INTERACCIÓN GENOTIPO x PRÁCTICAS DE MANEJO EN HÍBRIDOS DE MAÍZ. EFECTOS SOBRE EL DISEÑO DE RECOMENDACIONES

GENOTYPE x PRACTICES OF MANAGEMENT INTERACTION IN MAIZE HYBRIDS. EFFECTS ON THE DESIGN OF RECOMMENDATIONS

Aristeo Barrios-Ayala[1*], Antonio Turrent-Fernández[2], José I. Cortés-Flores[2], Carlos A. Ortiz-Solorio[2], Noel O. Gómez-Montiel[3] y Ángel Martínez-Garza[4]

[1]Campo Experimental Chilpancingo, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Av. Rufo Figueroa s/n, Colonia Burócratas, Chilpancingo, Gro. Tel y Fax: 01 (747) 4727359. Correo electrónico: aristeo_barrios@yahoo.com.mx [2]Programa de Edafología, Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco, C.P. 56230 Montecillo, Texcoco, Edo. de México. [3]Campo Experimental Iguala, (INIFAP). Km 2.5 Carr. Iguala-Tuxpan, C.P. 40000. Iguala, Gro. [4]Programa en Estadística, Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados.

** Autor para correspondencia*

RESUMEN

Las metodologías para definir recomendaciones de fertilización y otras prácticas de manejo del cultivo de maíz (*Zea mays* L.), no incluyen la interacción genotipos x manejo. En un agrosistema o localidad con diversidad genética para elegir, una recomendación de fertilización y densidad de población obtenida para un híbrido se hace extensiva a otros híbridos. Con el propósito de revisar la magnitud de la interacción genotipo x manejo entre seis híbridos de maíz similares en rendimiento de grano, altura de planta y ciclo de desarrollo, se condujeron dos experimentos con riego en el ciclo otoño invierno de la región sureste de México. El diseño fue un parcelas divididas, en cuyas parcelas "grandes" se asignaron los 27 tratamientos de un diseño compuesto central rotable, generados con dosis de fertilizante (N+P+K), densidades de población y fechas de siembra, cada uno en cinco niveles igualmente espaciados, el centro del diseño fue repetido seis veces. Las parcelas "chicas" se asignaron a los híbridos. El rendimiento se ajustó con un modelo polinomial de segundo orden al que se le incluyeron los híbridos como variables "mudas" y sus efectos de interacción con los factores de manejo. Las manifestaciones de la interacción genotipo x manejo se midieron mediante las diferencias entre las ecuaciones de cada híbrido y su impacto en el diseño de sus recomendaciones. La interacción genotipo x manejo fue altamente significativa, por lo que la ecuación que se aproximó para cada híbrido fue diferente dentro del experimento en las dos localidades. El impacto en su recomendación se reflejó en considerables diferencias entre los tratamientos óptimos de cada híbrido, respecto a los factores de manejo, lo que sugiere la necesidad de considerar estas interacciones en el diseño de recomendaciones de manejo para un agrosistema o localidad.

Palabras clave: *Zea mays* L., recomendaciones de manejo, variabilidad genética, híbridos.

SUMMARY

The techniques to determine fertilization and cultural practices for maize (*Zea mays* L.) cropping, do not take into account the interaction genotype x management factors. Even though farmers have now access to several hybrids suitable for a particular agrosystem, that is they have a greater genetic diversity, a fertilization and plant density technology adapted for a hybrid is still used for all maize hybrids. In order to quantify the significance of the genotype x management interaction on crop management, two irrigated maize field experiments, including six commercial hybrids, were conducted in two different locations during the Fall-Winter season, in Southeastern "México. The experimental design was a split plot, in which main plots were assigned to 27 treatments of a rotary central composite design for nitrogen, phosphorus and potassium rates, population densities, and planting dates. Subplots contained the six maize hybrids and the center of the design was replicated six times. Grain yield response was adjusted to a complete quadratic model, including hybrids as dummy variables and managements factors as multiplicative effects. Since the genotype x management interaction was highly significant, different equations were obtained for each hybrid to predict grain yield in every experiment and the two locations. The resulting management recommendations for each hybrid also were different for the same location. These findings show the importance to include the genotype x management interaction for the hybrid managent in particular agrosystem o location.

Index words: *Zea mays* L, management recommendations, genetic variability, hybrids.

INTRODUCCIÓN

Mediante experimentos realizados en el Sureste de México se ha detectado una posible carencia de procedimientos actualizados para diseñar recomendaciones de fertilización y otras prácticas de producción del cultivo de maíz (*Zea mays* L). Ello podría deberse al cambio en el paradigma de su mejoramiento genético, después de epifitias provocadas por plagas y enfermedades, magnificadas por la endogamia que existía entre los materiales comerciales usados en siembras del Sur de la franja maicera de los EE.UU. a finales de los años 70 (Meghji *et al.,* 1984). Para prevenir tales siniestros los fitomejoradores están generando híbridos con mayor variabilidad genética, sin perder

Recibido: 14 de Enero del 2003.
Aceptado: 16 de Abril del 2004.

potencial de rendimiento. En México, a esta situación se le unió, desde 1994, una nueva política de mercado que favoreció la entrada de empresas de semillas extranjeras, y que el productor compita en función de precios internacionales. Ello provocó un aumento explosivo de oferta de nuevas variedades y el uso cada vez mayor de híbridos en las diferentes regiones agroclimáticas del país. Así, en el Sureste de México es posible encontrar en el mercado de semillas, alrededor de 30 de estos materiales (Turrent *et al.*, 1998).

Desde los años 50 las recomendaciones de manejo para el cultivo de maíz (fertilización, densidad de población, fechas de siembra, etc.), se han diseñado con base en el conocimiento de suelo y clima, sin incluir formalmente el factor genotipo; sólo se han reconocido diferentes interacciones entre híbridos y criollos y dentro de éstos, el porte y ciclo (Laird *et al.,* 1993). Tanto los investigadores de Productividad de Agrosistemas como los de Fertilidad de suelo, suponen igualdad en la respuesta de todos los híbridos, o bien que la interacción genotipo x manejo se puede ignorar sin repercusión. Este supuesto sería razonable solamente cuando la oferta de híbridos fuera baja.

El diseño de recomendaciones de fertilización y otras prácticas de producción para una región agrícola, parten del postulado de la ley natural de la respuesta de los cultivos (LNRC), cuyos factores según Jenny (1941), son suelo, clima, manejo y planta. El uso de esta LNRC ha manteniendo constante a la planta, de tal forma que el suelo, el clima y el manejo definen la respuesta de un cultivo. Puesto que en el mercado actual de una región agrícola existen varios híbridos disponibles, es improbable que los productores mantengan constante al factor genotipo. Por lo tanto, surgen las preguntas: ¿Lo que se ha hecho para diseñar recomendaciones, es actual y suficiente? ¿Son precisas las recomendaciones que se han generado? En el maíz se han encontrado desviaciones de más de 40 kg ha^{-1} en las recomendaciones de nitrógeno generadas con los métodos tradicionales; Volke y Etchevers (1994) reportan diferencias de 50 % entre dosis. Estas respuestas están controladas por genes, por lo que dependerá del genotipo si presenta o no el alelo que controle la característica en estudio (Hergert *et al.,* 1996; Jewell *et al*., 1995; Nordquist *et al.,* 1996). La variabilidad genética de los híbridos de maíz puede provocar respuestas diferentes ante dosis similares de N, P_2O_5, K_2O y de otros factores controlables de la producción (Atlin *et al*., 2000; Buah *et al*., 1998; Tollenaar y Wu, 1999).

En el Sureste de México hay más de dos millones de hectáreas con posibilidades técnicas de riego en el ciclo de otoño-invierno (Turrent *et al.*, 1998), que varían en suelo, clima e híbridos. En esta superficie, una imprecisión como las mencionadas arriba, significa contaminación y pérdidas económicas importantes, tan sólo en el factor de fertilización con nitrógeno. ¿Se debe entonces, seguir recomendando a los agricultores la misma dosis de fertilización, en híbridos de maíz tan diferentes como H516, H515, C-343 y Tornado, que tienen orígenes y germoplasmas diferentes, y posiblemente también diferentes eficiencias en el uso de insumos, para un potencial de rendimiento similar? ¿Es la magnitud del impacto de esta diversidad de cultivares de maíz, determinante en la precisión de una recomendación de fertilizantes y de otras prácticas de producción?

En este documento se examinan dos experimentos realizados en el Sureste de México, para explorar la hipótesis de que la oferta genética actual en el cultivo de maíz en esta región, existe suficiente variabilidad para que la interacción genotipo x factores de manejo, pueda conducir a diferencias sustantivas en las recomendaciones de manejo de cada híbrido.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron los resultados de dos experimentos establecidos con riego durante el ciclo otoño invierno, en condiciones contrastantes de suelo y clima en el Sureste de México. Los experimentos se diseñaron para evaluar la importancia de la interacción genotipos por factores de manejo en el diseño de recomendaciones, al incluir genotipos entre los cuales se supone que existe variabilidad genética, pero similares en altura y longitud de ciclo de desarrollo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características de los híbridos evaluados en los dos experimentos de este estudio, según Gómez (2001)[1].

Híbrido	Tipo	Progenitores (líneas)	Altura de planta (cm)	Madurez fisiológica (dds^{+})
H-513	Cruza simple	LT-154(♀) **x** LT-155(♂)	195 en OI	115–120
H-515	Cruza trilineal	(TTC-63xST549) ♀ **x** (D7501 471) ♂	200 en OI	115–120
H-516	Cruza trilineal	(D471xTTC-63) ♀ **x** (ST-30-1-3) ♂	190 en OI	115–120
Hemoc	Cruza simple	TTC-17(♀) **x** TTC-63(♂)	200 en OI	120–125
H-551c	Cruza Simple	CML144(♀) **x** CML159(♂)	180 en OI	95–100
HEP^{++}	Cruza simple	Genealogía no publicada	180-200 en OI	110–125

$^{++}$Híbrido experimental o de empresa privada; dds = Días después de la siembra; OI = Ciclo otoño-invierno.

Un experimento se condujo en el Campo Experimental de Iguala, Guerrero, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, cuyo clima es cálido subhúmedo y tipo de suelo *Chromic Haplusterts*; el otro se estableció en El Cayal, Campeche, cuyo clima es cálido húmedo y tipo de suelo *Typic Rhodustalfs*. La clasificación de los suelo se realizó con la metodología propuesta por Soil Survey Staff (1995).

[1] N Gómez M (2001). Genetista mejorador del Programa de Maíz, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Iguala, Gro.

En ambos experimentos el cultivo previo fue maíz, y el manejo agronómico inició con barbecho, doble rastreo y surcado. Se dio un riego presiembra, e inmediatamente antes de sembrar se fertilizó manualmente con la tercera parte del N, todo el fósforo y todo el potasio aplicados en el fondo del surco. La parte restante del N se aplicó y cubrió, 40 d después de la siembra. Como fuentes de fertilizantes se usaron: urea; superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio. La siembra se hizo a "chorrillo" 2 d después del riego, y las semillas se depositaron en la pendiente ("costilla") del surco. Para asegurar la densidad de población requerida en cada tratamiento, se ajustó la población entre los 7 y 10 d después de la emergencia, mediante aclareos. Las malezas fueron controladas con aplicaciones preemergentes de Atrazina a razón de 1.8 kg ha^{-1}, y dos labores de cultivo.

Se aplicaron de 9 a 12 riegos durante el ciclo biológico, con una lámina total de 1.0 a 1.2 m. Se tomaron datos de altura de planta, días a floración masculina, madurez fisiológica y síntomas de enfermedad que se presentaron poco antes de la etapa fisiológica de grano dentado. Las mazorcas se cosecharon manualmente, al llegar a madurez fisiológica, sólo en plantas con competencia completa tanto dentro de su surco como en los flancos. Se contaron las mazorcas y se cuantificó su sanidad (con escala de 0 a 5, donde 0 es sin síntomas y 5 es incidencia alta); de las mazorcas se pesó el grano, del cual se extrajo una muestra, para determinar su contenido de humedad. El forraje total sin grano, también se pesó y se determinó el contenido de humedad de cinco plantas en cada parcela útil. El peso del grano se expreso en t ha^{-1} con 14 % de humedad. La materia seca aérea de las plantas, también fue expresada en t ha^{-1}, y el índice de cosecha (IC) como el cociente del peso del grano entre el peso total de la materia seca aérea, sin el grano.

Los 27 tratamientos aplicados resultaron de la combinación de los siguientes factores: fertilización ($N+P_2O_5+K_2O$), densidad de población (DP), y fechas de siembra (FS), que se ubicaron en las parcelas grandes (TPG) de un diseño de parcelas divididas. Cada factor se estudió en cinco niveles igualmente espaciados, codificados de -2 a +2, de la siguiente manera: $\boldsymbol{n}=(N-140)/40$; $\boldsymbol{p}=(P_2O_5-80)/40$; $k=(P_2O_5-60)/30$; $\boldsymbol{d}=(DP-50)/10$ y $\boldsymbol{f}=(FS-30)/15$. El espacio de exploración fue de 60 a 220 kg de N ha^{-1}, de 0 a 160 kg de P_2O_5 ha^{-1}, y de 0 a 120 kg de K_2O ha^{-1}; la DP varió de 30 a 70 mil plantas/ha y la FS se hizo cada 15 d a partir del 15 de diciembre y hasta el 15 de febrero. Los materiales genéticos de maíz se asignaron a las parcelas chicas, que constaron de un surco de 5 m con dos surcos de bordo en la parcela grande. Los TPG se seleccionaron de un diseño compuesto central rotatorio lotificado a un tercio (Cochran y Cox, 1957) con dos repeticiones; la lotificación se realizó por fecha de siembra.

Con la información obtenida de cada experimento se realizó un análisis de varianza y se ajustó una ecuación de regresión y una prueba de falta de ajuste para un modelo cuadrático aditivo y un no aditivo que integra a los genotipos como variables. El modelo general aditivo, si se consideran tres híbridos y dos factores de manejo (N y P) es: $y=\mu+N+P+N^2+P^2+e$, y el modelo general no aditivo para este mismo caso, donde los tres híbridos se representan como dos variables "dummy", $\mathbf{w_1}$ y $\mathbf{w_2}$ y que asumen los valores de 0 y 1 (Allen, 1984; Myers y Montgomery, 1995) es:

$$y=\mu+w_1+w_2+N+P+NP+N^2+P^2+w_1N+w_1P+w_1NP+ w_1N^2+w_1P^2+w_2N+w_2P+w_2NP+w_2N^2+w_2P^2+ e$$

Análogamente, a las variables independientes cuantitativas (N, P_2O_5, K_2O, DP y FS) se les adicionó un juego de cinco variables indicadoras "mudas o dummy" que representan a los seis híbridos en el ajuste de la ecuación de regresión. Las cinco variables indicadoras (dummy) fueron: w_1, w_2, w_3, w_4, w_5,, cada una tomó el valor de 1 ó 0 para formar un vector para cada híbrido. Así, por ejemplo, el híbrido H-516 se representó con el vector W=00000, esto es que $w_1=0$, $w_2=0$, $w_3=0$, $w_4=0$ y $w_5=0$. Este vector es el de referencia en el modelo, y excluye a las variables indicadoras ($\mathbf{w_i}$, i= 1,2,3,4,5), por lo que cualquier término afectado por alguna de estas variables será excluido de la respuesta de este híbrido. Todos los términos que incluyan alguna variable $\mathbf{w_i}$, son componentes de algún otro híbrido y cuentan como desviaciones del término homólogo del híbrido de referencia. La asignación de los demás híbridos fue: H-513=10000, H-515=01000, HEP=00100, Hemoc=00010 y H-551c=00001. Si en la ecuación no aparece alguna de las variables indicadoras ($\mathbf{w_i}$), significa que todos los híbridos respondieron de la misma manera. Los productos cruzados entre estas variables y las de los factores de manejo, cuantifican las interacciones genotipo x manejo.

El modelo cuadrático no aditivo (con variables de genotipos) se ajustó a partir de 125 términos, e incluye: cinco efectos lineales y cinco cuadráticos de los factores principales, 10 interacciones de segundo orden en los efectos lineales, cinco efectos independientes de las variables mudas, y 100 términos que se generan de la multiplicación de los cinco efectos de las variables mudas, con los 20 efectos producto de la suma de los lineales, cuadráticos y de interacción (de 2º orden). El modelo aditivo (sin variables de genotipo) consta de 10 términos, y se ajusta con los cinco efectos lineales y los cinco cuadráticos. Los cinco efectos independientes de las variables mudas proporcionan la

respuesta individual de los seis híbridos a los factores de manejo, donde el H-516 se usa como referencia (vector de ceros); cada efecto en una variable muda es una desviación de este híbrido, y su suma algebraica representa el efecto de otro híbrido. El cotejo de la hipótesis se complementa con los 100 términos extra del modelo no aditivo con variables de genotipos (mudas), que permiten cuantificar en cada uno de los híbridos, los efectos lineal, cuadrático, e interacciones de segundo orden de los factores de manejo.

El rendimiento de grano se usó como variable dependiente y para la selección de variables se usó la técnica de máximo incremento de R^2. El diseño de recomendaciones de máxima ganancia, se hizo con el SAS (1994) y el método computacional iterativo propuesto por Martínez (1987). Con este algoritmo se calculó el ingreso neto y los costos de producción en cada fecha de siembra (FS), cuando así se requería, para valores de N que van de 60 a 220 kg de N ha^{-1}, de P que van de 0 a 160 kg de P_2O_5 ha^{-1}, espaciados ambos a cada 5 unidades; de K que van de 0 a 120 kg de K_2O ha^{-1}, espaciado cada 4 unidades y DP que explora de 30 a 70 mil plantas/ha, espaciado cada 2 mil unidades.

Los costos en moneda nacional que se usaron fueron de: 5.5 \$ kg^{-1} de N, de 6.0 \$ kg^{-1} de P_2O_5, de 6.0 \$ kg^{-1} de K_2O y de 9.07 \$/mil plantas. El costo variable (CV) se calculó con la fórmula:

$$CV = 5.5N + 6P + 6K + 9.07DP + 250\,\hat{y}$$

donde 250 $\hat{y}$ se refiere al costo de la cosecha y desgrane por tonelada, y el precio del grano es de 1500 \$ t^{-1}; entonces el ingreso total (IT) = 1500 $\hat{y}$, y por tanto, el ingreso neto (IN) = IT-CV.

Este método fue condicionado por el máximo rendimiento observado (M2), y una varianza de $\hat{y}$ menor o igual a 0.5 σ^2. Estos coeficientes evitan soluciones en la periferia del diseño, que se asocian regularmente a varianzas muy grandes y respuesta estimadas ($\hat{y}$), fuera de lo observado en el experimento. Sin embargo, dado que en estos diseños (rotatorios) la varianza de $\hat{y}$ depende de su distancia al centro del diseño (**p**), las condiciones impuestas implican que no todos los híbridos exploran el mismo espacio experimental, circunstancia que puede propiciar que si resulta una misma ecuación ajustada para dos híbridos, un **p** diferente proporciona recomendaciones diferentes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las ecuaciones de regresión que se ajustaron a partir de los rendimientos medios de grano, se presentan en el Cuadro 2. En el experimento de Iguala, Guerrero la ecuación constó de 35 términos, con una prueba de F_c significativa ($P \leq 0.0001$), $R^2 = 77$ %, cuadrado medio del error de 0.3406 $(t\ ha^{-1})^2$ y la prueba de ajuste no fue significativa ($F_c = 0.55$). En Cayal, Campeche la ecuación fue de 37 términos, con una prueba de F_c también significativa ($P \leq 0.0001$), $R^2 = 82$ %, cuadrado medio del error de 0.3186 $(t\ ha^{-1})^2$; y su prueba de falta de ajuste tampoco fue significativa ($F_c = 1.0$).

Para explicar cómo se manifiestan en la ecuación, las diferencias de respuesta de cada uno de los seis híbridos a los cinco factores de manejo que se están estudiando (N, P_2O_5, K_2O, DP y fechas de siembra (FS)), se toma como ejemplo al experimento de Iguala. Tales diferencias se detectan en los términos que contienen alguna variable indicadora, $\mathbf{w}_i$. Dado que la respuesta del híbrido H-516, que es el de referencia, se conforma con todos los términos que no contengan $\mathbf{w}_i$, la respuesta de cualquier otro híbrido será la respuesta del híbrido de referencia más la suma algebraica del término homólogo con la variable indicadora $\mathbf{w}_i$ que le corresponda. Por ejemplo, en el experimento de Iguala, el rendimiento estimado del híbrido de referencia (H-516) en el centro del diseño (ordenada al origen = 140N-80P-60K-50DP-FS3) es de 8.85 t ha^{-1}; por tanto, el rendimiento estimado del HEP en ese mismo punto es: $8.851 + (0.967\ \mathbf{w}_3) = 9.818$ t ha^{-1}. Si el híbrido de referencia no presenta respuesta cuadrática a $\boldsymbol{p}$ ($\boldsymbol{p}^2$), la respuesta del HEP es igual a 0 - 0.272 $\mathbf{p}^2\mathbf{w}_3$; al extender esta idea, la respuesta a $\boldsymbol{p}^2$ del H-551c es de 0 + 0.262 $\mathbf{p}^2\mathbf{w}_5$ y del Hemoc de 0 - 0.208 $\mathbf{p}^2\mathbf{w}_4$. Las variables indicadoras $\mathbf{w}_1$ y $\mathbf{w}_2$ no acompañan al factor $\boldsymbol{p}^2$ en esta ecuación, lo cual quiere decir que los híbridos, H-513 y H-515, al igual que el híbrido de referencia, no respondieron a este factor ($\boldsymbol{p}^2$). En los dos experimentos los efectos se leen de la misma manera: todos los términos con alguna $\mathbf{w}_i$ indican diferencias en las respuestas de los híbridos. El hecho de que en las ecuaciones de regresión aparezcan todas las variables indicadoras $\mathbf{w}_i$, significa que todos los híbridos respondieron de manera diferente en al menos una variable independiente del modelo no aditivo, lo cual evidencia la presencia de la interacción genotipos x factores de manejo.

Las diferencias de respuesta en tres híbridos (G) al nitrógeno (N), fósforo (P), densidad de población (DP), y de nitrógeno, fósforo, fechas de siembra (F) y en general a las interacciones GxNxPxDP y GxNxPxF, se ilustran para Iguala en la Figura 1. El centro del espacio de exploración es el tratamiento: 140-80-60-50-F3. Los dos factores que no aparecen en cada interacción se mantienen constantes en el valor que corresponde al centro del diseño; sólo en DP se utilizaron 60 mil plantas por hectárea debido al interés agronómico de observar el comportamiento de los otros factores bajo esta densidad.

Cuadro 2. Ecuaciones para rendimiento de grano en seis híbridos de maíz, en respuesta a fertilización, densidad de población y fecha de siembra, en condiciones de riego durante el ciclo otoño invierno en: 1) Iguala, Gro. y 2) Cayal, Campeche.

Con el modelo no aditivo que incluye al factor genotipo

1) $\hat{y}_g = 8.851+0.162\mathbf{n}+0.282\mathbf{p}-0.098\mathbf{k}+0.843446\mathbf{d}-0.174\mathbf{f}-0.179\mathbf{d}^2-0.158\mathbf{f}^2-0.113\mathbf{nk}+0.249\mathbf{pk}+0.141\mathbf{kf}+0.383\mathbf{fw}_1+0.372\mathbf{nfw}_1+0.373\mathbf{pdw}_1+0.269\mathbf{fw}_2+0.249\mathbf{k}^2\mathbf{w}_2+0.316\mathbf{npw}_2-0.212\mathbf{pfw}_2+0.303\mathbf{kdw}_2-0.323295\mathbf{dfw}_2+0.967282\mathbf{w}_3-0.183\mathbf{kw}_3-0.272\mathbf{p}^2\mathbf{w}_3-0.179\mathbf{d}^2\mathbf{w}_3-0.247\mathbf{f}^2\mathbf{w}_3+0.246\mathbf{pkw}_3-0.442\mathbf{w}_4-0.266\mathbf{nw}_4-0.208\mathbf{p}^2\mathbf{w}_4-0.204\mathbf{ndw}_4-0.206\mathbf{pdw}_4-0.394\mathbf{dfw}_4+0.326\mathbf{fw}_5+0.262\mathbf{p}^2\mathbf{w}_5+0.314\mathbf{ndw}_5-0.409\mathbf{pkw}_5$ **(R^2=0.770)**

2) $\hat{y}_g = 6.505-0.251\mathbf{n}-0.104\mathbf{p}+0.066\mathbf{k}-0.724\mathbf{f}+0.679\mathbf{d}+0.162\mathbf{n}^2+0.1003\mathbf{p}^2+0.201\mathbf{k}^2-0.198\mathbf{f}^2+0.166\mathbf{d}^2+0.090\mathbf{np}+0.117\mathbf{pd}+0.084\mathbf{kf}+0.097\mathbf{kd}-0.069\mathbf{df}\ 0.445\mathbf{w}_1-0.614\mathbf{w}_2-0.373\mathbf{w}_4+0.627\mathbf{nw}_1-0.283\mathbf{dfw}_1+0.384\mathbf{nw}_2+0.216\mathbf{fw}_2+0.171\mathbf{p}^2\mathbf{w}_2-0.383\mathbf{nw}_3-0.168\mathbf{dw}_3+0.120\mathbf{n}^2\mathbf{w}_3-0.199\mathbf{pdw}_3+0.423\mathbf{nw}_4-0.146\mathbf{d}^2\mathbf{w}_4+0.257\mathbf{nkw}_4+0.731\mathbf{nw}_5-0.216\mathbf{pw}_5+0.218\mathbf{nkw}_5+0.440\mathbf{ndw}_5+0.185\mathbf{pkw}_5-0.177\mathbf{pfw}_5$ **(R^2=0.8159)**

1) $\hat{y}_g = 8.906+0.117\mathbf{n}+0.283\mathbf{p}-0.131\mathbf{k}+0.843\mathbf{d}-0.135\mathbf{p}^2-0.194\mathbf{f}^2-0.196\mathbf{d}^2$ **(R^2 = 0.5313)**

2) $\hat{y}_g = 6.266+0.174\mathbf{n}-0.140\mathbf{p}+0.067\mathbf{k}-0.688\mathbf{f}+0.707\mathbf{d}+0.182\mathbf{n}^2+0.129\mathbf{p}^2+0.201\mathbf{k}^2-0.235\mathbf{f}^2+0.141\mathbf{d}^2$ **(R^2=0.6851)**

$\hat{y}_g$ es rendimiento de grano, en t ha^{-1}, n=(N-140)/40; p=(P-80)/40; k=(K-60)/30; d=(D-50)/10; f=(F-30)/15.

N es dosis de nitrógeno, en kg ha^{-1}; P es dosis de P_2O_5, en kg ha^{-1}; K es dosis de K_2O, en kg ha^{-1},
D es densidad de población en miles de plantas/ha^{-1}; F es fecha de siembra medida cada 15 d a partir del 1 de diciembre;
Las variables indicadoras de los genotipos son: W=$w_1w_2w_3w_4w_5$. Así, H-516=00000; H-513=10000; H-515=01000; HEP=00100; Hemoc=00010 y H-551c=00001.

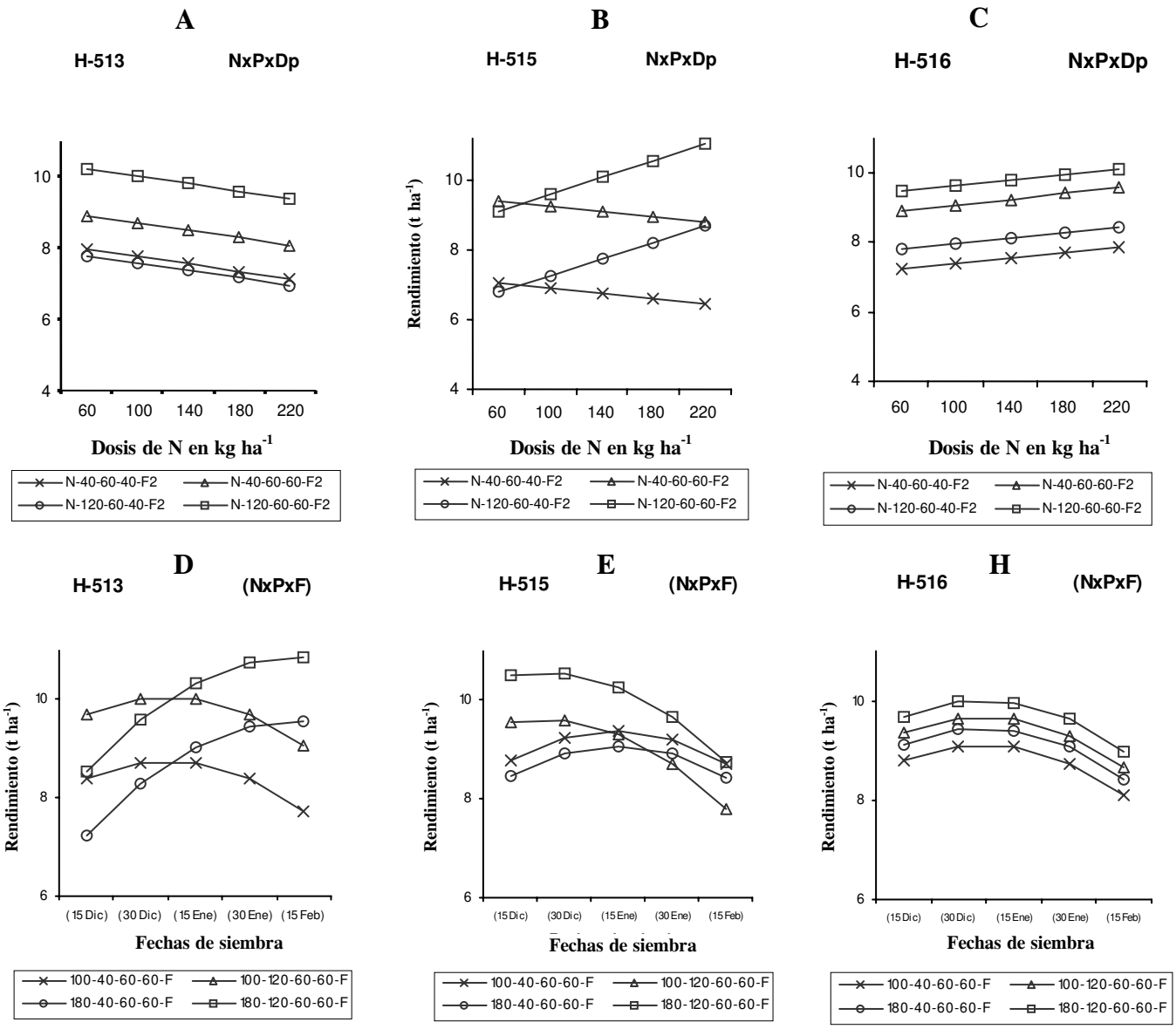


Figura 1. Respuesta de tres híbridos : 1) A, B y C a la aplicación de N en dos niveles de P y dos de Dp, con K y F fijos en el centro del diseño y; 2) D, E y H a la aplicación de F en dos niveles de N y dos de P con K y F fijos en el centro del diseño. Iguala, Gro.

Los gráficos de la Figura 1A, B y C son explícitos para N y resaltan diferencias de respuesta de tres híbridos, a los efectos de N, P, DP y sus interacciones. Así, el H-513 presenta respuesta negativa a N y a la interacción PxDP. En el H-515 esta misma interacción tiene diferente forma y está afectada por N, que presenta respuesta negativa con bajo nivel de P y positiva en el caso contrario. En el H-516 la respuesta a estos tres factores también es diferente, con respuesta positiva a N. La interacción NxP en el H-515 se detecta porque con un bajo valor de P, la respuesta a N es ligeramente negativa y con alto valor de P la respuesta a N cambia a positiva; el H-516 no presenta interacciones y sólo presenta respuestas positivas a N, P y DP. En general, cada híbrido muestra diferente respuesta a N y P y sólo la respuesta positiva a DP es consistente, pero con diferente intensidad entre híbridos, lo cual indica la presencia de la interacción GxNxPxDP. De la misma manera se explica la marcada diferencia en la estructura de las Figuras 1D, E y H, para las interacciones NxPxF (explícitas para FS), en cada uno de los híbridos usados como ejemplo, lo cual quiere decir que la interacción GxPxKxF es significativa.

Nótese que en Iguala (Figura 1), el efecto de N en el H-513 cambia de negativo a positivo a medida que se siembra mas tarde respecto al espacio de exploración de FS. En este híbrido el P tiene respuesta positiva sin interacción. Sin embargo, en el H-515 el P interacciona negativamente con la fecha de siembra (PxFS), esto es que con bajo nivel de P no se tiene efecto de FS y en siembras tardías la respuesta a P se vuelva negativa. En el H-516, a diferencia de los dos anteriores, los factores N, P y FS no interaccionan entre sí, y sólo presenta ligera respuesta positiva a N y P, y respuesta negativa a FS.

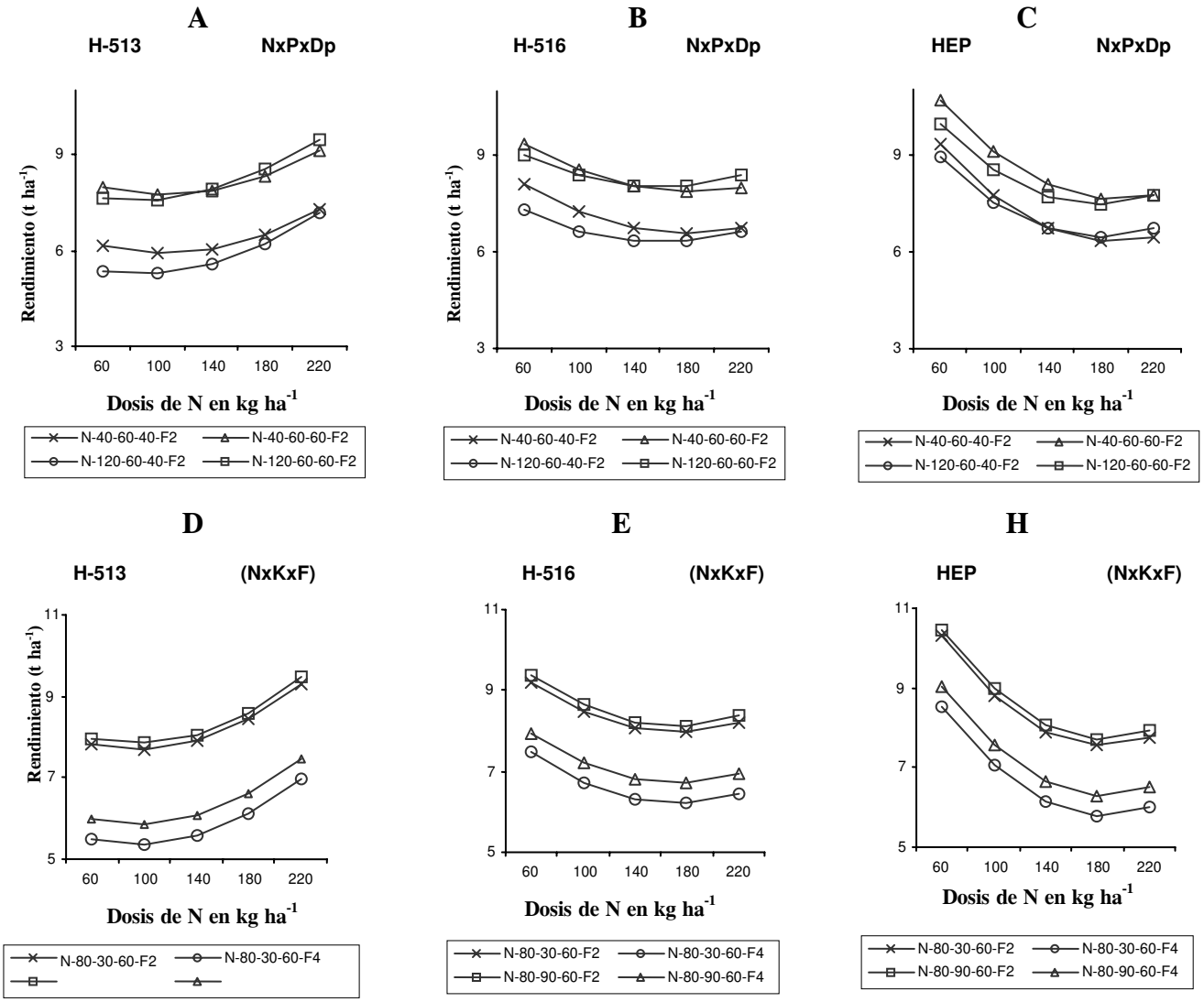


Figura 2. Respuesta a tres híbridos : 1) A, B y C a la aplicación de N en dos niveles de P y dos de Dp, con K y F fijos en el centro del diseño y; 2) D, E y H a la aplicación de N en dos niveles de K y dos de F con P fijo (centro del diseño) y DP de 60 mil pl/ha. Cayal, Camp.

Si se considera que todos los híbridos fueron evaluados bajo el supuesto de homogeneidad en la disponibilidad nutrimental en el experimento, este ejemplo sugiere importantes diferencias de respuesta de cada uno de los híbridos a los diferentes factores de manejo, que tal vez pueda atribuirse a diferencias en su estructura genética reflejada en diferente habilidad para el uso de cada insumo. (Tollenaar y Wu, 1999). Todos los híbridos con los componentes que conforman su ecuación, se pueden analizar de la misma manera y, en general, el efecto de estas interacciones es similar.

En Cayal, Campeche, al igual que en Iguala, la respuesta individual de cada híbrido será la suma de los términos del híbrido de referencia (H-516=00000), más la suma algebraica de los términos homólogos de la $\mathbf{w}_i$ que le corresponda. Así, las diferencias de respuesta entre el H-516 y el H-551c son todos los términos con $\mathbf{w}_5$, que son los efectos de **n**, **p**, $\mathbf{f}^2$, **nk**, **nd**, **pk** y **pf**. Entonces la interacción entre estos dos genotipos y el manejo se refleja en que ambos responden con diferente intensidad a todos estos efectos. Lo mismo sucede con todos los híbridos, pues ninguno respondió igual que otro y su respuesta fue diferente en al menos uno de los factores. Obviamente el modelo aditivo no refleja estas diferencias, que en la medida que más factores estén involucrados, mayor será la magnitud del error en que se incurre al considerar que los genotipos de un mismo cultivo responden igual a los factores de manejo. En la Figura 2A, B y C se distingue la respuesta positiva a DP en los tres híbridos, pero que interaccionan con P de diferente forma en cada uno de ellos. En el H-516 esta interacción es positiva y en HEP es negativa.

En la Figura 2D, E y H se muestra la respuesta individual a N, K y F, de tres híbridos evaluados en el Cayal. Sobresale la respuesta negativa a F en los tres genotipos; no obstante, hay respuesta positiva a N en el H-513, levemente negativa en el H-516 y negativa en el HEP. Estos resultados revelan que la interacción GxN es significativa.

Los resultados de los dos experimentos, muestran la importancia de considerar la interacción genotipos x factores de manejo en el diseño de recomendaciones. En términos agronómicos estas respuestas indican que se debió sembrar antes del 15 de diciembre, y que fisiológicamente cada híbrido requiere de una dosis diferente de N y P_2O_5 y DP. Estos y otros efectos no graficados que se observan en la estructura de la ecuación de cada híbrido, dan origen a recomendaciones para genotipo y fecha de siembra, como se muestran con el experimento de Iguala. El cálculo de estas recomendaciones absorbe todos los efectos de la interacción genotipo x manejo y los transfiere a los tratamientos óptimos de cada híbrido, anotados en el Cuadro 3.

La manifestación de la interacción genotipo x manejo en el diseño de recomendaciones, genera tratamientos óptimos que difieren entre híbridos y entre fechas de siembra (FS), de tal forma, que aún dentro de éstas se detectan diferencias entre las dosis óptimas (DO) hasta de 160 kg de N ha^{-1}, entre el HEP y el Hemoc en la cuarta FS; de 135 kg de P_2O_5 ha^{-1}, entre el H-513 y el H-551c de la tercera FS; de 112 kg de K_2O ha^{-1}, entre el H-513 y el Hemoc en la cuarta FS y 34 mil plantas/ha, entre el H-513 y el H-515 de la tercera FS. Las diferencias en las DO también se observan entre híbridos que presentaron un rendimiento similar en una FS; por ejemplo, entre el H-513 ($\hat{y}$ =10.387) y HEP ($\hat{y}$ =10.341 t ha^{-1}) de la primera FS, la diferencia en kg ha^{-1} de las DO de fertilizantes fueron de 35 en N, 100 en P, 52 en K y de 4 mil plantas/ha en DP. Diferencias de diversa magnitud también se presentan entre las DO de los híbridos: H-516 ($\hat{y}$ =8.7114 t ha^{-1}) y H-513 ($\hat{y}$ =8.484 t ha^{-1}) de la segunda FS, y entre el H-515 ($\hat{y}$ =10.215 t ha^{-1}) y H-551c ($\hat{y}$ =10.322 t ha^{-1}) de la quinta FS, y otras que se pueden apreciar en el mismo Cuadro 3.

Entre fechas de siembra también ocurrieron diferencias. Baste observar al H-513 con un tratamiento óptimo de 80-125-52-64 en la primera FS y 215-50-28-56 en la quinta FS. Estas situaciones reflejan una habilidad diferencial entre genotipos, respecto al uso eficiente de los factores de manejo, habilidad que puede ser afectada por la FS. La presencia de estas diferencias son manifestaciones de la interacción Genotipo x fertilización x fecha de siembra. Su severidad se hace palpable en diversos grados en los demás híbridos, e ilustra la magnitud del problema de generalizar un tratamiento óptimo para cualquier cultivo de maíz. En diversos estudios en el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (Jewell *et al.*, 1995) se reporta variabilidad genética para eficiencia a diversos factores, como N, P, K, densidad de población, pH, humedad (sequía), plagas y enfermedades (Bramel-Cox *et al.*, 1991; Lafitte y Edmeades 1991; Robinson, 2000) y que la expresión de los genes involucrados cambia en función del ambiente (Márquez, 1985).

Cuadro 3. Recomendaciones de (N-P_2O_5-K_2O-DP) y su rendimiento estimado de grano ($\hat{y}_g$), para seis híbridos evaluados en cinco fechas de siembra, en condiciones de riego en el ciclo otoño invierno, en la localidad de Iguala, Guerrero.

Híbrido	Fechas de siembra				
	5 dic	30 dic	15 ene	30 ene	15 eb
			($\hat{y}_g$)		
H-516	150-65-32-58	165-45-12-60	160-40-08-62	1 65-45-16-62	130-105-76-60
	(9.5279)	(8.7114)	(10.103)	(9.4872)	(8.8654)
H-513	80-125-52-64	65-120-40-68	70-135-36-70	210-40-00-56	215-50-28-56
	(10.387)	(8.4840)	(10.596)	(10.579)	(10.624)
H-515	95-15-00-58	65-05-00-46	65-10-12-36	70-00-12-38	80-00-16-46
	(10.176)	(7.7975)	(10.206)	(10.218)	(10.215)
HEP	215-25-00-60	160-05-00-60	170-00-00-60	220-15-00-60	215-25-00-60
	(10.341)	(9.2311)	(11.481)	(11.210)	(9.5187)
Hemoc	90-35-08-56	65-20-12-58	75-25-00-62	60-100-112-64	65-105-104-54
	(9.7771)	(8.0340)	(9.8024)	(9.7607)	(8.6212)
H-551c	100-150-00-54	165-00-00-66	160-00-00-68	175-00-04-66	170-00-48-68
	(10.322)	(9.2660)	(10.308)	(10.311)	(10.322)
Todos (*)	120-90-00-66	80-95-00-68	65-95-00-68	80-95-00-66	120-90-00-66
|Oi-Oa|	**95-60-52-12**	**85-95-40-22**	**105-95-36-32**	**140-95-112-28**	**95-90-104-20**

Cada tratamiento óptimo se calculó con el proceso numérico propuesto por Martínez (1987), al que se le incluyeron dos restricciones: 1) Que el máximo rendimiento explorado no rebase al máximo rendimiento observado para cada híbrido en el experimento y 2) Que la distancia del centro a la periferia del diseño (ρ) se asocie a un valor que disminuya en 50 % la $\sigma^2 y$, por tanto, la varianza de las Y estimadas V($\hat{y}$), que le corresponden a cada tratamiento óptimo.

($\hat{y}_g$) = Rendimiento estimado de grano, en toneladas por hectárea.

(*) = Calculados con un modelo aditivo que se condicionó con el promedio de las ρ que cumplían con la restricción (2) del cálculo de los tratamientos óptimos y con el promedio de los rendimientos máximos observados por híbrido referido en la restricción (1).

|Oi - Oa| = Valor absoluto de la máxima diferencia entre el óptimo del modelo aditivo y el óptimo de modelo no aditivo.

Por tanto, en el caso del N si genotipos como H-513 y H-551c (Cuadro 3) cambian su eficiencia para producir el mismo rendimiento con sólo cambiar la fecha de siembra, puede deberse a dos razones básicas: 1) La diferente fecha implica diferentes condiciones de temperatura y humedad relativa, mismas que afectan la transpiración de la planta, el flujo de masas en el suelo y, por tanto, la velocidad de asimilación de este elemento, que se traduce en diferentes eficiencias de fertilización (Bennet, 1997); 2) La eficiencia del metabolismo del N ya asimilado depende de la estructura genética y su expresión génica es afectada por el ambiente y por su interacción (Fenotipo = genotipo (g) + ambiente (a) + interacción (g x a)). Un cambio de fecha de siembra implica cambios en el clima y en la eficiencia del metabolismo, que frecuentemente se relaciona con acumulaciones de N en prefloración y actividades enzimáticas en llenado de grano (Cretans y Berkum, 1984; Short, 1991; Feil *et al.*, 1993). En el caso de P y K sucede de forma similar, debido a que la eficiencia de estos fertilizantes depende de su difusión y, ésta a su vez de la temperatura que cambia con la fecha de siembra. Se deduce que al menos en los híbridos de maíz evaluados, cuyo potencial de producción es similar, también pueden esperarse producciones similares de biomasa con la aplicación de cantidades diferentes de insumos.

Los tratamientos óptimos generados con el modelo aditivo, aún cuando se colocan aproximadamente a la mitad de estas diferencias, su desviación sigue siendo considerable. Estos tratamientos óptimos deberían ser iguales a través de fechas de siembra, si los efectos de este factor no hubieran sido significativos. Sin embargo, como el efecto de fecha de siembra tiene curvatura negativa en la ecuación ajustada, el espacio de exploración de los rendimientos estimados se modifica y éstos a su vez se ajustan a los efectos significativos de los demás factores, lo cual provoca diferencias de diversa magnitud en el cálculo de sus óptimos.

En las Figuras 1 y 2 (A, B y C) se muestran los híbridos H-513 y el H-516 con un comportamiento marcadamente diferente. Por ejemplo, el H-513 en Iguala tiene respuesta negativa a N mientras que en el Cayal su respuesta es positiva, con ligera curvatura también positiva e interacción con el P. Con el H-516 sucedió algo similar, pues en Iguala su respuesta a N es ligeramente negativa e interactúa con P, mientras que en Cayal su respuesta es positiva, sin interactuar con los demás factores. Dado que estos dos híbridos responden de manera diferente a los factores de manejo en una localidad y estas respuestas tienen diferente intensidad en la otra localidad, se evidencia que la interacción triple genotipo x manejo x localidad,

también pueden ser importante en el diseño de recomendaciones.

Respecto a la precisión de los modelos, en Iguala el modelo no aditivo con inclusión de los genotipos como variables, explicó 24 % más de variabilidad respecto al modelo aditivo, y en la localidad Cayal la diferencia fue de 13 %.

CONCLUSIONES

Se presenta evidencia de que la interacción genotipo x factores de manejo es significativa en las dos localidades y conduce a diferencias sustantivas de respuesta entre híbridos de maíz, dentro de localidades y fechas de siembra. Las diferencias encontradas en Iguala, Guerrero que se reflejan en las recomendaciones, son del orden de 160 kg N ha^{-1}, entre los híbridos HEP y Hemoc en la cuarta fecha de siembra; de 135 kg de P_2O_5 ha^{-1}, entre los híbridos H-513 y H-551c en la tercera fecha de siembra; de 112 kg de K_2O ha^{-1}, entre los híbridos H-513 y Hemoc en la cuarta fecha de siembra y 36 mil plantas/ha, entre los híbridos H-513 y H-515 en la tercera fecha de siembra.

Las desviaciones máximas entre los óptimos generados con el modelo aditivo y no aditivo en Iguala, fueron de 140 kg de N ha^{-1}; 95 kg de P_2O_5 ha^{-1}; 112 kg de K_2O ha^{-1} y de 32 mil plantas/ha.

El modelo no aditivo que incluyó a los genotipos explicó mayor variabilidad observada en el rendimiento de grano, del orden de 24 y 13 % en las localidades Iguala y Cayal, respectivamente, respecto al modelo aditivo que ignora al genotipo.

BIBLIOGRAFÍA

Allen E L (1984) An introduction to linear regression and correlation. Snd.Ed. University of Washington, W. H. Freeman. New York, USA. pp:35-117.

Atlin G N, K B McRae, X Lu (2000) Genotype x region interaction for two-row barley yield in Canada. Crop Sci. 40:1-6.

Bennet W F (1997) Nutrient deficiencies and toxicity in crop plants. Marcel Dekker, Inc. New York Basel-Hong Kong. 624 p.

Bramel-Cox P J, T Barker, F Zavala-Garcia, J D Eastin (1991) Selection and testing environments for improved performance under reduced-input conditions. *In*: D A Sleper *et al*. (Eds.). Plant Breeding and Sustainable Agriculture: Considerations for Objectives and Methods. CSSA Special Publ. No. 18. ASA/CSSA/SSSA, Madison, WI. pp:29-56.

Buah S S J, J W Maranville, A Traore, P J Bramel-Cox (1998) Response of nitrogen use efficient sorghum to nitrogen fertilizer. J. Plant Nut. 21(11):2303-2318.

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (1994) El CIMMYT en 1994. El Batán, México, D.F. 10 p.

Cretans P B, V Berkum P (1984) Genetics of nitrogen metabolism and physiological/biochemical selection for increased grain crop productivity. Theor. Appl. Genet. 67:97-111.

Cochran W G, G M Cox (1957) Experimental Designs. John Wiley, New York, USA. 661 p.

Feil B, R Thiraporn, P Stamp (1993) In vitro nitratre reductasa activity of laboratory-grown seedlings as an indirect selection criterion for maize. Crop Sci. 33:1280-1286.

Hergert G W, P T Nordquist, J L Paterson, B A Skates (1996) Fertilizer and crop management practices for improving maize yields on high pH soils. J. Plant Nut. 19(8,9):1223-1233.

Jewell D C, S R Waddington, J K Ransom, K V Pixley (1995) Maize research for stress environments. Zimbabwe, 28 March–1 April 1994. México D.F. CIMMYT. 306 p.

Laird R J, A Turrent F, V Volke H, J I Cortés F (1993) La Investigación en Productividad de Agrosistemas. Cuadernos de Edafología 18. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 42 p.

Jenny H (1941) Factors of soil formation. McGraw-Hill. New York, USA. pp:450-600.

Márquez S F (1985) Genotecnia vegetal. Métodos, teoría y resultados. A. G. T. México, D. F. pp:118-125

Martínez G A (1987) Aspectos Económicos del Diseño y Análisis de Experimentos. LIMUSA. México, D. F. pp:51-96.

Meghji M R, J W Dudley, R J Lambert, G F Sprague (1984) Imbreding depression, imbredand hybrid grain yields and others traits of maize genotypes representing three eras. Crop Sci. 24:545-549.

Myers R H, D C Montgomery (1995) Response surface methodology; Process and product optimization using designed experiments. John Wiley & Sons. INC. New York, USA. 702 p.

Nordquist P T, G W Hergert, B A Skates, J L Paterson (1996) Genetic improvement of corn for tolerance to high pH soils. J. Plant Nut. 19(8,9):1309-1317.

Robinson R A (2000) Retorno a la Resistencia. Fitomejoramiento para Depender Menos de los Plaguicidas. F. Romero (trad). Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. pp:15-103.

SAS Institute (1994) SAS User's guide for personal computers. V.6. 4a Ed. Vol 1. Cary, NC. 889 p.

Soil Survey Staff (1995) Claves para la taxonomía de suelos, versión 1994. C A Ortiz Solorio, M C Gutiérrez C, J L García R (trads). Primera Edición en español. 1995. Publicación especial No. 3. SMCS. Chapingo, México. 306 p.

Tollenaar M, J Wu (1999) Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. Crop Sci. 29:1597-1604.

Turrent F A, N O Gómez M, M Sierra M, R Aveldaño S (1998) Producción de maíz de riego en el ciclo otoño-invierno, en el Sureste de México. I. Rendimientos de cuatro fórmulas tecnológicas. Rev. Fitotec. Mex. 21:159-170.

Volke H V, J D Etchevers B (1994) Recomendaciones de fertilización para cultivos: necesidad y perspectivas de una mayor precisión. Cuaderno de Edafología 21. IRENAT, Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, México. 43 p.