

Contenido de zinc y rendimiento de frijol caupí biofortificado

César Márquez-Quiroz¹
Efraín de-la-Cruz-Lázaro^{1§}
Rodolfo Osorio-Osorio¹
Esteban Sánchez-Chávez²
José Javier Huijara-Vasconcelos¹
Juan Pedro Sida-Arreola²

¹División Académica de Ciencias Agropecuarias-Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Teapa km 25, R/A La Huasteca 2^{da}. Sección, Villahermosa Centro, Tabasco, México. CP. 86280. Tel. 52(993) 3581500, ext. 6607. (cesar.marquez@ujat.mx; rodolfo.osorio@gmail.com; javier.huijara@ujat.mx). ²Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo AC-Unidad Delicias. Delicias, Chihuahua. México. (estaban@ciad.mx; johnvih@gmail.com).

§Autor para correspondencia: efrain.delacruz@ujat.mx

Resumen

El zinc (Zn) es un elemento traza esencial para las plantas, los animales y los seres humanos; por consiguiente, su deficiencia afecta el crecimiento y el desarrollo de los mismos. Se estima que entre 15 y 30% de la población humana en el mundo exhiben deficiencias de Zn. El objetivo fue estudiar el efecto de la biofortificación con Zn^{2+} sobre el contenido mineral y rendimiento del frijol caupí. El experimento se desarrolló bajo un diseño completamente al azar en dos ciclos de producción. El Zn se aplicó como sulfato de zinc (T1: 0 $\mu M L^{-1}$, T2: 25 $\mu M L^{-1}$, T3: 50 $\mu M L^{-1}$ y T4: 100 $\mu M L^{-1}$) y como quelato de zinc (T5: 0 $\mu M L^{-1}$, T6: 25 $\mu M L^{-1}$, T7: 50 $\mu M L^{-1}$ y T8: 100 $\mu M L^{-1}$). Las aplicaciones de 25 $\mu M L^{-1}$ de $ZnSO_4$ y 50 $\mu M L^{-1}$ de Zn-EDTA para ambos ciclos de producción fueron las más efectivas en aumentar el contenido de este elemento en la semilla de frijol caupí, determinándose 1.14 y 0.93 veces más zinc, respectivamente, en comparación con el testigo. El rendimiento, en el ciclo 1, se decrementó 53.8 y 20.3% al aplicar 50 $\mu M L^{-1}$ de $ZnSO_4$ y 25 $\mu M L^{-1}$ de Zn-EDTA, respectivamente. La adición de 50 $\mu M L^{-1}$ de $ZnSO_4$ y 25 $\mu M L^{-1}$ de Zn-EDTA, en el ciclo 2, incrementó el rendimiento en 16.7 y 37.3%, respectivamente, en comparación con el testigo. Los mejores tratamientos para biofortificar frijol caupí fueron 25 $\mu M L^{-1}$ de $ZnSO_4$ y 50 $\mu M L^{-1}$ de Zn-EDTA para ambos ciclos de producción.

Palabras clave: *Vigna unguiculata subsp. unguiculata*, alimento funcional, hierro, zinc.

Recibido: enero de 2018

Aceptado: marzo de 2018

Introducción

El frijol caupí *Vigna unguiculata* (L.) Walp. Subsp. *unguiculata* es una leguminosa que se produce en las regiones tropicales y subtropicales, los seres humanos pueden consumir las hojas, raíces, granos y vainas inmaduras (Lim, 2012) además, constituye una fuente de proteínas, fibra dietética, carbohidratos, vitaminas, nutrimentos esenciales y fitoquímicos en la dieta humana (Awika y Duodu, 2017). El contenido de zinc (Zn) en la semilla con frecuencia es bajo (7.3 mg kg^{-1} , Espinosa-Moreno *et al.*, 2013), en especial al ser producida en suelos con deficiencias de microelementos (Alloway, 2008). Sin embargo, se han reportado valores 43 mg kg^{-1} hasta 65 mg kg^{-1} de Zn en frijol caupí biofortificado con hierro (Márquez-Quiroz *et al.*, 2015). Por otra parte, el consumo per cápita a nivel mundial es de 3.89 kg año^{-1} , en tanto que en México es de 1.89 kg año^{-1} (FAOSTAT, 2017).

El Zn es un componente esencial de diversas deshidrogenasas, proteasas y peptidasas (Fageria y Baligar, 2005). En este sentido, la deficiencia de este microelemento constituye un problema de salud pública (Pereira *et al.*, 2014). Para corregirla se han implementado estrategias para incrementar el contenido de Zn en las legumbres (Prahraj *et al.*, 2016). En este sentido, la biofortificación del cultivo con fertilizantes de Zn ha incrementado 74.6% el contenido de este elemento en leguminosas, ha incrementado la capacidad antioxidante del grano 60% (Sida-Arreola *et al.*, 2017), y ha reducido el contenido de antinutrientes (Sharma *et al.*, 2017); asimismo, se ha observado que al incrementar la dosis de Zn^{2+} , el contenido de P tiende a disminuir (Cakmak *et al.*, 2010). En las semillas de diversos cultivos, la mayor parte del Zn se encuentra asociado con proteínas, péptidos (Persson *et al.*, 2016), enzimas (Broadley *et al.*, 2007) y ácido fítico (Broadley *et al.*, 2012).

Diversos estudios han demostrado que la biofortificación con fertilizantes de zinc incrementó el contenido del microelemento en papa *Solanum tuberosum* (L.) (White *et al.*, 2017), arroz *Oryza sativa* (L.) (Tuyogon *et al.*, 2016), trigo *Triticum aestivum* (L.) (Cakmak, 2008; Zhao *et al.*, 2014), maíz *Zea mays* (L.) (Potarzycki *et al.*, 2015), cebolla *Allium cepa* (L.) (Almendros *et al.*, 2015; Manna y Maity, 2016), frijol común *Phaseolus vulgaris* (L.) (Ram *et al.*, 2016) y cártamo *Carthamus tinctorius* (L.) (Movahhedy-Dehnavy *et al.*, 2009). En general, existe escasa literatura sobre la biofortificación de leguminosas del género *Vigna* y los resultados obtenidos de otros trabajos se enfocan principalmente a la producción de cereales biofortificadas, por lo que el objetivo del presente trabajo de investigación fue estudiar el efecto de la biofortificación con Zn^{2+} sobre el contenido mineral y rendimiento de frijol caupí.

Materiales y métodos

Ciclos de producción

El trabajo fue realizado en la División Académica de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, geolocalizada a $17^{\circ} 47'$ latitud norte, $92^{\circ} 57'$ longitud oeste y a 29 msnm. Se utilizó la variedad de frijol caupí “De Castilla”, de hábito de crecimiento indeterminado.

Ciclo de producción otoño-invierno 2013 y primavera-verano 2014

Las semillas se sembraron en macetas de polietileno de color negro de 25 cm x 30 cm, utilizando como sustrato inerte tepetzil. Durante el ciclo otoño-invierno la temperatura promedio fue de 30 °C, con humedad relativa de 86 a 94%, en tanto que el ciclo primavera-verano se registró una temperatura promedio de 37 °C, con humedad relativa de 80 a 94%.

En ambos ciclos de producción, las macetas se establecieron en un sistema protegido tipo Megavent tropical de 200 m², con cubierta lateral de malla antiáfidos y malla Grown Cover en el suelo. Las plantas se acomodaron en doble hilera, con una separación de 30 cm entre plantas y 90 cm entre hileras, para una densidad de siembra de 44 444 plantas por hectárea. Las plantas se guiaron de manera vertical con hilo rafia, y el manejo fitosanitario se realizó con aplicaciones de Karate® (lambda cyaotrina) y Sulfacob 25® (sulfato de cobre pentahidratado).

Fertilización y tratamientos

A la planta de cada maceta se le aplicó riego con solución nutritiva (Hoagland y Arnon, 1950), que contenía 14 mM de NO₃⁻, 1 mM de H₂PO₄⁻, 2 mM de SO₄²⁻, 6 mM de K⁺, 4 mM de Ca²⁺ y 2 mM de Mg²⁺. Los microelementos de la solución nutritiva se suministraron con el producto TradeCorp AZ®. La solución nutritiva se adaptó según las etapas de desarrollo del cultivo al 50 y 100%, a los 10-30, 31-100 días después de la siembra (DDS), respectivamente, el pH de la solución se mantuvo entre 5.5 y 6, utilizando ácido sulfúrico. A los diez DDS se aplicó 0.25 L de solución por maceta día⁻¹, a los 31 DDS se aumentó a 0.5 L día⁻¹ y se llegó a aplicar 1 L día⁻¹, después de 61 DDS.

Los tratamientos consistieron en la adición de Zn⁺² en forma de sulfato de zinc (ZnSO₄·7H₂O, grado reactivo, 21% de Zn; 0 μM L⁻¹, 25 μM L⁻¹, 50 μM L⁻¹ y 100 μM L⁻¹) y como quelato de zinc (Zn-EDTA, TradeCorp Zn®, 14 % de Zn, 0 μM L⁻¹, 25 μM L⁻¹, 50 μM L⁻¹ y 100 μM L⁻¹) (Cuadro 1). Ambos compuestos se disolvieron en agua destilada, y se aplicaron desde el día 31 hasta el día 100 DS, cada tercer día. El total de tratamientos fue de ocho por cada ciclo de producción, con cuatro repeticiones. Se utilizó un diseño completamente al azar.

Cuadro 1. Tratamientos empleados en la biofortificación de frijol caupí con zinc en dos ciclos de producción.

Tratamiento	Fertilizante	Dosis de zinc (μM L ⁻¹)
T1	ZnSO ₄ 7H ₂ O	0
T2	ZnSO ₄ 7H ₂ O	25
T3	ZnSO ₄ 7H ₂ O	50
T4	ZnSO ₄ 7H ₂ O	100
T5	Zn-EDTA	0
T6	Zn-EDTA	25
T7	Zn-EDTA	50
T8	Zn-EDTA	100

Variables evaluadas

Las variables evaluadas fueron: contenido mineral y rendimiento del frijol caupí obtenido. La cosecha de las vainas inició a los 70 DDS y finalizó a los 100 DDS. Las vainas cosechadas se colocaron en bolsas de papel de estraza etiquetadas, para posteriormente ser pesadas. Por otra parte, el contenido de nitrógeno (N) en la semilla se determinó con el método Dumas (1831), la proteína cruda total se calculó multiplicando el contenido de N por el factor 6.25, el fósforo (P), potasio (K), hierro (Fe) y zinc (Zn) de la semilla se determinó por espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES ICAP[®] 7200 Duo, Thermo Fisher Scientific), acorde con el procedimiento 984.27 (Horwitz, 2002) y previa digestión húmeda.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza. Para la diferencia entre medias de los tratamientos se utilizó la prueba de contrastes ortogonales ($p \leq 0.05$) (SAS Institute, 2013).

Resultados y discusión

Contenido mineral del frijol biofortificado

Los resultados del contenido mineral del frijol caupí biofortificado con diferentes dosis de fertilizantes de zinc en los dos ciclos de producción, se muestran en la Figura 1.

En el ciclo 1, la adición de 25 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 , y 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA incrementó el contenido de proteína cruda total y N en 3.7, 3.4 y 7.3%, respectivamente, en comparación con la adición de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico (Figura 1A y Figura 1B). En cambio, al adicionar 25 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA, mermó el contenido de proteína cruda total y N en 1.9%, respectivamente, en comparación con la adición de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico. Por otra parte, la adición de 25 y 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 , y 25 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA se redujo el contenido de P en 21.3, 8.2, 11.5 y 27.9%, respectivamente, en comparación con la adición de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico (Figura 1C). El contenido de K se disminuyó 15.3, 12.4, 9.5, 12.4, 14.6 y 6.6% al adicionar 25, 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 , y 25, 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA, respectivamente (Figura 1D).

Al mismo tiempo, la aplicación de 25 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 , y 25, 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA decrementó el contenido de Fe en 11.8, 8.9, 3.9 y 10.4%, respectivamente, en comparación con la aplicación de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico (Figura 1E). De modo similar, la adición de 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 y 25, 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA y un decremento en el contenido de Zn en 18.2, 18.9, 26.7, 20.6 y 26.5%, respectivamente, en comparación con la aplicación de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ (Figura 1F).

En el ciclo 2, la adición de 25 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 , y 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA decremento el contenido de proteína cruda total y N en 4.6 y 1.4%, respectivamente, en comparación con la adición de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico (Figura 1A y Figura 1B). En cambio, al adicionar 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 , y 25 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA, descendió el contenido de proteína cruda total y N en 8.6, 3.7 y 3.1%, respectivamente, en comparación con la adición de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico. Por otra parte, la adición de 25 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 y 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA incrementó el contenido de P en 18.88 y 6.3%, respectivamente, en comparación con la adición de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto

químico (Figura 1C). No obstante, al adicionar $100 \mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 y 25 y $100 \mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA se decremento el contenido de P en 6.3, 12.5 y 9.4%, respectivamente, en comparación con la aplicación de $0 \mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico.

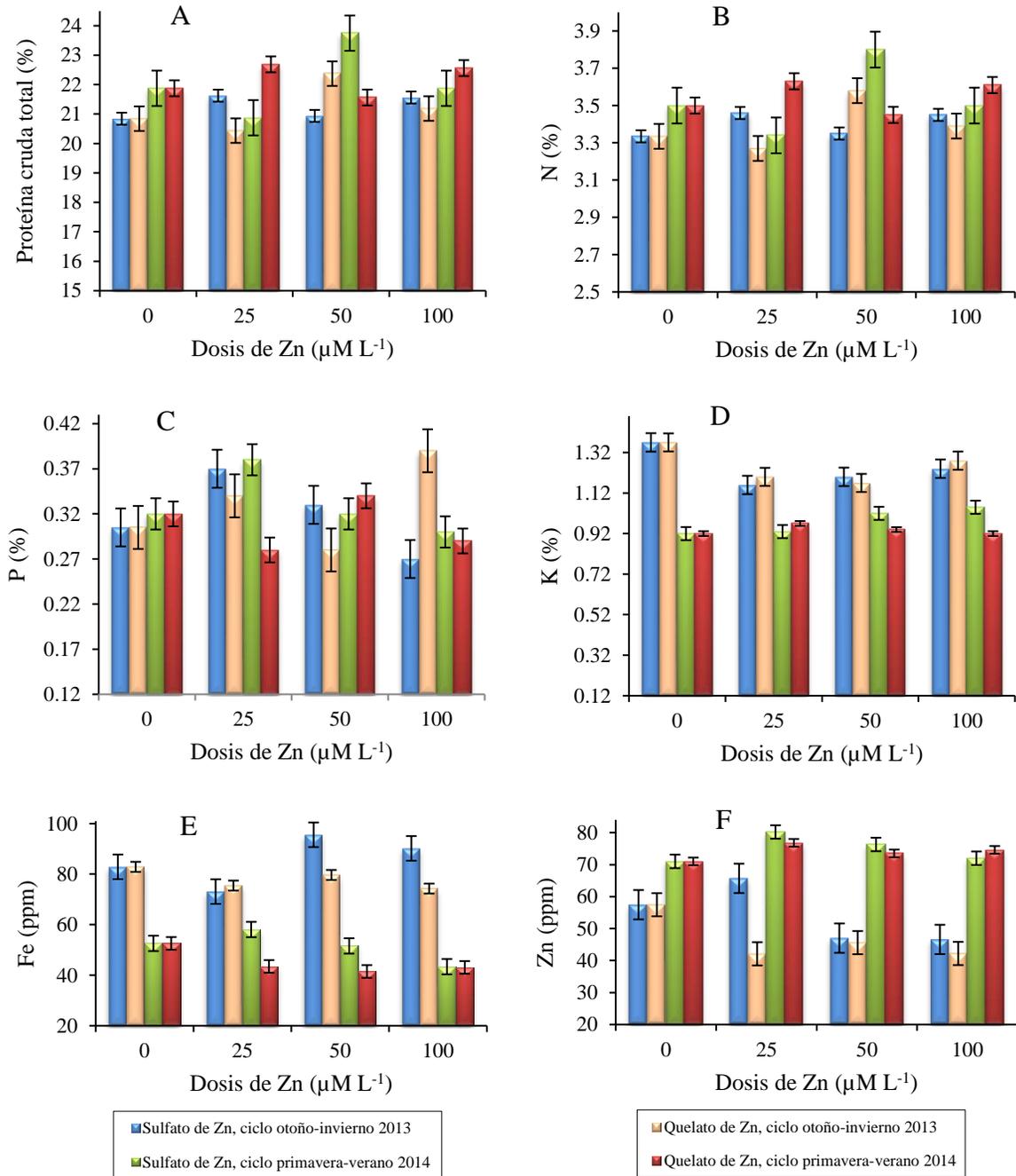


Figura 1. Contenido de proteína cruda total (A), nitrógeno (B) fósforo (C), potasio (D), hierro (E) y zinc (F) del frijol caupí biofortificado en dos ciclos de producción. Valores medios \pm error estándar.

El contenido de K se incrementó en 1.1, 10.9, 14.1, 5.4 y 2.2% al adicionar 25, 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 , y 25 y 50 M L^{-1} de Zn-EDTA, respectivamente (Figura 1D). Al mismo tiempo, la aplicación de 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 y 25, 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA bajó el contenido de Fe en 1.9, 17.5, 17.3, 21.1 y 18.1%, respectivamente, en comparación con la aplicación de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico (Figura 1E). Sin embargo, la adición de 25, 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 y 25, 50 y 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA incrementó el contenido de Zn en 13, 7.5, 1.4, 8.2, 3.5 y 5.1%, respectivamente, en comparación con la aplicación de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico (Figura 1F).

El valor obtenido en el contenido de proteína cruda total y N son similares a los reportados en la literatura, los cuales oscilan entre 16 y 30% y 2.5 y 4.8%, respectivamente (Carvalho *et al.*, 2012). En el presente estudio, la concentración de macroelementos en la semilla contrastan con los resultados reportados por Espinosa-Moreno *et al.* (2013), quienes reportaron el contenido de proteína cruda total, N, P y K en la semilla de 21.9, 3.5, 0.35 y 1.52%, respectivamente. Por otra parte, el contenido de Fe y Zn mostró valores que son frecuentemente reportados en la literatura (Carvalho *et al.*, 2012; Kalidass y Mohan, 2012). En consecuencia, el contenido de Zn en la semilla de frijol caupí biofortificado, no se considera como tóxico al no superar valores de 150 ppm de Zn (Mengel *et al.*, 2001).

Aunado a lo anterior, el incremento en la dosis de Zn^{2+} no siempre va a permitir una mayor acumulación en la semilla, puesto que depende de la movilización que tenga el microelemento como ion libre o quelatado desde los tallos hacia la semilla (Olsen *et al.*, 2016), lo que sugiere que la retranslocación, vía floema, de los microelementos depositados en los tallos tienen un papel importante en la acumulación de Fe y Zn en la semilla (Cakmak *et al.*, 2010). En este sentido, las plantas de frijol caupí del presente experimento pudieron exhibir capacidades distintas para absorber y movilizar el nutrimento, debido a una menor o mayor tasa de transpiración durante los ciclos de producción (White, 2012).

De modo similar se ha reportado que la aplicación de dosis elevadas de Zn^{2+} interfiere en la absorción y translocación del P, calcio y Fe, además de provocar desórdenes citológicos en la planta (Cakmak, 2000; Khudsar *et al.*, 2008). Asimismo, se ha reportado una disminución en el contenido de Fe en el grano de trigo (Shekari *et al.*, 2015) y de proteína en la raíz en el frijol común al aplicar dosis elevadas de Zn^{2+} debido a un decremento en la actividad enzimática de la Nitrato Reductasa (Chaoui *et al.*, 1997).

Rendimiento

En el ciclo 1, el peso de 100 semillas osciló entre 12.1 y 20.5 g, lo cual es consistente con los datos reportados en la literatura (Giami, 2005). En el presente estudio, la aplicación de ZnSO_4 tuvo un efecto negativo sobre el número de vainas por planta, número de semillas por planta y rendimiento de semilla por planta, con decrementos de hasta 37.4, 54.9 y 53.8%, respectivamente, en comparación con la adición de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO_4 . Por otra parte, no todas las respuestas de las plantas fueron negativas, la adición 100 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA incrementó el número de vainas por planta, el número de semillas por planta y el rendimiento por planta en 14.0, 20.3 y 17.2%, respectivamente, con respecto a la aplicación de 0 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA.

En cambio, las plantas cultivadas con $50 \mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA mostraron un incremento de 2.6 y 1.6% en el número de semillas por planta y rendimiento por planta, en comparación con la aplicación de $0 \mu\text{M L}^{-1}$ del compuesto químico (Cuadro 2). Como parte de la comparación, mediante contrastes ortogonales, entre los fertilizantes de Zn, se determinó que el uso de Zn-EDTA presentó diferencias significativas en las comparaciones del T3 *versus* T7, y T4 *versus* T8.

Cuadro 2. Componentes de rendimiento del frijol caupí biofortificado con zinc, ciclo agrícola otoño-invierno 2013.

Tratamiento	Dosis ($\mu\text{M L}^{-1}$)	Peso de 100 semillas (g)	Núm. vaina por planta	Núm. semillas por planta	Rendimiento de semilla (g planta^{-1})
T1) ZnSO ₄	0	13.2	9	144	16
T2) ZnSO ₄	25	20.5	7	89	9.8
T3) ZnSO ₄	50	16.2	6	65	7.4
T4) ZnSO ₄	100	12.3	8	144	10.8
T5) Zn-EDTA	0	12.4	9	118	12.8
T6) Zn-EDTA	25	12.1	7	91	10.2
T7) Zn-EDTA	50	13.1	9	121	13
T8) Zn-EDTA	100	13.8	10	142	15
Contrastes ortogonales (valores de <i>p</i>)					
T1 <i>vs</i> T2 + T3 + T4		0.3815	0.9607	0.9607	0.9216
T2 <i>vs</i> T3 + T4		0.0743	0.0162	0.0001	0.0001
T2 <i>vs</i> T6		0.0001	0.9165	0.0425	0.6309
T3 <i>vs</i> T7		0.0016	0.0027	0.0001	0.0001
T4 <i>vs</i> T8		0.0848	0.0677	0.1057	0.0001
T5 <i>vs</i> T6 + T7 + T8		0.0002	0.0076	0.0001	0.0001
T6 <i>vs</i> T7 + T8		0.0001	0.6273	0.0001	0.3369

En el ciclo 2, la biofortificación con ZnSO₄ y Zn-EDTA tuvo un efecto positivo sobre las variables número de vainas por planta, número de semillas por planta y rendimiento por planta. En este sentido, la adición de 25, 50 y $100 \mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO₄ ocasionó un incremento en el número de vainas de 25, 5 y 21.6%, respectivamente, en el número de semillas por planta de 31.3, 35.3 y 58.4%, respectivamente, y en el rendimiento de 7.2, 16.7 y 33.3%, respectivamente, en comparación con la adición de 0mM L^{-1} del compuesto químico (Cuadro 3). De modo similar, se registró un incremento el número de vainas de 28.3, 35.9 y 32.9%, al adicionar 25, 50 y $100 \mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA, respectivamente, en comparación con la adición de 0mM L^{-1} del compuesto químico.

Más aún, el número de semillas por planta y rendimiento por planta se incrementó en 65.1, 63.9 y 53.1% y 37.4, 43.4 y 19.3%, respectivamente, al adicionar 25, 50 y $100 \mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA, en comparación con la adición de 0mM L^{-1} del compuesto químico. Como parte de la comparación, mediante contrastes ortogonales, entre los fertilizantes de Zn, se determinó que el uso de ZnSO₄ y Zn-EDTA no presentó diferencias significativas en las comparaciones del T2 *versus* T6, T3 *versus* T7, y T4 *versus* T8.

Cuadro 3. Componentes de rendimiento del frijol caupí biofortificado con zinc, ciclo agrícola primavera-verano 2014.

Tratamiento	Dosis ($\mu\text{M L}^{-1}$)	Peso de 100 semillas (g)	Núm. vaina por planta	Núm. semillas por planta	Rendimiento de semilla (g planta^{-1})
T1) ZnSO ₄	0	13.4	6	62	9.6
T2) ZnSO ₄	25	11.7	8	81	10.3
T3) ZnSO ₄	50	13.5	6	84	11.2
T4) ZnSO ₄	100	13.1	7	98	12.8
T5) Zn-EDTA	0	13.4	5	54	8.3
T6) Zn-EDTA	25	13	7	88	11.4
T7) Zn-EDTA	50	13.4	7	88	11.9
T8) Zn-EDTA	100	12	7	82	9.9
Contrastes ortogonales (valores de <i>p</i>)					
T1 vs T2 + T3 + T4		0.3467	0.0346	0.0159	0.1602
T2 vs T3 + T4		0.6538	0.8408	0.7866	0.8332
T2 vs T6		0.0976	0.4897	0.6243	0.6543
T3 vs T7		0.8967	0.4897	0.7717	0.7472
T4 vs T8		0.1660	0.4897	0.3018	0.2326
T5 vs T6 + T7 + T8		0.3132	0.1025	0.048	0.3545
T6 vs T7 + T8		0.0242	0.5489	0.4658	0.4134

El rendimiento obtenido en el presente estudio es mayor a los 7 g de semilla por planta reportados por Apáez-Barrios *et al.* (2011), pero inferior a los 13 g de semilla por planta obtenido por los productores de frijol caupí del estado (SIAP, 2013). Al respecto, Cakmak *et al.* (2010), reportaron que la adición de ZnSO₄ vía fertirriego incrementó significativamente el rendimiento y contenido de Zn en el grano de trigo; sin embargo, recomiendan que se combine la aplicación foliar con la aplicación vía fertirriego para incrementar 200% estas variables. Al respecto, Prasad *et al.* (2014), reportan un incremento de 69% en el contenido de Zn del arroz al realizar aplicaciones foliares en vez de la aplicación al suelo. Asimismo, Das y Green (2016), reportaron que la aplicación de Zn²⁺ mejoró el rendimiento y calidad nutracéutica de la papa.

Conclusiones

Las aplicaciones de 25 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO₄ y 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA para ambos ciclos de producción fueron las más efectivas en aumentar el contenido de este elemento en la semilla de frijol caupí, determinándose 1.14 y 0.93 veces más zinc, respectivamente, en comparación con el testigo. El rendimiento, en el ciclo 1, se redujo 53.8 y 20.3% al aplicar 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO₄ y 25 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA, respectivamente. La adición de 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO₄ y 25 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA, en el ciclo 2, incrementó el rendimiento en 16.7 y 37.3%, respectivamente, en comparación con el testigo. Considerando el conjunto de respuestas, los mejores tratamientos para biofortificar el frijol caupí con Zn²⁺ fueron 25 $\mu\text{M L}^{-1}$ de ZnSO₄ y 50 $\mu\text{M L}^{-1}$ de Zn-EDTA para ambos ciclos de producción.

Literatura citada

- Almendros, P.; Obrador, A.; Gonzalez, D. and Alvarez, J. M. 2015. Biofortification of zinc in onions (*Allium cepa* L.) and soil Zn status by the application of different organic Zn complexes. *Sci. Hortic.* 186:254-265.
- Alloway, B. J. 2008. Zinc in soils and crop nutrition. International Zinc Association Brussels, Belgium. 135 p.
- Apáez, B. P.; Escalante, E. J. A. S. and Rodríguez, G. M. T. 2011. Growth and yield of cowpea bean in relation with trellises type and climate. *Trop. Subtrop. Agroecosys.* 13:307-315.
- Awika, J. M. and Duodu, K. G. 2017. Bioactive polyphenols and peptides in cowpea (*Vigna unguiculata*) and their health promoting properties: A review. *J. Functional Foods.* 10.1016/j.jff.2016.1012.1002.
- Broadley, M.; Brown, P.; Cakmak, I.; Rengel, Z. and Zhao, F. 2012. Function of nutrients: Micronutrients. *In: Marschner, P. (Ed.). Marschner's mineral nutrition of higher plants (third edition).* Academic Press, San Diego, USA. Chapter 7. 191-248 pp.
- Broadley, M. R.; White, P. J.; Hammond, J. P.; Zelko, I. and Lux, A. 2007. Zinc in plants. *New Phytologist.* 173:677-702.
- Cakmak, I. 2000. Possible roles of zinc in protecting plant cell from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist.* Tansley review No. 111. 146:185-205.
- Cakmak, I. 2008. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? *Plant and Soil.* 302:1-17.
- Cakmak, I.; Pfeiffer, W. H. and McClafferty, B. 2010. Biofortification of durum wheat with zinc and iron. *Cereal Chem. J.* 87:10-20.
- Carvalho, A. F. U.; de Sousa, N. M.; Farias, D. F.; da Rocha-Bezerra, L. C. B.; da Silva, R. M.P.; Viana, M. P.; Gouveia, S. T.; Sampaio, S. S.; de Sousa, M. B.; de Lima, G. P. G.; de Moraes, S. M.; Barros, C. C. and Filho, F. R. F. 2012. Nutritional ranking of 30 Brazilian genotypes of cowpeas including determination of antioxidant capacity and vitamins. *J. Food Composition and Analysis.* 26:81-88.
- Chaoui, A.; Mazhoudi, S.; Ghorbal, M. H. and El Ferjani, E. 1997. Cadmium and zinc induction of lipid peroxidation and effects on antioxidant enzyme activities in bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant Sci.* 127:139-147.
- Das, S. and Green, A. 2016. Zinc in crops and human health. *In: Singh, U.; Praharaj, S. C.; Singh, S. S. and Singh, P. N. (Eds.). Biofortification of food crops.* Springer India, New Delhi. 31-40 pp.
- Dumas, J. B. A. 1831. Procédés de l'analyse organique. *Annales de Chimie et de Physique.* 47:198-212.
- Espinosa, M. J.; Centurión, H. D.; Solano, M. L. y Lagunes, G. L. M. 2013. Las leguminosas de grano. *In: Velázquez, M, J. R.; López-Hernández, E. y García-Alamilla, P. (Eds.). Desarrollo científico y tecnológico de los recursos alimentarios en el estado de Tabasco.* Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Tabasco, México. 183-190 p.
- Fageria, N. K. and Baligar, V. C. 2005. Nutrient availability. *In: Hillel, D. (Ed.). Encyclopedia of soils in the environment.* Elsevier, Oxford. 63-71 pp.
- FAOSTAT. 2017. Suministro alimentario. Cultivos equivalentes primario, año 2013. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/CC>
- Giami, S. Y. 2005. Compositional and nutritional properties of selected newly developed lines of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp). *J. Food Composition and Analysis.* 18:665-673.

- Hoagland, D. R. and Arnon, D. I. 1950. The water-culture method for growing plants without soil. California agricultural experiment station, circular 347. College of Agriculture, University of California in Berkeley, USA. 32 p.
- Horwitz, W. 2002. Official methods of analysis of AOAC international. 17th edition. Gaithersburg, MD. USA.
- Kalidass, C. and Mohan, V. R. 2012. Nutritional composition and antinutritional factors of little-known species of vigna. *Trop. Subtrop. Agroecosys.* 15:525-538.
- Khudsar, T.; Arshi, A.; Siddiqi, T. O.; Mahmooduzzafar. and Iqbal, M. 2008. Zinc-induced changes in growth characters, foliar properties, and Zn-accumulation capacity of pigeon pea at different stages of plant growth. *J. Plant Nutr.* 31:281-306.
- Lim, T. K. 2012. *Vigna unguiculata* cv-gr. Unguiculata. Edible medicinal and non-medicinal plants: fruits. Springer Netherlands, Dordrecht. 2:976-988 pp.
- Manna, D. and Maity, T. K. 2016. Growth, yield and bulb quality of onion (*Allium cepa* L.) in response to foliar application of boron and zinc. *J. Plant Nutr.* 39:438-441.
- Márquez, Q. C.; de-la-Cruz, L. C.; Osorio, O. R.; Sánchez, C. E. 2015. Biofortification of cowpea beans with iron: Iron's influence on mineral content and yield. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 15(4):839-847.
- Mengel, K.; Kirkby, E. A.; Kosegarten, H. and Appel, T. 2001. Principles of plant nutrition. Springer Netherlands. 849 pp.
- Movahhedy, D. M.; Modarres, S. S. A. M. and Mokhtassi, B. A. 2009. Foliar application of zinc and manganese improves seed yield and quality of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) grown under water deficit stress. *Industrial Crops and Products.* 30:82-92.
- Olsen, L. I.; Hansen, T. H.; Larue, C.; Østerberg, J. T.; Hoffmann, R.D.; Liesche, J.; Krämer, U.; Surblé, S.; Cadarsi, S.; Samson, V. A.; Grolimund, D.; Husted, S. and Palmgren, M. 2016. Mother-plant-mediated pumping of zinc into the developing seed. *Nature Plants.* 16036.
- Pereira, E. J.; Carvalho, L. M. J.; Dellamora, O. G. M.; Cardoso, F. S. N.; Carvalho, J. L. V.; Viana, D. S.; Freitas, S. C. and Rocha, M. M. 2014. Effects of cooking methods on the iron and zinc contents in cowpea (*Vigna unguiculata*) to combat nutritional deficiencies in Brazil. *Food Nutr. Res.* 58:20694.
- Persson, D. P.; de Bang, T. C.; Pedas, P. R.; Kutman, U. B.; Cakmak, I.; Andersen, B.; Finnie, C.; Schjoerring, J. K. and Husted, S. 2016. Molecular speciation and tissue compartmentation of zinc in durum wheat grains with contrasting nutritional status. *New Phytologist.* 211:1255-1265.
- Potarzycki, J.; Przygocka, C. K.; Grzebisz, W. and Szczepaniak, W. 2015. Effect of zinc application timing on yield formation by two types of maize cultivars. *Plant, Soil Environ.* 61:468-474.
- Praharaj, C. S.; Singh, U.; Singh, S. S. and Kumar, N. 2016. Improving protein density in food legumes through agronomic interventions. *In: Singh, U.; Praharaj, S. C.; Singh, S. S. and Singh, P. N. (Eds.) Biofortification of food crops.* Springer. New Delhi. India. 199-215 p.
- Prasad, R.; Shivay, Y. S. and Kumar, D. 2014. Chapter Two-Agronomic biofortification of cereal grains with iron and zinc. *In: Donald, L. S. (Ed.). Adv. Agron.* Academic Press. 55-91 pp.
- Ram, H.; Rashid, A.; Zhang, W.; Duarte, A. P.; Phattarakul, N.; Simunji, S.; Kalayci, M.; Freitas, R.; Rerkasem, B.; Bal, R. S.; Mahmood, K.; Savasli, E.; Lungu, O.; Wang, Z. H.; Barros, V. L. N. P.; Malik, S. S.; Arisoy, R. Z.; Guo, J. X.; Sohu, V. S.; Zou, C. Q. and Cakmak, I.

2016. Biofortification of wheat, rice and common bean by applying foliar zinc fertilizer along with pesticides in seven countries. *Plant and Soil*. 403:389-401.
- SAS Institute I. 2013. Base SAS(R) 9.4. Procedures guide: Statistical procedues. Second edition. Cary, NC, USA. SAS Institute Inc. 212 pp.
- Sharma, P.; Aggarwal, P. and Kaur, A. 2017. Biofortification: a new approach to eradicate hidden hunger. *Food Reviews International*. 33:1-21.
- Shekari, F.; Javanmard, A. and Abbasi, A. 2015. Zinc biofortification, preference or essential? *International J. Agric. Crop Sci*. 8:320-327.
- SIAP. 2013. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario estadístico de la producción agrícola. Cierre de la producción agrícola por estado de frijol pelón. [<http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>].
- Sida, A. J. P.; Sánchez, E.; Ojeda, B. D. L.; Ávila, Q. G. D.; Flores, C. M. A.; Márquez, Q. C.; Preciado, R. P. 2017. Can biofortification of zinc improve the antioxidant capacity and nutritional quality of beans? *Emirates J. Food Agric*. 29(3):237-241.
- Tuyogon, D. S. J.; Impa, S. M.; Castillo, O. B.; Larazo, W. and Johnson-Beebout, S. E. 2016. Enriching rice grain zinc through zinc fertilization and water management. *Soil Sci. Soc. Am. J*. 80:121-134.
- White, P. J. 2012. Long-distance transport in the xylem and phloem *In*: Marschner, P. (Ed.). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (Third edition). Academic Press, San Diego. USA. Chapter 3. 49-70 pp.
- White, P. J.; Thompson, J. A.; Wright, G. and Rasmussen, S. K. 2017. Biofortifying Scottish potatoes with zinc. *Plant and Soil*. 411:151-165.
- Zhao, A-q.; Tian, X-h.; Cao, Y-x.; Lu, X-c. and Liu, T. 2014. Comparison of soil and foliar zinc application for enhancing grain zinc content of wheat when grown on potentially zinc-deficient calcareous soils. *J. Sci. Food Agric*. 94:2016-2022.