

ENDOGAMIA Y PREDICCIÓN DE SINTÉTICOS DE MAÍZ DE CRUZAS DOBLES

INBREEDING AND PREDICTION OF MAIZE SYNTHETICS FROM DOUBLE CROSSES

Fidel Márquez-Sánchez

Centro Regional Universitario de Occidente, Dirección de Centros Regionales Universitarios, Universidad Autónoma Chapingo. Rosario Castellanos 2332, Col. Residencial La Cruz, Guadalajara, Jalisco. Tel. (33) 36467794.

* Autor para correspondencia (fidelmqz@hotmail.com)

RESUMEN

En la literatura se reporta la endogamia en sintéticos de maíz (*Zea mays* L.) hechos con cruza simple. Además, se ha calculado la endogamia y hecho la predicción del rendimiento en los sintéticos con cruza doble. En los países subdesarrollados, sin embargo, son más frecuentes las cruza doble que las cruza simple. Se espera además que la endogamia en aquéllos sea menor que en la de éstos. Aquí se muestra el cálculo de la endogamia de los sintéticos de cruza doble y la predicción de su rendimiento, con otro método.

Palabras clave: *Zea mays*, endogamia, cruza doble, predicción.

SUMMARY

The calculation of inbreeding of a maize (*Zea mays* L.) synthetic made with single crosses is reported in literature. Moreover, calculation of the inbreeding coefficient and yield prediction of synthetics have been reported for double crosses. In underdeveloped countries, however, double cross hybrids are mostly used. It is expected that inbreeding in synthetics made with double crosses is smaller than in synthetics from single crosses. In this paper the calculation for the inbreeding of synthetics made with double crosses as well as the equation for yield prediction, are shown by using a different method.

Index words: *Zea mays*, inbreeding, double crosses, prediction.

INTRODUCCIÓN

Se han propuesto el uso de variedades sintéticas de maíz (*Zea mays* L.) como alternativa del uso de híbridos para evitar el alto costo de la semilla de éstos. Así, en países subdesarrollados los agricultores hacen sintéticos a partir de compuestos de híbridos de cruza simple o de cruza doble. Como ha sido demostrado por Márquez-Sánchez (1992) y por Sahagún (1994), los sintéticos se pueden obtener con una sola generación de apareamiento

aleatorio de un compuesto de híbridos. De la segunda generación en adelante la semilla puede usarse directamente en la producción comercial, o bien puede avanzarse unas cuantas generaciones adicionales para producir la cantidad necesaria de semilla comercial. Como la endogamia de los sintéticos hechos con cruza simple ya ha sido calculada por Sahagún y Villanueva (1997) y Márquez-Sánchez (2007), y además Sahagún y Villanueva (2003) presentaron su resultado para los sintéticos de cruza doble, a continuación se desarrollará el cálculo de la predicción del rendimiento y de la endogamia para sintéticos hechos con cruza doble con un método diferente al de Sahagún y Villanueva (2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

El sintético de cruza doble se constituye por apareamiento aleatorio de un compuesto balanceado de las cruza doble involucradas. En el Cuadro 1, Cdp₁, Cdp₂, Cdp₃, etc., son los símbolos de las *n* cruza doble progenitoras, cada una con *m* plantas. Los números de apareamientos se muestran en el Cuadro 2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para construir la ecuación de predicción, el apareamiento aleatorio da lugar a las autofecundaciones S₁ con endogamia = 1/2; los cruzamientos dentro de una Cdp producen las cruza C'; la coancestría involucrada (row) tiene un valor de 1/4. Este valor es igual a la probabilidad de obtener líneas homocigóticas de la coancestría de AB/CD consigo misma, o sea la coancestría AB/CD//AB/CD = (AA + BB + CC + DD)/16 = 1/4. Fuera de las cruza del tipo C', se tienen las cruza C que son cruza cuádruples o cruza entre dos cruza doble. Por tanto, la predicción del rendimiento, de acuerdo con los Cuadros 1 y 2, es:

$$\begin{aligned} \text{SINT}(\text{Cd})_1 &= [S_1 + (m - 1)C' + m(n - 1)C]/nm \\ &= S_1/nm + C'/n - C'/nm, + C - C/n \\ &= C - (C - C')/n - (C' - S_1)/nm \end{aligned} \quad (\text{Ec. 1})$$

La endogamia promedio en la generación 1 es la coancestría promedio de la generación 0 que se obtiene al multiplicar las frecuencias codificadas por las coancestrías correspondientes (row = 1/4) y dividir entre el total codificado (Cuadro 1).

$$\begin{aligned} F(\text{SINTCd})_1 &= (1/nm)[1/2 (1 + F_0) + (m - 1)(1/4) \\ &\quad + m(n - 1)r_{\text{row}}]/nm \end{aligned}$$

Como usualmente las cruza dobles están hechas con líneas homocigóticas no emparentadas, entonces $F_0 = r_{0B} = 0$, por lo que:

$$\begin{aligned}
 F(\text{SINCd})_1 &= (1/2nm)[1 + 2(m - 1)/4] \\
 &= (1/4nm)(2 + m - 1) \\
 &= (1/4nm)(m + 1) \quad (\text{Ec. 2})
 \end{aligned}$$

Por su parte, Busbice (1969) estableció el valor genotípico de una población como $G_t = A + (1 - F_t)B$, en donde A es el valor aditivo de la población, y B el valor heterocigótico. Al aplicar este principio en la Ec. 1, se tiene:

$$\begin{aligned}
 \text{SINT}(\text{Cd})_1 &= A + (1 - F_c)B - \{[A + (1 - F_c)B - [A + (1 - F_{c'})B]]/n \\
 &\quad - \{[A + (1 - F_{c'})B] - [A + (1 - F_{s1})B]\}/nm \\
 &= A + (1 - F_c)B - \{[(1 - F_c) - (1 - F_{c'})]/n - (1 - F_{c'}) - (1 - F_{s1})\}/nm\}B \\
 &= A + (1 - F_c)B + F_c/n - F_{c'}/n - F_{s1}/nm + F_{c'}/nm]B \\
 &= A + (1 - F_c)B - [(F_{c'} - F_c)/n + (F_{s1} - F_{c'})/nm]B \\
 &= A + (1 - F_c)B - \{[m(F_{c'} - F_c) + (F_{s1} - F_{c'})]/nm\}B
 \end{aligned}$$

Cuadro 1. Apareamiento aleatorio entre n híbridos de cruz a doble cada uno con m plantas.

	(1) Cdp ₁				(2) Cdp ₂				(n) Cdp _n			
(1) Cdp ₁	1	2	3m	1	2	3m	1	2	3m
1	S	C'	C'	C'	C	C	C	C	C	C	C	C
2	C'	S	C'	C'	C	C	C	C	C	C	C	C
3	C'	C'	S	C'	C	C	C	C	C	C	C	C
.												
m	C'	C'	C'	S	C	C	C	C	C	C	C	C
(2) Cdp ₂												
1	C	C	C	C	S	C'	C'	C'	C	C	C	C
2	C	C	C	C	C'	S	C'	C'	C	C	C	C
3	C	C	C	C	C'	C'	S	C'	C	C	C	C
.												
m	C	C	C	C	C'	C'	C'	S	C	C	C	C
(n) Cdp _n												
1	C	C	C	C	C	C	C	C	S	C'	C'	C'
2	C	C	C	C	C	C	C	C	C'	S	C'	C'
3	C	C	C	C	C	C	C	C	C'	C'	S	C
.												
m	C	C	C	C	C	C	C	C	C'	C'	C'	S

C' = Cruzamientos del tipo Cdp₁-1 x Cdp₁-2; S = Autofecundaciones de los tipos 1 x 1, 2 x 2, ..., n x n; C = Cruzamientos del tipo Cdp₁ x Cdp₂.

Cuadro 2. Tipos generales de apareamiento, y sus números, frecuencias codificadas y coancestrías, correspondientes a la Figura 1.

Tipo de apareamiento	Números	Frecuencias codificadas [†]	Coancestrías ^{††}
Autofecundación (S _i)	nm	1	(1/2)(1 + F ₀)
Cruzamiento AB x AB	nm(m - 1)	(m - 1)	r _{ow} = 1/4
Cruzamiento AB x CD	nm ² (n - 1)	m(n - 1)	r _{OB}

[†] Con factor común nm , total $n^2 m^2$, total codificado nm

^{††} F₀ = Endogamia de las cruzas dobles igual a cero; r_{OB} = Coancestría entre dos cruza dobles progenitoras Cdp₁ x Cdp₂ igual a cero, para cruza no emparentadas.

Como F_c = 0, entonces:

$$\text{SINT}(\text{Cdi}) = A + B - [mF_c - F_c + F_{S_i}]/nm]B$$

y como F_c = 1/4 y F_{S_i} = 1/2, entonces:

$$\begin{aligned} \text{SINT}(\text{Cdi}) &= A + B - \{[(1/4)m - (1/4) + 1/2]/nm\}B \\ &= A + [1 - (m + 1)/4nm]B \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3})$$

La Ec. 3 es entonces que es otra forma de predicción del sintético de cruza dobles en la generación 1 que usa precisamente la endogamia dada en la Ec. 2. Por otra parte, si en la ecuación del coeficiente de endogamia se incrementa m , entonces el resultado se acerca a $1/4n$, que es la mitad de la endogamia con $m = 1$, igual a $1/2n$.

Se procederá primero a la obtención del coeficiente de endogamia, el que luego ayudará a discutir la predicción del rendimiento de los sintéticos. Según Márquez-Sánchez (1992), la endogamia de un sintético en la generación 1 es:

$$F(\text{SIN})_1 = (1/2nm)[1 + 2m(n - 1)r_{OB} + 2(m - 1)r_{ow} + F_0]$$

en donde r_{OB} es la coancestría entre las componentes del sintético, r_{ow} la coancestría dentro de cada componente, y F₀ la endogamia del sintético. La anterior ecuación aplicada a un sintético de cruza dobles queda como:

$$\begin{aligned} F(\text{SIN})_1 &= (1/2nm)(1 + F_0) + [(n - 1)/n]r_{OB} \\ &+ [(m - 1)/nm]r_{ow} \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4})$$

Como F₀ = 1, con las componentes no emparentadas, r_{OB} = 0, y en el sintético de cruza dobles r_{ow} = 1/4, entonces la ecuación queda como:

$$F(\text{SINTCd})_1 = (1/4nm)(m + 1) \quad (\text{Ec. 5})$$

que es la misma que la Ec. 2.

La predicción del rendimiento del sintético tendría que hacerse con la fórmula de Busbice (1970), que se muestra al final de este párrafo, ya que las predicciones que da este autor son siempre para la media de la segunda generación. Así, si en la generación 0 se tienen las componentes, en la generación 1 se tienen a las cruza posibles entre éstas, y en la generación 2, como resultado del apareamiento aleatorio de las plantas de la generación 1, se tiene el sintético propiamente dicho. Se tiene entonces a Y₂, Y₁ y Y₀ como las medias respectivas del sintético en las generaciones segunda, primera y cero, y F₂, F₁ y F₀ son sus respectivos coeficientes de endogamia, por lo que la predicción del sintético es:

$$Y_2 = Y_0 + [(F_0 - F_2)/(F_0 - F_1)](Y_1 - Y_0)$$

Pero en el caso de los sintéticos hechos con cruza dobles F₁ = F₀ = 0; por tanto, la predicción con dicha fórmula no procede. De manera que, como se señaló, la predicción tiene que llevarse a cabo con la Ec. 1.

La predicción de Sahagún y Villanueva (2003) es:

$$Y_2 = Y_1 - (Y_1 - Y_0)/4n \quad (\text{Ec. 6})$$

Se aplica a componentes con $4n$ líneas homocigóticas, que es cuando F_{2,CD} = $1/4n$.

Una ecuación generalizada, similar a la Ec. 1, fue encontrada independientemente por Márquez-Sánchez (1992a) y por Sahagún y Villanueva (1997). Márquez-Sánchez (1992a) hizo la deducción directamente, sin recurrir a gráfico alguno, para la predicción de compuestos varietales en los cuales también F₁ = F₀ = 0. En realidad, el que primero usó el auxilio gráfico fue Gilmore (1969) quien partió de n (en lugar de m , como en este escrito) plantas S₀, para llegar a la conclusión de que si en cada una de éstas se derivaban dos líneas homocigóticas, por ejemplo AA y BB de la planta AB, y si Y₀ es el rendimiento de las componentes del sintético en la generación 0, Y₁ el rendimiento de las cruza posibles entre las líneas en la generación F₁ y Y₂ el rendimiento del sintético en la generación F₂, entonces la predicción del sintético así formado sería:

$$Y_2 = Y_1 - (Y_1 - Y_0)/2n \quad (\text{Ec. 7})$$

El resultado de la Ec. 7 fue encontrado por Sahagún y Villanueva (1997) y por Márquez-Sánchez (2007) para el caso de cruza simples. En forma similar, si se tienen las cuatro líneas endogámicas de cada Cdp, entonces la predicción del sintético sería la mostrada en la Ec. 6; pero como se ha señalado, en esta ecuación $4n$ es el coeficiente de endogamia de los sintéticos con $4n$ líneas.

Si en la Ec. 5, del coeficiente de endogamia con cruza dobles, m fuera igual con uno, el resultado sería también: $Y_2 = Y_1 - (Y_1 - Y_0)/2n$; es decir que Gilmore (1969) sólo consideró, justamente, también una sola planta por cruza simple.

Por otra parte, Busbice (1970) expresó el rendimiento del genotipo Y_t como:

$$Y_t = A + (1 - F_t)B$$

En donde A es la porción aditiva del genotipo Y_t , B la porción no aditiva (heterótica) y F_t el coeficiente de endogamia de Y_t .

Por tanto, si las poblaciones C , C' y S_1 son derivadas de una misma población original cuya fórmula es la Ec. 7, entonces: $C = A + (1 - F_C)B$, $C' = A + (1 - F_{C'})B$ y $S_1 = A + (1 - F_{S_1})B$. Y si en la Ec. 1 se sustituyen estos valores, se tendrá:

$$\begin{aligned} \text{SINTCd}_1 &= A + (1 - F_C)B - [A + (1 - F_C)B \\ &\quad - [A + (1 - F_{C'})B]/n \\ &\quad - [A + (1 - F_{S_1})B]/nm \\ &= A + (1 - F_C)B - \{[(1 - F_C) - (1 - F_{C'})]/n \\ &\quad - [(1 - F_{C'}) - (1 - F_{S_1})]/nm\}B \\ &= A + (1 - F_C)B + F_C/n - F_{C'}/n - F_{S_1}/nm \\ &\quad + F_{C'}/nm]B \\ &= A + (1 - F_C)B - [(F_{C'} - F_C)/n \\ &\quad + (F_{S_1} - F_{C'})/nm]B \\ &= A + (1 - F_C)B - \{[m(F_{C'} - F_C) \\ &\quad + (F_{S_1} - F_{C'})]/nm\}B \end{aligned}$$

Como $F_C = 0$, entonces:

$$\text{SINTCd}_1 = A + B - [mF_{C'} - F_{C'} + F_{S_1}]/nm]B$$

Y como $F_{C'} = 1/4$ y $F_{S_1} = 1/2$, entonces:

$$\begin{aligned} \text{SINTCd}_1 &= A + B - \{[(1/4)m - (1/4) + (1/2)]/nm\}B \\ &= A + B - [(m + 1)/4nm]B \\ &= A + [1 - (1/4nm)(m + 1)]B \end{aligned} \tag{Ec. 8}$$

Esta Ec. 8 corresponde a la predicción del sintético en la generación 1, dado que su coeficiente de endogamia es el mismo que en la Ec. 2. Se tienen aquí dos maneras de predecir a este sintético: con la Ec. 1 en forma práctica y con la Ec. 8 en forma teórica. Una cuestión adicional es que con la Ec. 4, referida al sintético de la segunda gene-

ración, si se usa la Ec. 8 no es necesario que el número de líneas sea de $4n$ cruza dobles.

En cuanto al número de plantas por componente, en el caso de sintéticos de cruza simples la endogamia del sintético de C_{sp} es $1/n$, independientemente del número de plantas por C_{sp} (Márquez-Sánchez, 2007). En el caso del sintético de cruza dobles, mientras el número de plantas por cada C_{dp} aumente, la endogamia se mantiene la misma, es decir, $1/n$.

Finalmente, debe distinguirse entre los estudios con sintéticos para fines académicos y para fines comerciales. En los primeros se conoce la constitución de cada sintético porque el investigador conoce las líneas con las que hace cada uno de ellos. En este caso los sintéticos pueden estar hechos con líneas homocigóticas no emparentadas. En los sintéticos para fines comerciales, sin embargo, no se conoce su pedigrí; por tanto, esta condición no es cierta. Sin embargo, los híbridos dobles comerciales generalmente están hechos con líneas homocigóticas, aunque no se sabe si algunas son comunes en ellos. De todas maneras, si se supone que los materiales están relacionados en algún grado, éste debe de ser pequeño, excepto en el caso en que una compañía semillera use con frecuencia una cruza simple al hacer sus cruza dobles. La predicción y la endogamia calculadas aquí propuestas pueden tomarse como valores aceptables para los propósitos prácticos del uso de cruza dobles para hacer sintéticos de los que se desconoce su constitución genotípica.

BIBLIOGRAFÍA

- Busbice T H (1969)** Inbreeding in synthetic varieties. *Crop Sci.* 9:601-604.
- Busbice T H (1970)** Predicting yield of synthetic varieties. *Crop Sci.* 10:265-269.
- Gilmore F C (1969)** Effect of inbreeding on parental lines on predicted yield of synthetics. *Crop Sci.* 9:102-104.
- Márquez-Sánchez F (1992)** Inbreeding and yield prediction in synthetic maize cultivars made with parental lines. I. Basic methods. *Crop Sci.* 32:345-349.
- Márquez-Sánchez F (1992a)** On the yield prediction of composite varieties of maize. *Maydica* 37:271-274.
- Márquez-Sánchez F (2007)** Predicción de sintéticos de maíz hechos con cruza simples. *Agrociencia* 41:647-651.
- Sahagún C J (1994)** Sobre el cálculo de endogamia de variedades sintéticas. *Agrociencia s. Fitoc.* 5:67-78.
- Sahagún C J, C Villanueva V (1997)** Teoría de las variedades sintéticas formadas con híbridos de cruza simple. *Rev. Fitotec. Mex.* 20:69-79.
- Sahagún C J (2003)** Coeficiente de endogamia de las variedades sintéticas de cruza dobles. *Agrociencia* 37:641-655.