

Rendimiento y proteína del maíz intercalado con frijol en arreglos topológicos, densidades y fertilización

Yield and protein of corn intercropped with beans in topological arrangements, densities and fertilization

Rocio Albino-Garduño^{1*}, Antonio Turrent-Fernández², José Isabel Cortés-Flores³,
Horacio Santiago-Mejía¹, Ma. del Carmen Mendoza-Castillo⁴, Carmen Jacinto-Hernández²

RESUMEN

Se analizó el efecto del arreglo topológico del maíz 'H-151' y frijol arbustivo 'Negro-8025', la dosis de fertilización y la densidad de población (D) en el rendimiento de grano de maíz (Y_m), contenido de proteína (ProtG), P y K. Se estableció un experimento de parcelas divididas en Cevamex-Textoco, en el año 2012. Las parcelas grandes fueron: cultivo simple de maíz (CSM), dos surcos intercalados con dos de frijol (MMFF) y un surco de cada especie intercalada (MFMF). Las sub-parcelas fueron tratamientos del factorial 2^4 (dos niveles de los factores de fertilidad con N, P_2O_5 , K_2O y densidad). Y_m fue mayor en ambos sistemas intercalados que el cultivo simple debido al número de mazorcas por planta, granos por hilera en la mazorca y peso y tamaño del grano. ProtG fue mayor en sistemas intercalados comparado con CSM al mismo nivel de fertilización y D.

PALABRAS CLAVE

Zea mays, *Phaseolus vulgaris*, cultivos intercalados

ABSTRACT

Previous studies have shown that yield of corn (*Zea mays* L.) was higher in strip intercropping with bush beans (*Phaseolus vulgaris* L.) than in monoculture, under similar agronomic management. However, its quality has not been reported in the hybrid studied. Were studied the effects of: 1) planting arrangement of maize 'H-155' and black bush beans '8025' in strip intercropping system, 2) the rate of nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K) and 3) density (D) on the corn yield (Y_m) and yield components, as well as, its quality in terms of protein content (ProtG), P and K. A field experiment (split plot design experimental) was set up at the Campo Experimental Valle de Mexico in 2012. The main plots were three planting arrangements (PA); corn in monoculture (CM), two rows of corn intercropped in two rows of bush beans (CCBB), and one row of corn intercropped in one row of bush beans (CBCB). Subplots were the treatments of the factorial design 2^4 : 60 and 120 kg of N, 15 y 45 kg of P_2O_5 , 10 and 30 kg of K_2O and 35,500 and 40,500 plants 0.5 ha^{-1} . In intercropping system, corn yield was higher in both planting arrangements than in monoculture, whose yield was 15% lower than planting arrangement CBCB. This result was associated to prolificacy of plants (ears per plant), number of kernels per row of ear and the weight and size of corn grain. Protein content was also higher in both planting arrangements in strip intercropping than in monoculture: CBCB = 8.64 %, CCBB = 8.35 % and CM = 7.85 %, using the lower rates of nitrogen, phosphorus, potassium and density.

KEYWORDS

Zea mays, *Phaseolus vulgaris*, intercropping

¹ División de Desarrollo Sustentable, Universidad Intercultural del Estado de México. Estado de México.

² Campo Experimental Valle de México, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Textoco, Estado de México.

³ Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.

⁴ Genética, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.

* Autor para correspondencia. Libramiento Francisco Villa s.n. 50640 San Felipe del Progreso, Estado de México.

Correo electrónico: albino.rocio@colpos.mx

Recibido: 7 de octubre de 2016

Aceptado: 26 de octubre de 2016

INTRODUCCIÓN

El rendimiento de un cultivo depende de factores incontrolables (suelo, clima y biota) y controlables (fertilización, arreglos topológicos, composición del cultivo, densidades de plantación, genotipo, etc.) de la producción (Turrent, 1980). El manejo de los factores controlables ha sido objeto de múltiples investigaciones agrícolas enfocadas en incrementar el rendimiento de los cultivos y su calidad.

La fertilización básica para los cultivos está constituida por nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). El N es un componente esencial de las proteínas, del ADN, del ARN y de la clorofila, y tiene efecto positivo sobre la altura de planta de maíz, el número de granos por mazorca, el peso de 1,000 granos y el índice de cosecha (Mahmood *et al.*, 2001). El P estimula el crecimiento radical (Ali *et al.*, 2002) y participa en la síntesis de proteínas y en los procesos metabólicos de transferencia de energía. El K interviene en la regulación de la presión osmótica y es activador o cofactor de más de 50 enzimas del metabolismo de carbohidratos y proteínas (Alcántar *et al.*, 2012). En el cultivo de maíz, la fertilización con N, P y K incrementa el contenido de proteína en el grano (Gyóri, 2010). Específicamente, el N constituye 17% de la molécula de proteína y su disponibilidad para la planta incrementa el contenido proteico (Wang *et al.*, 2008).

La calidad de grano del maíz puede ser evaluada con parámetros requeridos para el uso industrial o alimenticio (Gyóri, 2010). El contenido de proteína y elementos esenciales para la nutrición humana, como P y K, son algunas características consideradas en la evaluación de la calidad alimenticia. Se ha reportado que el rendimiento del grano de maíz, su contenido de almidón, proteína y aceite difieren en respuesta a la densidad de plantación (D) y al genotipo (Munamava *et al.*, 2004). Específicamente, una alta D disminuye el rendimiento de grano, el número de granos por mazorca y el número de mazorcas por planta, pues se reduce el suministro de nitrógeno, los fotosintatos y el agua hacia la mazorca. Además, se genera dominancia apical, competencia por radiación solar, nutrimentos y, por lo tanto, afecta la fase reproductiva de la planta (Sangoi, 2001; Abuzar *et al.*, 2011). El maíz es la gramínea más sensible a las variaciones en la D y, para cada sistema de producción, hay una población que maximiza el rendimiento de grano por hectárea

(Sangoi, 2001). Por ejemplo, en la variedad Azam, la densidad de 60,000 plantas ha⁻¹ genera más mazorcas por planta que las densidades 40,000 y 90,000 plantas ha⁻¹ (Abuzar *et al.*, 2011).

En el sistema intercalado de surcos alternos, las especies se siembran en la misma fecha, de manera que la colocación o madurez precoz de alguna reduce, en lo posible, la competencia interespecífica, aun cuando el traslape temporal y espacial de ellas es una característica del sistema (Turrent, 2008; Lithourgidis *et al.*, 2011). Las plantas de maíz y frijol arbustivo tienen diferente altura, de manera que al intercalarse en diferentes arreglos topológicos, se aprovecha la complementariedad en la arquitectura del dosel y raíz (Johanne y Lynch, 2012). Se ha reportado que el cultivo intercalado de maíz con frijol maximiza los efectos de complementariedad de las especies y se incrementa el rendimiento del maíz en comparación con el monocultivo bajo condiciones similares de fertilización y riego (Li *et al.*, 2001; Malézieux *et al.*, 2009). Turrent¹ encontró rendimientos en grano de maíz 'H-151' intercalado con frijol arbustivo de hasta 16.2 t ha⁻¹, en comparación con 9.6 t ha⁻¹ en monocultivo en el mismo sitio experimental del presente estudio durante los años 2002 a 2005. Sin embargo, de manera general existe poca información respecto a la calidad del grano de maíz producido en cultivo intercalado. Esta información es necesaria ya que en México el grano de maíz está destinado en su mayoría al consumo humano y es fuente de 39% de las proteínas de la dieta de la población en México (Bourges, 2013). En monocultivos de maíz altos rendimientos de grano se han asociado con una baja concentración de N en el grano, por efecto de dilución (Uribe Larrea *et al.*, 2007; Gyóri, 2010; Chen *et al.*, 2014). Por tal motivo, se analizó el efecto del arreglo topológico, las dosis de N, P, K y D, en el rendimiento y contenido de proteína del grano de maíz intercalado con frijol.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en el Campo Experimental Valle de México (Cevamex) "El Horno" del INIFAP, durante el ciclo primavera-verano de 2012, en un suelo fluvisol háplico (Govaerts *et al.*, 2008). El sitio está ubicado a 19° 29'N, 98° 53'O, 2,280 msnm. Los datos de la estación meteorológica en el sitio indicaron que el promedio de temperatura durante el ciclo de cultivo fue de 19.5 °C; la precipitación, de 315

¹ Comunicación personal con Turrent, F. A., investigador Titular C. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (aturrent37@yahoo.com.mx)

mm; y la evaporación promedio diaria, de 4.7 mm.

Se manejó un diseño experimental de parcelas divididas con tres tratamientos de parcela grande y 16 tratamientos de parcela chica. La parcela grande correspondió al arreglo topológico de maíz 'H-155' y frijol arbustivo 'Negro-8025': 1) cultivo simple de maíz (CSM), 2) dos surcos de maíz alternados con dos de frijol (MMFF), y 3) un surco de maíz alternado con uno de frijol (MFMF). Los 16 tratamientos de parcela chica (cuadro 1) correspondieron a un experimento factorial 2^4 , para los factores N, P, K y D, cuyos dos niveles para maíz fueron: 60 y 120 kg de N en 0.5 ha^{-1} , 15 y 45 kg de P_2O_5 en 0.5 ha^{-1} , 10 y 30 kg de K_2O en 0.5 ha^{-1} , 34,500 y 40,500 plantas en 0.5 ha^{-1} ocupada por el maíz en 1 ha del sistema. En el caso del frijol, los niveles de los factores fueron 12.5 y 37.5 kg de N y P_2O_5 en 0.5 ha^{-1} ; 7.5 y 22.5 kg de K_2O en 0.5 ha^{-1} ; 75,000 y 105,000 plantas en 0.5 ha^{-1} ocupadas por el frijol. Los 16 tratamientos de maíz y frijol se distribuyeron aleatoriamente y estuvieron perfectamente alineados en los arreglos topológicos. Los fertilizantes utilizados fueron urea (46% N), superfosfato de calcio triple (46% P_2O_5) y cloruro de potasio (60% K_2O), res-

pectivamente. Cada tratamiento de parcela chica constó de cuatro surcos de 0.8 m de ancho por 2.12 m de longitud, con los dos surcos centrales como parcela útil y eliminando las plantas de los 30 cm laterales en las orillas. El número de plantas en cada parcela útil varió según la densidad de plantación probada.

La siembra se hizo manualmente el 11 de abril de 2012 y con ella se aplicó todo el P, el K y 1/3 del N al maíz y el total de los tres elementos al frijol; los 2/3 restantes del N se aplicaron al maíz en la primera escarda (37 días después de la siembra). Se regó inmediatamente después de sembrar y se mantuvo al cultivo sin restricciones de humedad durante el ciclo, con riego rodado de auxilio. El deshierbe fue manual.

El maíz se cosechó 221 días después de la siembra y el frijol a los 125. Todas las mazorcas de cada parcela útil fueron cosechadas, pesadas y desgranadas. La humedad del grano se determinó con un medidor portátil John Deere (SW 16060®, Ill. EUA). El rendimiento de grano (Y_m) con 14% de humedad se estimó por superficie compacta; es decir, en 0.5 ha^{-1} ocupada por el maíz en el sistema intercalado en 0.5 ha^{-1} con frijol. El frijol no fue evaluado en este estudio.

Cuadro 1. Lista de tratamientos de parcela chica (2^4) establecidos en los arreglos topológicos CSM, MMFF y MFMF del cultivo de maíz-frijol en el ciclo primavera verano 2012.

TRATAMIENTO	MAÍZ				FRIJOL			
	N	P_2O_5	K_2O	DP	N	P_2O_5	K_2O	DP
	(kg ha^{-1})			plantas ha^{-1}	(kg ha^{-1})			plantas ha^{-1}
1	120	30	20	69000	25	25	15	150000
2	120	30	20	81000	25	25	15	210000
3	120	30	60	69000	25	25	45	150000
4	120	30	60	81000	25	25	45	210000
5	120	90	20	69000	25	75	15	150000
6	120	90	20	81000	25	75	15	210000
7	120	90	60	69000	25	75	45	150000
8	120	90	60	81000	25	75	45	210000
9	240	30	20	69000	75	25	15	150000
10	240	30	20	81000	75	25	15	210000
11	240	30	60	69000	75	25	45	150000
12	240	30	60	81000	75	25	45	210000
13	240	90	20	69000	75	75	15	150000
14	240	90	20	81000	75	75	15	210000
15	240	90	60	69000	75	75	45	150000
16	240	90	60	81000	75	75	45	210000

CSM= cultivo simple de maíz, MMFF= dos surcos de maíz alternados con dos de frijol y MFMF= un surco de maíz alternado con uno de frijol.

Las mazorcas de cada unidad experimental se ordenaron de menor a mayor longitud y se tomaron como muestra las 5 mazorcas centrales. De las mazorcas se registraron las siguientes variables: longitud de mazorca (LM), número de hileras (NH), número de granos por hilera (NGH), número de granos por mazorca (NGM) al multiplicar NH por NGH, peso de 100 granos (P100) tomados al azar de la muestra; prolificación (Prol) que fue el número de mazorcas por planta; profundidad de grano (ProfG) [igual a la diferencia entre el diámetro de mazorca y el diámetro de olote, dividido entre dos], e índice de desgrane (ID) [calculado como el peso del grano entre el peso de mazorca expresado en porcentaje]. De la misma muestra de mazorcas, se tomaron al azar granos de maíz, hasta completar 100 g, que se utilizaron para determinar el contenido de proteína (ProtG), P y K. La determinación de proteína cruda se hizo en el Laboratorio de Calidad de Frijol (INIFAP) por el método Kjeldahl con la nota de aplicación 1987 (Tecator, 1987) y el equipo Kjeltex AUTO 1030 Analyzer Tecator (FOSS®, Denmark). Para conocer el contenido de ProtG, primero se determinó el N total en el grano (que incluye proteínas, péptidos, aminoácidos libres, aminos y amonio); luego, multiplicando este dato por el factor 6.25 se obtuvo el contenido de ProtG (Györi, 2010). El análisis del P y del K se hizo mediante una digestión del grano con una mezcla diácida ($\text{HNO}_3/\text{HClO}_4 = 4/2$ mL), siguiendo el procedimiento descrito por Etchevers (1992).

Para determinar el efecto del arreglo topológico, las dosis de N, P y K y la D, se realizó el análisis de varianza correspondiente al diseño experimental usado (ANOVA, $p < 0.05$) y análisis de regresión por etapas o stepwise ($\text{sle} = 0.10$ $\text{sls} = 0.05$ y variables "mudas" o dummy), utilizando el programa SAS® versión 9.0. El análisis de varianza detectó las variables significativas, las cuales se incluyeron en los modelos de regresión que se interpretan en este artículo. En el análisis de varianza se consideraron las interacciones de tres y cuatro factores, dentro de cada arreglo topológico, como parte del error experimental, para la prueba de hipótesis. Los gráficos de las interacciones que resultaron significativas se hicieron con promedios de los valores observados de los otros factores que no intervinieron (no fueron significativos) en el efecto factorial analizado (Mercado *et al.*, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Rendimiento de grano de maíz (Y_m)

Mediante el análisis de regresión se generó la ecuación del rendimiento de grano estimado (\hat{Y}_m):

$$\hat{Y}_m \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = 5.773 + 0.241K + 0.244D - 0.261PD + 0.885a_2 + 0.471a_1NP + 0.200a_1NK + 0.441a_1PD + 0.622a_2PD$$

donde: N, P, K y la D fueron variables que codificaron al N, P_2O_5 , K_2O y densidad, respectivamente; a_1 y a_2 representaron los arreglos topológicos MMFF y MFMF. Las ecuaciones de regresión se pueden exponer en una matriz bidimensional para observar claramente las diferencias en la respuesta (Barrios-Ayala *et al.*, 2003) de los arreglos topológicos a los factores de estudio. De esta forma, la ecuación desglosada de \hat{Y}_m (cuadro 2) indicó que en el nivel bajo de N, P, K y D (60-15-10 kg de N-P-K y 34.5 mil plantas en 0.5 ha^{-1} ocupadas por el maíz), el CSM rindió 5.77 t 0.5 ha^{-1} , al igual que el sistema MMFF; sin embargo, MFMF llegó a 6.65 t 0.5 ha^{-1} . En otras palabras, por efecto del arreglo topológico, a la misma dosis de fertilización el rendimiento en MFMF fue 0.88 t mayor que en CSM y MMFF.

Cuadro 2. Ecuación del rendimiento de grano de maíz (t ha^{-1}) desglosada en una matriz bidimensional para mostrar el efecto del N, P, K, D y arreglos topológicos.

ARREGLO TOPOLÓGICO Y VALORES DE a_1 Y a_2 QUE LOS REPRESENTAN EN LA ECUACIÓN		
CSM ($a_1=0, a_2=0$)	MMFF ($a_1=1, a_2=0$)	MFMF ($a_1=0, a_2=1$)
5.773***		0.885***
0.241 k***		
0.244 d***		
	0.471 np***	
	0.200 nk**	
0.261 pd**	0.441 pd**	0.622 pd***

CSM= cultivo simple de maíz, MMFF= dos surcos de maíz alternados con dos de frijol y MFMF= un surco de maíz alternado con uno de frijol. CME=0.342 y $R^2= 62\%$. n, p, k son dosis de N, P_2O_5 y K_2O en kg 0.5 ha^{-1} . d es densidad de plantación en miles de plantas en 0.5 ha^{-1} . El espacio de exploración fue 60 y 120 kg de N 0.5 ha^{-1} , 15 y 45 kg de P_2O_5 0.5 ha^{-1} , 10 y 30 kg de K_2O 0.5 ha^{-1} , 34500 y 40500 plantas 0.5 ha^{-1} en maíz. ***para $p < 0.001$ y **para $p < 0.01$.

De acuerdo con la misma ecuación de \hat{Y}_m , los cambios de dosis de K, de 10 a 30 kg de K_2O y la D de 34,500 a 40,500 plantas en 0.5 ha^{-1} en el CSM tuvieron un efecto positivo en el rendimiento del grano con un incremento de $0.24 \text{ t } 0.5 \text{ ha}^{-1}$ (por arriba de los $5.77 \text{ t } 0.5 \text{ ha}^{-1}$ obtenidos con los niveles bajos de ambos factores), mientras que en los sistemas MMFF y MFMF no hubo respuesta.

En el arreglo topológico MMFF, el rendimiento fue de $6.24 \text{ t } 0.5 \text{ ha}^{-1}$ (por adición de 0.47 t a $5.77 \text{ t } 0.5 \text{ ha}^{-1}$ estimada en niveles bajos de los factores) por efecto de la interacción N x P, también reportada en la literatura (Ali *et al.*, 2002; Vázquez, 2008; Mukhtar *et al.* 2011).

el sistema MMFF (que tuvo mayor peso del grano que CSM), de acuerdo a las ecuaciones de regresión para los componentes del rendimiento estimados (cuadro 3, ecuación de LM y NGM).

Acosta (1986) también observó reducciones en la LM y NGM en maíz asociado con frijol respecto del cultivo simple. En este estudio la LM no fue afectada por la dosis de N, a diferencia de los resultados que obtuvieron Bakht *et al.* (2007), quienes mostraron una relación positiva de la interacción N x LM en el híbrido Azam.

Los componentes de rendimiento ayudaron a explicar las diferencias en el rendimiento de los tratamientos, atribuidas a alguna estructura vegetal en

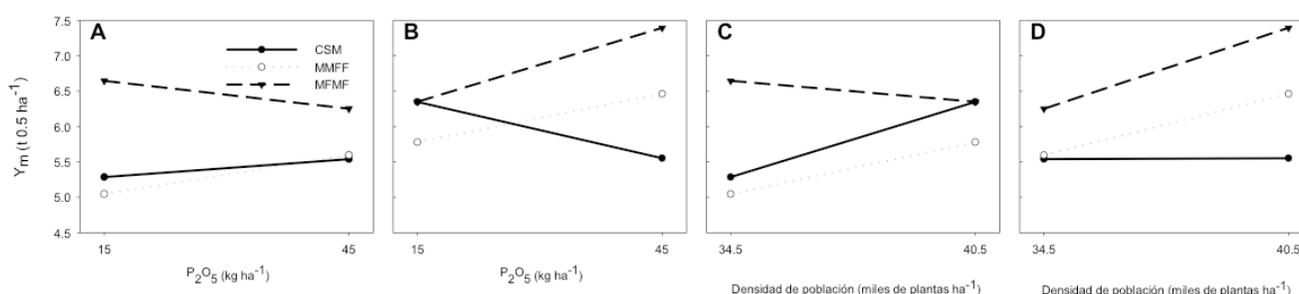


Figura 1. Efecto de la interacción P x D x arreglo topológico (AT) en el rendimiento observado de grano de maíz: A y B) Interacción P x AT en densidad de plantación baja (34500 plantas 0.5 ha^{-1}) y alta (40500 plantas 0.5 ha^{-1}), respectivamente; C y D) Interacción D x AT en dosis baja de P (15 kg de P_2O_5 0.5 ha^{-1}) y alta (45 kg de P_2O_5 0.5 ha^{-1}), respectivamente. CSM = cultivo simple de maíz, MMFF = maíz y frijol intercalados en dos surcos alternos y MFMF = intercalados en un surco alterno.

La interacción P x D aumentó el rendimiento de grano tanto en CSM como en los sistemas intercalados aunque el mayor incremento ($0.66 \text{ t } 0.5 \text{ ha}^{-1}$) ocurrió con el sistema MFMF (cuadro 2). El análisis gráfico del rendimiento observado indicó que con 34,500 plantas en 0.5 ha^{-1} al aumentar la dosis de P, el rendimiento de grano en el CSM y MMFF se incrementó pero no en el sistema MFMF (figura 1A). La misma tendencia fue observada con los cambios en D a niveles bajos de P_2O_5 (figura 1C). Sin embargo, con 45,000 plantas en 0.5 ha^{-1} , el aumento en la dosis de P incrementó en 0.68 t el rendimiento de grano en MMFF y MFMF (figura 1B). Este cambio también ocurrió al incrementar la D con la dosis alta de P (figura 1D).

En resumen, el \hat{Y}_m más alto fue 7.28 t en 0.5 ha^{-1} y se obtuvo con el arreglo topológico MFMF con 40,500 plantas en 0.5 ha^{-1} y 45 kg de P_2O_5 en 0.5 ha^{-1} .

Se mencionó que el CSM rindió menos que el sistema MFMF comparados al mismo nivel de N, P, K y D (cuadro 2), no obstante que el CSM produjo mazorcas 0.89 cm más largas y con 48 más granos que

particular. El cultivo simple respondió positivamente a las dosis de P: en dosis bajas tuvo 15.99 NH y en dosis altas 16.25 , mientras que en los sistemas intercalados no hubo respuesta. Vázquez (2008) menciona que el fósforo es importante en la fase inicial del crecimiento del maíz cuando el sistema radicular puede no ser capaz de absorber suficiente P del suelo.

Por efecto del arreglo topológico, el sistema MFMF tuvo 2.67 NGH menos que el CSM (cuadro 3, ecuación de NGH). Este arreglo topológico respondió al incremento de N aumentando 1.21 el NGH. En el arreglo topológico MMFF hubo un efecto negativo de la dosis de N y de las interacciones P x K y K x D en el P100; sin embargo, con la dosis alta de P, K, D y la interacción N x K fue mayor (cuadro 2, ecuación de P100). El P100 más alto se obtuvo en el arreglo MFMF, el cual fue 12% mayor que en el cultivo simple y 2.4% que en el intercalado MMFF. Sharar *et al.* (2003) indicaron que el peso de 1,000 granos se afecta positivamente por efecto de la interacción N x P. En el presente estudio, esta interacción positiva se presentó

Cuadro 3. Ecuaciones de regresión de los componentes del rendimiento y P en grano del maíz 'H-155' en función de la respuesta al arreglo topológico N, P, K y densidad de plantación.

VARIABLE DEPENDIENTE	ECUACIÓN	R ²
LM (cm)=	15.37 - 0.89 a ₁ + 0.47 a ₁ P	0.339
NGM=	520.58 - 48.72 a ₁	0.333
NH=	15.99 + 0.26 P + 0.37 a ₁ N - 0.56 a ₁ D + 0.47 a ₁ NP	0.410
NGH=	31.96 - 2.67 a ₁ + 1.21 a ₁ N + 1.17 a ₂ D	0.348
P100 (g)=	34.21 - 2.24 a ₁ N + 2.03 a ₁ P + 2.49 a ₁ K + 2.96 a ₁ D + 2.61 a ₁ NK - 2.14 a ₁ PK - 2.40 a ₁ KD + 4.17 a ₂	0.589
ProfG (cm)=	1.01 - 0.03 K - 0.05 KD + 0.07 a ₁ KD + 0.07 a ₂ K + 0.06 a ₂ KD	0.681
ID =	88.53 - 1.23 a ₁ + 0.64 a ₁ P + 0.53 a ₁ NP + 0.53 a ₁ PK - 0.96 a ₂	0.499
Prol=	1.13 - 0.06 D - 0.03 NK - 0.06 PK + 0.28 a ₁ + 0.12 a ₁ PK + 0.08 a ₁ PD + 0.30 a ₂ + 0.07 a ₂ N + 0.13 a ₂ PK + 0.07 a ₂ KD	0.831
P grano (%)=	0.40 + 0.05 N - 0.04 PD + 0.11 a ₁ + 0.23 a ₂	0.456

LM= longitud de la mazorca, NGM= número de granos por mazorca, NH= número de hileras, NGH= número de granos por hilera, P100= peso de 100 granos, ProfG= profundidad del grano, ID = índice de desgrane, Prol= proliferación (mazorcas planta⁻¹) y P grano = contenido de fósforo en grano. a₁= MMFF y a₂ MFMF. N, P, K son dosis de nitrógeno, P₂O₅ y K₂O en kg 0.5 ha⁻¹. D es densidad de plantación en miles de plantas en 0.5 ha⁻¹. El espacio de exploración fue 60 y 120 kg de N 0.5 ha⁻¹, 15 y 45 kg de P₂O₅ 0.5 ha⁻¹, 10 y 30 kg de K₂O 0.5 ha⁻¹, 34500 y 40500 plantas 0.5 ha⁻¹ en maíz.

en las variables NH, Ym e ID, todas en el sistema MMFF.

El cultivo simple de maíz presentó la menor ProfG y, considerando las interacciones de los factores al comparar los sistemas, se puede alcanzar una ProfG de hasta 0.92, 1.08 y 1.15 cm en los sistemas CSM, MMFF y MFMF, respectivamente (cuadro 3, ecuación ProfG). En el sistema MMFF hubo efectos positivos del P y las interacciones N x P y P x K en el índice de desgrane.

El cambio de la D de 34,500 a 40,500 plantas 0.5 ha⁻¹ en CSM disminuyó el número de mazorcas planta⁻¹ de 1.13 a 1.07 (cuadro 3, ecuación Prol). El número de mazorcas por plantas disminuyó al aumentar las densidades debido a la competencia por RFA y nutrientes (Abuzar *et al.*, 2011). La proliferación fue mayor en los sistemas intercalados que en el cultivo simple, comparados con los mismos niveles de N, P, K y D (figura 2). A diferencia del maíz en CSM, en los arreglos intercalados hubo efectos positivos que incrementaron la proliferación. En MMFF fueron las interacciones P x K y P x D y en MFMF la dosis de N y la interacción P x K y K x D (cuadro 3, ecuación de Prol). El efecto positivo del N en la proliferación también ha sido reportado por Bakht *et al.* (2007) con una dosis de 160 kg N ha⁻¹. La interacción P x K fue significativa en los tres arreglos topológicos: a dosis baja de K el incremento de P disminuyó la proliferación de los sistemas MMFF y MFMF y la aumentó en el CSM (figura 3A); la misma tendencia se observó cuando

en dosis baja de P se incrementó la dosis de K (figura 3C). Sin embargo, en dosis alta de K los sistemas intercalados mejoraron la proliferación por la adición de P (figura 3B); respuesta similar ocurrió cuando en dosis alta de P se incrementó la dosis de K (figura 3D). El número de mazorcas por planta en el CSM no fue afectado por la interacción N x P, en contraste con lo reportado por Sharar *et al.* (2003).

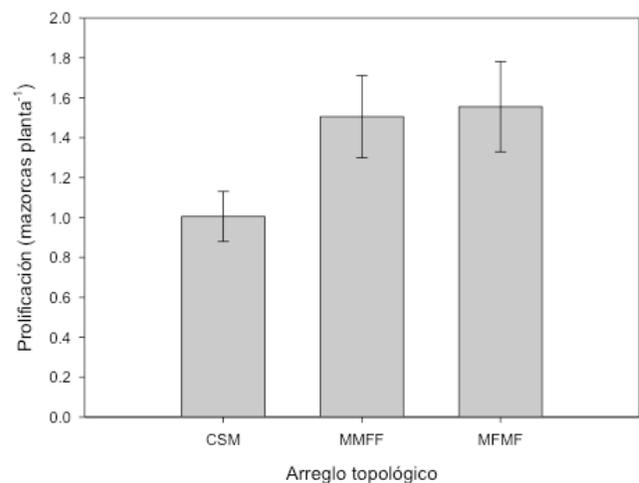


Figura 2. Proliferación observada del maíz en función del arreglo topológico a 60-15-10 kg en 0.5 ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O y 34500 plantas en 0.5 ha⁻¹. CSM = cultivo simple de maíz, MMFF = maíz y frijol intercalados en dos surcos alternos y MFMF = intercalados en un surco alterno. Promedios ± ES.

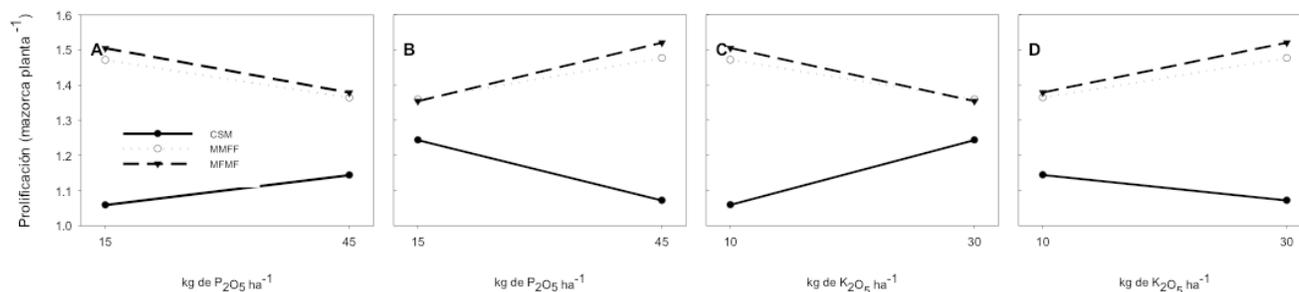


Figura 3. Interacción P x K x arreglo topológico (AT) en la prolificación del maíz: A y B) Interacción P x AT a dosis baja de K (15 kg de K₂O ha⁻¹) y alta (45 kg de K₂O ha⁻¹), respectivamente; C y D) interacción K x AT a dosis baja de P (10 kg de P₂O₅ ha⁻¹) y alta (30 kg de P₂O₅ ha⁻¹), respectivamente. CSM = cultivo simple de maíz, MMFF = maíz y frijol intercalados en dos surcos alternos y MFMF = intercalados en un surco alterno.

Contenido de proteína en el grano de maíz

La ecuación de regresión para ProtG, en su expresión bidimensional (cuadro 4) indicó que el contenido en el grano del CSM aumentó de 7.85% (en 60-15-10 kg en 0.5 ha⁻¹ de N-P-K y 34,500 plantas ha⁻¹) a 8.04%, por efecto del incremento en la dosis de nitrógeno a 120 kg de N en 0.5 ha⁻¹. El resultado confirma lo que la literatura menciona, la fertilización con N (urea y sulfato de amonio) incrementa el porcentaje de ProtG en maíz, en cultivo simple (Hanan *et al.*, 2008; Saha *et al.*, 2008).

Cuadro 4. Ecuación del contenido de proteína en el grano de maíz, desglosada en una matriz bidimensional que muestra el efecto del N, P, K, D y arreglo topológico.

ARREGLO TOPOLÓGICO Y VALORES DE a ₁ Y a ₂ QUE LOS REPRESENTAN EN LA ECUACIÓN		
CSM (a ₁ =0, a ₂ =0)	MMFF (a ₁ =1, a ₂ =0)	MFMF (a ₁ =0, a ₂ =1)
7.8543 ***	0.5053**	0.7925***
0.1912 n**		
-0.2425 a*	0.2593 d	

CME=0.198 y R²=49%. N, P, K son dosis de nitrógeno, P₂O₅ y K₂O en kg 0.5 ha⁻¹. D es densidad de plantación en miles de plantas en 0.5 ha⁻¹. El espacio de exploración fue 60 y 120 kg de N 0.5 ha⁻¹, 15 y 45 kg de P₂O₅ 0.5 ha⁻¹, 10 y 30 kg de K₂O 0.5 ha⁻¹, 34500 y 40500 plantas 0.5 ha⁻¹ en maíz. ***para p<10⁻³, **para p<0.01 y * para p<0.05.

En el CSM al aumentar la D, de 34,500 a 40,500 plantas en 0.5 ha⁻¹ hubo un detrimento en el contenido de proteína de 0.24 % (figura 4). Ciampitti y Vyn (2013) indican que la formación de híbridos de maíz entre los años 1940-2011 se ha enfocado a la tolerancia de altas densidades en monocultivo para generar más

rendimiento del grano y esto ha sido indirectamente acompañado por el decremento en la concentración de N en el grano de los híbridos modernos. Sin embargo, el maíz 'H-155' en sistemas intercalados MMFF incrementó 0.23% el contenido de proteína al aumentar la D (figura 4).

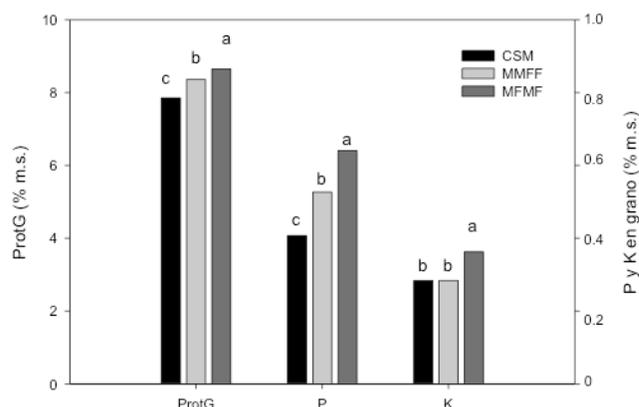


Figura 4. Contenido de proteína estimado en grano de maíz 'H-155' en función de la densidad de plantación en dos arreglos topológicos a 60-15-10 kg de N-P₂O₅-K₂O en 0.5 ha⁻¹. CSM= cultivo simple de maíz y MMFF = maíz intercalado con frijol en dos surcos alternos.

El grano de maíz de los sistemas intercalados MMFF y MFMF tuvo mayor concentración de ProtG, P y K cuando se comparó con el grano del CSM a la misma dosis de fertilización y la D (figura 5). El único efecto significativo en el contenido de K en el grano de maíz fue en el arreglo topológico MMFF ($p<0.001$). Considerando la interacción positiva de la D en el sistema MMFF, los porcentajes promedio de ProtG más altos se obtuvieron en los arreglos MMFF y MFMF

(8.35 y 8.64% respectivamente), en comparación de CSM (7.85%) (cuadro 4). Específicamente, con la misma dosis, el Y_m fue mayor cuando se cultivó intercalado con respecto del monocultivo, sin que se afectara negativamente el contenido de P y K en el sistema MFMF (cuadro 2 y figura 5). Lo anterior fue contrario a lo que se esperaba pues se ha reportado que a mayor rendimiento se da un efecto de dilución de ProtG (Uribebarrea *et al.*, 2007; Chen *et al.*, 2014).

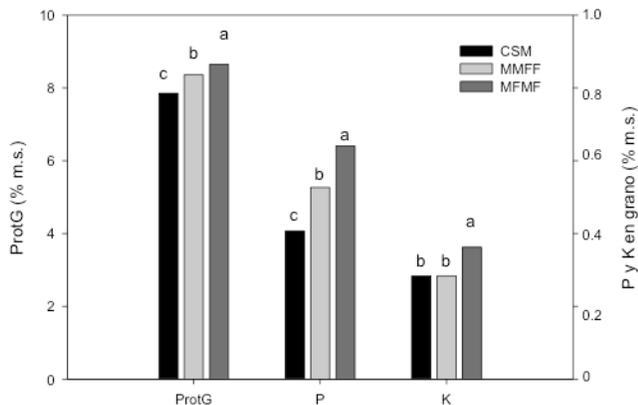


Figura 5. Contenido de proteína (ProtG), de P y de K en el grano de maíz 'H-155' en tres arreglos topológicos con aplicación de 60-15-10 kg en 0.5 ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O y sembrado a 34500 plantas en 0.5 ha⁻¹. CSM = cultivo simple de maíz, MMFF = maíz y frijol intercalados en dos surcos alternos y MFMF = intercalados en un surco alterno. Letras distintas entre barras de cada grupo denotan diferencia significativa ($p < 0.05$).

La principal translocación del N en plantas de maíz ocurre del tallo y las hojas basales a las hojas apicales más jóvenes y cercanas a la hoja en que estará la mazorca, durante la prefloración, en condiciones de no estrés, alto rendimiento y monocultivo (Ciampitti y Vin, 2013). Este proceso contribuye a la senescencia de las hojas basales, junto con otros factores como la calidad de la luz a las hojas basales, agua disponible, estrés por hacinamiento etc, (Mi *et al.*, 2003; Ning *et al.*, 2012).

Uribebarrea *et al.*, (2007), tras comparar la acumulación de N en el grano de híbridos (de alta y baja calidad proteica), argumentan que los híbridos de alta calidad proteica son más eficientes en absorber N en la prefloración. Estas aseveraciones se han hecho en investigación con monocultivos de maíz; sin embargo, de acuerdo con las observaciones de campo (que requieren ser cuantificadas) en este experimento, las hojas basales de los arreglos intercalados per-

manecieron verdes por más días que las del cultivo simple. Pommel *et al.* (2006) indican que las plantas que permanecen con follaje verde por más tiempo acumulan más biomasa que aquellas cuyas hojas senescen más rápidamente. Además, en condiciones de no estrés en el cultivo, una buena translocación durante la fase reproductiva es consecuencia de mayor actividad fotosintética (Ciampitti y Vin, 2013). Se sugiere que en los sistemas intercalados el mecanismo de translocación de N, P y K pudo darse durante un periodo más largo con respecto al CSM. Además, cuando se intercala maíz con leguminosas, aumenta la absorción de N del maíz y la fijación biológica del N (Ning *et al.*, 2012).

En la obtención del mayor contenido de ProtG, P y K en el grano del sistema MFMF también debieron estar involucradas: 1) la eficiencia en el uso de la RFA que llegó hasta las hojas basales que aún permanecían activas fotosintéticamente; 2) la mayor distribución radical del maíz intercalado con el frijol (con referencia de CSM), y 3) la disponibilidad de recursos del suelo para el maíz después de la cosecha del frijol, como lo determinó un estudio simultáneo de la presente investigación (Albino *et al.*, 2015). Se considera que las hojas basales del maíz intercalado funcionaron por más tiempo como fuente de fotosintatos y elementos móviles como N, P y K (Alcántar *et al.*, 2012), translocando incluso después de la prefloración, pues la senescencia "tardía" no limitó este proceso, en comparación con las hojas basales en CSM. Pérez y Colín (2008) corroboran que a mayor RFA interceptada existe un incremento en algunos componentes del rendimiento del maíz.

CONCLUSIONES

Por efecto del arreglo topológico, el rendimiento de grano, el contenido de proteína, P y K en el grano fueron mayores en el maíz intercalado que en el cultivo simple, aún con el nivel bajo de fertilización probado. El arreglo de un surco de maíz alternado con uno de frijol fue el mejor en estas variables.

El mayor rendimiento de grano de maíz se presentó en el arreglo topológico de un surco de maíz alternado con uno de frijol y se debió al mayor número de mazorcas por planta y de granos por hilera de la mazorca, así como al peso y tamaño del grano.

AGRADECIMIENTOS

La primera autora agradece al Conacyt por la beca (No. 101536) otorgada para sus estudios de doctorado.

LITERATURA CITADA

- Abuzar, M. R., G. U. Sadozai, M. S. Baloch, A. G. Baloch, I. H. Shah, T. Javaid, N. Hussain. 2011. Effect of plant population densities on yield of maize. *The Journal of Animal and Plant Sciences* 21: 692-695.
- Acosta, D. E. 1986. Crecimiento, rendimiento y aprovechamiento de la energía solar en maíz (*Zea mays* L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en unicultivo y asociados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 163 p.
- Albino, G. R., F. A. Turrent, F. J. I. Cortés, M. M. Livera, C. M. C. Mendoza. 2015. Distribución de raíces y radiación solar y biomasa en maíz y frijol intercalados. *Agrociencia* 49: 513-531.
- Alcántar, G. G., V. M. Sandoval, G. P. Sánchez. 2012. Elementos Esenciales. pp: 8-34. In: Alcántar, G. G., L. Trejo, L. Fernández, M. Rodríguez (Eds). *Nutrición de Cultivos*. Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados. México, D.F.
- Ali, J., J. Bakht, M. Shafi, S. Khan, W. Ali. 2002. Uptake of nitrogen as affected by various combination of nitrogen and phosphorous. *Asian Journal of Plant Sciences* 1: 367-369.
- Bakht, J., F. Siddique, M. Shafi, H. Akbar, M. Tariq, N. Khan, M. Zubair, M. Yousef. 2007. Effect of planting methods and nitrogen levels on the yield and yield components of maize. *Sarhad Journal of Agriculture* 23: 553-559.
- Barrios-Ayala, A., A. Turrent-Fernández, A. Martínez-Garza, J. I. Cortés-Flores, C. A. Ortiz-Solorio. 2003. Optimización tecnológica simultánea para tres híbridos de maíz con precisión definida a priori. *Terra Latinoamericana* 21: 127-135.
- Bourges, H. R. 2013. El Maíz: su Importancia en la Alimentación de la Población Mexicana. pp: 231-247. In: Álvarez-Buylla, E., N. A. Piñeyro. (Eds). *El Maíz en Peligro ante los Transgénicos. Un Análisis Integral sobre el caso de México*. UNAM-UCCS. México, D.F.
- Chen, Y., C. Xiao, X. Chen, Q. Li, J. Zhang, F. Chen, L. Yuan, G. Mi. 2014. Characterization of the plant traits contributed to high grain yield and high grain nitrogen concentration in maize. *Field Crops Research* 159: 1-9.
- Ciampitti, I. A., T. J. Vyn. 2013. Grain nitrogen source changes over time in maize: a review. *Crop Science* 53: 366-377.
- Etchevers, B. J. 1992. *Manual de Métodos para el Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes*. Laboratorio de Fertilidad. Colegio de Postgraduados. Montecillos, México. 130 pp.
- Govaerts, B., M. Barrera-Franco, M. A. Limón-Ortega, P. Muñoz-Jiménez, P. K. Sayre, J. J. Deckers. 2008. Clasificación y evaluación edafológica de tres sitios experimentales del altiplano central de México. *Tropicultura* 26: 2-9.
- Gyóri, Z. 2010. Corn: Characteristics and Quality Requirements. pp: 183-211. In: Wrigley, C. W., I. Batey (Eds.). *Cereal Grains*. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, No. 190. Cambridge, UK.
- Hanan, S. S., M. G. Abd-El-Kader, H. I. El-Alia. 2008. Yield and yield components of maize as affected by different sources and application rates of nitrogen fertilizer. *Research Journal of Agriculture and Biological Sciences* 4: 399-412.
- Johanne, P. A., J. P. Lynch. 2012. Complementarity in root architecture for nutrient uptake in ancient maize/bean and maize/bean/squash polycultures. *Annals of Botany* 110: 521-534.
- Li, L., S. Jianhao, Z. Fusuo, L. Xialolin, Y. Sicun, R. Zdenko. 2001. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients. *Field Crops Research* 71: 123-137.
- Lithourgidis, A., C. Dordas, C. Damalas, D. Vlachostergios. 2011. Annual intercrops: an alternative pathway for sustainable agriculture. *Australian Journal of Crop Science* 5: 396-410.
- Mahmood, M. T., M. Maqsood, T. H. Awan, S. Rashid. 2001. Effect of different levels of nitrogen and intra-row plant spacing on yield and yield components of maize. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 38: 1-2.
- Malézieux, E., Y. Crozat, C. Dupraz, M. Lawrans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontaine, B. Rapidel, S. Tourdonnet, M. Valantin. 2009. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29: 43-62.
- Mercado, R. G., F. A. Turrent, C. O. Solorio, B. P. Olvera. 2001. Productividad en cebada maltera. II. Análisis de las interacciones de seis factores de la producción. *Agricultura Técnica en México* 27: 95-105.
- Mi, G. H., J. A. Liu, F. J. Chen, F. S. Zhang, Z. L. Cui, X. S. Liu. 2003. Nitrogen uptake and remobilization in maize hybrids differing in leaf senescence. *Journal of Plant Nutrition* 26: 237-247.
- Mukhtar, T., M. Arif, S. Hussain, M. Tariq, K. H. Mehmood. 2011. Effect of different rates of nitrogen and phosphorus fertilizers on growth and yield of maize. *Journal of Agricultural Research* 49: 333-338.
- Munamava, M. R., A. S. Goggi, L. Pollak. 2004. Seed quality of maize inbred lines with different composition and genetic backgrounds. *Crop Science* 44: 542-548.
- Ning, T., Y. Zheng, H. Han, G. Jiang, Z. Li. 2012. Nitrogen uptake, biomass yield and quality of intercropped spring-and summer-sown maize at different nitrogen levels in the North China Plain. *Biomass and Bioenergy* 47: 91-98.

- Pérez, R. P., S. M. Colín. 2008. Efecto del doble cenit solar en la producción de maíz y frijol II. Componentes del rendimiento de grano. *Scientia CUCBA* 10: 29-60.
- Pommel, B., A. Gallais, M. Coque, I. Quillere, B. Hirel, J. L. Prioul, B. Andrieu, M. Floriot. 2006. Carbon and nitrogen allocation and grain filling in three maize hybrids differing in leaf senescence. *The European Journal of Agronomy* 24: 203-211.
- Saha, S., K. A. Gopinath, B. L. Mina, H. S. Gupta. 2008. Influence of continuous application of inorganic nutrients to a Maize–Wheat rotation on soil enzyme activity and grain quality in a rainfed Indian soil. *The European Journal of Soil Biology* 44: 521-531.
- Sangoi, L. 2001. Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. *Ciência Rural* 31: 159-168.
- Sharar, M. S., M. Ayub, M. A. Nadeem, N. Ahmad. 2003. Effect of different rates of nitrogen and phosphorous on growth and grain yield of maize (*Zea mays* L.). *Asian Journal of Plant Science* 2: 347-349.
- Tecator, 1987. Determination of Kjeldahl nitrogen content with kjeltec system 1026. Application note AN 86/87 (1987.02.18). Kjeltec 1026 Manual. Tecator AB, Sweden.
- Turrent, F. A. 1980. El Agrosistema, un Concepto útil dentro de la Disciplina de Productividad: rama de Suelos. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 29 p.
- Turrent, F. A. 2008. Cultivos Asociados. pp: 115-125. In: Rodríguez, R., C. León (Eds). *El Cultivo del Maíz. Temas selectos*. Colegio de Postgraduados-Mundi Prensa. México, D.F.
- Uribelarrea, M., S. P. Moose, F. E. Below. 2007. Divergent selection for grain protein affects nitrogen use in maize hybrids. *Field Crops Research* 100: 82-90.
- Vázquez, G. J. 2008. *Ecofisiología del maíz. Volumen II*. Fundación Produce Universidad Autónoma de Chiapas. México. 352 pp.
- Wang, Z. H., S. Li. X., S. Malhi. 2008. Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88(1): 7-23.
- Zhao-Hui, W., L. Sheng-Xiu, M. Sukhdev. 2008. Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88: 7-23.