigated systems, could be an adequate option.

KEY WORDS: Adaptation, genotype by environment interaction, silage corn.

INTRODUCCIÓN

La utilización de maíz como reserva forrajera se ha incrementado en los últimos años en Uruguay, lo que ha llevado a una búsqueda de cultivares adaptados a este

propósito. Por esto, desde la zafra 1992/93 a 1998/99, ha existido un aumento del 70% en el número de cultivares evaluados con este propósito por el Programa Nacional de Evaluación de Cultivares – INIA. Frente a esta gran oferta actual y potencial de material genético, así como el uso comercial de esta opción tecnológica a nivel predial, es muy importante identificar los cultivares mejor adaptados a nuestras situaciones de producción con una precisión adecuada.

¹ Universidad de la República, Facultad de Agronomía.

² INIA La Estanzuela.

CENTRO: Universidad de la República, Facultad de Agronomía. Garzón 780, Mdeo. Uruguay.

Se entiende por cultivares adaptados aquellos que presentan mejor comportamiento relativo, generalmente asociado a posiciones en un ranking, en caracteres de importancia económica en una serie de condiciones ambientales diferentes (Abadie y Ceretta, 1997). Cuando un grupo de genotipos es evaluado en distintas condiciones ambientales, (años, localidades, y/o épocas de siembra), puede presentar dos tipos de adaptación, general o específica. Un cultivar tiene adaptación general cuando muestra tener mejor comportamiento relativo en la mayoría de los ambientes en los que es evaluado. Por el contrario, un cultivar presenta adaptación específica cuando muestra tener mejor comportamiento relativo en un determinado ambiente en donde fue evaluado (Ceretta *et al.*, 1998). El comportamiento relativo diferencial de un cultivar en distintos ambientes de evaluación está dado por la presencia de interacción genotipo ambiente (IGA), (Fox *et al.*, 1997), que es la respuesta diferencial de un genotipo en cada uno de los ambientes a los cuales es sometido (Vargas *et al.*, 1999). La caracterización de la IGA es necesaria para comprender la adaptación de los cultivos, debido a que desde el punto de vista biológico, el estudio de la adaptación trata de comprender el fenómeno por el cual la expresión de fenotipos superiores resulta de la continua IGA a través del tiempo (van Eeuwijk, 1996, Ceretta, *et al.*, 1998).

El análisis de redes de experimentos, con métodos estadísticos adecuados, permite una buena interpretación del comportamiento de los genotipos en diferentes condiciones ambientales (Ceretta *et al.*, 2000). En Uruguay este tipo de estudios han sido realizados únicamente en cebada por Ceretta *et al.* (2000) y en girasol por Vilaró *et al.* (2000). Este trabajo tiene como objetivo general estudiar la adaptación de los cultivares de maíz para silo en condiciones de cultivo en el Uruguay. Los objetivos específicos son: i) estudiar la adaptación de los cultivares de maíz para silo; ii) caracterizar en términos de variables ambientales relevantes los ambientes de evaluación utilizados en la red de evaluación de cultivares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se contó con la media de rendimiento en materia seca total (kg ha^{-1}) de 133 cultivares de maíz para silo evaluados en Uruguay y registros climáticos para la serie de años 1992 – 1998. Los datos fueron generados por el Programa Nacional de Evaluación de Cultivares – INIA, y por INIA - La Estanzuela - Proyecto URU/97/007 – (Variabilidad Climática y Agricultura). Los cultivares se encuentran clasificados por ciclo en corto, medio y largo, de acuerdo a la duración del período siembra a floración (PSF) en relación a testigos (INIA - INASE, 1999). Anualmente los ensayos

consistieron en una única localidad, La Estanzuela, ubicada al sudoeste del país. Por cada año se realizó una única época de siembra, es decir, se contó con un único ambiente por año. Los datos disponibles fueron: fecha de siembra, fecha de floración, y fecha de cosecha. Las prácticas generales del cultivo se encuentran definidas en un protocolo experimental (INIA - INASE, 1999). Para los ensayos de las zafras 1992/93 y 1993/94, la cosecha se realizó a madurez fisiológica mediante la evaluación visual de la aparición de punto negro en la zona de inserción del grano en la mazorca. Desde la zafra 1994/95 en adelante la cosecha se realizó a $\frac{3}{4}$ línea de leche en el grano, momento en que se cuenta con el mejor balance calidad / cantidad de materia seca (Wiersma *et al.*, 1993; Pigurina y Pérez Gomar, 1994). El diseño experimental utilizado fue de bloques completos al azar con una restricción en la aleatorización de acuerdo a la clasificación por ciclo, y tres repeticiones.

Con los datos climáticos se crearon variables ambientales que conjugan la variable climática en sí con diferentes períodos de crecimiento del cultivo. El ciclo de crecimiento del cultivo se dividió en diez períodos: Período 1: siembra a diez días prefloración (S-PF), Período 2: diez días prefloración a floración (PF-F), Período 3: floración a 10 días postfloración (F-POF), Período 4: diez días postfloración a cosecha (POF-C), Período 5: siembra a floración (S-F), Período 6: siembra a diez días postfloración (S-POF), Período 7: siembra a cosecha (S-C), Período 8: diez días prefloración a diez días postfloración (PF-POF), Período 9: diez días prefloración a cosecha (PF-C) y Período 10: floración a cosecha (F-C). Para el promedio de los cultivares pertenecientes a cada ciclo, en cada año de evaluación, y para los diez períodos mencionados, se calculó la temperatura media diaria en $^{\circ}\text{C}$ (T_{med}), temperatura media máxima en $^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{máx}}$), temperatura media mínima en $^{\circ}\text{C}$ ($T_{\text{mín}}$), radiación solar acumulada en MJ/m^2 (Rad), precipitación acumulada en mm (PP), déficit hídrico potencial acumulado en mm (DHP), y déficit hídrico real acumulado en mm (DHR).

Sobre la base de los datos disponibles, rendimiento en materia seca total (kg ha^{-1}), y datos meteorológicos se construyeron 4 series de datos. Con la serie de datos A se procedió a realizar: i) estimación de los componentes de varianza; ii) estudio de la adaptación de los cultivares. Con las series de datos B, C, y D, se caracterizaron los ambientes de evaluación con respecto a las variables ambientales relevantes para los cultivares de distintos ciclos.

Serie de datos A

Esta serie consistió en una matriz de 133 cultivares por 7 ambientes, definidos por cada una de las zafras de evaluación (1992/93 a 1998/99), en donde las celdas corres-

Cuadro 1. Número de cultivares según años dentro del Programa nacional de Evaluación de Cultivares de INIA para la serie de ensayos correspondientes a las zafas 1992/1993 a 1998/1999.

Nº de años de evaluación	Nº de cultivares	Porcentaje
1	75	56.4
2	24	18.0
3	16	12.0
4	5	3.8
5	5	3.8
6	5	3.8
7	3	2.3
TOTAL	133	100

ponden a la media de rendimiento ajustado de materia seca total de cada cultivar en cada ensayo anual. Esta matriz es incompleta, es decir no todos los cultivares se encuentran presentes en todos los ambientes de evaluación, estando la mayor parte de los cultivares presentes sólo en uno de ellos (Cuadro 1).

Serie de datos B, C y D

Para la construcción de estas series de datos se seleccionaron algunas de las variables ambientales combinadas para los cultivares de ciclo corto, medio y largo. La elección de dichas variables se realizó en base a dos criterios: i) la existencia de correlaciones significativas ($P \leq 0.1$), entre la variable rendimiento promedio de materia seca total y las variables ambientales calculadas para cada periodo¹; ii) la no-existencia de solapamiento en los periodos de crecimiento del cultivo abarcados por cada una de las variables.

Esto resultó en tres series de datos: B, correspondiente al promedio de los cultivares de ciclo corto; C, correspondiente al promedio de los cultivares de ciclo medio; D, correspondiente al promedio de los cultivares de ciclo largo. Estas series consisten en matrices de 4 variables (rendimiento promedio en materia seca total de los cultivares de cada ciclo, precipitación acumulada, déficit hídrico real acumulado, y radiación solar acumulada) por 7 ambientes (1992/93 – 1998/99). Estas series de datos se utilizaron para caracterizar los ambientes de evaluación.

Estimación de los componentes de varianza

La estimación de los componentes de varianza se realizó con la serie de datos A, donde se utilizó el método REML²

¹ Se utilizó el programa Statistica for Windows, 1998.
² Se utilizó el Programa Genstat 5, Reliase 4.3.

tomando como efectos fijos el efecto Cultivar dentro de Ciclo y Ciclo, y como aleatorios el efecto del Ambiente y de la interacción Ciclo por Ambiente. Se ajustó el modelo:

$$Y_{ijk} = m + gc_{i(k)} + e_j + c_k + ce_{jk} + r_{ijk}$$

Y_{ijk} = rendimiento en materia seca (kg ha⁻¹), con $i = 1, 2, \dots, 133; k = 1, 2, 3; j = 1, \dots, 7$.

m = media general.

$gc_{i(k)}$ = efecto principal del Cultivar dentro de Ciclo.

c_k = efecto principal de Ciclo.

e_j = efecto principal de Ambiente.

ce_{jk} = efecto de la interacción Ciclo por Ambiente.

r_{ijk} = residual.

Se trabajó con la media de cada cultivar a través de repeticiones por lo que:

$$r_{ijk} = gce_{i(kj)} + e_{ijk}$$

Las variables e_{ijk} se asumen independientes y distribuidas normalmente con media cero y varianza s^2/n , donde n es el número de repeticiones. La estimación de s^2 se realizó mediante el cálculo de la mediana de los cuadrados medios del error reportados en cada uno de los experimentos. Posteriormente se estimó el efecto de la interacción Cultivar dentro de Ciclo por Ambiente ($gce_{i(kj)}$):

$$gce_{i(kj)} = r_{ijk} - e_{ijk}$$

Una vez estimados los componentes de varianza se procedió a estimar los datos faltantes en la serie de datos A, mediante los mejores estimadores lineales insesgados, BLUEs (Lynch y Walsh, 1998).

Estudio de la adaptación de los cultivares

Para el estudio de la adaptación de los cultivares, tomando en cuenta solo los cultivares presentes mas de un año, se realizó un Análisis de Regresión de Sitios (SREG) de la base de datos A, ajustando el modelo (Crossa y Cornelius, 1997):

$$Y_{ijk} = e_j + \sum_{n=1}^N \lambda_n \xi_{in} \eta_{jn} + r_{ijk}$$

Y_{ijk} : rendimiento del i -ésimo cultivar, en el j -ésimo ambiente, del k -ésimo ciclo.

e_j : media de rendimiento del j -ésimo ambiente.

l_n : valor singular del n -ésimo eje principal.

x_{in} : valor de i -ésimo cultivar en el n -ésimo eje.

h_{jn} : valor del j -ésimo ambiente en el n -ésimo eje.

r_{ijk} : residual.

De esta manera la variación explicada por el efecto principal de Cultivar dentro de Ciclo es absorbida por el término multiplicativo. La matriz de efectos multiplicativos son sometidos a una descomposición del valor singular (SVD), por lo que, si los resultados se representan gráficamente mediante un *biplot*, este contiene únicamente el efecto principal de Cultivar dentro de Ciclo y el de la interacción Cultivar dentro de Ciclo por Ambiente (Yan *et al.*, 2000).

CARACTERIZACIÓN DE LOS AMBIENTES DE EVALUACIÓN

Con cada una de las series de datos B, C, y D se realizó un análisis de componentes principales (PCA) para caracterizar, en términos de variables ambientales relevantes, los diferentes ambientes. Para ello, sobre datos previamente estandarizados, se ajustó el siguiente modelo PCA:

$$Y_{ve} = \mu_v + \sum_{n=1}^N \lambda_n \xi_{vn} \eta_{en} + r_{ve}$$

Y_{ve} : valor de la variable v en el e -ésimo ambiente.

m_v : media para cada una de las variables v .

l_n : raíz cuadrada de la varianza explicada por el n -ésimo eje PCA (valor propio).

x_{vn} : valor de v -ésima variable en el n -ésimo eje.

h_{en} : valor del j -ésimo ambiente en el n -ésimo eje.

r_{ve} : residual.

Con los escores de cada variable y de los ambientes se realizó un *biplot* para la caracterización de los ambientes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estimación de los componentes de varianza

Los efectos tomados como fijos, efecto principal del Ciclo y el efecto principal de Cultivar dentro de Ciclo son significativos por el test de Wald (Cuadro 2). Esto indica que los cultivares y los distintos ciclos poseen distintos potenciales de rendimiento, lo cual ha sido usualmente detectado por los ensayos individuales de evaluación de cultivares (Ceretta, 1996, 1997, 1998; INIA, 1993, 1995; Vilaró, 1994; Vilaró *et al.*, 1999). La estimación de los componentes de varianza muestra que los efectos más relevantes son: el efecto del Ambiente y el efecto de la interacción Cultivar dentro de Ciclo por Ambiente (Cuadro 3). El efecto de Ambiente es un componente de varianza de gran magnitud y evidencia que para las condiciones de cultivo en Uruguay, este efecto es un determinante importante del

Cuadro 2. Prueba de Wald para los efectos definidos como fijos en la estimación de los componentes de varianza utilizando el método REML para 133 cultivares, 3 ciclos y 7 ambientes (1992/93 – 1998/99), para la variable rendimiento en materia seca total (ton.ha⁻¹).

Efecto Fijo	Estadístico Wald	Grados de Libertad
Ciclo	7.9*	2
Cultivar dentro de Ciclo	202.4**	130

* Significativo $\chi^2 P \leq 0.025$, ** Significativo $\chi^2 P \leq 0.001$

rendimiento en materia seca total de los cultivares de maíz para silo. La estimación de la varianza correspondiente a Ambiente tiene baja precisión de la estimación, lo que se ve reflejado en su elevado error estándar (Cuadro 3). El efecto de la interacción entre Cultivar dentro de Ciclo por Ambiente, se presenta como un componente de varianza relevante. Resultados similares fueron reportados por Vilaró, *et al.* (2000) en girasol, y por van Eeuwijk *et al.* (1995), en maíz, donde el año, la interacción año por localidad y la interacción cultivar por ambiente aparecen como los componentes de varianza de mayor magnitud. Es de importancia conocer la magnitud de los componentes de varianza que afectan el genotipo (Cultivar dentro de Ciclo e interacción Cultivar dentro de Ciclo por Ambiente). El hecho de que estos sean significativos indica que el comportamiento de los cultivares varía en cada condición de cultivo, pudiendo alterar de forma significativa el resultado final (en este caso producción de materia seca total). Nuestros resultados muestran que estos componentes son significativos lo que implica que en maíz para silo la selección adecuada de un cultivar no es una decisión de importancia menor.

Cuadro 3. Estimación de los componentes de varianza de los efectos definidos como aleatorios utilizando el método REML para 133 cultivares, 3 ciclos y 7 ambientes (1992/93– 1998/99), para la variable rendimiento en materia seca total (ton.ha⁻¹).

Fuente de Variación	Componente de Varianza	Error Estándar
Ambiente	15.15	9.167
Ciclo x Ambiente	1.16	0.851
Cultivar dentro de Ciclo x Ambiente	3.99	
Residual	3.13	

Estudio del comportamiento de los cultivares

El resultado del análisis de SREG sobre el rendimiento en materia seca total se presenta gráficamente como un "biplot" en la Figura 1. Un *biplot* muestra la representación gráfica de la correlación genotípica entre diferentes ambientes. La posición de los ambientes (representados por cuadrados) y cultivares (representados por círculos), en el *biplot* está determinada por vectores. En este caso sólo se grafican los vectores ambientales. El coseno del ángulo entre dos vectores representa el coeficiente de correlación entre los mismos. Vectores que apuntan en la misma dirección se encuentran correlacionados positivamente. Vectores que presentan un ángulo recto indican correlación cero; si apuntan en dirección opuesta tienen correlación negativa (Sharma *et al.*, 1996). El punto en donde se cruzan los vectores ambientales (origen) representa el rendimiento promedio para cada ambiente. El comportamiento de un cultivar en un ambiente está determinado por la magnitud de la proyección ortogonal de ese cultivar en el ambiente en consideración. De esta manera dos ambientes que se presentan negativa o pobremente asociados tendrán un ranking de cultivares diferente, (independientemente del rendimiento), producto de la IGA.

En el *biplot* de la Figura 1 se representan los dos primeros ejes principales, los que explicaron el 76 % de la variación total. Se observa que existe un grupo de cultivares que presentan asociación positiva con todos los ambientes de evaluación, es decir presentan adaptación general. Estos son los cultivares que se posicionan dentro del ángulo formado por los vectores de los ambientes 1997/98 y 1998/99. Es de importancia notar que dentro de este grupo se encuentran cultivares pertenecientes a los tres ciclos, corto, medio, y largo. Se observan cultivares que presentaron adaptación específica al ambiente 1997/98 o al ambiente 1998/99. (Por ejemplo cultivares que proyectados sobre el vector del ambiente 1997/98 se ubican por encima del promedio de rendimiento, mientras que proyectados sobre el vector del ambiente 1998/99 se ubican por debajo del promedio de rendimiento). Los cultivares que presentaron adaptación específica al ambiente 1997/98 fueron de ciclo medio mientras que para el año 1998/99 fueron de ciclo largo. Esto sugiere que el comportamiento diferencial de algunos cultivares de ciclo medio y de ciclo largo en esos dos años sería la causa de la interacción Cultivar dentro de Ciclo por Ambiente. Finalmente hay un grupo importante de cultivares que presentaron pobre adaptación a todos los ambientes de evaluación (situados sobre la izquierda del eje de las abscisas).

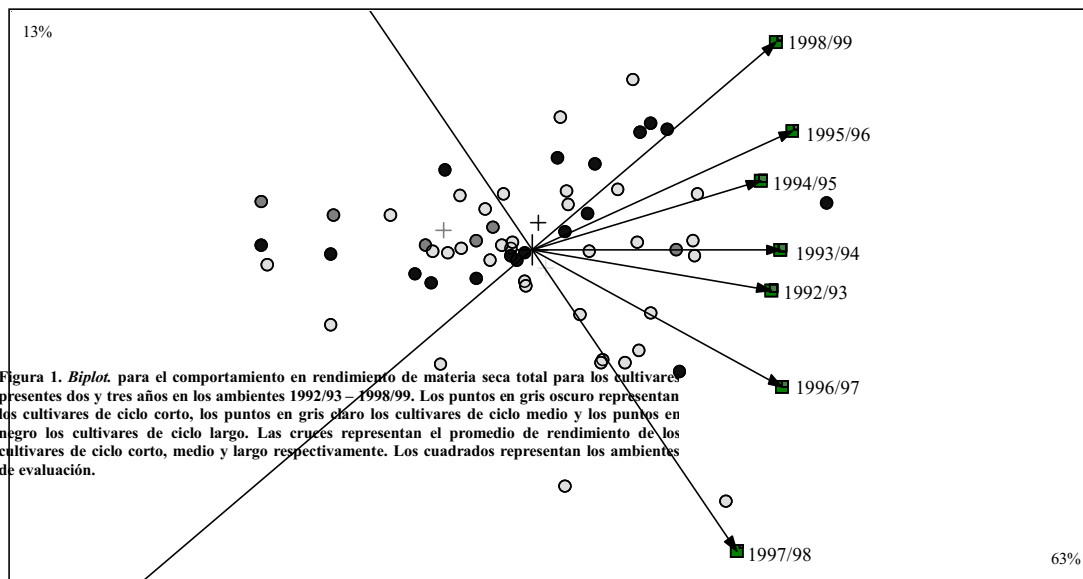


Figura 1. *Biplot*. para el comportamiento en rendimiento de materia seca total para los cultivares presentes dos y tres años en los ambientes 1992/93 – 1998/99. Los puntos en gris oscuro representan los cultivares de ciclo corto, los puntos en gris claro los cultivares de ciclo medio y los puntos en negro los cultivares de ciclo largo. Las cruces representan el promedio de rendimiento de los cultivares de ciclo corto, medio y largo respectivamente. Los cuadrados representan los ambientes de evaluación.

En la Figura 1 también se representa mediante cruces el comportamiento del promedio de los cultivares de cada ciclo. Se observa que los de ciclo corto aparecen como menos adaptados que los cultivares de ciclo medio y largo. El número de cultivares de ciclo corto evaluados (7), es pequeño, en comparación al número de cultivares evaluados de ciclo medio y largo (33 y 18 respectivamente) y por lo tanto, la caracterización de dicho ciclo puede ser incompleta.

No es posible formar grupos de ambientes marcadamente diferentes con respecto al comportamiento relativo de los cultivares en ellos, no obstante los ambientes 1997/98 y 1998/99 se presentan como los más contrastantes y por lo tanto los mayormente responsables de la IGA.

Caracterización de los ambientes de evaluación

En base a las correlaciones entre rendimiento y variables ambientales (datos no mostrados) se seleccionaron como importantes para la caracterización de los ambientes las siguientes combinaciones de variables climáticas y períodos del ciclo del cultivo: i) precipitación (para ciclo corto, medio y largo se tomó el período 10 días prefloración a cosecha); ii) déficit hídrico real (para ciclo corto se tomó el período 10 días prefloración a cosecha y para ciclo medio y largo se tomó el período floración cosecha); iii) radiación solar (para ciclo corto y medio se tomó el período floración a 10 días postfloración y para ciclo largo se tomó el período 10 días prefloración a floración). Este análisis evidenció que los distintos ciclos son sensibles a las mismas variables ambientales en distintos períodos del ciclo del cultivo.

Utilizando las variables arriba definidas, se realizó un análisis de componentes principales para cada ciclo para caracterizar los ambientes de evaluación. Para los tres ciclos se representa los dos primeros componentes principales que explicaron entre 85 % y 95 % de la variación total. Los resultados para cada ciclo se presentan en las figuras 2 a 4. Los *biplots* de las Figuras 2, 3 y 4 representan la relación entre las variables analizadas y los diferentes ambientes. Para la interpretación de estas figuras son válidas las consideraciones realizadas para la Figura 1.

Se observa que la producción de materia seca total se encontró altamente relacionada con la disponibilidad de agua en períodos previos a floración hasta la cosecha. La disponibilidad de agua medida a través de la precipitación o a través del déficit hídrico determinó en gran medida la expresión del rendimiento de materia seca. La radiación solar estuvo siempre negativamente asociada con rendimiento. Esto puede deberse a la existencia de una correlación positiva entre la radiación solar y el déficit hídrico (figuras 3 y 4) y/o al efecto directo de la radiación solar sobre la fotosíntesis. El déficit hídrico puede causar una disminución de la fotosíntesis, (por lo tanto en producción de materia seca), y/o una reducción de la funcionalidad de las barbas y/o aborto de los granos recién polinizados, disminuyendo el aporte de la mazorca al rendimiento total en materia seca (Fassio *et al.*, 1998). En condiciones de alta radiación solar combinada con altas temperaturas, la fotosíntesis del estrato superior de las hojas cesa por el fenómeno de fotoinhibición (Fassio *et al.*, 1998).

En la Figura 2 para los cultivares de ciclo corto, se evidencian dos grupos de ambientes: un grupo de alto nivel

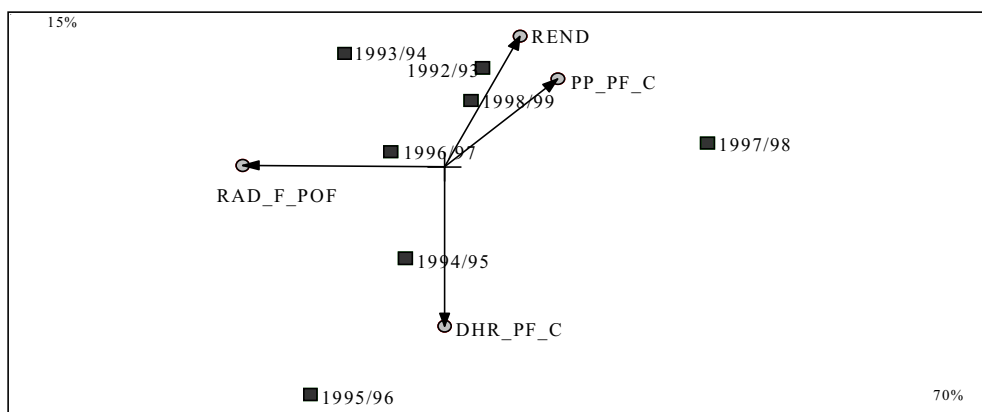


Figura 2. *Biplot* para el comportamiento en rendimiento de materia seca total para la media de rendimiento de los cultivares de ciclo corto en los ambientes 1992/93 – 1998/99 y las variables ambientales seleccionadas. REND: rendimiento en materia seca total, PP_PF_C: precipitación en el período 10 días prefloración a cosecha, DHR_PF_C: déficit hídrico real en el período 10 días prefloración a cosecha, RAD_F_POF: radiación solar en el período floración a 10 días postfloración.

de rendimiento representado por los ambientes 1992/93, 1993/94, 1997/98, y 1998/99, y un segundo grupo de bajo nivel de rendimiento representado por los ambientes 1994/95, y 1995/96. El rendimiento estuvo determinado por la disponibilidad de agua como lo muestra la correlación positiva del vector rendimiento con PP_PF_C y negativa con DHR_PF_C. Si bien es posible explicar la expresión del rendimiento en base a la disponibilidad de agua, el grupo de cultivares de ciclo corto no aportaría información para explicar la IGA, pues su comportamiento se basa fundamentalmente en el efecto principal del genotipo (Cultivar dentro de Ciclo), es decir el comportamiento relativo de los cultivares de ciclo corto fue consistente para todos los ambientes (Figura 1).

El agrupamiento de ambientes, para los ciclos medio y largo (Figura 3 y Figura 4), muestra un grupo de mayor rendimiento que estuvo conformado por los ambientes 1992/93, 1997/98, y 1998/99; y un grupo de menor rendimiento conformado por los ambientes 1994/95 y 1995/96. Para el caso de los cultivares de ciclo medio (Figura 3) el rendimiento estuvo correlacionado negativamente con el

DHR_F_C. Comparando los años 1997/98 y 1998/99 si bien en año 1997/98 fue un año con PP_PF_C algo menores al año 1998/99, el DHR_F_C para los cultivares de ciclo medio fue menor determinando mayores rendimientos. Este menor déficit hídrico para el año 1997/98 podría explicarse por un menor nivel de radiación solar en el 1997/98 así como también por otras causas que afectaron la eficiencia en el almacenamiento y uso del agua. En contraste con lo anterior, para los ciclos largos (Figura 4), los años 1997/98 y 1998/99 fueron años muy similares en cuanto DHR_F_C y R_PF_F con rendimientos mayores en el año 1998/99, fundamentalmente debido a mayor nivel de precipitación. En estos dos años los rendimientos diferenciales de ciclo medio y largo fueron explicados por variables vinculadas al agua. En 1997/98 fue el menor déficit hídrico lo que favoreció a los cultivares de ciclo medio y para el 1998/99 fue la mayor precipitación lo que favoreció a los ciclos largos. Es decir, para distintos años las variables ambientales que explicarían la IGA no serían las mismas. Resultados similares fueron reportados por Yan y Hunt (2000), para el cultivo de trigo.

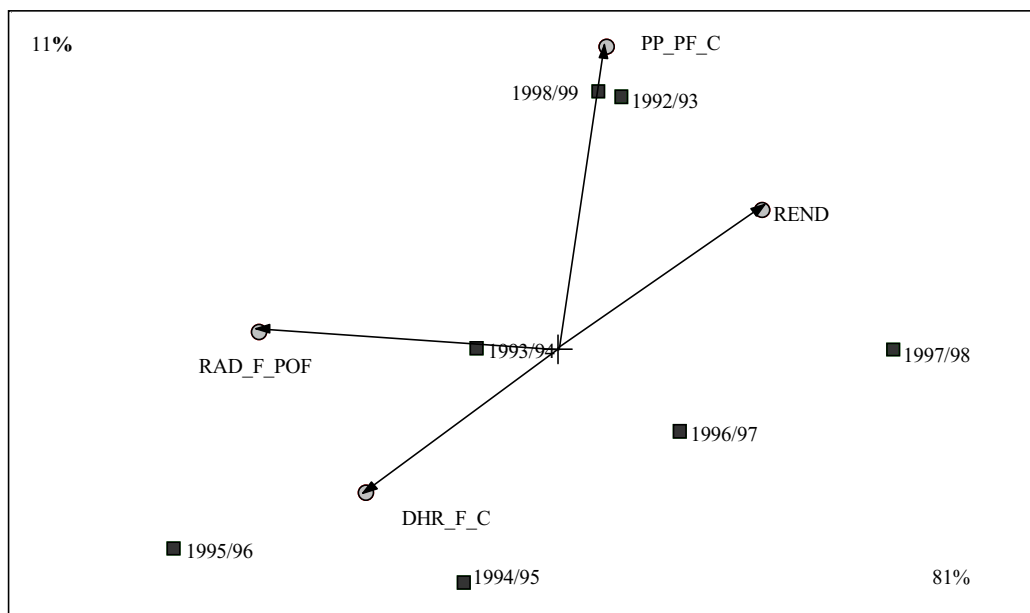


Figura 3. Biplot para el comportamiento en rendimiento de materia seca total para la media de rendimiento de los cultivares de ciclo medio en los ambientes 1992/93 – 1998/99 y variables ambientales seleccionadas. REND: rendimiento en materia seca total, PP_PF_C: precipitación en el período 10 días prefloración a cosecha, DHR_F_C: déficit hídrico real en el período floración a cosecha, RAD_F_POF: radiación solar en el período floración a 10 días postfloración

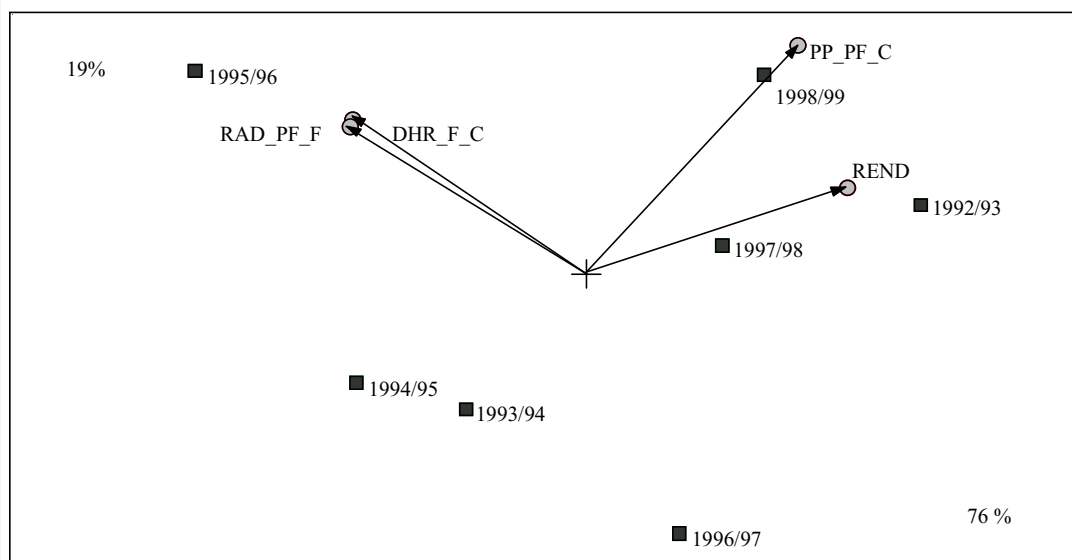


Figura 4. *Biplot* para el comportamiento en rendimiento de materia seca total para la media de rendimiento de los cultivares de ciclo largo en los ambientes 1992/93 – 1998/99 y variables ambientales seleccionadas. REND: rendimiento en materia seca total, PP_PF_C: precipitación en el período 10 días prefloración a cosecha, DHR_F_C: déficit hídrico real en el período floración a cosecha, RAD_PF_F: radiación solar en el período 10 días prefloración a floración.

CONCLUSIONES

El rendimiento en materia seca de los cultivares de maíz para silo se encuentra determinado principalmente por el efecto del Ambiente, el efecto del Cultivar dentro de Ciclo y la interacción Cultivar dentro de Ciclo por Ambiente. Esto muestra que el conocimiento de cómo estos factores actúan sobre el rendimiento permitirá una mejor comprensión del fenómeno de adaptación del cultivo. Por otro lado será de importancia para productores, técnicos y mejoradores tener en cuenta cómo actúan estos factores en el momento de realizar una adecuada selección de cultivares de maíz para silo ya que el rendimiento en materia seca total depende de ellos.

Es posible identificar cultivares de maíz para silo con adaptación general y/o específica así como cultivares poco adaptados en todos los ciclos. En promedio los cultivares de ciclo corto presentaron menor rendimiento que los de ciclo medio y largo en todos los ambientes. A su vez los ambientes de alto rendimiento (1997/98 y 1998/99) fueron los que permitieron evidenciar la presencia de interacción genotipo por ambiente (adaptación específica).

Las variables analizadas vinculadas a disponibilidad de agua (precipitación o déficit hídrico) explican en gran me-

da el rendimiento en materia seca total. El análisis indica a su vez que estas variables explicarían parte de la interacción genotipo por ambiente. Esto sugiere que sería posible seleccionar cultivares con adaptación específica a situaciones de producción bajo riego. Mientras tanto la selección por amplia adaptación a través de un muestreo de un amplio rango de ambientes aparece como una estrategia válida para la selección de cultivares de maíz para silo adaptado a las situaciones de producción promedio de Uruguay.

Contar con una variable que permita cuantificar la disponibilidad de agua con respecto a demanda real del cultivo, tal vez permita mejorar la explicación de una de las causas de la interacción. Así mismo un seguimiento más preciso del desarrollo de los cultivares permitiría precisar los estados fenológicos de mayor sensibilidad a las variables ambientales.

BIBLIOGRAFÍA

- ABADIE, T., and CERETTA, S. 1997. Exploring crop adaptation through the study of multi-environment trials (METS). In: Third South American Oats Congress. Rebuffo, M., and T. Abadie eds. INIA, The Quaker Oats Company. INIA La Estanzuela, Noviembre 1997. pp 35-40.

- CERETTA, S. 1996. Evaluación de Cultivares de Maíz para Silo. In: Jornada de Cultivos de Verano. Serie Actividades de Difusión N° 104. INIA La Estanzuela. INIA, Uruguay. pp 21-25.
- _____. 1997. Evaluación de Cultivares de Maíz para Silo. In: Jornada de Cultivos de Verano. Serie Actividades de Difusión N° 138. INIA La Estanzuela. INIA, Uruguay. pp 55-61.
- _____. 1998. Evaluación de Cultivares de Maíz para Silo. In: Jornada de Cultivos de Verano. Serie Actividades de Difusión N° 169. INIA La Estanzuela. INIA, Uruguay. pp 38-44
- _____, ABADIE, T., OZERAMI, H., and ARBELBIDE, M. 1998. El uso de redes de experimentos para estudiar la adaptación de los cultivos. In Actas da la VII reunión de coordinación de la investigación algodonera en el cono sur. De. Belot, Jean Louis ed. Universidad de la República, Facultad de Agronomía, CIRAD. Paysandú, Setiembre 1998. pp 9-13.
- _____, VAN EEUWIJK, F.A., CASTRO, M., VILARÓ, D. and ABADIE, T. 2000. Variabilidad en el rendimiento de cultivares de cebada cervecera en Uruguay. Serie Técnica 117. INIA, Uruguay. 20 p.
- CROSSA, J., and P.L. CORNELIUS. 1997. Sites Regression and Shifted Multiplicative Model Clustering for Cultivar Trials Sites under Heterogeneity of Error Variances. *Crop Sci.* 37:406-415.
- FASSIO, A., CARRIQUIRY, A.I., TOJO, C. and ROMERO, R. 1998. Maíz: Aspectos sobre Fenología. Serie Técnica 101, INIA La Estanzuela. INIA, Uruguay. 51p.
- FOX, P.N., CROSSA, J. and ROMAGOSA, I. 1997. Multi-environmental testing and genotype x environment interaction. In Statistical methods for plant variety evaluation. R.A. Kempton and P.N. Fox (eds). London, Chapman & Hall. pp. 117-138.
- INIA. 1993. Informe Presentado a la Comisión Asesora de Certificación de Semillas. Sector Cereales de Verano. Maíz – Sorgo. INIA La Estanzuela. pp 1-7.
- _____. 1995. Informe Presentado a la Comisión Asesora de Certificación de Semillas. Sector Cereales de Verano. Maíz. INIA La Estanzuela. pp 42-50.
- INIA-INASE. 1999. Proyecto. Protocolo de Evaluación de Maíz Silo para el Registro Nacional de Cultivares. Agosto de 1999.
- LYNCH, M., and WALSH, B.. 1998. Genetics and Analysis of Quantitative Traits. Sinauer Associates, Inc. 980pp.
- PIGURINA, G. y PEREZ GOMAR E. 1994. Momento de cosecha de maíz para ensilar. Boletín de Divulgación N° 43. INIA Tacuarembó. 12 p.
- SHARMA, S. 1996. Applied Multivariate Techniques. 1st ed. John Wiley & Sons, Inc. 493 pp.
- STATSOFT, INC. 1998. Statistica for Windows (Computer Program Manual). Tulsa, OK: StatSoft, Inc., 2300 East 14th Street, Tulsa, OK. USA.
- VAN EEUWIJK, F.A. 1996. Between and beyond additivity and non additivity: The statistical model of genotype by environment interaction in plant breeding. Doctoral Thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 293 p.
- _____, L.C.P. KEIZER, and J.J. BAKKER. 1995. Linear and bilinear models for the analysis of multi-environment trials: II. An application to data from the Dutch maize Variety Trials. *Euphytica* 84:9-22.
- VARGAS, M., J. CROSSA, F.A. VAN EEUWIJK, M.E. RAMÍREZ, and K. SAYRE. 1999. Using partial Least Squares Regression, Factorial Regression, and AMMI Models for Interpreting Genotype x Environment Interaction. *Crop Sci.* 39:955-967.
- VILARÓ, D. 1994. Evaluación de Cultivares de Maíz para Silo. In: Jornada de Cultivos de Verano. Sector Cereales de Verano. Serie Actividades de Difusión N° 22. INIA La Estanzuela, Uruguay. pp 69-73.
- _____, M. LABANDERA, y M. SASTRE. 1999. Resultados Experimentales de Evaluación de cultivares. Maíz para Silo 1999. INIA La Estanzuela. INIA, Uruguay. 14 p.
- _____, S. CERETTA, y T.E. ABADIE. 2000. Poster: Estudio de la adaptación de cultivares de girasol en Uruguay. In: XVII Seminario Panamericano de Semillas. Noviembre 20-22, 2000. Punta del Este, Uruguay.
- WIERSMA, D.W., CARTER, P.R., ALBRECHT, K.A. and Coors, J.G. 1993. Kernel Milkline Stage and Corn Forage Yield, Quality, and Dry Matter Content. *J. Prod. Agric.* 6:94-99.
- YAN, W., and L.A. HUNT. 2001. Interpretation of Genotype x Environment Interaction for Winter Wheat Yield in Ontario. *Crop.Sci.* 41:19-25.
- _____, _____, Q. SHENG and Z. SZLAVNICS, 2000. Cultivar Evaluation and Mega-Environment Investigation Based on the GGE Biplot. *Crop Sci.* 40:597-605.
- ZOBEL, R.W., WRIGHT, M.J. and GAUCH, JR, H.G. 1988. Statistical Analysis of a Yield Trial. *Agronomy Journal* 80:388-393.