

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO



Índices de Selección en el Mejoramiento del Cultivo de Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench)

Por:

PEPE MONTAÑO HERNÁNDEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Saltillo, Coahuila, México
Diciembre, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO DE FITOMEJORAMIENTO

Índices de Selección en el Mejoramiento del Cultivo de Sorgo (*Sorghum bicolor* L.
Moench)

PEPE MONTAÑO HERNÁNDEZ

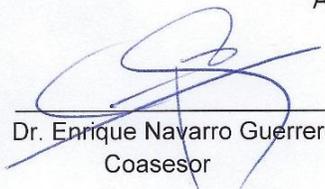
TESIS

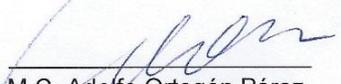
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

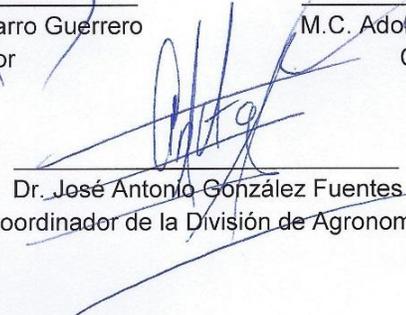
INGENIERO AGRÓNOMO EN PRODUCCIÓN

Aprobada por el Comité de Asesoría:


M.C. Luis Ángel Muñoz Romero
Asesor Principal


Dr. Enrique Navarro Guerrero
Coasesor


M.C. Adolfo Ortegón Pérez
Coasesor


Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México
Diciembre, 2019

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme vida, salud, bendiciones y no dejarme solo en el transcurso de mi camino.

A la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, MI ALMA TERRA MATER, por haberme forjado en su seno y ser hombre de provecho para mi país, así como al Departamento de Fitomejoramiento por brindarme durante cuatro años toda su sabiduría y darme la oportunidad de superarme académicamente y por haber sido la base de mis conocimientos y formarme como profesionista.

A mi papá Lorenzo Montaña Cruz y a mi mamá Natalia Hernández Hernández por creer en mí y apoyarme cuando más lo necesitaba y por sus sabios consejos, te amo mamá y papá.

Al M.C. Luis Ángel Muñoz Romero, por el apoyo mostrado en la realización y revisión de esta tesis.

Al Doctor Enrique Navarro Guerrero, por todo el apoyo, como tutor, consejero, mi orientador, brindado durante mi estancia en la Universidad, así como realización y revisión de esta tesis.

Al M.C. Adolfo Ortegón Pérez por participar en mi comité de asesoría y por sus comentarios finales en este manuscrito.

Al Doctor Lorenzo López Barbosa, por el apoyo mostrado durante mi estancia en la UAAAN.

A todos los maestros del departamento de FITOMEJORAMIENTO por brindarme sus conocimientos para formarme como un profesionista competitivo.

A mis amigos, Jonathan Vírelas, Antelmo Díaz, por su apoyo y amistad brindados durante esta etapa, así como a los demás amigos que fui conociendo de diferentes Estados.

Por su amistad brindada en momentos de tensiones, diversiones y dado el caso académicamente, a todos, GRACIAS.

DEDICATORIAS

A mi padre Lorenzo Montaña Cruz por haberme formado de una manera la cual sea un hombre de bien y por su apoyo incondicional durante esta etapa, apoyándome en los momentos de dificultades sin dejarme un momento, aconsejándome de la mejor manera posible. Eres un gran ejemplo a seguir, por todo muchas gracias.

A mi madre Natalia Hernández Hernández por haberme dado la vida y permitirme compartir momentos contigo, por tus buenos consejos, enseñanzas y cariño, gracias MAMÁ.

A mis hermanos, por brindarme su apoyo y su cariño durante este tiempo, y poder seguir compartiendo momentos juntos a pesar de las dificultades y la distancia.

A mi cuñado, Lázaro Gutiérrez por su apoyo incondicional mostrado durante toda etapa de mi vida, y por los consejos y confianza que depositó en mí. Gracias.

A mi novia, Ubalda Jiménez y su mamá Enriqueta Jiménez por todo el apoyo, la confianza, comprensión, y tolerancia que me brindaron durante mi estancia en la UAAAN.

Por siempre tratar de apoyarme y llevarme por el camino de bien y cabalidad.

A mis tíos: Dominga Hernández, Hipólito Hernández, Elodia Hernández y Abrahán Mendoza por sus consejos a lo largo de mi vida.

A los demás integrantes de mi familia, tíos, primos, que son un gran apoyo durante mi vida personal y por consecuente profesional a todos gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIAS.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO	iii
RESUMEN.....	iv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Los objetivos del presente trabajo fueron:	3
Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1 Importancia de los índices de selección	4
III. MATERIALES Y METODOS	8
Descripción de las Áreas de trabajo.....	9
Preparación del Terreno.....	9
Labores de cultivo.....	11
Variables Agronómicas Medidas	11
Análisis estadístico.....	13
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
V. CONCLUSIONES.....	43
VI. BIBLIOGRAFÍA.....	44

RESUMEN

El presente trabajo de investigación consistió en la evaluación de 200 familias de sorgo de medios hermanos las cuales fueron evaluados en dos localidades en 2015 bajo un diseño de bloques incompletos con dos repeticiones. El objetivo fue identificar las mejores familias de sorgo de medios hermanos usando como criterio de selección los índices de selección. Cada parcela experimental consistió un surco de 3 m de largo una distancia de .80m entre surcos y como parcela útil se tomó un metro de la parte central de cada parcela experimental. La conducción del experimento y las prácticas culturales fueron de acuerdo a los utilizados por los productos. Riego, fertilización y control de plagas y enfermedades fueron realizados para evitar estrés y crear un ambiente óptimo para máxima expresión de las familias medios hermanos. Las variables agronómicas fueron días a floración, altura de planta, excursión, longitud de panoja, número de granos por panoja, peso de mil granos y rendimiento de grano.

Las variables como número de granos por panoja y peso de mil granos fueron considerados por sus correlaciones significativas con rendimiento para la construcción de índice de selección. Las mayores ganancias se observaron con numero de granos por panoja, peso de mil granos y rendimiento (24.68 g/p.u), siguiendo peso de mil granos con rendimiento de grano (24.23 g/p.u) con eficiencia relativas de 1.38 y 1.35, respectivamente. El índice de selección en discriminar a las mejores 40 familias de sorgo de medios hermanos fue aquel que incluyó a número de granos por panoja, peso de mil granos y rendimiento de grano.

Palabras claves: *Índices de selección y Sorghum bicolor L. Moench*

I. INTRODUCCIÓN

En el mejoramiento poblacional de las plantas: los diferentes métodos de selección buscan aprovechar la variación al máximo, siendo el objetivo de todo fitomejorador el desarrollar materiales superiores para una o varias características. Para lograr lo anterior se han desarrollado diferentes métodos de selección que permiten un mejor aprovechamiento de la varianza genética aditiva presente en las poblaciones a mejorar.

El valor total de una especie, ya sea vegetal o animal, se ve afectado por diversas características, en algunos programas de mejoramiento se necesita mejorar más de una de ellas; reconociendo que el mejorar un carácter puede causar la mejora o deterioro de un grupo de características asociadas o no al carácter en cuestión: de ahí que los mejoradores tengan que tomar en cuenta dichos caracteres para una mejor selección de individuos.

Debido a que la mayoría de las variables de importancia económica son de herencia cuantitativa y que por ende están asociadas a otras, se han llevado a cabo investigaciones donde señalan que la selección simultánea para varios caracteres es más rápida y efectiva cuando se le asigna a cada carácter a seleccionar una ponderación apropiada de acuerdo con su importancia económica, su heredabilidad y las correlaciones fenotípicas y genotípicas entre los diversos caracteres.

Existen algunos procedimientos para seleccionar en forma simultánea varios caracteres con el fin de mejorar el rendimiento de grano o cualquier carácter de importancia económica, dentro de los cuales se tienen el método tándem, el método de niveles independientes de descarte (“independent culling levels”) y los índices de selección. El primero consiste en dirigir la selección hacia un carácter hasta mejorarlo, luego a un segundo carácter, después para un tercero y así sucesivamente. El segundo método es aquel en el que se selecciona para todos los caracteres a un mismo tiempo; pero en este método, cualquier genotipo que no rebase un nivel fijado

se descarta sin importar los niveles de los otros caracteres. En el tercer método, los índices de selección son una herramienta que aprovechan las correlaciones de los caracteres que se quieren mejorar, donde por último todos los materiales de estudio obtienen una puntuación o calificación que se toma como base de selección.

La construcción de un índice de selección nos aporta un coeficiente para cada característica involucrada en él, donde la suma de los productos del coeficiente con el valor estimado para su característica correspondiente da una calificación determinada a cada unidad de selección, de esta manera dicha calificación es un criterio para seleccionar los mejores genotipos.

La mayoría de los investigadores involucran en el índice de selección al rendimiento y algunos componentes de éste, obteniéndose mejores respuestas en la selección de genotipos superiores en cuanto al rendimiento. Además, al hacer mejoramiento poblacional tomando como base a los índices de selección, podemos avanzar en la selección de individuos con el más alto rendimiento del carácter de importancia económica y las mejores características correlacionadas positivamente a él.

En los programas de selección recurrente donde más de una característica contribuye al valor total de un genotipo, es esencial la construcción de un índice objetivo para una selección consistente, la cual va a depender de los caracteres que se involucren en él y la importancia económica de estos.

Tomando en cuenta lo anterior y dado que los índices de selección es un método eficiente para seleccionar varias variables en forma simultánea, en vez de una sola (Kauffman y Dudley, 1979 y St. Martín, 1980) es muy importante que se elaboren más trabajos de mejoramiento utilizando esta metodología, por laborioso que resulte aplicarla para seleccionar los individuos con atributos positivos.

Los objetivos del presente trabajo fueron:

1. Construcción de índices de selección a partir de rendimiento, número de granos por panoja y peso de mil granos.
2. Estimación del avance genético y eficiencia relativa en el uso de los índices de selección.
3. Selección de las 40 mejores familias en base al mejor índice de selección.

Hipótesis

H₀: El índice de selección es eficiente al seleccionar las mejores familias de medios hermanos.

H₁: El índice de selección no es eficiente al seleccionar las mejores familias de medios hermanos.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Importancia de los índices de selección

Los primeros en usar los índices de selección fueron Smith (1936) y Hazel y Lush (1942) en plantas y animales, respectivamente.

Smith (1936) propuso el método de índices de selección para elegir de una manera lógica y sistemática genotipos en cuanto a varios caracteres; posteriormente Hazel (1943) amplió los principios de la construcción y uso de los índices, indicando que el avance genético está en función del diferencial de selección, del valor genético agregado y de la variabilidad genética. En otro estudio llevado a cabo por Manning (1956) usó los índices de selección en algodón y como componentes importantes del rendimiento a número de bellotas, semillas por bellota y fibras por semillas para cuantificar la superioridad genética después de seis generaciones de selección en la variedad original BP52 la misma que ha sido sembrada extensivamente en Uganda. Observó mayor superioridad genética en el índice al incluir rendimiento en lugar de número de bellotas por lo que sugiere la construcción de un índice en base a semillas por bellota, fibra de la semilla y rendimiento.

Searle (1965) señala que con la construcción de un índice se obtiene una mejor forma de capitalizar las correlaciones genéticas entre caracteres. Menciona que por medio de un índice es posible maximizar la respuesta a la selección para un conjunto de caracteres.

Hazel y Lush (1942) al evaluar y comparar la eficiencia relativa de los métodos de selección tándem, calificación total o índices de selección y niveles de selección independientes, encontraron que el método de índice de selección era el mejor. Mismo

resultado encontró Young (1961) en donde además menciona que en algunos casos el índice de selección no es más eficiente.

Hanson y Johnson (1957) presentaron argumentos para combinar la información obtenida de una serie de experimentos para obtener un índice general, de manera general se menciona que con datos de material genético evaluado sobre varias localidades y años (generaciones) se puede obtener un índice general. Además, que el éxito de tal índice depende de los errores de muestreo para las ponderaciones estimadas de índice y de los errores involucrados en las estimaciones genéticas debido a la interacción ambiental.

Young (1961) y Reyes (1985) afirman que la superioridad o eficiencia del índice de selección se va incrementando con la adición de un mayor número de caracteres involucrados en él. Además, agrega Young (1961), que la eficiencia decrece al incrementar la intensidad de selección.

Wallace *et al* (1954) al construir índices de selección en avena, utilizando caracteres cuantitativos en las que se involucran caracteres individuales y la asociación de algunos con el rendimiento; encontraron que el avance genético y la eficiencia relativa del índice de selección resulto mayor cuando se tomaron caracteres más asociados con el rendimiento y menor cuando se tomaron los menos asociados.

Arévalo (1974) realizó un trabajo sobre la eficiencia relativa de índices de selección para rendimiento de grano en cebada maltera. En este estudio encontraron que en general la eficiencia del índice fue mayor a medida que se aumentó el número de caracteres en el índice y que estos estaban correlacionados positivamente con el rendimiento. En el grupo de índices formados con caracteres no correlacionados con

rendimiento, se observó que los mejores índices apenas rebasaron el índice basado solo en rendimiento.

Oyervides (1979) realizó un estudio sobre índices de selección en once variedades tropicales de maíz, de donde obtuvo 63 índices a partir de todas las combinaciones posibles entre los caracteres de más alta heredabilidad y más estrechamente correlacionados entre sí con el rendimiento, siendo estos índices de 81.2 a 259.3% más eficientes que el índice construido sólo en base a rendimiento.

Miller *et al* (1978) elaboraron índices de selección para cuatro poblaciones de caña de azúcar, de los cuales obtuvieron que cuando la selección para toneladas métricas por hectárea se basó en la longitud de la caña, diámetro de la caña y número de cañas, el avance genético fue del 89% superior al obtenido cuando la selección se basó únicamente en las toneladas métricas por hectárea. Así mismo encontraron que cuando se seleccionó para toneladas métricas por hectárea de sucrosa, incluyendo las anteriores características y los grandos Brix dentro del índice, se incrementó a 92.1 por ciento el avance genético esperado en comparación al obtenido en la selección basado solo en las toneladas métricas por hectárea de sucrosa.

Celis *et al* (1986) estimaron parámetros genéticos e índices de selección en la variedad original de maíz Zacatecas 58 en su décimo ciclo de selección masal visual estratificada, donde encontraron que la respuesta a la selección resultó ser mayor al usar índices de selección que cuando consideraron solamente el rendimiento. La población original los índices elegidos mostraron eficiencias relativas de 124.6 y 122.97% más que la selección basada sólo en rendimiento, y para la población seleccionada el índice elegido resultó con una eficiencia relativa de 130.45 por ciento.

Liang *et al* (1969) estimaron la heredabilidad y las relaciones entre las características agronómicas de sorgo para grano, en las que encontraron que los índices de selección, contruidos usando varias combinaciones, demostraron que la

selección para rendimiento puede ser más efectiva si son utilizadas combinaciones relacionadas con rendimiento en relación a otras que no lo estén. Además, observaron que los índices fueron menos efectivos al seleccionar para proteína cuando el contenido de esta no fue incluido en el índice.

Valencia y Vargas (2001) realizaron un estudio en una variedad de pino y determinaron la calidad de la madera y los caracteres que inciden en la misma, para lo cual utilizaron índices de selección basados en la biomasa y la densidad de la madera y encontraron que es posible reducir la densidad de la madera de -0.43% a -0.38% a través del índice de selección restringido de Kempthorne y Nordskog (1969). Lo anterior se observó al incluir caracteres como altura de la planta y la biomasa los cuales tienen alta heredabilidad y una correlación genética negativa, permitiendo un incremento de 6.08% de volumen de madera y de biomasa.

López (2010) evaluó las cruzas posibles de once poblaciones de maíz con base en rendimiento y otras características fenotípicas las mismas que permitieron hacer uso de los índices de selección y poder así clasificar las cruzas más sobresalientes para algunos ambientes específicos.

Cerón *et al* (2006) propusieron un método sobre índices de selección llamado análisis eigen (ESIM) en el cual el primer vector eigen es usado como un criterio en los índices de selección y sus elementos determinan la proporción de dicho carácter y su contribución al índice de selección los cuales son usados en la respuesta de selección. El método (ESIM) no requiere de la asignación de pesos económicos ni de la estimación de la matriz de las covarianzas genotípicas.

III. MATERIALES Y METODOS

MATERIAL GENETICO

El material genético utilizado en el presente trabajo fue derivado de la población panmítica NP3R – Texas en la localidad de Buenavista, Saltillo, Coah. En esta población se seleccionaron y etiquetaron aproximadamente 500 plantas con características agronómicas deseables, y que estas presentaron androesterilidad en la floración, por lo que cada panoja de las plantas seleccionadas en campo constituyó una familia de medios hermanos (MH). Al llegar las plantas a su madurez se cosecharon las panojas y se embolsaron individualmente. En bodega se hizo una reelección de las familias de Medios Hermanos (MH) desechando aquellas que presentaban mal aspecto, pocos granos, dañados por plagas y enfermedades, etc., quedando finalmente un total de 200 familias las cuales constituyeron el material del presente estudio.

DISEÑO Y PARCELA EXPERIMENTAL

Este experimento incluyó 200 tratamientos (200 familias de medios hermanos) los cuales fueron evaluados en dos localidades durante 2015. El diseño experimental utilizado fue bloques incompletos al azar con dos repeticiones; debido a lo grande del experimento las familias fueron agrupadas en 10 grupos de 20 familias cada uno.

La parcela experimental para cada localidad estuvo constituida por un surco de 3 metros de longitud y una separación de 0.80 metros entre surcos, dando una superficie de 2.40 m² por parcela experimental, con aproximadamente 60 plantas por parcela. En la cosecha se tomó parcela útil a las plantas establecidas dentro de la

superficie de un metro de la parte central de la parcela experimental (surco), por lo que el área de la parcela útil fue de 0.8 m²

Descripción de las Áreas de trabajo

La localidad de Buenavista, Coah., corresponde al campo experimental de la Universidad Autónoma “Agraria Antonio Narro” situada a 8 kilómetros al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila, entre las coordenadas geográficas 25°22′00″ latitud norte y 101°02′00″ longitud oeste, con una altitud de 1743 msnm. Esta localidad presenta un clima clasificado como muy seco, semicálido con invierno fresco muy extremo, con lluvias de verano y precipitación invernal superior al 10% del total anual. Además, presenta un suelo xerosol háplico asociado con fozem calcárico de textura fina. Durante el ciclo de cultivo (junio a noviembre) de los materiales, se presentó una precipitación de 457 mm de lluvia, siendo los meses de julio, agosto y septiembre los de mayor precipitación con un total de 146.6, 103.5 y 148.0 mm, respectivamente.

La localidad de La Morita, Municipio de General Cepeda, Coah., se localiza a 7 kilómetros General Cepeda, Coah., sobre la carretera General Cepeda Parras, Coah., entre las coordenadas geográficas 25°24′00″ latitud norte y 101°29′00″ longitud Oeste, con una altitud de 1405 msnm. Esta región presenta un clima seco con temperatura media anual entre 18 y 22°C, el suelo es xerol haplico de textura media, la región presenta terrenos planos a ligeramente ondulado (pendientes menores de ocho porcientos). La precipitación desde la siembra a la cosecha fue de 567 mm, en el que mes de mayor precipitación fue julio con un total de 105 mm.

Preparación del Terreno

En las localidades se realizaron labores, como barbecho para incorporar al suelo los residuos del cultivo del ciclo anterior, aflojar la tierra para facilitar el crecimiento y desarrollo de la raíz, obtener una mejor retención del agua de riego y

exponer a factores climáticos las plagas del suelo. Posteriormente se realizaron dos pasos de rastra con el fin de deshacer los terrones y de esta forma obtener una buena cama de siembra para obtener una mejor germinación y establecimiento del cultivo. El siguiente paso fue el surcado del terreno para terminar las labores de pre siembra.

Siembra.

La siembra del experimento se realizó el 31 de mayo y el 28 de abril de 2015 en Buenavista y la Morita, respectivamente, la cual se hizo en seco en forma manual, sembrando la semilla a chorrillo en un surco por parcela, depositando arriba de 60 semillas por surco.

En cada surco se realizó un aclareo cuando las plantas alcanzaron una altura de 15 centímetros aproximadamente, dejando 60 plantas como máximo por parcela a una distancia de cinco centímetros entre planta y planta.

Fertilización.

El experimento se fertilizó con la fórmula 140-60-00 por hectárea, donde la fuente de nitrógeno usada fue la urea al 46% y la fuente de fósforo fue el superfosfato triple de calcio al 46%. La fertilización se realizó en dos aplicaciones, la primera se hizo al momento de la siembra, aplicando la mitad del nitrógeno y el total del fósforo de la fórmula de fertilización. El resto del nitrógeno se aplicó en la primera escarda.

Riesgos.

Una vez sembrado el experimento en las localidades, inmediatamente se dio el primer riesgo de nacencia, posteriormente se dieron los riesgos necesarios para mantener la humedad adecuada para el desarrollo de las plantas. En la Morita se aplicaron dos riesgos de auxilio a 47 y 64 días del primero. En Buenavista se dio un

solo riego de auxilio a 24 días del primero. El número de riesgos de auxilio dependieron de las precipitaciones presentadas durante el ciclo del cultivo.

Labores de cultivo.

En las localidades se realizaron las demás labores correspondientes al manejo de cultivo, tales como aclareo, deshierbes y escardillado.

Combate de plagas.

En nuestro experimento hubo necesidad de aplicar Sevin al 80% PH para combatir daños del gusano cogollero, a la vez fue necesario cubrir las panojas de la parcela útil para evitar el daño por pájaro.

Cosecha.

La cosecha se realizó en La Morita y Buenavista después de 156 días y 181 días respectivamente.

Variables Agronómicas Medidas

Durante el desarrollo del cultivo fueron tomados los datos siguientes, los cuales se hicieron en las plantas de la parcela útil experimental para evitar errores de muestreo:

1. Días de floración. Se consideró de acuerdo al número de días transcurridos desde la siembra hasta que el 50% de las plantas de cada parcela mostraran antesis y presentaban estigmas receptivos.
2. Altura de planta. Se tomó en base al promedio de 20 plantas tomadas al azar en cada parcela, considerando la distancia en centímetros entre la superficie del suelo y el ápice de la panoja de cada planta.

3. Excerción. Se consideró como la distancia promedio de 20 plantas, tomada desde la base de la vaina de la hoja bandera a la base de la panoja y se expresó en cm.
4. Longitud de panoja. Se refiere a la longitud promedio total de panojas cosechadas por parcela útil, medida desde la base de la panoja hasta el ápice de la misma.
5. Peso de granos por panoja. Se consideró como el peso en gramos del total de granos cosechado por parcela útil divididos entre el número total de panojas cosechadas.
6. Número de granos por panoja. Se realizó desgranando el total de panojas cosechas por parcela útil, contándose el número total de granos (en base a volumen) dividiéndose entre el total de panojas desgranadas.
7. Peso de mil granos. Se tomó como el peso en gramos de mil granos contados al azar de cada una de las familias cosechadas.
8. Rendimiento. Se determinó como el peso en gramos del total de granos cosechados por parcela útil.

Se pesó el grano de cada una de las parcelas útiles y se multiplicó por el factor de corrección y este fue dividido entre 1000 y posteriormente expresarlo en toneladas por hectárea.

$$FC = \frac{10,000m^2}{(LS) * (DS)}$$

Dónde:

Fc= Factor de corrección

10,000m²= Superficie de una hectárea

D.S.= Distancia entre surcos

L.S.= Largo del surco.

Análisis estadístico

Análisis de varianza y covarianza.

El análisis de varianza para cada una de las variables en estudio fue combinado en dos localidades, dos repeticiones y diez grupos: realizándose en base al siguiente modelo lineal:

$$Y_{ijkl} = \mu + L_l + R_{jl} + G_k + (GL)_{kl} + G * R/L + F_{ik} + (FL)_{ilk} + E_{ijkl}$$

Donde:

i = 1, 2, ..., f (familias)

J = 1, 2, ..., r (repeticiones)

K = 1, 2, ..., g (grupos)

l = 1, 2, ..., m (localidades)

Y_{ijkl} = observación de la i-ésima familia, de la j-ésima repetición, del k-ésimo grupo en la l-ésima localidad.

μ = media general.

L_l = efecto de la l-ésima localidad.

R_{jl} = efecto de la j-ésima repetición anidada en la l-ésima localidad

G_k = efecto del k-ésimo grupo.

(GL) kl = efecto de la interacción del k-ésimo grupo con la l-ésima localidad.

$G * R/L$ = efecto de la interacción del k-ésimo grupo con la j-ésima repetición anidada en la l-ésima localidad.

F_{ik} = efecto de la i-ésima familia anidada en el k-ésimo grupo.

(FL) ilk = efecto de la interacción de la i-ésima familia anidada en el l-ésimo grupo en la k-ésima localidad.

E_{ijkl} = error experimental.

Asumiendo con este modelo que:

$$F_{ik} \sim (0, \sigma^2_f) \quad \text{y} \quad E_{ijkl} \sim (0, \sigma^2_e)$$

El análisis de varianza combinado apropiado para los 10 grupos en las dos localidades se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Análisis de varianza combinado de los 10 grupos en las dos localidades.

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	CUADROS MEDIOS	ESPERANZAS DE LOS CUADROS DE MEDIOS
L	$(l - 1)$		
R/L	$(r - 1) l$		
G	$(g - 1)$		
G*L	$(g-1) (l-1)$		
G*R/L	$(g-1) (r-1) l$		
F/G	$(f-1) g$	M_3	$\sigma^2_e + r \sigma^2_{fl} + rl \sigma^2_f$
F*L/G	$(f-1) (l - 1) g$	M_2	$\sigma^2_e + r \sigma^2_{fl}$
ERROR	$(f-1) (r-1) l g$	M_1	σ^2_e
TOTAL	$(fgr-1)$		

L = localidades; R = repeticiones; G = grupos y F = familias

Estimación de Componentes de Varianza.

La varianza fenotípica de cada caracter en base a la media de entrada, se estimó de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\sigma^2_p = \frac{M_3}{rl}$$

Con lo que respecta a la varianza genética entre familias se obtuvo por medio de la fórmula:

$$\sigma^2_f = \frac{M_3 - M_2}{rl}$$

Se llevó a cabo también un análisis de covarianza para cada combinación de los caracteres, en el Cuadro 2 se presentan las fuentes de variación y esperanzas de los productos cruzado medios.

Cuadro 2. Análisis de covarianza combinado de los 10 grupos en las dos localidades.

FUENTE DE VARIACION	GRADOS DE LIBERTAD	PRODUCTOS CRUZADOS MEDIOS	ESPERANZAS DE LOS PRODUCTOS CRUZADOS MEDIOS
L	(l - 1)		
R/L	(r - 1)l		
G	(g - 1)		
G*L	(g-1) (l -1)		
G*R/L	(g-1) (r-1) l		
F/G	(f-1) g	M _{3xy}	$\sigma_{e xy} + r\sigma_{fl xy} + rl\sigma_{f xy}$
F*L/G	(f-1) (l-1)g	M _{2xy}	$\sigma_{e xy} + r\sigma_{fl xy}$
ERROR	(f-1) (r-1) lg	M _{1xy}	$\sigma_{e xy}$
TOTAL	(fglr-1)		

Análisis de covarianza

En cuanto a las covarianzas fenotípicas, se denominará como $\sigma_{P_{xy}}$ al valor estimado de la covarianza entre los caracteres x e y, la estimación de dicho parámetro se realizó de acuerdo a la siguiente expresión.

$$\sigma_{P_{xy}} = \frac{M_{3xy}}{rl}$$

Para las covarianzas genotípicas se usará $\sigma_{g_{xy}}$ para denotar la estimación de la covarianza genotípica entre los caracteres x e y, la cual es obtenida mediante la fórmula siguiente.

$$\sigma_{g_{xy}} = \frac{M_{3xy} - M_{2XY}}{RI}$$

Las correlaciones tanto fenotípicas (y_{pxy}) como genotípicas (y_{gxy}) fueron calculadas bajo las expresiones siguientes:

$$y_{pxy} = \frac{\sigma_{P_{xy}}}{\sigma_{P_x} \sigma_{P_y}}$$

$$y_{gxy} = \frac{\sigma_{g_{xy}}}{\sigma_{g_x} \sigma_{g_y}}$$

Índices de selección

Los índices de selección se construyeron de acuerdo a los principios establecidos por Smith (1936) y Hazel (1946) donde mencionan además que para obtener los índices de selección es necesario obtener información sobre: (a) valores económicos de cada carácter, y (b) varianzas y covarianzas y tanto fenotípicas como

genotípicas de cada caracter y cada par de caracteres respectivamente. De acuerdo a sus principios cada genotipo presenta un valor genético agregado (H) definido por la siguiente expresión.

$$H = a_1G_1 + a_2G_2 + \dots + a_mG_m$$

Donde G_i es el valor genotípico o el valor reproductivo para el i -ésimo caracter y a_i su respectiva ponderación económica.

En el caso de que un caracter no tenga el valor económico, su coeficiente a_i será igual a cero.

Un índice de selección (I), es una función de los valores genotípicos para un cierto número de caracteres y está definido por la siguiente expresión.

$$I = \sum_{i=1}^n b_i p_i$$

Donde:

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

b_i = ponderación para el i -ésimo caracter.

P_i = valor fenotípico para el i -ésimo caracter.

Se deben encontrar valores b_i , tales que maximicen las correlaciones entre el valor genético agregado (H) y el índice (I), esto equivale a maximizar la ganancia genética con el uso del índice.

Una relación que maximiza la ganancia genética la reporta Harris (1964) bajo la siguiente fórmula.

$$\sum_i b_i \sigma_{P_i} = \sigma_t H$$

Donde:

$t = 1, 2, \dots, n$ (características)

σ_{Pit} = covarianza entre el i -ésimo y t -ésimo valores fenotípicos

σ_{tH} = covarianza entre el i -ésimo y t valor genético agregado.

En el presente trabajo sólo se consideró al rendimiento como parte del valor genético agregado, con una ponderación económica de uno. Las otras variables, número de granos por panoja y peso de mil granos recibieron un valor económico de cero. Una gran cantidad de fitomejoradores se ven limitados en la asignación de pesos económicos específicos, en este sentido Pesek y Baker (1969) proponen substituir los pesos económicos específicos por ganancias genéticas deseadas. Por otra parte, Cerón y Sahagún (2005) presentan una nueva alternativa de índice de selección utilizando el primer componente principal asociado con la matriz de covarianzas fenotípicas. El cual no requiere el uso de pesos económicos ni de varianzas y covarianzas genotípicas para la construcción de índices de selección y se esperan ganancias genéticas mucho mayores.

De tal forma que el valor genético agregado para cada familia de medios hermanos quedó reducida a:

$$H = Gr$$

Donde Gr es el valor genotípico promedio para el rendimiento de una familia. Así, la expresión que maximiza la ganancia genética esperada se puede expresar como:

$$\sum_{i=1}^n b_i p_i = Gtr \quad t = 1, 2, \dots, n$$

Las ecuaciones simultáneas para obtener los coeficientes bi expresadas de la siguiente forma (Hazel, 1943).

$$b_1P_{11} + b_2P_{21} + \dots + b_nP_{n1} = G_{1r}$$

$$b_1P_{12} + b_2P_{22} + \dots + b_nP_{n2} = G_{2r}$$

$$b_1P_{1n} + b_2P_{2n} + \dots + b_nP_{nn} = G_{nr}$$

donde P_{ij} es la covarianza fenotípica entre los caracteres i y j , y G_{ir} es la covarianza genotípica entre el carácter i y el rendimiento. En el caso de que ambos subíndices correspondan al mismo carácter P_{ij} representa la varianza fenotípica y G_{ir} la varianza genética. En forma matricial los parámetros genotípicos y fenotípicos de las variables en cuestión se pueden representar con el siguiente set de ecuaciones $\mathbf{W}\mathbf{a} = \mathbf{v}\mathbf{b}$ (Smith, 1936).

Donde, \mathbf{W} = es la matriz genética de varianzas y covarianzas, \mathbf{a} = pesos económicos, \mathbf{v} = es la matriz fenotípica de varianzas y covarianzas y \mathbf{b} = vector de coeficientes parciales de regresión.

Los coeficientes parciales de regresión (\mathbf{bi}) fueron estimados mediante la siguiente ecuación $\mathbf{b} = \mathbf{w} \mathbf{a} \mathbf{v}^{-1}$ los mismos que fueron utilizados para construir los índices de selección. En el entendido que los valores de \mathbf{bi} son los que maximizan la correlación entre los valores genotípicos y fenotípicos.

La ganancia genética por ciclo de selección para cada índice se calculó de acuerdo a la siguiente expresión reportada por Harris (1964). Donde K es el diferencial de selección en unidades de desviación estándar y el control parental tomando como unidad de selección a la familia de medios hermanos es igual a uno:

$$\Delta H = K \left[\text{Cov} (H, I) \right]^{1/2}$$

$$\Delta H = K \left[\sum_{i=1}^n b_i p_i = G_{tr} \right]^{1/2}$$

Para calcular eficiencia relativa (E.R) de cada índice, se dividió la ganancia genética esperada por ciclo para dicho índice entre la ganancia genética esperada cuando se consideró únicamente al rendimiento como criterio de selección.

En cuanto a la importancia relativa de un caracter en la selección se tomó el criterio propuesto por Reyes (1985) en el cual toma como base el incremento en ganancia genética predicha que se obtiene con la adición de un caracter en un índice, donde la fórmula queda expresada de la manera siguiente:

$$Imr (Xi) = \left[\frac{E.R. (A) - E.R. (A - Xi)}{\sum_{j=1}^n E.R. (A) - E.R. (A - Xj)} \right] * 100$$

Donde:

$$i = 1,2,\dots,n$$

$$j = 1,2,\dots n$$

E.R. (A) = eficiencia relativa del índice I (A)

E.E. (A-Xi) = eficiencia relativa del índice I (A-Xi)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El presente estudio no es ajeno a la presencia de la interacción genotipo ambiente (G*E) ya que la evaluación de las familias de sorgo de medios hermanos fue en dos ambientes de prueba, por lo que la respuesta de los genotipos esta acondicionada por una gran cantidad de factores del micro y macro ambiente tales como profundidad de semilla, gradientes de humedad y fertilización, temperatura, precipitación, plagas y enfermedades, entre otros. Lo anterior es soportado por una gran cantidad de investigadores que han utilizado diferentes métodos para identificar los genotipos más estables y de mayor adaptabilidad (Comstock y Moll, 1963., Finlay y Wilkinson, 1963., Eberhart y Russell, 1966., Gauch, 1988 y Crossa, 1990).

En este estudio se tomarán únicamente las fuentes de variación L (localidades), F/G (familias dentro de grupo) y FL/G (familias por localidad dentro del grupo) por ser estas fuentes las más importantes, ya que presentan los ambientes, las familias y el comportamiento de estas últimas en los ambientes (interacción genotipo – medio ambiente).

Días a floración

En esta variable se obtuvo una diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) para la fuente localidades, lo cual indica que el material genético se comportó de manera muy diferente en las dos localidades evaluadas. Esto se aprecia claramente en el Cuadro 3 donde la localidad Buenavista tiene una media de 94 días a floración y la localidad La Morita presenta una de 76. Estas diferencias pudieron ser debidas a que el material genético es afectado grandemente por los factores ambientales de las distintas localidades, o también pudo ser debido a que la siembra se realizó en diferentes fechas en cada localidad.

La fuente familias dentro de grupos presenta una diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) por lo tanto, se asume que las familias presentan amplia variabilidad genética entre sí dentro de los grupos, se observa un rango de 78 a 91 días a floración. Dichas variaciones permitirán dirigir la selección hacia materiales precoces, intermedios o tardíos.

Asimismo, se obtuvo una diferencia altamente significativamente ($P \leq 0.01$) para la fuente familias por localidades dentro de grupo, al respecto se infiere que las familias de la localidad Buenavista se comportaron de manera diferente a las de la localidad la Morita, lo cual pudo ser debido a los ambientes de las localidades, o bien a las fechas de siembra las que originó diferente respuesta en floración.

El promedio general de esta variable fue de 85 días a floración con un coeficiente de variación de 2.82 por ciento, este coeficiente da un amplio margen de confiabilidad. Sin embargo, debe manejarse bajo ciertas reservas debido a que a nivel de campo difícilmente se pueden controlar la mayoría de los factores ambientales que en la mayoría de las veces son los causantes de la variación.

Altura de planta

Para esta variable la fuente de variación de localidades mostró no significancia, lo cual indica que la altura de planta de las familias es igual estadísticamente en ambas localidades. Sin embargo, se denota que las alturas promedias por localidad fueron de 118 y 133 cm para Buenavista y la Morita, respectivamente.

Las familias dentro de grupo resultaron con una diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) situación que indica que la altura de planta de las familias es altamente variable entre sí, lo cual era de esperarse si asumimos que los medios hermanos fueron derivados de una población panmíctica. En un trabajo realizado por Olmos (1989) hace mención que la altura de planta es muy importante en el cultivo de sorgo para grano y forraje por lo tanto se debe tomar en cuenta según el uso que se vaya a dar, para producción de grano se recomienda plantas de porte intermedio o

bajo debido a que con ello se puede aumentar la densidad de siembra y por ende el rendimiento, por otra parte, las plantas de porte alto producen mayor cantidad de forraje.

La fuente de variación familias por localidad dentro de grupo arrojó una diferencia no significativa, circunstancia que señala que las familias de la localidad Buenavista, se comportaron de igual forma que en la localidad La Morita, por lo que se asume que la altura de planta de las diferentes familias no fue afectada por las localidades ni por los grupos.

Se observó un coeficiente de variación de 8.37 por ciento, el cual es considerado como bueno y debido a que esta variable es de alta heredabilidad fue poco afectada por el ambiente.

Excerción

La fuente de variación localidades mostró diferencia significativa ($P \leq 0.05$), indicando que la excerción de la panoja de las familias varía ligeramente en las localidades de prueba según el análisis estadístico, aunque se observa gran diferencia entre dichas localidades, siendo en promedio de 8 cm para Buenavista y 22 cm para la Morita.

Por lo que respecta a familias dentro de un grupo, esta presentó una diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) con esto se deduce que la excerción de la panoja de las familias dentro de los grupos fue considerablemente variable por lo tanto existe variabilidad genética en esta población. Lo anterior permite seleccionar familias con una excerción que facilite la buena cosecha mecánica, o aquellas que eviten la pudrición del grano por lluvia debido a que presentan la hoja bandera envolviendo o muy cerca de la panoja.

La fuente familias por localidad dentro de grupo resultó ser altamente significativa ($P \leq 0.01$) esto era de esperarse debido a que la excerción de las familias

dentro grupos fue altamente significativa, por lo tanto, la variación en la excerción es muy considerable en esta interacción.

El coeficiente de variación fue de 17.55 porciento, se considera dentro de los límites de confiabilidad dicho valor nos permite confiar en los resultados de las estimaciones de esta variable.

Longitud panoja

Por lo que respecta a localidades esta variable presentó no significancia, con lo que se asume que el ambiente no es factor limitante en cuanto a la longitud de panojas, con una diferencia de 4 cm, siendo el promedio de 22 cm para la localidad Buenavista y de 26 cm para La Morita.

En cuanto a familias dentro de un grupo, hubo una diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) situación que indica que la longitud de panoja de las familias en los grupos es muy diferente entre sí y que existen diferentes genotipos en la población evaluada, oscilando entre 20 a 39 cm; valores que permiten seleccionar familias de panojas largas, media y cortas.

La fuente de variación familias por localidad dentro de grupo resultó no significativa, esto indica que las familias para longitud de panoja no fueron afectadas por los grupos ni por las localidades. Su coeficiente fue de variación de 12.09 porciento, dicho coeficiente nos da suficiente confiabilidad en las estimaciones hechas para dicha variable.

Peso de granos por panoja.

Esta variable no mostró significancia en la fuente de variación localidades, lo cual lleva a pensar que el peso de granos por panoja no es afectado

por las diferentes localidades obteniéndose para un valor de 19 gramos, y La Morita, de 13 gramos.

Las familias dentro de un grupo resultaron altamente significativas ($P \leq 0.01$) indicando alta variabilidad genética en la población, con la posibilidad que el mejoramiento se puede encaminar a materiales con mayor peso de granos por panoja. Por otro lado, la fuente familia por localidad dentro de grupo mostró no significancia, lo que indica que las familias se comportaron de igual forma, tanto en Buenavista, como en La Morita, y que el ambiente no afecta a esta variable, por lo que es indiferente hacer la selección en cualquiera de las localidades. Su coeficiente de variación fue del orden de 41.55%, el mismo que se considera muy alto y pudo ser consecuencia a que esta variable es de herencia compleja y por lo tanto fuertemente afectada por el ambiente.

Número de granos / panoja

La fuente localidades para número de granos/panoja fue altamente significativa ($P \leq 0.01$) lo cual indica que la población estudiada tuvo comportamientos muy diferentes en la localidad Buenavista y en la localidad La Morita, cuyas medias fueron 956 granos/panoja y la segunda 598 granos/panoja. El bajo rendimiento observado en La Morita era de esperarse ya que se presentó ataque de mosca Midge en la etapa de floración afectando fuertemente a esta variable. Salcedo y colaboradores (2012) realizaron un estudio en sorgo y determinaron que la presencia de la mosca Midge ocurre de 3 a 6 días una vez que se establece la floración y observaron que no era rentable y conveniente aplicar insecticidas después de que se haya alcanzado el 50% de la floración, siempre y cuando haya una cantidad considerable de este patógeno.

Por lo que respecta a familias dentro de grupos se obtuvo diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) por lo que se asume que las familias anidades en los grupos presentan un diferente comportamiento para esta variable se observó un rango de 420 a 1272 granos/panoja, mostrando una diferencia de 831.18 granos en la panoja,

permitiendo manejar la selección en base a familias de alto número de grano por panoja.

Familias por localidad dentro de un grupo, mostraron diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) esto significa que las familias en los grupos en Buenavista se comportaron muy diferente a La Morita, resultado que era predecible, ya que esta viable, es un componente del rendimiento y fue afectada grandemente por el ambiente. La literatura reporta que en algunas ocasiones el daño por mosca Midge alcanza hasta 90%, afectando enormemente al rendimiento de grano Salcedo y colaboradores (2012).

Su coeficiente de variación fue de 29%, coeficiente moderadamente alto ya que es una variable afectada grandemente por el ambiente.

Peso de mil granos

Para esta variable se observó no significancia entre localidades con un promedio para Buenavista de (20 gramos) y para La Morita de (23 gramos) indicando que son estadísticamente iguales, donde se asume que el material en general no es afectado por el ambiente de evaluación. La fuente de variación familias dentro de grupo mostró una diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) por lo que se infiere que el peso de mil granos es muy variable entre las familias de cada grupo, circunstancia que se puede manejar para identificar las mejores familias del programa de sorgo para futuras evaluaciones. En este sentido la variable obtuvo una media general de 21 granos y un rango de 15 a 27 gramos.

En cuanto a familias por localidad dentro de un grupo, resultó no significancia, por lo cual se puede asumir que las familias en los grupos mostraron estabilidad para el peso de mil granos en las localidades de prueba.

El coeficiente de variación fue de 13%, el cual da un buen grado de confiabilidad de los resultados obtenidos de las estimaciones donde se involucre esta variable.

Rendimiento de grano

La fuente de variación de localidades mostró una diferencia significativa al ($P \leq 0.05$) por lo que se infiere que el comportamiento de las familias de medios hermanos fue diferente obteniéndose un promedio de 595 g/p.u. para Buenavista y de 153 g/p.u. para La Morita. En este sentido familias dentro de grupo, mostró una diferencia altamente significativa ($P \leq 0.01$) circunstancia que indica una amplia variabilidad para la construcción de los índices ya que la ganancia genética está en función de su variabilidad genética (Hazel, 1943).

Las familias mostraron un rango de rendimiento de 126 a 616 g/p.u., con una diferencia de 490 g/p.u., hecho que pudiera catalogarse como lógico debido a que esta variable está controlada por una gran cantidad de genes y el potencial que existe para identificar mejores familias de medios hermanos. Por otro se detectó la interacción de familias por localidad dentro de grupo el cual fue altamente significativa ($P \leq 0.01$) lo que indica que las familias dentro de un grupo en Buenavista variaron notoriamente en comparación a La Morita. Resultado esperado ya que esta variable es altamente influenciada por el ambiente por el número de genes que lo controlan. Resultados similares del efecto de genotipos con el ambiente fueron observados por Reyes y colaboradores (2017) quienes evaluaron el comportamiento agronómico y la interacción genotipo x ambiente de ocho híbridos de maíz sembrados en cuatro fechas de siembra y tres años de cultivo con base al análisis de la interacción de efectos principales aditivos y multiplicativos (AMMI) y el modelo genotipo, genotipo x ambiente (GGA) Biplot. El análisis AMMI para rendimiento de grano indicó diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre híbridos y ambientes de prueba, el análisis GGE biplot indicó que DK-697 fue el híbrido con mayor rendimiento y mayor estabilidad. Las variables con mayor asociación al rendimiento de grano fueron peso de mazorca, altura de planta, relación de altura de planta/mazorca y número de mazorcas sanas que explicaron 86% de la variación. En otro trabajo, Mejía (2014) evaluó nueve materiales de algodón transgénico en diez localidades. Los resultados mostraron una respuesta diferencial entre las localidades con diferencias altamente significativas

($p \leq 0.01$). Para la fuente de variación genotipos se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para todas las variables.

El promedio general para esta variable fue de 374 g/p.u. Su coeficiente de variación de 32.39 por ciento fue alto y pudo deberse a los efectos ambiente en los que se incluye el clima y suelo, al potencial genético de la población.

Cuadro 3. Datos promedio de rendimiento y otras variables agronómicas por localidades y grupos obtenidas en la evaluación de 200 familias de medios hermanos en Buenavista, Saltillo, Coah. Y la Morita, Gral. Cepeda, Coahuila 2015.

	DÍAS A FLOR	ALTURA DE PLANTA (cm)	EXCERCION (cm)	LONGITUD DE PANOJA (cm)	PESO DE GRANOS PANOJA (g)	GRANOS POR PANOJA	PESO DE MIL GRANOS (g)	RENDIMEINTO (g/p.u.)
LOC. BUENAVISTA	94.2	117.81	8.35	21.95	19.22	955.51	20.35	595.13
LOC. LA MORITA	76.44	132.90	22.23	25.66	13.44	594.71	22.50	153.30
GRUPO 1	84.90	131.40	15.71	23.49	14.36	678.32	21.77	345.19
GRUPO 2	85.85	127.20	16.83	23.71	15.75	730.10	22.10	393.71
GRUPO 3	85.25	134.94	15.39	24.01	17.87	810.53	22.19	405.53
GRUPO 4	84.55	133.53	16.77	23.86	17.03	811.34	21.97	369.67
GRUPO 5	85.34	127.17	13.93	22.92	13.74	665.92	20.50	336.94
GRUPO 6	86.65	127.26	16.14	23.85	15.76	770.61	21.21	396.97
GRUPO 7	85.58	119.94	15.18	23.81	18.23	920.95	20.76	392.04
GRUPO 8	85.39	118.30	14.19	23.96	14.38	730.27	21.12	315.97
GRUPO 9	85.63	120.88	15.09	23.56	17.02	820.81	20.80	379.99
GRUPO 10	84.34	112.95	13.67	24.85	19.16	812.25	21.75	406.12

Índices de selección, Avance Genético y Eficiencia Relativa

En el Cuadro 4 se muestran los coeficientes en los siete índices de selección formados para las tres variables estudiadas, número de granos/panoja, peso de mil granos y rendimiento de grano, así como su ganancia por ciclo y sus eficiencias relativas.

Las variables utilizadas para la construcción de los índices se eligieron por ser componentes del rendimiento y por sus correlaciones positivas con el rendimiento de grano (Hazel, 1943).

Por otro lado, se estimaron las varianzas y covarianzas, tanto fenotípicas y genotípicas las mismas que fueron utilizadas en la construcción de los índices de selección.

Se obtuvieron coeficientes, los índices fluctuaron de -0.0492 a 0.0112 para número de granos por panoja, mientras que para peso de mil granos fueron de 6.185 a 8.2517 y por lo que respecta a rendimiento de grano fueron del orden de 0.1021 a 0.1964.

En este sentido los índices construidos en forma individual como número de granos por panoja (1.76 g/p.u.), peso de mil granos (21.49 g/p.u.) y rendimiento de (17.89 g/p.u.) mostraron las menores ganancias genéticas. Lo anterior ha sido enfatizado por Falconer y Mackay (1996) al observar que la selección de plantas individuales en un solo carácter puede resultar en la pérdida de varianza genética en relación a otros caracteres de importancia específica en ambientes de poca productividad. Sin embargo, las mayores ganancias genéticas se computaron con el índice construido por las tres variables (24.068 g/p.u.), y por el índice formado con peso de mil granos con rendimiento (24.23 g/p.u.) los cuales difieren en solo 0.45 g/p.u. En un estudio realizado en soya por Costa et al., (2008) señalan que los modelos de Smith-Hazel y Pesek-Baker tuvieron ventaja sobre la selección directa para

rendimiento de grano dado que las ganancias se distribuyeron entre todos los caracteres y que el modelo de Smith-Hazel fue ligeramente superior que el de Pesek-Baker. Estos resultados coinciden con otras investigaciones quienes observaron que al incrementar el número de caracteres se observaron mayores ganancias genéticas predichas siempre y cuando estén correlacionadas Tucuch *et al.*, (2011). Por otro lado, Rodríguez y colaboradores (2013) utilizaron índices de selección al comparar variedades criollas de maíz y observaron que los índices de selección más eficientes incluyeron días a floración masculina, altura de planta y mazorca, longitud y diámetro de mazorca, así como rendimiento de grano. Por otro lado, Ghaed-Rahimi *et al.*, (2017) observaron que la respuesta correlacionada para peso de mil granos e índice de cosecha tuvieron un efecto importante en el incremento de rendimiento de grano en trigo bajo condiciones de sequía y que además las ganancias genéticas más altas fueron en rendimiento biológico, número de granos por espiga, rendimiento de grano, entre otros; bajo el modelo de Smith-Hazel.

En nuestro estudio se observó que el índice más eficiente fue el que incluyó las tres variables con una eficiencia relativa de 1.3799, lo anterior coincide con lo reportado por Young (1961) y Reyes (1985) al enfatizan que la eficiencia relativa aumenta con la adición de caracteres usados en el índice. Lo mismo fue observado por Taba *et al.*, (1998) al obtener mayores valores de eficiencia relativa en índices de selección al involucrar mayor número de caracteres correlacionados con rendimiento de grano. Sin embargo, el índice computado con peso de mil granos y rendimiento, muestra una eficiencia relativa de 1.3549, que es semejante a la anterior (1.3799), por lo que se puede pensar que las variables que influyen en la eficiencia del primer índice (1.3799) son el peso de mil granos y el rendimiento de grano.

Cuadro 4. Coeficiente de las variables X6, X7 y X8 para siete índices de la selección, utilizados para estimar la ganancia genética por ciclo ($\Delta H/K$) y sus eficiencias relativas (E.R).

INDICE	GRANOS POR PANOJA (g) X6	PESO DE MIL GRANOS (g/p.u.) X7	RENDIMIENTO (g/p.u.) X8	$\Delta H/K$	E.R.
I (6)	0.0087	-----	-----	1.76	0.0982
I (7)	-----	8.2316	-----	21.49	1.2016
I (8)	-----	-----	0.1532	17.89	1.0001
I (6, 7)	0.0112	8.2517	-----	21.61	1.2082
I (6, 8)	-0.0492	-----	0.1964	19.82	1.1080
I (7, 8)	-----	6.6667	0.1021	24.23	1.3549
I (6, 7, 8)	-0.0278	6.1856	0.1302	24.68	1.3799

Por otro lado, al comparar el índice construido sólo con número de granos por panoja mostró menor eficiencia relativa (0.0982) en relación a peso de mil granos (1.2016), lo anterior se debió a que granos por panoja tuvo una correlación genotípica baja con rendimiento de grano, la cual fue del orden de 0.1854, mientras que para peso de mil granos fue de 0.7633. En un estudio realizado por Lin (1978) indica que la eficiencia relativa del índice de selección depende de la estimación de la heredabilidad y de las correlaciones genéticas y fenotípicas entre los caracteres. En el Cuadro 5 se presentan las importancias relativas de los índices de selección, formados por dos y tres variables. Se observa que peso de mil granos en todos los índices donde se involucró presenta las mayores importancias relativas, siguiéndole el rendimiento y por último el número de granos por panoja. La importancia relativa más alta no sobrepasa el 10%, razón por la cual el índice formado por las tres variables no difiere mucho del índice que involucra solamente rendimiento y peso de mil granos.

CUADRO 5. Importancias relativas en la selección de los caracteres para cuatro índices de selección (expresadas en porcentajes).

INDICE	GRANOS POR	PESO DE MIL	RENDIMIENTO
I(6,7)	0.59	99.41	-----
I (6.8)	9.65	-----	90.35
I(7,8)	-----	69.83	30.17
I(6,7,8)	5.34	58.02	36.64

En el Cuadro 6 se muestran las 40 mejores familias seleccionadas bajo una intensidad de selección del 20% tomado como base al rendimiento de grano y los cuatro índices de selección. Se aprecia que el índice I(6.8),

selecciona el 58% (23 familias) y el índice I(6,7) selecciona el 62.5% (25 familias) y el índice I(7,8) el 78% (31 familias), todos comparados en relación a los materiales seleccionados por el índice I(6,7,8). Entriger *et al.*, (2016) encontraron una alta coincidencia entre el índice Pesek-Baker (1969) y la restricción máxima de probabilidad y la predicción lineal sin sesgo (REML-Restricted Maximum Likelihood / BLUP-Best Linear Unbiased Predictor) con un valor de (0.75) en relación al de Smith-Hazel y (REML / BLUP) de (.70) en la identificación de las mejores 20 progenies seleccionadas al considerar seis caracteres en forma simultánea. En el trabajo realizado por Ghaed-Rahimi *et al.*, (2017) concluyen que el índice PBI (Pesek-Baked Índice) fue superior al SHI (Smith-Hazel Índice) en la identificación de genotipos superiores basados en la selección de más de un caracter.

Con estos resultados y en base a las importancias relativas, se puede inferir que en un momento dado no es necesario formar un índice de selección con las tres características involucradas en el índice mayor, sino que se puede construir uno solamente con el peso de mil granos y rendimiento, ya que el número de granos por panoja.

Se observó poca importancia relativa en todos los índices donde se involucra, además seleccionaron el menor número de familias de medios hermanos en relación a los otros índices. Reyes (1985) señala la importancia relativa que tiene un valor práctico para decidir la inclusión o eliminación de un caracter en un índice de selección y argumenta que se deben corroborar llevando a cabo nuevas evaluaciones en los subsecuentes ciclos de selección.

Finalmente, al comparar las familias seleccionadas por los dos mejores índices I (7,8), I (6,7,8) contra las familias seleccionadas de forma directa para rendimiento, se puede observar que el primer índice selecciona el 40% (16 familias), y el segundo selecciona el 48% (19 familias). Es importante recalcar que a través de los índices de selección no solo se pudo identificar a las familias

más productivas, sino que también hubo una ganancia extra al seleccionar familias con mayor número de granos por panoja, así como para peso de mil granos y esto se debe a que estos últimos son componentes importantes en el rendimiento de grano.

CUADRO 6. Mejores 40 familias según los índices de selección I(6,7), I (6,8), I(7,8), I(6,7,8) y el rendimiento (6 = número de granos por panoja, 7 = peso de mil granos y 8 = rendimiento).

FAMILIA	VALOR INDICE 6,7	FAMILIA	VALOR INDICE 6,8	FAMILIA	VALOR INDICE 7,8	FAMILIA	VALOR INDICE 6,7,8	FAMILIA	RENDIMIENTO (g/p.u.)
34	225.0955	177	81.3888	34	228.0658	192	208.3747	177	615.68
192	223.8307	189	70.1730	192	225.8477	34	208.0640	60	577.35
134	222.8669	53	67.9028	60	222.9483	134	201.6144	184	565.55
79	216.8245	60	67.6663	134	222.9441	60	201.5001	101	554.40
180	215.0826	192	64.9058	79	216.4043	53	192.0339	179	541.90
60	213.4008	184	64.4017	184	211.0769	177	190.9700	53	536.50
15	213.1671	34	63.6167	53	209.2774	15	190.7761	187	531.28
75	211.1194	198	62.5875	15	208.3856	79	189.6528	189	531.25
73	210.5204	100	59.6533	75	207.8196	184	189.5316	27	524.35
178	209.7558	96	58.2064	24	206.8966	75	187.8706	107	524.23
14	208.4281	101	57.7100	177	206.3611	178	186.6685	34	523.00
56	207.9312	187	57.2322	195	206.0099	195	185.5227	197	516.33
40	207.7618	27	56.8118	178	206.0035	24	184.6135	161	509.25
190	206.3666	179	56.7962	73	205.6268	16	183.8919	130	502.83
195	206.1954	134	56.5269	49	205.1563	22	183.4770	22	501.68
128	205.7731	125	55.8312	22	204.7218	73	183.3821	192	501.28
8	205.6533	22	55.5860	16	202.6437	189	182.0816	79	495.30
70	204.8678	118	54.3207	40	201.9039	49	180.9602	24	495.23
48	204.8653	16	54.1770	27	201.3702	96	180.8707	134	492.43
49	204.8505	129	53.3329	70	201.1410	29	180.7556	125	485.18
23	204.2217	24	53.1642	187	201.0772	23	180.5405	47	478.88
144	204.1928	107	53.0665	56	200.3357	40	180.0139	64	748.00
124	203.5990	99	53.0369	14	200.1821	27	179.3478	198	473.23

Cuadro 6..... Continuación.

FAMILIA	VALOR INDICE 6,7	FAMILIA	VALOR INDICE 6,8	FAMILIA	VALOR INDICE 7,8	FAMILIA	VALOR INDICE 6,7,8	FAMILIA	RENDIMIENTO (g/p.u.)
42	202.4194	130	52.2953	42	199.2649	14	178.4351	129	470.20
133	201.1776	64	52.0703	180	198.5368	125	177.5766	172	467.53
41	201.0665	115	51.4906	161	198.4952	182	177.1576	7	461.05
16	200.9148	120	51.3783	47	199.2649	36	176.7615	16	460.10
184	200.4137	197	51.3256	7	198.5368	128	176.7899	99	459.83
28	200.3803	195	50.9243	90	198.4952	42	176.3026	29	456.55
18	200.1324	15	50.0501	125	198.3939	8	175.5658	100	456.38
68	200.1270	172	49.3746	23	198.0740	90	175.5387	195	455.53
76	199.9311	36	49.3002	189	197.1359	118	174.8154	120	455.10
22	199.7710	156	49.2425	101	196.8704	58	174.7248	115	454.18
53	199.7619	26	48.8130	128	196.8367	56	173.9785	77	451.78
29	198.5004	75	48.5868	77	196.7413	47	173.8496	156	450.35
164	197.7675	182	48.5781	36	195.9347	100	173.4609	84	449.05
90	197.2422	178	48.1552	96	195.4546	18	173.3634	32	444.80
143	197.0697	114	47.9130	159	194.8944	101	173.1650	159	444.60

V. CONCLUSIONES

1. Los índices de selección es una metodología eficiente que permitió identificar familias de medios hermanos de sorgo más productivas con mayor peso de mil gramos y número de granos por panoja.
2. Los mejores índices de selección al compararse directo con rendimiento de granos fueron aquellos que se construyeron con las variables (6, 7 y 8) y (7 y 8) identificando 19 familias de medios hermanos (48%) y 16 familias de medios hermanos (40%), respectivamente. Así lo demuestran las ganancias genéticas esperados por ciclo.
3. En la identificación de familias de medios hermanos de sorgo, los índices de selección más eficientes fueron aquellos que involucraron a las variables de peso de mil granos con rendimiento de grano.
4. Lo anterior probablemente se deba a que hay una relación entre peso de mil granos con rendimiento de granos, así lo demostró la correlación genética significativa (0.7633).

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Arévalo-Noboa, M. 1974. Estimación de parámetros genéticos y su uso en la construcción de índices de selección para rendimiento de grano en cebada maltera (*Hordeum vulgare* L.). Tesis que como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Chapingo, México.
- Célis, H. G., J. D. Molina., G, A. Martínez G 1986. Estimación de parámetros genéticos e índices de selección en la variedad de maíz Zac. 58 (*Zea mays* L.). *Agrociencia* 63:121-138.
- Cerón-Rojas, J. J. y Sahagún-Castellanos, J. 2005. Un índice de selección basado en componentes principales. *AGROCIENCIA. VOLUMEN 39, NÚMERO 6*.
- Cerón-Rojas, J.J., Crossa, J., Sahagun- Castellanos, J., Castillo-Gonzalez, F. and Santacruz-Varela, A. 2006. A selection index method based on eigen analysis. *Crop Sci.* 46:1711-1721.
- Crossa, J. 1990. Statistical analyses of multilocation trials. *Adv. Agron.* 44:55-85.
- Comstock, R.E., and R. H. Moll, 1963. Genotype-Environment interactions. In: Hanson. W.D. and Robinson, H.F., Eds., *Statistical Genetics and Plant Breeding*, NAS-NRC, Washinton DC, 164-196.
- Costa, M.M., Di Mauro, A.O., Uneda-Trevisoli, S.H., Arriel, N.H.C., Barbo, I.M. and Da Silveira, G.D. 2008. Analysis of direct and indirect selection and indices in soybean segregating population. *Crop Breed. Appl. Biot.* 8: 47-55.
- Eberthart, S.A., and W.A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Sci.* 6: 36-40.
- Entringer, G.C., Vettorazzi, J.C.F., Santos A, Pereira M.G, Viana, A.P. 2016. Genetic gain estimates and selection of S₁ progenies based on selection indices and REML/BLUP in super sweet corn. *Aust. J. Crop Sci.* 10:411-417.

- Falconer, D.S., and T.F.C. Mackay, 1996. Introduction to quantitative genetics. Ed 4. Longmans Green, Harlow, Essex, U.K.
- Finlay, K. W., and G.N. Wilkinson. 1963. The analysis of adaptation in a plant breeding programme. Aust. J. Agric. Res. 14: 742-754.
- Gauch, H.G., Jr. 1988. Model selection and validation for yield trials with interaction. Biometrics 44:705-715.
- Ghaed-Rahimi, L., B. Heidari and A. Dadkhodaie. 2017. Construction and efficiency of selection indices in wheat (*Triticum aestivum* L.) under drought stress and well-irrigated conditions. Plant Breed. Biotech. 5(2):78-87.
- Hanson, W. D. and H. W. Johnson. 1957. Methods of calculating a general selection index obtained by pooling information from two or more experiments. Genetics 42: 421-432.
- Harris, D.L. 1964. Expected and predicted progress from index selection involving estimate of population parameter. Biometrics 20: 46-72.
- Hazel, L.N., 1943. The genetic basis for constructing selection indices. Genetics 28:476-90.
- Hazel, L.N., and J. L. Lush. 1942. The efficiency of three methods of selection. J. Hered. 33:393-99.
- Hazel, L.N., 1946. The covariance analysis of multiple classification tables with unequal subclass numbers. Biometrics Bull 2:21-25.
- Kauffman, K.D., and J.W. Dudley. 1979. Selection indices for corn grain yield, percent protein, and Kernel depth. Crop Sci. 19:583-88.
- Kempthorne, O. and W. Nordskog. 1969. Restricted selection indices. Biometrics 15:10-19.

- Liang, H. L. G., C. B. Overley, and A. J. Casady. 1969. Interrelation among agronomic characters in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Crop Sci.* 9:299-302.
- Lin, C.Y. 1978. Index selection for genetic improvement of quantitative characters. *Theor Appl Genet.* 52:49–56.
- López – Hernández, A. 2010. Índices de Selección para la clasificación de once poblaciones de maíz y sus cruzas posibles. Requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Producción. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Manning, H.L. 1956. Yield improvement from a selection index technique with cotton. *Heredity* 10:303-322.
- Mejía-Salazar, J.R. 2014 Evaluación de la interacción genotipo por ambiente para variedades transgénicas de algodón *Gossypium hirsutum* L. Tesis de maestría, Facultad de ciencias agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Colombia.
- Miller, J. D., N.I. James and P.M. Lyrene 1978. Selection indices in sugarcane. *Crop Sci.* 18: 369-372.
- Olmos, T. O. 1989. Estimación de las correlaciones fenotípicas y genotípicas en características en Sorgo para grano (*Sorghum bicolor* L. Moench). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Tesis de Licenciatura. Buena Vista, Saltillo, Coahuila, México.
- Oyervides, G. M. 1979. Estimación de los parámetros genéticos, heterosis e índices de selección en variedades tropicales de maíz adaptadas a Nayarit. Tesis Maestría. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Pesek, J., and R. J. Baker. 1969. Desired improvement in relation to selection indices. *Canadian J. Plant Sci.* 49: 803-4.

- Rodríguez-Pérez, G., Zavala-García, F., Gutiérrez-Diez, A., Treviño-Ramírez, J.E., Ojeda-Zacarias, C. y De la Rosa-Loera, A. 2013. Comparación de dos tipos de selección en poblaciones de maíces criollos. Rev. Mex. Cienc. Agríc vol.4 no.4 Texcoco may/jun.
- Reyes, V.M.H. 1985. Índices de selección para rendimiento en girasol (*Heliantus annus* L.). Tesis de maestría UAAAN, Saltillo, Coahuila, México. 47p.
- Reyes-Méndez, C.A., Cantú-Almaguer, M.A., Gill-Langarica, H.R., García-Olivares, J.G., y Mayek-Pérez, N. 2017. Interacción genotipo*ambiente en maíz cultivado en Tamaulipas, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.8 Núm.3
- Salcedo, M., Barrera-Camacho, M.A., O-R, G.T. 2012. Economic thresholds of midge fly *Contarinia sorghicola* (Coq.) in sorghum at Valle de Apatzingan, Mich. AGRIS.
- Searle, S.R. 1965. The value of indirect selection. I. Mass selection. Biometrics. 21:682-707.
- Smith, H.F. 1936. A discriminant function of plant selection. Ann. Eugenics, 7:240-250.
- St. Martin, S.K. 1980. Selection indices for the improvement of Opaque-2 maize. Ph. D. dissertation. Iowa State Univ., Ames.
- Taba, S., Díaz, J., Franco, J. and Crossa, J. 1998. Evaluation of caribbean maize accessions to develop a core subset. Crop Sci. 38:1378-1386.
- Tucuch-Cauich, C. A., Rodríguez-Herrera, S. A., Reyes-Valdés, M. H., Pat-Fernández, J. M., Tucuch-Cauich, F. M. y Córdova-Orellana, H. S. 2011. Índices de selección para producción de maíz forrajero agronomía mesoamericana, vol. 22, núm. 1. 123-132.

Valencia-Manzo, S. y Vargas-Hernández, J. 2001. Correlaciones genéticas y selección simultánea del crecimiento y densidad de la madera en *Pinus patula*. AGROCIENCIA VOLUMEN 35, NÚMERO 1.

Wallace, A. T., G. K. Middleton. R. E. Comstock and H. F. Robinson. 1954. Genotypic variances of six quantitative characters in oats. Agr. Jour. 46: 484-88.

Young, S.S. Y. 1961. A further examination of the relative efficiency of genetic gains under less-restricted conditions. Genet. Res. 2:106-121.