

Contenido de hierro y cinc en la semilla y su respuesta al nivel de fertilización con fósforo en 40 variedades de frijol colombianas

Seed iron and zinc content and their response to phosphorus fertilization in 40 Colombian bean varieties

Carolina Astudillo¹ y Matthew W. Blair²

RESUMEN

El mejoramiento del frijol en Colombia ha producido un amplio número de variedades para diferentes zonas agroecológicas y con diferentes rangos de adaptación. Los objetivos de esta investigación fueron determinar la calidad nutricional del frijol en Colombia en cuanto al contenido de hierro y cinc en el grano y entender cómo los niveles de fertilización del suelo alta y baja en fósforo afectan tanto el rendimiento como el nivel de estos minerales. Se evaluaron 40 genotipos arbustivos dentro de los que se encuentran variedades liberadas por el ICA o Corpoica (series Diacol e ICA), cultivares tradicionales de los departamentos de Valle, Nariño, Norte de Santander, y líneas CIAT como testigos. Estos se sembraron en la localidad de Darién en el primer semestre de 2004, en los dos tratamientos de fertilización, con diseño de bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. El contenido de hierro y cinc en la semilla cosechada fue determinado por espectroscopia de absorción atómica. El análisis de varianza mostró diferencias significativas para la concentración de los minerales entre las variedades y entre los niveles de alta y baja fertilización con fósforo con promedios de 61,5 y 53,2 ppm, respectivamente, para hierro, y 26,3 y 23,1 ppm, respectivamente, para cinc. Teniendo en cuenta el análisis combinado para hierro y cinc a través de los dos tratamientos de fósforo, se sugiere que la aplicación de fósforo puede incrementar la concentración de hierro en la semilla, pero no la de cinc.

Palabras clave: frijol común, *Phaseolus vulgaris*, interacción genotipo x ambiente, frijol arbustivo colombiano, contenido de minerales en grano, aplicación de fósforo al suelo.

ABSTRACT

The improvement of beans in Colombia has produced a large number of varieties for different agro-ecological zones and with different adaptation ranges. The objective of this research was to determine the nutritional quality of common bean genotypes from Colombia in terms of iron and zinc content of the seed and to determine how soil fertilization with high or low levels of phosphorus impact yield with these minerals. A total of 40 genotypes were evaluated including released varieties from ICA or Corpoica (of the Diacol or ICA series), traditional landrace varieties from Valle, Nariño and Norte de Santander, and CIAT breeding lines as control. These were planted in Darién in the first semester of 2004 under two-fertilization treatments in complete randomized block experiments with three repetitions. Iron and zinc content was measured in harvested seed using the spectrophotometric method of atomic absorption. Variance analysis showed significant differences for mineral content among genotypes, and between high and low phosphorus fertilization levels with averages of 61.5 and 53.2 ppm for iron and 26.3 and 23.1 for zinc, respectively. Given these results, phosphorus fertilization can increase iron content in bean seeds, but can reduce zinc content in seeds.

Key words: common bean, *Phaseolus vulgaris*, genotype x environment interaction, colombian bush bean varieties, seed mineral content, soil phosphorus application.

Introducción

La deficiencia de hierro y cinc en la población humana está ampliamente distribuida y afecta a más de 2.000 millones de personas en el mundo. En Colombia la anemia por deficiencia de hierro tiene una incidencia del 23% en niños menores de 5 años y en mujeres en edad fértil y gestantes: el 23% y el 43%, respectivamente. En la costa Atlántica y el

suroccidente del país, principalmente en los departamentos de Cauca y Nariño, los reportes de niveles de anemia son de hasta el 40% en la Encuesta nacional de la situación nutricional en Colombia (ICBF, 2005). Las estrategias para enfrentar este problema se han fundamentado en la suplementación con productos farmacéuticos, en la fortificación alimenticia y en la biofortificación. Esta última estrategia usa el fitomejoramiento para aumentar la cantidad de

Fecha de recepción: 18 de diciembre de 2007. Aceptado para publicación: 5 de noviembre de 2008

¹ Investigadora, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Palmira (Colombia). carolinastudillor@gmail.com

² Investigador, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Palmira (Colombia). m.blair@cgiar.org

micronutrientes en granos, raíces y tubérculos de manera que la provisión de estos elementos sea a menor costo y sostenible a largo plazo (Graham *et al.*, 1999).

El fríjol común es una leguminosa muy importante para la canasta básica de los colombianos; como cultivo es muy variable en sus formas, calidad de grano y contenido nutricional. Islam *et al.* (2004) reportaron que en la evaluación realizada a la colección núcleo de fríjol del CIAT se identificaron algunas fuentes para aumentar el contenido de hierro y cinc en el grano. La evaluación reveló que la cantidad de hierro se encontraba en un rango de 34 a 100 ppm; este valor es dos veces mayor que el de las variedades corrientes de fríjol y cinco veces mayor que el contenido de hierro de la mayoría de los cereales. Para el contenido de cinc los rangos se encontraron entre 21 y 54 ppm, siendo uno de los más altos entre las fuentes vegetales y casi igual al de los productos lácteos, pero inferior al de la carne (Graham *et al.* 1999). El fríjol arbustivo posee características atractivas para el agricultor por sus vainas tiernas, fácil desvainado del grano, porque presenta una alta adaptabilidad al agrosistema y por tener un alto potencial de comercialización o de exportación (Roy *et al.* 2006).

El fitomejoramiento de fríjol en Colombia ha producido un amplio número de variedades de diversas clases comerciales para diferentes zonas agroecológicas; estos genotipos son un punto de partida para la caracterización y el conocimiento del estado nutricional del germoplasma de fríjol. También, para maximizar la calidad del valor nutricional de una semilla en términos de la captación y acumulación de minerales, es necesario identificar los factores que los afectan, ya que estos pueden ser dependientes del tipo de suelo, disponibilidad del nutriente, época de siembra y tipo de cultivo. En el caso del fríjol las prácticas de fertilización se hacen necesarias para proveer a la planta macronutrientes como nitrógeno, potasio y fósforo, los cuales estimulan el desarrollo de raíces y biomasa.

Específicamente la fertilización con fósforo se relaciona fuertemente con el potencial de rendimiento de la planta ya que es fijadora de nitrógeno y tanto el fríjol como su *Rhizobium* simbiótico necesitan este elemento. En particular, la fertilización con fósforo aumenta el crecimiento radicular lo que podría aumentar la captación de micronutrientes como hierro y cinc, pues estos son comúnmente absorbidos junto con macronutrientes (Rengel *et al.*, 1999). Sin embargo el uso del fósforo como fertilizante no es una alternativa económica viable para muchos agricultores de escasos recursos en países en vías de desarrollo (Yan *et al.*

1996); por lo tanto se hace necesario que alternativas como el mejoramiento genético desarrollen genotipos que puedan ser eficientes tanto en la adquisición de fósforo como en la capacidad de acumular hierro y cinc en la semilla cuando el fósforo sea escaso en el suelo.

La variabilidad en la habilidad para producir grano bajo condiciones de fósforo limitante y su eficiencia en la adquisición ha sido observada en frijol mejorado y cultivado (Yan *et al.* 1996). Estos fenotipos incluyen características como longitud de raíces más largas y de mayor densidad, mayor despliegue de raíces basales superficiales o mayor exudación de ácidos orgánicos a la rizósfera (Beebe *et al.* 2006). La acidificación de la rizósfera puede influenciar la absorción de hierro ya que mediante la reducción del pH en la zona circundante a la raíz se puede incrementar la solubilidad del hierro en el suelo (Grusak y Dellapenna, 1999).

Los objetivos de esta investigación fueron determinar la calidad nutricional en cuanto al contenido de minerales de variedades de fríjol en Colombia y entender cómo la fertilización con diferentes concentraciones de fósforo en el suelo afecta el nivel de hierro y cinc en la semilla de fríjol común. Se estudió un vivero de variedades arbustivas colombianas de fríjol mejoradas y tradicionales, las cuales representan la mayoría de variedades de fríjol arbustivo liberadas por ICA y Corpoica en los últimos 30 años junto con líneas mejoradas y algunas variedades criollas de grano rojo moteado como los tipos Calima o Nima, o de grano rojo de tamaño grande como los tipos Radical o Duva.

Materiales y métodos

Un total de 40 genotipos de fríjol arbustivo se sembraron en dos ensayos de rendimiento simultáneamente en la localidad de Darién, Colombia, en el primer semestre de 2004 (altura de 1.500 msnm, temperatura promedio de 19 °C y una precipitación anual de 1.200 mm de los cuales 500 mm son durante la época lluviosa de marzo, abril y mayo). Los ensayos se realizaron con dos tratamientos de fertilización, uno bajo en fósforo (50 kg-ha⁻¹ equivalentes a 7,5 kg P₂O₅) y otro alto en fósforo (350 Kg-ha⁻¹ TSP equivalentes a 45 kg P₂O₅), teniendo en cuenta que la concentración de fósforo en los suelos nativos de Darién oscila entre 2 y 10 ppm. Cada ensayo tuvo un diseño de bloques completos al azar con tres replicaciones. Los genotipos incluyeron 20 variedades liberadas en los últimos 30 años por el ICA o Corpoica (series Diacol e ICA), entre los que se encuentran fenotipos rojos moteado (tipo calima), rojo (tipo radical) de semilla grande, 7 cultivares de Berruecos, Darién, Sevilla y Tenerife en el departamento del Valle, 6 genotipos

de Ocaña y Zaragoza, Norte de Santander, y siete líneas CIAT como testigos.

La semilla de cada variedad se cosechó individualmente por repetición y se analizó para hierro y cinc. Se tomaron 5 gramos de semilla completa lavada con agua destilada que luego se secó en un horno a 50 °C y después se molió en un molino Retsch modificado con cámaras de teflón y balines de zirconio. El no usar piezas de metal permitió evitar cualquier tipo de contaminación con minerales. Una vez molida, la harina se transfirió a envases plásticos de 30 mL para almacenarla en una cámara a 20 °C y posteriormente analizarla. La harina de la semilla se sometió a digestión ácida, según metodología de Benton Jones (1989). La concentración del mineral se determinó por espectroscopia de absorción atómica medida en partes por millón (ppm), en un equipo Unicam Solaar 969 en el laboratorio de servicios analíticos del CIAT. Los datos se analizaron usando el programa Statistix v. 8.0 para calcular la correlación entre variables los análisis de varianza y la comparación de medias.

Resultados y discusión

Las variedades evaluadas difirieron en su contenido de hierro y de cinc en ambos niveles de fertilización con fósforo. El análisis de varianza mostró diferencias significativas en la concentración de los dos minerales para los dos niveles de fertilización con fósforo (tabla 1), que se ven reflejadas en los promedios por tratamiento de la fertilización alta en fósforo (hierro 61,47 ppm y cinc 23,30) *versus* baja en fósforo (53,15 para hierro y 26,86 para cinc). También se encontraron diferencias significativas en cuanto a rendimiento entre los genotipos evaluados.

El rango para hierro entre los genotipos en el tratamiento alto en fósforo fue de 32 a 85 ppm, de los cuales presentaron promedios más altos ICA Tundama (79,4 ppm), ICA L-59 (75,1 ppm), ICA Cerinza (68,6 ppm), AFR188 (76,2 ppm), AFR612 (69,5 ppm) y AFR735 (75,1 ppm) (tabla 2). Con respecto al tratamiento bajo en fósforo el rango de hierro fue de 34 a 78 ppm, en que las variedades Radical (69,9 ppm), AFR188 (67,4 ppm) y AFR612 (77,0 ppm) presentaron el mayor contenido de hierro. Todas las variedades altas en hierro fueron de origen andino que se caracteriza por presentar una amplia variabilidad y un alto contenido de hierro en semilla (Islam *et al.* 2002).

El análisis de varianza para el contenido de cinc en la semilla tuvo diferencias significativas para los genotipos cuyos rangos se encontraron entre 20,9 y 36,0 ppm en bajo

TABLA 1. Análisis de varianza para el contenido de hierro y cinc en semilla de 40 variedades, cultivares locales y líneas avanzadas crecidas en niveles alto y bajo en fósforo en la localidad de Darién.

a) Hierro

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Nivel de P	1	3.982,4	3.982,4	90,4	0,0000***
Genotipo	39	12.966,8	341,2	7,7	0,0000***
Nivel de P x genotipo	39	2.711,6	71,4	1,6	0,0211*
Error	162	7.136,2	44,0		
Total	239				

b) Cinc

Fuente	GL	SC	CM	F	P
Nivel de P	1	766,4	766,4	156,1	0,0000***
Genotipo	39	1.352,7	35,6	7,3	0,0000***
Nivel de P x genotipo	39	179,5	4,7	1,0	0,5385 ^{ns}
Error	162	795,2	4,9		
Total	239				

Hierro CV 11,55 // Cinc CV 8,82.

Ns, no significativo; * 0,05; ** 0,01; *** 0,001.

fósforo y 13,1 a 33,7 ppm en alto fósforo. Los genotipos más altos fueron ICA Tundama y AFR188 en el tratamiento alto en fósforo y Diacol Nutibara, ICA Quimbaya, AFR612 y AFR188 en el tratamiento bajo en fósforo (tablas 1 y 2).

La interacción entre el genotipo y el nivel de fertilización fue significativa para hierro, lo que muestra la diferencia en respuesta de algunos genotipos como Diacol Nima, ICA Tundama, ICA L-59, ICA Cerinza cuyos promedios fueron altos en el tratamiento alto en fósforo pero más bajos en el tratamiento bajo en fósforo, comparados con AFR612 que respondió de la manera opuesta a la reducción en el nivel de fósforo y tuvo mayor concentración de hierro en el tratamiento bajo en fósforo respecto al alto en fósforo (figura 1). Mientras tanto, aunque para el contenido de cinc la interacción de genotipo por nivel de fósforo no fue significativa, en general hubo una reducción en el contenido de cinc con mayor fertilización con fósforo, como se observa para las variedades Diacol Nutibara, ICA Quimbaya y AFR612. Fue notable que en casos como el de ICA Tundama hubo una reducción de cinc en bajo fósforo mientras que para la línea CIAT AFR188 los promedios eran similares en los dos ambientes (figura 2).

Se realizaron las correlaciones entre todas las variables evaluadas (tabla 3) y se encontró que las concentraciones

TABLA 2. Promedio de la concentración de hierro y cinc en la semilla y rendimiento para las 40 variedades colombianas, cultivares locales y líneas avanzadas bajo niveles alto y bajo en fósforo en la localidad de Darién.

Identificación	Localidad	Color	Tamaño	Bajo en fósforo			Alto en fósforo		
				Fe ppm	Zn ppm	Rend. kg-ha ⁻¹	Fe ppm	Zn ppm	Rend. kg-ha ⁻¹
Diacol Calima		Morado moteado	Grande	45,87	24,41	515,89	48,00	23,72	1.204,57
Diacol Catio		Morado moteado	Grande	57,45	25,69	592,91	54,19	19,57	1.480,36
Diacol Nima		Rojo moteado	Mediana	50,58	24,29	759,00	61,90	20,54	1.694,32
Diacol Nutibara		Rojo moteado	Mediana	53,43	29,63	309,33	49,76	25,17	580,11
ICA Cafetero		Rojo moteado	Mediana	48,48	26,67	525,00	55,83	23,02	1.365,71
ICA Caucaya		Rojo moteado	Mediana	59,13	28,39	988,30	46,73	24,40	1.720,50
ICA Citara		Morado moteado	Mediana	45,62	23,10	798,11	46,68	16,86	1.524,75
ICA Cuna		Rojo	Mediana	41,67	20,86	585,33	36,48	17,78	1.201,26
ICA Duva		Rojo	Grande	53,12	26,97	802,54	45,72	19,86	1.913,32
ICA Guali		Morado moteado	Grande	62,22	29,00	774,78	53,04	20,43	1.377,61
ICA Guanenta		Morado moteado	Grande	48,22	27,88	706,56	57,37	25,46	1.280,27
ICA L 24		Rojo moteado	Mediana	47,41	24,99	849,01	60,18	24,81	852,40
ICA L-59		Morado moteado	Mediana	60,86	28,75	966,11	75,12	26,02	1.821,52
ICA L-66		Morado moteado	Mediana	50,91	27,56	421,00	54,81	21,97	1.529,12
ICA Quimbaya		Rojo	Grande	64,36	30,23	577,67	63,85	23,60	1.395,18
ICA Tone		Morado	Mediana	46,69	26,09	450,00	48,31	21,74	943,82
ICA Tundama		Rojo moteado	Grande	49,75	25,68	1.032,35	79,44	30,18	1.433,19
ICA Palmar		Rojo moteado	Mediana	47,11	24,53	666,21	55,05	21,96	1.502,34
ICA Cerinza		Rojo	Mediana	53,75	27,56	560,56	68,57	24,04	1.244,86
ICA Bachué		Rojo	Mediana	55,57	28,15	675,43	62,37	21,83	1.220,28
Rosado	Ocaña	Rosado	Grande	55,40	26,91	370,89	47,74	24,97	867,25
LP 110 Rosado	Zaragoza	Rosado	Grande	40,78	25,53	558,45	47,32	21,85	923,06
Blanquillo	Berruecos	Blanco	Pequeña	54,64	27,65	1.466,15	58,63	26,30	1.986,12
Mina	Berruecos	Morado moteado	Grande	54,25	25,49	773,51	63,98	21,98	2.816,64
Palisero	Berruecos	Rojo	Pequeña	53,93	26,03	1.781,55	57,56	24,14	2.976,88
Sangretoro	Berruecos	Rojo	Pequeña	48,55	24,22	1.658,38	55,76	23,38	2.303,10
Cargabello	Darién	Rojo moteado	Pequeña	62,35	30,17	663,55	52,75	25,55	1.405,10
Morado Mot	Restrepo	Morado moteado	Grande	49,57	26,07	1.082,28	62,98	24,08	1.741,76
Radical	Restrepo	Rojo	Mediana	69,98	28,22	1.072,83	60,67	24,04	1.926,96
Radical Cerinza	Restrepo	Rojo	Mediana	52,83	28,71	816,21	59,33	27,18	1.805,39
Chocho	Tenerife	Morado	Mediana	41,13	24,55	572,11	59,07	22,13	1.211,56
Radical Froylan	Tenerife	Rojo	Pequeña	53,02	26,46	633,67	53,90	24,23	1.901,10
Sangretoro		Rojo	Mediana	38,28	21,30	885,23	53,97	22,92	1.377,51
A36	CIAT	Rojo moteado	Grande	41,56	24,28	850,03	51,01	24,07	2.001,13
AFR188	CIAT	Rojo moteado	Mediana	67,36	30,73	1.421,98	76,20	30,37	1.660,40
AFR612	CIAT	Rojo moteado	Grande	77,04	30,72	1.147,03	69,46	23,02	2.545,88
AFR619	CIAT	Rojo moteado	Mediana	35,06	21,76	1.315,11	32,00	19,58	3.164,44
AFR735	CIAT	Rojo moteado	Mediana	62,33	27,71	1.277,79	75,14	22,00	2.302,51
AND279	CIAT	Rojo moteado	Mediana	53,89	21,61	1.080,62	59,98	19,23	1.741,93
CAL96	CIAT	Rojo moteado	Grande	46,27	23,72	706,45	45,04	18,90	1.490,14

Bajo en fósforo

Media: hierro = 53,15 ppm; cinc = 26,86 ppm

STDV: hierro = 8,69; cinc = 2,98

CV: hierro = 16,51; cinc = 11,28

LSD: hierro = 1,99; cinc = 1,99

Alto en fósforo

Media: hierro = 61,47 ppm; cinc = 23,30 ppm

STDV: hierro = 10,78; cinc = 3,36

CV: hierro = 17,68; cinc = 14,69

LSD: hierro = 1,99; cinc = 1,99

TABLA 3. Correlaciones entre la concentración de hierro, cinc y rendimiento en los dos niveles de tratamiento con fósforo (P) para las variedades colombianas, cultivares locales y líneas avanzadas.

	Hierro, alto P	Hierro, bajo P	Cinc, alto P	Cinc, bajo P	Rendimiento, alto P
Hierro, bajo P	0,55*				
Cinc, alto P	0,57*	0,32*			
Cinc, bajo P	0,47*	0,79*	0,56*		
Rendimiento, alto P	0,11 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	
Rendimiento, bajo P	0,30 ^{ns}	0,21 ^{ns}	-0,22 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,73*

ns, no significativo; * 0,05; ** 0,01; *** 0,001.

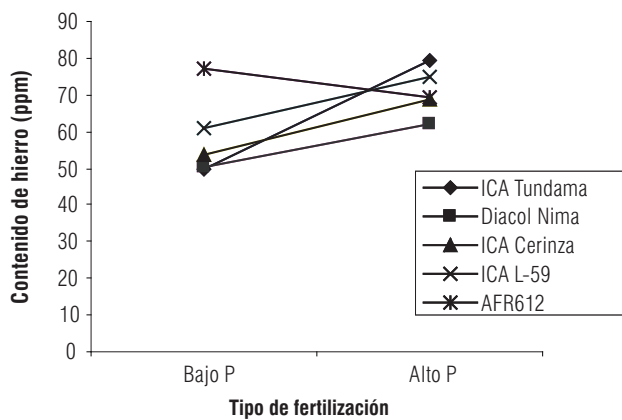


FIGURA 1. Variedades colombianas con mayor contenido de hierro y su respuesta al tratamiento de fertilización bajo y alto en fósforo.

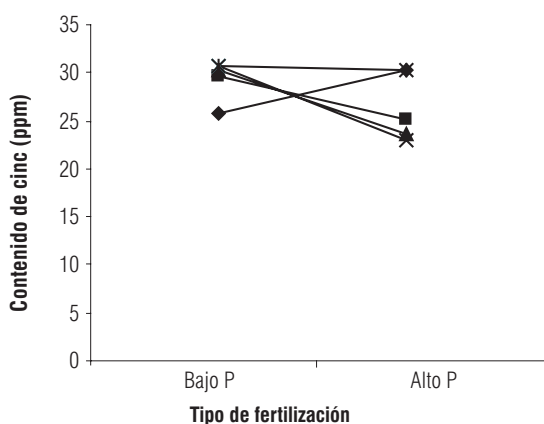


FIGURA 2. Variedades colombianas con mayor contenido de cinc y su respuesta al tratamiento de fertilización bajo y alto en fósforo.

de hierro y cinc en los tratamientos bajo y alto en fósforo fueron altas ($r = 0,79$ y $r = 0,57$, respectivamente) y significativas ($P < 0,05$), un poco mayores que lo reportado por autores anteriores (Beebe *et al.*, 2000; Blair *et al.*, 2005). La correlación entre los dos tratamientos de fertilización con fósforo para hierro fue de $r = 0,55$ y para cinc de $r = 0,56$, los dos significativos a $P < 0,05$. La alta correlación positiva entre los dos minerales sugiere que el incremento en el contenido de hierro puede aumentar simultáneamente el contenido de cinc y la mediana correlación entre niveles de minerales en los dos tratamientos de fertilización con fósforo refleja el nivel de interacción entre genotipo y ambiente. No existieron correlaciones significativas entre el contenido de hierro y cinc con el rendimiento, lo que indica que en programas de mejoramiento es posible realizar una selección de genotipos con alto contenido de hierro o cinc, sin un efecto negativo en la producción de semilla.

Los resultados sugieren que la aplicación de fósforo al suelo puede incrementar la concentración de hierro pero a la vez puede disminuir la concentración de cinc en la semilla de frijol. Esta conclusión complementa los resultados de Biddulph y Woodbridge (1952) quienes en varios estudios de fertilización con varios niveles de fósforo en suelo y en soluciones nutritivas, determinaron que la planta absorbe fósforo en relación directa con la concentración de hierro y viceversa. Mientras tanto el efecto del fósforo sobre la acumulación de cinc en plantas ha sido estudiado por autores como Wallace *et al.* (1974), Peck *et al.* (1979) y Gianquinto *et al.* (2000), quienes encontraron que en varios cultivos el contenido de cinc de toda la planta decrece con el incremento del nivel de fósforo. La interacción de fertilización por macronutrientes sobre la acumulación de micronutrientes en el grano de frijol es un tema de actualidad para el programa de biofortificación (<http://www.harvestplus.org>), un proyecto cuya meta es aumentar la calidad nutricional mediante la identificación y desarrollo de los granos elementales de la dieta básica de varios países de América Latina, entre ellos Colombia, mediante la identificación de genotipos de frijol con alto potencial para la acumulación de minerales en semilla y su comportamiento en diferentes ambientes.

Conclusiones

El frijol arbustivo colombiano tuvo una alta variabilidad en el contenido de hierro y de cinc, lo que representa un potencial para selección de padres en futuros programas de mejoramiento.

Las líneas mejoradas AFR188, AFR612, AFR735 y las variedades ICA Tundama e ICA L-59 mostraron altas concentraciones de hierro y cinc y buenos niveles de rendimiento en los dos tratamientos de fertilización con fósforo.

Aunque existió un efecto de la aplicación de fósforo en el suelo sobre la cantidad de hierro y cinc acumulada en la semilla, fue posible obtener genotipos con alto contenido de hierro y cinc adaptados a suelos en condiciones bajas en fósforo. Además, existió una correlación positiva entre el hierro y el cinc almacenados en la semilla en los genotipos evaluados.

La variabilidad en la calidad nutricional del germoplasma de frijol colombiano permitirá la selección y uso de genotipos con alto contenido de hierro en el diseño de programas nutricionales para suplir las necesidades de hierro en la población del país.

Agradecimientos

Para la realización de esta investigación se contó con la colaboración del equipo de campo del proyecto frijol en el Centro Internacional de Agricultura Tropical, especialmente Agobardo Hoyos y Yercil Viera. Agradecemos el apoyo financiero de la agencia Fontagro (IICA/BID) y del proyecto Harvest Plus.

Literatura citada

- Beebe, S.T., M. Rojas, X. Yan, M.W. Blair, F. Pedraza, F. Muñoz, J. Tohme y J.P. Lynch. 2006. Quantitative trait loci for root architecture traits correlated with phosphorus acquisition in common bean. *Crop Sci.* 46(1), 413-423.
- Beebe, S., A.V. González y J. Rengifo. 2000. Research on trace minerals in the common bean. *Food Nutr. Bull.* 21(4), 387-391.
- Benton-Jones, J. 1989. Plant analysis techniques. Benton-Jones Laboratories, Georgia.
- Biddulph, O. y C.G. Woodbridge. 1952. The uptake of phosphorus by beans plants with particular reference to the effect of iron. *Plant Physiol.* 27(3), 431-444.
- Blair, M.W., C. Astudillo, J. Restrepo, L.C. Bravo, D. Villada y S. Beebe. 2005. Análisis multi-local de líneas de frijol arbustivo con alto contenido de hierro y cinc en el departamento de Nariño. *Fitotecnia Colombiana* 5(2), 20-27.
- Gianquinto, G., A. Abu-Rayyan, L. Ditola, D. Piccotina y B. Pesarosa. 2000. Interaction effects of phosphorus and zinc on photosynthesis, growth and yield of dwarf bean grown in two environments. *Plant Soil* 220, 219-228.
- Graham, R., D. Senadhira, S. Beebe, C. Iglesias e I. Monasterio. 1999. Breeding for micronutrient density in edible portions of staple food crops: conventional approaches. *Field Crops Res.* 60, 57-80.
- Grusak, M. y D. Dellapenna. 1999. Improving nutrient composition to enhance human nutrition and health. *Annu. Rev. Plant Mol. Bio.* 50, 133-161.
- ICBF. 2005. Encuesta nacional de la situación nutricional en Colombia, 2005. En: <http://www.icbf.gov.co/Noticias/index.html>; consulta: junio de 2008.
- Islam, F.M.A., K.E. Basford, C. Jara, R.J. Redden y S. Beebe. 2002. Seed compositional and disease resistance differences among gene pools in cultivated common bean. *Genet. Resour. Crop Evol.* 49, 285-293.
- Islam, F.M.A., S. Beebe, M. Muñoz, J. Tohme, R.J. Redden y K. E. Basford. 2004. Using molecular markers to assess the effect of introgression on quantitative attributes of common bean in the Andean gene pool. *Theor. Appl. Genet.* 108, 243-252.
- Peck, N.H., D.L. Grunes, R.M. Welch y G.E. MacDonald. 1980. Nutritional quality of vegetable crops as affected by phosphorus and zinc fertilizers. *Agron. J.* 72, 528-534.
- Rengel, Z., G.D. Batten y D. E. Crowley. 1999. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portion of field crops. *Field Crops Res.* 60, 27-40.
- Roy, K.S., A.M. Karim, A.K.M. Islam, N.M. Bari y H. Tetsuschi. 2006. Relationship between yield and its component characters of bush bean (*Phaseolus vulgaris*). *South Pacific Studies* 27(1), 13-23.
- Wallace, A., A.A. Elgazzar, J.W. Cha y G.V. Alexander. 1974. Phosphorus levels versus concentration of zinc and other elements in bush bean plants. *Soil Sci.* 117(6), 347-351.
- Yan X., P.J. Lynch y S.E. Beebe. 1996. Utilization of phosphorus substrates by contrasting common bean genotypes. *Crop Sci.* 36, 936-941.