

Campo electromagnético en plántulas, rendimiento y calidad de maíz en condiciones de campo

Rosalba Zepeda Bautista^{1§}
Juan Virgen Vargas²
Francisco Suazo-López³
F. Arturo Domínguez-Pacheco¹
Hilda Rodríguez-Rebollar¹
Claudia Hernández-Aguilar¹

¹Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica-Instituto Politécnico Nacional-Unidad Profesional 'Adolfo López Mateos'. Col. Lindavista, Ciudad de México. CP. 07738. (fatur@hotmail.com; hilreb70@hotmail.com; clauhaj@yahoo.com). ²Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Carretera Los Reyes-Textcoco km 13.5, Coatlinchán, Textcoco, Estado de México. CP. 56250. (jvirgen.vargas@hotmail.com). ³Departamento de Preparatoria Agrícola-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Textcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México. CP. 56230. (suazofl@hotmail.com).

§Autor para correspondencia: rzb0509@hotmail.com.

Resumen

Para mejorar productividad y calidad del grano de maíz (*Zea mays* L.) Para consumo humano, sin dañar el ambiente, se evaluó el efecto del campo electromagnético (CE) sobre calidad fisiológica, rendimiento y sanidad del grano de maíz. La semilla se expuso a CE a intensidad de 3.6 mT. En condiciones de campo, en 2015 y 2016, se evaluaron las variedades: H-70, H-61R y V-60 y tres tiempos de exposición a CE (6, 12 y 24 min) más un testigo (no irradiado) en un diseño de bloques completos al azar. Los resultados mostraron que la semilla expuesta por 24 min a CE incrementó 10.54% y dos días el establecimiento de plántulas y la floración media masculina; asimismo, 11.04% el rendimiento ha⁻¹ (870 kg ha⁻¹) en comparación con el testigo no irradiado. H-70 y V-60 tuvieron mayor establecimiento de plántulas con 24 minutos de exposición a CE (17.5 y 8.23 %) y H-61R con 12 min (9.75%). H-61R y V-60 rindieron más (10.85 y 8%) con 12 min de exposición a CE y H-70 aumentó 27.14 % con 6 min en comparación con el testigo. En el grano se cuantificó en promedio 9.22 y 7.72% de *Fusarium* spp. y *Fusarium oxysporum*. Con 12 min de exposición a CE disminuyó 10% la presencia de *Fusarium* spp. en comparación con el testigo. Campo electromagnético, usado como tratamiento pre siembra en semilla de variedades de maíz, aumenta significativamente el establecimiento de plántulas, pero no el rendimiento de grano en condiciones de campo.

Palabras clave: *Fusarium* spp., *Zea mays* L., peso hectolítrico, rendimiento, vigor de semilla.

Recibido: enero de 2019

Aceptado: marzo de 2019

Introducción

Entre 2017 y 2026, se estima que el consumo mundial de maíz crecerá a una tasa promedio anual de 1.35%. El consumo promedio será de 1 093.9 millones de toneladas, 13.22, 16.48 y 58.68% para consumo humano, biocombustibles y alimentación animal con una tasa promedio anual de crecimiento de 1.99, 1.26 y 1.49% (OECD y FAO, 2017). En 2016, en el mundo se produjeron 1 060 millones de toneladas con un rendimiento promedio de 5.69 t ha⁻¹, 70.61% fue producido por EE. UU., China, Brasil, Argentina y México. México produjo 28.25 millones de toneladas de maíz (2.66% del total) e importó 7.15 millones de toneladas.

En 2013, se usaron 14.23 millones de toneladas de maíz para elaborar alimentos con un consumo *per capita* de 318.74 g persona⁻¹ día⁻¹, que proporciona el 49.3 y 21.1% de energía y proteína que requiere el cuerpo humano (FAO, 2018). En países en desarrollo, entre 2017 y 2026 el consumo aumentará 1.45% anual con una diferencia entre producción y consumo de 8.58%, equivalente a 48.3 millones de t (OECD y FAO, 2017) debido a que la productividad es menor, en México es de 3.71 t ha⁻¹, en comparación con países desarrollados, en EE. UU. es de 10.96 t ha⁻¹, (FAO, 2018). Por ello, se requiere aumentar la productividad y la calidad del grano de maíz con el uso eficiente de los recursos naturales, financieros y humanos, sin dañar el ambiente.

En maíz, la productividad ha aumentado entre 50 y 60% debido al mejoramiento genético y entre 40 y 50% ocasionado por el manejo de las prácticas agronómicas (Duvick, 2005; Lee y Tollenaar, 2007). En híbridos de maíz, con las dosis 67 y 145 kg N ha⁻¹ se obtuvieron rendimiento promedio de 7.42 y 10.64 t ha⁻¹ en comparación con 252 y 202 kg N ha⁻¹ que rindieron 36 y 9% más, respectivamente (Haegerle *et al.*, 2013; Kovács *et al.*, 2014). Sin embargo, el uso excesivo de N está causando problemas severos al ambiente por la contaminación del aire, suelo y agua (Nazir *et al.*, 2016; Bouwman *et al.*, 2017). Una alternativa es usar técnicas para la producción amigables con el ambiente como es el campo electromagnético.

Los campos electromagnéticos son una combinación de campos de fuerza eléctricos y magnéticos invisibles. Los campos magnéticos alternos, invierten su sentido con una frecuencia regular y se producen por medio de dispositivos, como bobinas que usan corriente alterna. Debido a que, si un campo eléctrico varía con el tiempo, se induce un campo magnético (Carbonell *et al.*, 2017). Los efectos magnéticos en las plantas se explican por la transferencia de energía sobre la materia que contiene radicales libres que son atraídos o repelidos en función de su carga, los cuales aumentan su carga y se activan.

Esto da origen a una bioestimulación, cuya magnitud depende de los parámetros adecuados de la energía que se transfiere con base al modelo par radical, que tiene un papel esencial en la magneto-recepción (Galland y Pazur, 2005). El efecto del campo magnético sobre la germinación, el crecimiento y el rendimiento de las plantas cultivadas es variado; depende de la dosis de exposición (intensidad y tiempo), la especie y el cultivar (Pietruszewski y Martínez, 2015; Carbonell *et al.*, 2017). Algunos autores reportan el efecto positivo del campo magnético sobre varios cultivos, aplicado a la semilla como tratamiento pre-siembra.

En trigo, se encontró 12 y 14% más rendimiento con la exposición a campo magnético a una dosis de 12.9 y 17.9 kJ m⁻³ s⁻¹ en comparación con el control (Pietruszewski y Kania, 2010). En chícharo aumentó la longitud y el peso seco de las plántulas, el rendimiento y sus componentes (Iqbal *et al.*,

2012; Iqbal *et al.*, 2013). En girasol y caléndula francesa expuestos a 30 s y 3 min a campo electromagnético a 30 y 100 mT, se observó un incremento de 90% en la germinación y 400% en la emergencia de las plántulas, respectivamente (Afzal *et al.*, 2012; Matwijczuk *et al.*, 2012).

En alfalfa, aumentó la emergencia y el número de plantas m⁻² en 36% con 30 s a 30 mT, en comparación con el testigo (Ćwintal y Dziwulska-Hunek, 2013). En *Vigna radiata* se mejoró la germinación y longitud de plántula al aumentar la intensidad (0.087-0.226 T) con una exposición de 100 min (Mahajan y Pandey, 2014) y en brocolí se bioestimuló semillas envejecidas durante 72 h con 5 min a 3.6 mT, se obtuvo 20% más germinación en comparación con el testigo (Rico *et al.*, 2014). En maíz, se ha reportado que el campo electromagnético (CE) mejora la calidad fisiológica de la semilla, la productividad y la calidad del grano.

En condiciones de campo, Shine y Guruprasad (2012) encontraron 78 y 40% más área foliar y longitud de raíz de plántulas, respectivamente, con 1 h de exposición a CE a 200 mT en comparación con el testigo no irradiado. En rendimiento de grano de maíz, Zepeda-Bautista *et al.* (2014) reportan un incremento de 6% con 12 min de exposición a CE a 480 mT en comparación con el testigo. En calidad física de grano, Zepeda *et al.* (2011) observaron una disminución de 15.5 y 5% en el índice de flotación y peso hectolítrico y 11% en el pericarpio retenido en el grano después de la nixtamalización en comparación con el testigo.

El maíz es comúnmente colonizado por especies de *Fusarium* y frecuentemente contaminado con micotoxinas que afectan la productividad y la sanidad de la planta y grano (Cendoya *et al.*, 2018). *Fusarium* spp. ocasiona marchitez en plántulas y planta, causa pudriciones en los órganos vegetativos, mazorca y grano, principalmente *F. verticillioides*, *F. subglutinans*, *F. proliferatum* y *F. oxysporum* (Figueroa-Rivera *et al.*, 2010; Leyva-Madrigal *et al.*, 2017; Mendoza *et al.*, 2017). Existe variabilidad genética entre líneas e híbridos para resistencia a *Fusarium* spp., la mayoría son susceptibles y la incidencia de hongos ha aumentado (Pereira *et al.*, 2017).

Una alternativa es generar híbridos resistentes o usar métodos biofísicos como campo magnético. Zepeda-Bautista *et al.* (2014) reportan una disminución de 33, 13 y 10% de *Fusarium* spp. con 3, 12 y 6 min de exposición de la semilla a CE a 480 mT, y Gutiérrez *et al.* (2014) observaron 10% menos *Fusarium* sp. al exponer la semilla por 48 h a 4 mT en comparación con el testigo.

En países en desarrollo, la productividad de maíz es baja y la calidad del grano para consumo humano y animal y materia prima para la industria, no es satisfactoria. El uso excesivo de N en su producción está causando problemas severos al ambiente. La información sobre la aplicación de campo electromagnético en maíz se focaliza en germinación y crecimiento de la plántula en condiciones controladas; mientras que, la información sobre rendimiento y calidad de grano en condiciones de campo es limitada. El objetivo fue evaluar el efecto del campo electromagnético en el establecimiento de plántulas, las características agronómicas, el rendimiento y la calidad física y sanitaria del grano en variedades de maíz en condiciones de campo.

Materiales y métodos

La investigación se realizó en el Campo Experimental San Ignacio de la Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México 19° 29' 31.19" latitud norte y 98° 52' 20.86" longitud oeste. y 2 268 msnm). El clima es subhúmedo con lluvias en verano (C (w_o) (w)_b (i')), la temperatura

media anual de 16.4 °C, con precipitación pluvial promedio anual de 618.5 mm (SMN, 2018). El suelo fue franco con pH ligeramente alcalino (7.26), libre de sales (conductividad eléctrica 0.26 dS m⁻¹), materia orgánica y N inorgánico medio (2.15% y 36.5 mg kg⁻¹), P asimilable muy alto (36.27 mg kg⁻¹) y K alto (648 mg kg⁻¹).

Durante el ciclo primavera-verano de 2015 y 2016, se evaluaron en factorial 3x4: tres variedades de maíz (H-61R, H-70 y V-60) y tres tiempos de exposición a campo electromagnético (6, 12 y 24 minutos, intensidad 3.6 mT) y un testigo (sin exposición a campo electromagnético) en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones. La unidad experimental fue de cuatro surcos de 5 m de longitud separados a 0.8 m, se usaron los dos surcos centrales como parcela útil.

La semilla de maíz se expuso a campo magnético variable mediante un solenoide alimentada con una señal sinusoidal de 60 Hz, dispositivo que cumple con la hipótesis de que la inducción magnética debe ser uniforme en toda la superficie de la semilla, ésta fue colocada en la parte media del solenoide. El solenoide es un dispositivo original diseñado y construido por Domínguez *et al.* (2010), investigadores de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN), la Figura 1 muestra la distribución del campo magnético generado. La semilla se radió el 30 de abril y el 02 de mayo en 2015 y 2016, respectivamente y se procedió a la siembra el día siguiente.

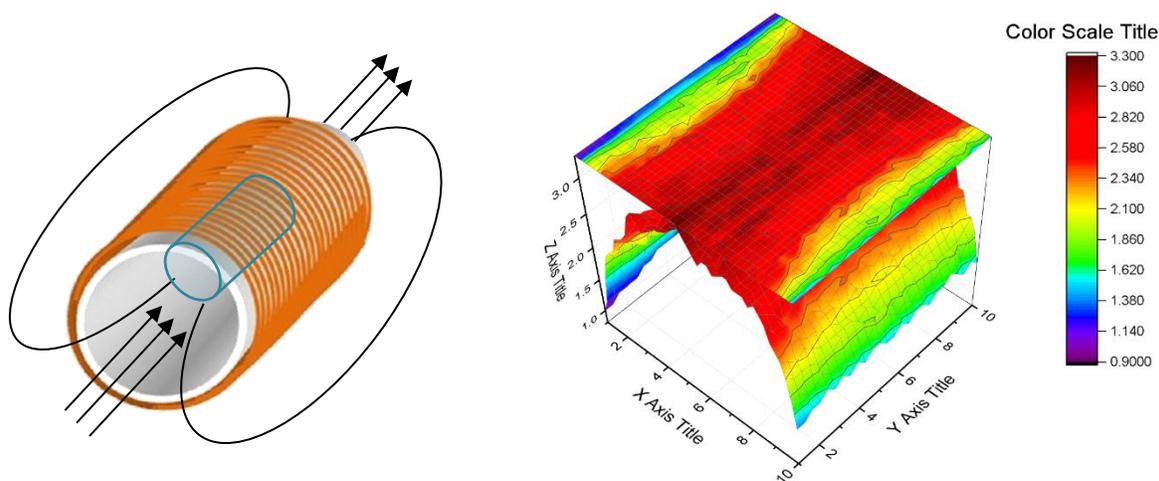


Figura 1. Visualización de la distribución del campo magnético en el solenoide (Domínguez *et al.*, 2010).

La preparación del terreno fue con barbecho, rastra y surcado con maquinaria. La siembra se realizó manual, en suelo seco, a una densidad de población de 70 000 plantas ha⁻¹, distancia entre plantas de 17.8 cm y una planta por mata. Se fertilizó con 120N-60P-30K en fertirriego, la aplicación fue semanal a partir de la semana cinco después de la siembra; se utilizó fosfonitrato, ácido fosfórico y nitrato de potasio como fuente de nitrógeno, fósforo y potasio, respectivamente.

Se controló la maleza con la aplicación en preemergencia de Primagran gold[®] (i. a. Atrazina + S-metolaclor) a una dosis de 1.5 L ha⁻¹ y en postemergencia con Marvel[®] (i. a. Dicamba + Atrazina) a una dosis de 2 L ha⁻¹, cuando la maleza tuvo una altura de 5 cm. El 15 y 18 de noviembre de 2015 y 2016, se realizó la cosecha manualmente cuando se observó la formación de la capa negra en la

base del grano, indicador de madurez fisiológica (Virgen-Vargas *et al.*, 2016). El secado de las mazorcas fue natural en un lugar ventilado y en la sombra, se desgranó manualmente cuando el contenido de humedad del grano fue alrededor de 12% y se almacenó el grano a una temperatura de 18 °C.

Las variables evaluadas fueron: 1) Establecimiento de plántulas (EP), se calculó en porcentaje con la fórmula: $EP = (\text{número de plántulas normales a los 25 días después del primer riego} / 112 \text{ semillas sembradas por unidad experimental (UE)}) \times 100$; 2) floración media masculina, se cuantificó en los surcos centrales, los días a partir del primer riego hasta que 50% de las plantas tuvieron la espiga liberando polen; 3) altura de planta, se midió en cinco plantas tomadas al azar y en cm desde la base del tallo hasta el punto de inserción de la espiga; y 4) rendimiento, se calculó en $t \text{ ha}^{-1}$ a 12% de humedad con la fórmula.

Rendimiento = $[(PC \times \%MS \times \%G \times FC) / 8800] / 1000$; donde PC = peso de campo de mazorca, en kg por parcela útil, %MS = porcentaje de materia seca, mediante la diferencia de 100 menos el porcentaje de contenido de humedad de la semilla obtenido del aparato Stenlite®; %G = porcentaje de grano, relación entre el peso de grano y el peso de mazorca desprovista de brácteas, promedio de cinco mazorcas tomadas al azar, multiplicado por 100; FC = factor de corrección, obtenido al dividir $10\,000 \text{ m}^2$ (1 ha) entre la superficie útil de la parcela (16 m^2); 8 800 = factor para ajustar el rendimiento al 12% de humedad por hectárea.

Calidad física y sanitaria del grano

Las evaluaciones se hicieron en el laboratorio de Sistémica-Transdisciplinaria del Programa de Ingeniería de Sistemas en la ESIME-IPN, Ciudad de México, México. Se utilizó una muestra aleatoria de 1 kg de grano por repetición. Para determinar la calidad física del grano, se midieron: 1) peso hectolítrico, se determinó en una báscula marca Ohaus® y se expresó en kg hL^{-1} ; y 2) tamaño de grano comercial, se clasificó el grano con cribas de perforación redonda de 8 y 7 mm de diámetro, se sumó el peso del grano retenido en ambas cribas y reportó en porcentaje.

Para determinar la calidad sanitaria del grano, se utilizó la prueba de sanidad de papel secante y congelación (Warham *et al.*, 1996), se utilizó 50 granos por repetición. Los granos fueron desinfectados con hipoclorito de sodio (NaCl) al 10% durante 3 min y enjuagados con agua destilada durante 1 min, enseguida, los granos se colocaron sobre papel filtro húmedo en una caja de plástico transparente y se sellaron con parafilm. Para su incubación, las cajas se colocaron a 25 °C durante dos días (12 h con luz blanca fría y 12 h oscuridad cada día).

Transcurrido el tiempo, se sometieron a congelación a -1 °C durante 24 h. Finalmente, las cajas se colocaron a 25 °C durante 11 días. A los 14 días, se cuantificó el número de granos infectados con *Fusarium* spp. y *Penicillium* spp. y se expresó en porcentaje. Para detectar la presencia de desarrollo micelial, cada grano se observó con microscopio estereoscópico Olympus SZ51®. En los granos se observó crecimiento micelial con una variación en color blanco-amarillo, rosa salmón y gris. Para la identificación morfológica de las especies de *Fusarium* se elaboró con las claves específicas y descripciones reportadas por Nelson *et al.* (1983) y para *Penicillium* (Pitt, 1979).

A las variables registradas se les realizó un análisis de varianza combinado con el procedimiento PROC GLM del Statistical Analysis System (SAS, 2014) para los factores principales y para las variables cuyos cuadrados medios mostraron diferencias significativas se utilizó la prueba de comparación múltiple de Tukey ($\alpha=0.05$). Las variables en porcentaje se transformaron con la función arcoseno para una distribución normal y poder llevar a cabo el análisis previamente referido.

Resultados y discusión

Establecimiento de plántulas de maíz en condiciones de campo

En el campo de producción, el establecimiento de plántulas es un indicador básico para la productividad del cultivo. La exposición de la semilla a campo electromagnético, intensidad de 3.6 mT (Figura 1), como tratamiento pre-siembra causó diferencias significativas ($p \leq 0.05$), en el establecimiento de plántulas de maíz en condiciones de campo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de medias de variedades de maíz con diferente tiempo de exposición de la semilla a campo electromagnético como tratamiento pre siembra. 2015-2016.

Tiempo de exposición a CE (min)	Establecimiento de plántulas (%)	Floración media masculina (días)	Altura de planta (cm)	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Tamaño de grano (%)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)
Testigo	82.23 b	83.05 b	249 a	7.88 a	93.55 a	75.91 a
6	82.39 b	84.83 ab	257.94 a	8.87 a	94.77 a	76.16 a
12	87.71 ab	84.11 ab	257 a	8.9 a	93.11 a	76.45 a
24	90.9 a	84.94 a	252.33 a	8.75 a	92.88 a	75.62 a
P> F	0.01	0.02	0.08	0.06	0.54	0.41
DMSH	8.34	1.78	9.77	1.14	3.99	1.36
Media	85.81	84.24	254.19	8.61	93.58	76.04
CV (%)	11.36	2.39	4.35	14.94	6.01	2.02
R ²	0.34	0.77	0.89	0.52	0.51	0.58

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$). DMSH= diferencia mínima significativa honesta. CV= coeficiente de variación; CE= campo electromagnético, intensidad 3.6 mT. R²= coeficiente de determinación.

Esto debido a la bioestimulación de la semilla por la transferencia de energía sobre la materia que contiene radicales libres que son atraídos o repelidos en función de su carga, los cuales aumentan su carga y se activan (Galland y Pazur, 2005) provocando cambios en enzimas, clorofila y fotosíntesis reflejado en el crecimiento de la plántula (Javed *et al.*, 2011; Shine y Guruprasad, 2012). La mejora en la germinación y crecimiento de las plántulas de maíz, en condiciones controladas fueron reportados por Domínguez *et al.* (2010) y Shabrangi *et al.* (2015) y en condiciones de campo por Shine y Guruprasad (2012).

La semilla de maíz expuesta a 24 min a campo electromagnético (CE) incrementó 10.54% ($p \leq 0.05$), el establecimiento de plántulas en condiciones de campo en comparación con el testigo no expuesto a CE (Cuadro 1). Con 12 min se aumentó 6.66% en comparación con el testigo, ambos estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$). Con 24 y 12 min de exposición de la semilla a CE permitió registrar valores $\geq 85\%$ de plántulas establecidas en campo; sin embargo, solo con 24 min se registró

91% de plántulas establecidas en las variedades de maíz, valor >90% de germinación, cuantificada con la prueba de germinación estándar, mínimo requerido en la regla para la calificación de semilla de maíz en México (SAGARPA-SNICS, 2016).

El testigo no irradiado y 6 min de exposición a CE tuvieron un establecimiento de plántulas <85%. En condiciones controladas, Domínguez *et al.* (2010); Zepeda-Bautista *et al.* (2010) reportaron 90 y 2% de incremento en el establecimiento de plántulas de híbridos de maíz con 30 y 15 minutos de exposición a CE a una intensidad de 560 y 480 mT en comparación con el testigo no expuesto a campo electromagnético. Entre variedades de maíz y años de producción no hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$), para establecimiento de plántulas en condiciones de campo (Cuadro 2) porque el tamaño de la semilla fue homogéneo (grande, criba de 8 mm de diámetro), medida indirecta de la cantidad de reserva, usada durante la germinación y establecimiento de la plántula.

Cuadro 2. Comparación de medias de variedades de maíz. Chapingo, Estado de México, México. 2015-2016.

Variedades de maíz	Establecimiento de plántulas (%)	Floración media masculina (días)	Altura de planta (cm)	Rendimiento de grano (t ha ⁻¹)	Tamaño de grano (%)	Peso hectolítrico (kg hL ⁻¹)
H-61R	84.53 a	85.83 a	255.62 a	8.02 b	92.33 b	76.41 a
H-70	85.92 a	81.41 b	262.25 a	9.82 a	96.25 a	75.52 a
V-60	86.97 a	85.45 a	244.7 b	7.97 b	92.16 b	76.17 a
P> F	0.75	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.12
DMSH	6.56	1.4	7.7	0.89	3.14	1.07
Años de producción						
2015	87.64 a	86.47 a	279.94 a	8.76 a	94.91 a	77.15 a
2016	83.97 a	82 b	228.44 b	8.44 a	92.25 b	74.92 b
P> F	0.34	<0.01	<0.01	0.29	0.01	<0.01
DMSH	4.46	0.95	5.23	0.61	2.13	0.73

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha = 0.05$). DMSH= diferencia mínima significativa honesta.

Asimismo, en cada siembra las condiciones de suelo, riego por goteo (por semana 167 m³ ha⁻¹ al 100% de evaporación de maíz), temperatura promedio (18.6 °C) y sin precipitación fueron similares (SMN, 2018). En condiciones de campo, no se han reportado resultados similares. Entre variedades se registró 85.81% de establecimiento de plántulas (EP) en condiciones de campo. La variedad V-60 tuvo el mayor establecimiento de plántulas, 2.44 y 1.05% más que los híbridos H-61R y H-70. En 2015, se tuvo 3.67% más plántulas establecidas en campo en comparación con 2016, estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05$).

Características agronómicas, rendimiento y calidad física de grano

Entre tiempo de exposición de la semilla a campo electromagnético como tratamiento pre-siembra, hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$), para floración media masculina (Cuadro 1) debido a que la bioestimulación de la semilla tuvo un efecto sobre el crecimiento de la planta. El efecto positivo del campo magnético en varias plantas cultivadas ha sido reportado por diversos autores (Pietruszewski y Martínez, 2015).

Con 24 min de exposición a CE se aumentaron dos días para la floración media masculina en comparación con el testigo no irradiado, lo cual puede ser útil en un lote de producción de semillas de maíz, categorías registrada y certificada, para lograr la sincronía floral entre progenitores hembra y macho (Virgen-Vargas *et al.*, 2016). Zepeda-Bautista *et al.* (2014) reportaron un aumento de un día en la floración media masculina con 15 min de exposición de la semilla a CE a una intensidad de 480 mT.

La aplicación de campo electromagnético a la semilla no tuvo un efecto significativo ($p \leq 0.05$), para altura de planta y rendimiento de grano (Cuadro 1); sin embargo, se observó un aumento en ellos en comparación con el testigo ($p = 0.08$ y $p = 0.06$, respectivamente). Con base en estos resultados y al efecto positivo del campo electromagnético sobre el crecimiento y el rendimiento de las plantas cultivadas reportado por varios autores (Pietruszewski y Martínez, 2015; Carbonell *et al.*, 2017), se recomienda realizar aplicaciones de campo electromagnético durante el ciclo fenológico de la planta, en las etapas de mayor absorción nutrimental: diferenciación floral (V10), floración (V18) y llenado de grano (R2).

El efecto positivo de campo magnético sobre el rendimiento de trigo reportado por Pietruszewski y Kania (2010) y chícharo por Iqbal *et al.* (2013). En maíz, Zepeda-Bautista *et al.* (2014) reportaron que con 12 min de exposición de la semilla a CE (480 mT) en pre-siembra se aumentó 6% el rendimiento de grano. Con 12 min de exposición de la semilla a CE, a una intensidad de 3.6 mT, se observó un incremento en la altura de planta y peso hectolítrico de grano de 3 y 0.71%, ambos estadísticamente iguales ($\alpha = 0.05$). Con 24 y 12 min a CE aumentó 12.94 y 11.04% el rendimiento de grano ha^{-1} , equivalente a 1020 y 870 kg ha^{-1} , en comparación con el testigo no expuesto a CE.

Sin embargo, para porcentaje de grano comercial no hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en comparación con el testigo (Cuadro 1). Por el contrario, en híbridos de maíz se observó un decremento de 5% en el peso hectolítrico al exponer el grano a campo electromagnético durante 15 min a 480 mT Zepeda *et al.* (2011). Entre variedades de maíz y entre años de producción se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), para características agronómicas, rendimiento y calidad de grano (Cuadro 2). En el híbrido H-61R y la variedad V-60 se observaron cuatro días más para la floración media masculina y 2.59 y 7.17% menos altura de planta en comparación con el híbrido H-70.

El rendimiento de grano promedio fue $>8.5 \text{ t ha}^{-1}$, superior a la productividad media en México (3.71 t ha^{-1}) (FAO, 2018) y similar a los rendimientos (7.42 y 10.64 t ha^{-1}) reportados por Haegele *et al.* (2013) y Kovács *et al.* (2014) con la aplicación de fertilizantes químicos, que en ocasiones causan problemas severos al ambiente (Nazir *et al.*, 2016). Por lo tanto, la aplicación de campo electromagnético a la semilla como tratamiento pre-siembra, es una alternativa para mejorar el rendimiento de maíz, sin dañar el ambiente.

El híbrido H-70 rindió 22.44 y 23.21% más y 4% más grano comercial en comparación con H-61R y V-60. En promedio, se observaron 94% de grano comercial y 76.04 kg hL^{-1} de peso hectolítrico, valores superiores a los requeridos por la industria de la masa y la tortilla (NMX-FF-034/1-SCFI-2002, 2002). Benítez-Rodríguez *et al.* (2014) reportaron que el híbrido H-70 rindió 48.33% menos y peso hectolítrico del grano similar, en temporal en Valles Altos de México con una precipitación media anual de 583 y 816 mm, en comparación con el rendimiento y peso hectolítrico de fertirriego en Chapingo, Estado de México con una precipitación media anual de 618.5 mm.

En el año de producción 2015 se observaron cuatro días más para la floración media masculina y 22.54% mayor altura de planta, 2.66 y 2.97% más grano comercial y peso hectolítrico en comparación con 2016. Esto debido a que la cantidad y la distribución de la precipitación durante el ciclo fenológico del maíz fue diferente, lo que afectó el crecimiento y desarrollo de la planta, como lo reportaron Virgen-Vargas *et al.* (2016) en cruza simples de maíz. Entre los meses de junio a septiembre de 2015, la temperatura media y la precipitación fueron 10.24 y 5.28% mayor que en 2016 (16.6 °C y 408.4 mm). El rendimiento de grano fue estadísticamente igual ($\alpha= 0.05$) entre años; en 2015 se produjeron 320 kg ha⁻¹ más que en 2016.

Interacción variedades de maíz x tiempo de exposición a campo electromagnético

Para las variables plántulas establecidas y rendimiento de grano, las variedades de maíz mostraron una respuesta estadísticamente igual ($\alpha= 0.05$) al tiempo de exposición de la semilla a campo electromagnético (CE) a una intensidad de 3.6 mT. En el híbrido H-70 y la variedad V-60 se observó un aumento en las plántulas establecidas en campo al incrementar el tiempo de exposición de la semilla a CE. En H-70 con la exposición de 6, 12 y 24 min aumentó 3.75, 8.75 y 17.5% y en V-60 0, 1.17 y 8.23% más que el testigo (no expuesto a CE).

Resultados contrarios a los reportados por Zepeda-Bautista *et al.* (2010), que al evaluar el establecimiento de plántulas de maíz en condiciones controladas observaron un incremento, seguido de un decremento al aumentar el tiempo de exposición de la semilla a CE (3, 6, 9, 12 y 15 min). En el híbrido H-61R con 12 min de exposición tuvo mayor establecimiento de plántulas en condiciones de campo (9.75%) en comparación con 6 min de exposición a CE, que mostró un decremento de 2.43% (Figura 2).

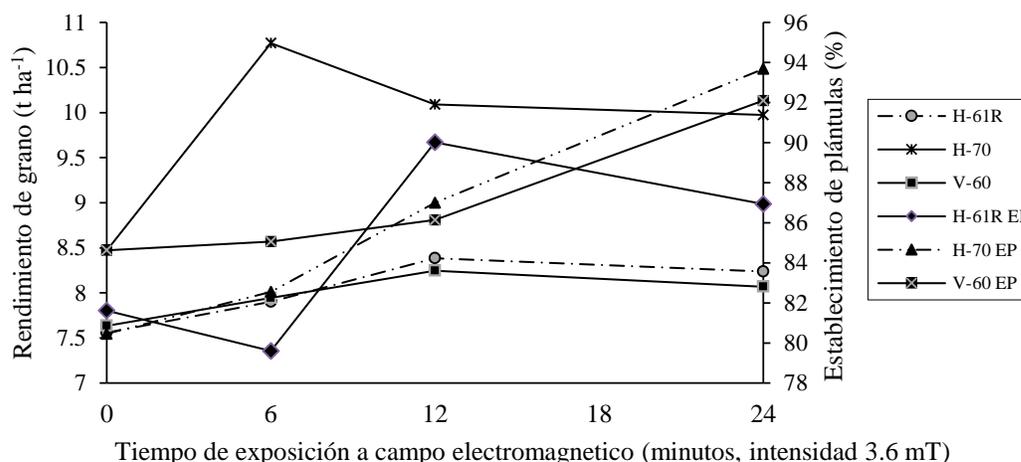


Figura 2. Establecimiento de plántulas y rendimiento de grano en variedades de maíz con tiempo de exposición de la semilla a campo electromagnético como tratamiento pre-siembra.

Para rendimiento de grano, el híbrido H-61R y la variedad V-60 rindieron más (10.85 y 8%) con 12 min de exposición a CE, mientras que, el híbrido H-70 aumento su rendimiento 27.14% con 6 min de exposición en comparación con el testigo no expuesto a CE (Figura 2). Esto representó un incremento de 800, 600 y 2 300 kg ha⁻¹ de grano para el productor con la aplicación de un método biofísico amigable con el ambiente.

Cada variedad de maíz tuvo una respuesta diferente al tiempo de exposición al CE, comportamiento similar a lo observado por Zepeda-Bautista *et al.* (2014) al evaluar el rendimiento de híbridos de maíz con exposición a CE de la semilla como tratamiento pre-siembra. Sin embargo, existe poca información sobre el efecto del campo electromagnético en el establecimiento de plántulas, crecimiento y producción de maíz en condiciones de campo (Pietruszewski y Martínez, 2015).

En otros cultivos como trigo, se observó 12 y 14% más rendimiento con la exposición a campo magnético a una dosis de 12.9 y 17.9 kJ m⁻³ s⁻¹ en comparación con el control (Pietruszewski y Kania, 2010) y en chícharo, se observó la mayor producción de vaina verde por planta y por hectárea con la exposición de 5 min a una intensidad de 180 mT (Iqbal *et al.*, 2013).

Sanidad del grano de maíz

Entre años de producción no hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el porcentaje de granos infectados por *Fusarium* spp. y por *F. oxysporum* porque las características físicas y químicas del suelo y el manejo agronómico fueron similares; además, entre junio y septiembre la temperatura y la precipitación en 2015 fueron ligeramente superiores (18.3 °C y 430 mm) en comparación con 2016 (16.6 °C y 408.4 mm), que no afectó el porcentaje de granos infectados por *Fusarium*; no obstante, sí hubo mayor porcentaje de granos infectados por *F. graminearum* (Cuadro 3).

Cuadro 3. Comparación de medias de la calidad sanitaria del grano de variedades de maíz con diferente tiempo de exposición de la semilla a campo electromagnético como tratamiento pre-siembra. Chapingo, Estado de México. 2015-2016.

Años de producción	<i>Fusarium</i> spp. (%)	<i>Fusarium graminearum</i> (%)	<i>Fusarium oxysporum</i> (%)	<i>Penicillium</i> spp. (%)
2015	8.55 a	0.55 b	8 a	3.77 a
2016	9.88 a	2.44 a	7.44 a	2.55 a
P> F	0.27	0.01	0.92	0.38
DMSH	3.67	1.5	3.23	1.99
Variedades de maíz				
H-61R	10.33 a	2.33 a	8 a	3.5 a
H-70	10.66 a	1.16 a	9.5 a	2.33 a
V-60	6.66 a	1 a	5.66 a	3.66 a
P> F	0.08	0.35	0.1	0.76
DMSH	5.41	2.21	4.76	2.94
Tiempo de exposición de la semilla a campo electromagnético, intensidad 3.6 mT (min)				
Testigo	8.22 a	1.77 a	6.44 a	2.44 a
6	10 a	1.55 a	8.44 a	3.77 a
12	7.33a	1.55 a	5.77 a	4.44 a
24	11.33a	1.11 a	10.22 a	2 a
P> F	0.29	0.91	0.1	0.53
DMSH	6.87	2.81	6.04	3.73
Media	9.22	1.5	7.72	3.16

Medias con la misma letra en cada columna son estadísticamente iguales (Tukey, $\alpha=0.05$). DMSH= diferencia mínima significativa honesta.

En 2016, el porcentaje de granos infectados por *F. graminearum* fue mayor (2.44%) en comparación con 2015 (0.55%). Valores similares (entre 1.88 y 2.33%) fueron registrados por Zepeda-Bautista *et al.* (2014) en híbridos de maíz en el Estado de México.

En el grano de variedades de maíz se cuantificó en promedio 9.22% de granos infectados por *Fusarium* spp., 7.72% por *Fusarium oxysporum* y 1.5% por *Fusarium graminearum* (Cuadro 3). Cendoya *et al.* (2018) reportaron entre 13 y 16% de severidad de pudrición de mazorca de híbridos de maíz en Texcoco y Huamantla, México asociada a la presencia de *Fusarium verticilloides*, *F. subglutinans*, *F. proliferatum* y *F. oxysporum*. Esto indica que el grano de maíz fue colonizado por especies de *Fusarium* que afecta la sanidad del grano como lo reportaron Cendoya *et al.* (2018).

Entre variedades de maíz no hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para el porcentaje de granos infectados por *Fusarium* spp.; es decir, los granos infectados por *Fusarium* fueron similares entre genotipos. Resultados contrarios fueron observados por Pereira *et al.* (2017) al evaluar híbridos y líneas de maíz. Los híbridos H-61R y H-70 tuvieron en promedio 10% de granos infectados por *Fusarium* spp. y entre 8 y 9.5% por *F. oxysporum*; mientras que, la variedad V-60 tuvo los valores menores (6.66 y 5.66%).

El porcentaje de granos infectados por *Fusarium* spp. fue menor a lo reportado por Zepeda-Bautista *et al.* (2014) en híbridos de maíz (28.49%). Entre años de producción y variedades de maíz no hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para porcentaje de granos infectados por *Penicillium* spp., en promedio fue de 3.16% (Cuadro 3), se observó siempre en grano separado de *Fusarium* spp. En 2015 y en el híbrido H-61R, el porcentaje de granos infectados por *Penicillium* spp. fueron 47.84 y 50.21% mayor en comparación con 2016 y el híbrido H-70.

Por otra parte, la exposición de la semilla durante 6 y 24 min a CE aumentó la presencia *Fusarium* spp. en 21.65 y 37.83% y *F. oxysporium* 31.05 y 58.69% en comparación con el testigo no irradiado. Para *Penicillium* spp. en grano de maíz, se observó un aumento 54.51 y 81.96% con la exposición de 6 y 12 min de la semilla a CE como tratamiento presembrado (Cuadro 3). En general, se observó menor presencia de *Fusarium* spp. con la aplicación del campo electromagnético a la semilla en presembrado, por lo que podría ser un método alternativo para el control del hongo en granos de maíz para elaborar alimentos para consumo humano.

Conclusiones

El campo electromagnético usado como tratamiento pre-sembrado en semilla de variedades de maíz incrementó significativamente el establecimiento de plántulas y la floración media masculina en condiciones de campo. Para rendimiento de grano no hubo un efecto significativo ($p \leq 0.05$); sin embargo, se observó un aumento ($p = 0.06$). Las variedades de maíz tuvieron una respuesta estadísticamente igual al tiempo de exposición de la semilla a campo electromagnético para establecimiento de plántulas y rendimiento de grano en condiciones de campo en función de la composición estructural de la semilla.

Literatura citada

- Afzal, I.; Mukhtar, K.; Qasim, M.; Basra, S. M. A.; Shahid, M. and Haq, Z. 2012. Magnetic stimulation of marigold seed. *Int. Agrophys.* 26(1):335-339. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0047-1>.
- Benítez, R. M. G.; Zepeda, B. R.; Hernández, Aguilar, C.; Virgen, V. J.; Rojas, Martínez I. and Domínguez, P. A. 2014. Physical characteristics and yield of maize grain in rainfed conditions of High Valleys of Mexico. *Acta Agrophysica.* 21(4):403-414.
- Bouwman, A. F.; Beusen, A. H. W.; Lassaletta, L.; van Apeldoorn, D. F.; van Grinsven H. J. M.; Zhang, J. and van Ittersum, M. K. 2017. Lessons from temporal and spatial patterns in global use of N and P fertilizer on cropland. *Sci. Rep.* 7:40366. <https://doi.org/10.1038/srep40366>.
- Carbonell, M. V.; Flórez, M.; Martínez, E. y Álvarez, J. 2017. Aportaciones sobre el campo magnético: Historia e influencia en sistemas biológicos. *Rev. Intropica.* 12(2) <http://dx.doi.org/10.21676/23897864.2282>.
- Cendoya, E.; Chiotta, M. L.; Zachetti, V.; Chulze, S. N. and Ramirez, M. L. 2018. Fumonisin and fumonisin-producing *Fusarium* occurrence in wheat and wheat by products: A review. *J. Cereal Sci.* 80:158-166. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2018.02.010>.
- Ćwintal, M. and Dziwulska-Hunek, A. 2013. Effect of electromagnetic stimulation of alfalfa seeds. *Int. Agrophys.* 27:391-401. <https://doi.org/10.2478/intag-2013-0009>.
- Duvick, D. N. 2005. Genetic progress in yield of United States maize (*Zea mays* L.). *Maydica.* 50(3):193-202.
- FAO. 2018. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT-FAO Statistical Databases) Agriculture, Fisheries, Forestry, Nutrition. Rome, Italy. <http://www.fao.org/faostat/en/>.
- Figueroa, R. M. G.; Rodríguez, G. R.; Guerrero, Aguilar, B. Z.; González, C. M. M.; Pons, H., J. L.; Jiménez, B. J. F.; Ramírez, P. J. G.; Andrio, E. E. y Mendoza, E. M. 2010. Caracterización de especies de *Fusarium* asociadas a la pudrición de raíz de maíz en Guanajuato, México. *Rev. Mex. Fitopatol.* 28(2):124-134.
- Galland, P. and Pazur, A. 2005. Magnetoreception in plants. *J. Plant Res.* 118:371-389. <https://doi.org/10.1007/s10265-005-0246-y>.
- Gutiérrez, A. M.; Torres, G. C. and Díaz, E. J. 2014. Effect of magnetic fields in germination, growth, and microbial flourishing in seedlings of *Brachiaria humidicola*, *Panicum maximum*, and *Zea maiz* (Poaceae). *Rev. Cienc.* 18(1):9-17.
- Haegele, J. W.; Cook, K. A.; Nichols, D. M. and Below, F. E. 2013. Changes in nitrogen use traits associated with genetic improvement for grain yield of maize hybrids released in different decades. *Crop Sci.* 53:1256-1268. <https://doi.org/10.2135/cropsci2012.07.0429>.
- Iqbal, M.; Ahmad, I.; Hussain, S. M.; Kheral, R. A.; Bokhari, T. H. and Shehzad, M. A. 2013. Optimization of pre-sowing magnetic field doses through RSM in pea. *Int. Agrophys.* 27(3):265-274.
- Iqbal, M.; Haq, Z. U.; Jamil, Y. and Ahmad, M. R. 2012. Effect of presowing magnetic treatment on properties of pea. *Int. Agrophys.* 26(1):25-31. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0004-z>.
- Kovács, P.; Van Scoyoc, G. E.; Doerge, T. A.; Camberato, J. J. and Vyn, T. J. 2014. Pre-plant anhydrous ammonia placement consequences on no-till *versus* conventional-till maize growth and nitrogen responses. *Agron. J.* 106(2):634-644. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0356>.

- Lee, E. A. and Tollenaar, M. 2007. Physiological basis of successful breeding strategies for maize grain yield. *Crop Sci.* 47(S3):S202-S215. <https://doi.org/10.2135/cropsci.2007.04.0010IPBS>.
- Leyva, M. K. Y.; Sandoval, C. E.; Calderón, V. C. L.; Larralde, C. C. P. and Maldonado M. I. E. 2017. Pathogenic and genetic variability of *Fusarium verticillioides* from maize in northern Mexico. *Can. J. Plant Pathol.* 39(4):486-496.
- Mahajan, T. S. and Pandey, O. P. 2014. Magnetic-time model at off-season germination. *Int. Agrophys.* 28(1):57-62. <https://doi.org/10.2478/intag-2013-0027>.
- Matwijczuk, A.; Kornarzyński, K. and Pietruszewski, S. 2012. Effect of magnetic field on seed germination and seedling growth of sunflower. *Int. Agrophys.* 26(3):271-278.
- Mendoza, J. R.; Kok, C. R.; Stratton, J.; Bianchini, A. and Hallen-Adams, H. E. 2017. Understanding the mycobiota of maize from the highlands of Guatemala, and implications for maize quality and safety. *Crop Prot.* 101:5-11. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.07.009>.
- Nazir, M.; Pandey, R.; Siddiqi, T. O.; Ibrahim, M. M.; Qureshi, M. I.; Abraham, G.; Vengavasi, K. and Ahmad, A. 2016. Nitrogen-deficiency stress induces protein expression differentially in low-N tolerant and low-N sensitive maize genotypes. *Front. Plant Sci.* 7:1-16.
- Nelson, P. E.; Toussoun T. A. and Marasas, W. F. O. 1983. *Fusarium Species: An Illustrated Manual for Identification*. Pennsylvania State University Press, University Park, Pennsylvania, USA. 193 p.
- NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Norma mexicana para maíces destinados al proceso de nixtamalización (0022). Productos alimenticios no industrializados para consumo humano-cereales-Parte I: maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado-Especificaciones y Métodos de prueba. Secretaría de Economía (SE). México, DF.
- OECD-FAO. 2017. Organization for Economic Co-operation and Development and Food and Agriculture Organization of the United Nations OECD-FAO Agricultural Outlook 2017-2026. OECD Publishing, Paris. <http://dx.doi.org/10.1787/agr.outlook-2017-en>.
- Pereira, G. S.; Pinho, R. G. V.; Pinho, E. V. R. V.; Pires, L. P. M.; Junior, L. A. Y. B.; Pereira, J. L. A. and Melo, M. P. 2017. Selection of maize inbred lines and gene expression for resistance to ear rot. *Genet. Mol. Res.* 16(3):1-21. <http://dx.doi.org/10.4238/gmr16039415>.
- Pietruszewski, S. and Kania, K. 2010. Effect of magnetic field on germination and yield of wheat. *Int. Agrophys.* 24(3):297-302.
- Pietruszewski, S. and Martínez, E. 2015. Magnetic field as a method of improving the quality of sowing material: a review. *Int. Agrophys.* 29(3):377-389. <https://doi.org/10.1515/intag-2015-0044>.
- Pitt, J. I. 1979. The genus *Penicillium*, and its teleomorphic states: *Eupenicillium*, and *Talaromyces*. Academic Press. New York, USA. 641 p.
- Rico, M. F.; Domínguez, P. A.; Hernández, A. C.; Paniagua, P. G. and Martínez, O. E. 2014. Effects of magnetic field irradiation on broccoli seed with accelerated aging. *Acta Agroph.* 21(1):63-73.
- Ritchie, S. W.; J. J. Hanway, J. J. and Thompson, H. E. 1996. How a corn plant develops. *Spec. Rep. 48. Coop. Ext. Serv. Iowa State Univ. of Sci. and Technol.* Ames, IA. 25 p.
- SAGARPA-SNICS. 2016. Regla para la calificación de semilla de maíz (*Zea mays* L.). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/172412/Maiz.pdf>.

- SAS. 2014. Statistical Analysis System (SAS/STAT 9.3 user's guide. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Shine, M. B. and Guruprasad, K. N. 2012. Impact of pre-sowing magnetic field exposure of seeds to stationary magnetic field on growth, reactive oxygen species and photosynthesis of maize under field conditions. *Acta Physiol. Plant.* 34(1):255-265. <https://doi.org/10.1007/s11738-011-0824-7>.
- SMN. 2018. Servicio Meteorológico Nacional. Normales climatológicas por estación. Estado de México. <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=mex>.
- Virgen V. J.; Zepeda B. R.; Ávila P. M. A.; Rojas M. I.; Espinosa C. A. y Gámez V. A. J. 2016. Desespigamiento en cruces simples progenitoras de híbridos de maíz (*Zea mays* L.) para Valles Altos de México. *Agrociencia.* 50(1):43-59.
- Warham, E. J.; Butler, L. D. and Sutton, B. C. 1996. Seed testing of maize and wheat: a laboratory guide. Centro Internacional de Maíz y Trigo (CIMMYT). El Batán, Estado de México, DF. 84 p.
- Zepeda, B. R.; Hernández, A. C.; Suazo, L. F.; Domínguez, P. A.; Cruz, O. A.; Martínez, O. E. and Hernández, S. L. M. 2011. Physical characteristics of maize grain and tortilla exposed to electromagnetic field. *Int. Agrophys.* 25(4):389-393.
- Zepeda, B. R.; Hernández, A. C.; Suazo, L. F.; Domínguez, P. F. A.; Virgen, V. J.; Pérez, R. C. and Peón, E. I. 2014. Electromagnetic field in corn grain production and health. *African J. Biotechnol.* 13(1):76-83. <https://doi.org/10.5897/AJB2013.13245>.