

Caracterización fenotípica de patrones de raíces relacionados con la tolerancia a la baja fertilidad y sequía en frijol común

Mariel Andrea Gallardo Salazar

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano

Honduras

Noviembre, 2013

ZAMORANO
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

Caracterización fenotípica de patrones de raíces relacionados con la tolerancia a la baja fertilidad y sequía en frijol común

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Agrónomo en el Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Mariel Andrea Gallardo Salazar

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2013

Caracterización fenotípica de patrones de raíces relacionados con la tolerancia a la baja fertilidad y sequía en frijol común

Mariel Andrea Gallardo Salazar

Resumen: El desarrollo de la arquitectura de la raíz determina la capacidad de la planta para utilizar los recursos del suelo, ya sean nutrientes o agua. La presente investigación se realizó con la finalidad de caracterizar los patrones de las raíces del frijol común relacionadas con la tolerancia a la sequía y la baja fertilidad. Se evaluaron tratamientos con (130 kg/ha de 18-46-0 a la siembra + 32.5 kg/ha de urea al aporque) y sin fertilización, y ocho genotipos de frijol (seis líneas endogámicas recombinantes, LER y dos testigos comerciales, mejorado y criollo) utilizando un arreglo factorial de un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se condujeron un ensayo de campo (sin estrés hídrico) y otro en casa de malla (con estrés hídrico), en suelos bajos en materia orgánica, nitrógeno total y fósforo en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano a 800 msnm, con temperatura media de 24 °C y precipitación promedio de 1,100 mm. A la floración, las diferencias significativas en las variables de raíces debidas a la fertilización fueron muy limitadas. En cambio, se presentaron diferencias por efectos de genotipos y en la interacción F x G en la mayoría de las características, tanto en el campo como en casa de malla. A la madurez, no se observaron diferencias en el rendimiento y sus componentes por efectos de la fertilización en el campo ni en casa de malla. Sin embargo, si se presentaron diferencias debidas a efectos de genotipos y de la interacción F x G en el campo. Entre los genotipos destacados en variables de raíces se incluyen a la variedad comercial Amadeus 77 y la criolla Seda.

Palabras clave: Arquitectura de raíces, estrés hídrico, líneas endogámicas recombinantes, *Phaseolus vulgaris*.

Abstract: The development of root architecture determines the ability of the plant to use the resources of the soil, water or nutrients. This research was conducted to characterize the patterns of common bean roots related to drought tolerance and low fertility. Eight bean genotypes (six recombinant inbred lines, RIL, and two checks, an improved and a landrace cultivars) were evaluated with fertilization and without fertilization (130 kg/ha of 18-46-0 at sowing + 32.5 kg/ha of urea at four weeks after planting), using a factorial array of a randomized complete block design with four replications. A field trial without water stress and a screen house trial with water stress were conducted in low organic matter, total nitrogen and phosphorus soils in Zamorano, Honduras at 800 msnm, average temperature of 24 °C and average annual rainfall of 1,100 mm. At flowering, significant differences in root traits due to fertilization (F) treatment were very limited. However, there were differences due to the effects of genotypes (G) and the F x G interaction in most root and plant dry weight characteristics, both in the field and screen house. At maturity, there were no significant differences in yield and yield components by the effects of fertilization on the field or screen house. However, differences due to the effects of genotypes and the F x G interaction were observed in the field trial. The genotypes Amadeus 77 and Seda presented the highest values in root traits.

Key words: *Phaseolus vulgaris*, recombinant inbred lines, root architecture, water stress.

CONTENIDO

Portadilla.....	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de cuadros, figuras y anexos.....	v
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	4
3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	7
4 CONCLUSIONES.....	18
5 RECOMENDACIONES.....	19
6 LITERATURA CITADA.....	20
7 ANEXOS.....	22

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Resultados de separación de medias del peso seco de la parte aérea (PSA), ángulo de corona 1 y 2 (AC1 y AC2), número de raíces en corona 1 y 2 (RC1 y RC2), número (RA) y diámetro (DiRA) de raíces adventicias y diámetro de la raíz principal (DiRP) a la floración del ensayo en el campo. La Vega 4, Zamorano.	8
2. Interacción fertilización × genotipo en peso seco de parte aérea (PSA), ángulo de corona 1 y 2 (AC1 y AC2), raíces en corona 1 y 2 (RC1 y RC2), número (RA), y diámetro de raíces adventicias (DiRA) y diámetro de la raíz principal (DiRP) a la floración del ensayo en campo.	10
3. Características analizadas en la cosecha del ensayo en campo según los factores tratamiento y genotipo.	11
4. Efectos de la Interacción fertilización × genotipo a la madurez de cosecha del ensayo en campo.	12
5. Peso seco de parte aérea (PSA), ángulo de corona 1 y 2 (AC1 y AC2), raíces en corona 1 y 2 (RC1 y RC2), raíces adventicias (RA) Diámetro de corona 1 y2 (DiC1 y DiC2), Diámetro de raíces adventicias (DiRA), diámetro de raíz principal (DiRP), peso de la raíz (PR), longitud total de la raíz (LTR), área superficial de la raíz (ASR) y volumen de la raíz (VR) al momento de floración del ensayo en casa de malla.	14
6. Interacción fertilización × genotipo en peso seco de parte aérea (PSA), ángulo de corona 1 y 2 (AC1 y AC2), raíces en corona 1 y 2 (RC1 y RC2), raíces adventicias (RA) Diámetro de corona 1 y2 (DiC1 y DiC2), Diámetro de raíces adventicias (DiRA.), diámetro de raíz principal (DiRP), peso de la raíz (PR), longitud total de la raíz (LTR), área superficial de la raíz (ASR) y volumen de la raíz (VR) analizados al momento de floración del ensayo en casa de malla.	15
7. Peso de semillas del ensayo en casa de malla según los factores tratamiento y genotipo.	16
8. Interacción fertilización × genotipo en peso seco de semillas en la cosecha del ensayo en casa de malla.	17
Anexos	Página
1. Resultados de análisis de suelo del ensayo en campo (Henry <i>et al.</i> 2010). .	22
2. Resultados de análisis de suelo del ensayo en casa de malla.	22
3. Solución nutritiva Broughton y Dilworth (1971)	23

1. INTRODUCCIÓN

En Honduras, el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) ocupa el segundo lugar de producción de granos básicos y representa el 3% del PIB agropecuario (CEPAL 2011). El frijol representa el 20.25% del área dedicada a cultivos de consumo interno, y anualmente se producen 88,700 toneladas, con rendimientos de 0.9 toneladas/hectárea (CEPAL 2011). El frijol es la fuente principal de proteínas para la mayoría de la población rural y urbana de escasos recursos de Centro América y El Caribe (Rosas 2000). En la región, el cultivo está en manos de pequeños agricultores, los cuales tienen limitado acceso a insumos, tierras fértiles y mecanización (Rosas *et. al* 2003). La falta de tierras exige a la agricultura crecer hacia zonas marginales con problemas de estrés en factores ambientales (Christiansen y Lewis 1981), por eso es importante desarrollar variedades de que se adapten a los sistemas de producción de estos agricultores y al estrés ambiental.

La siembra del cultivo de frijol se concentra entre los meses de mayo y junio cuando inician las lluvias, así como en septiembre y octubre durante el período final de la época lluviosa. La siembra en los meses de noviembre y diciembre sólo es posible en las zonas húmedas de la región y es conocida como la siembra de apante (Beaver y Rosas 2003). La dificultad de la siembra en otras épocas se debe a que los mecanismos de tolerancia a la sequía en frijol como cierre estomático, precocidad y reducción de fotosíntesis, limitan el crecimiento del cultivo originando bajos rendimientos. Otro mecanismo de tolerancia a la sequía se relaciona directamente con el desarrollo radicular (White 1989). La importancia de la arquitectura de la raíz en la productividad de las plantas proviene del hecho de que muchos recursos del suelo tienen distribución desigual; por tal motivo, el desarrollo espacial del sistema radicular es en gran medida lo que determina la capacidad de la planta para explotar esos recursos (Lynch 1995).

Para el desarrollo de una línea con tolerancia a estrés ambiental se debe evaluar el genotipo en suficientes sitios y épocas en los cuales la línea va a ser utilizada, debido a la alta interacción genotipo \times ambiente. Es necesario que muchos ambientes sean evaluados para conseguir inferencias estadísticas acerca de la adaptación. Esta no es una tarea fácil ya que un cultivar puede sobresalir en unas condiciones y ser deficiente en otras. Por eso los fitomejoradores no enfatizan un rasgo en exclusión de otro (Christiansen y Lewis 1981). También se debe considerar la baja heredabilidad causada por la alta interacción entre ambiente y genotipo. Por tal motivo incluso cuando se selecciona con éxito es difícil demostrar la tolerancia a sequía con consistencia (Jensen 1981).

La selección de líneas con mejores rendimientos generalmente es la selección indirecta a tolerancias a algún estrés ambiental específico. Sin embargo, la planta que obtenga el mayor rendimiento en esa ocasión, no será necesariamente la que mejor se adaptará a otras condiciones. Por tal motivo para realizar el mejoramiento directo a estrés ambiental se deben escoger sitios y condiciones confiables y uniformes. Se escogen campos que tienen el factor de estrés a un nivel en el que se puede discriminar entre genotipos tolerantes y susceptibles. No es válido si no hay estrés o si es muy severo como para que nada sobreviva (Christiansen y Lewis 1981).

Los intentos por obtener variedades de frijol adaptadas a estreses abióticos, como sequía y baja fertilidad no ha sido sólo interés de científicos. Las variedades criollas utilizadas por los agricultores están relativamente bien adaptadas al estrés hídrico; sin embargo, esta selección se ha centrado principalmente en la precocidad como un mecanismo de escape al estrés hídrico (Rosas 2001). El interés por parte de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano en la investigación sobre variedades de frijol que se adapten a condiciones de sequía se remonta a 1988, con la evaluación del comportamiento agronómico del frijol común y frijol tepari (*P. acutifolius*) bajo estrés de sequía (Moncada Paz 1990; Rosas et al. 1991). En la actualidad, la investigación se orienta a la caracterización y selección de genotipos con comportamiento superior bajo condiciones de estrés hídrico y baja fertilidad, que son los limitantes abióticos más importantes en el cultivo del frijol.

Una de las alternativas de desarrollo de variedades tolerantes a condiciones predominantes de la sequía y baja fertilidad, es el desarrollo de multilíneas (Henry *et al.* 2010). Las variedades multilíneas se obtienen a partir de la mezcla de múltiples líneas puras (Jensen 1988). Recientemente, la investigación por parte del Programa de Investigaciones en Frijol (PIF), ha estado orientada al desarrollo de multilíneas que permitan mejor adaptación a condiciones adversas y variables que confrontan los pequeños productores de frijol en Centroamérica. En el 2010, se caracterizaron 50 líneas endogámicas recombinantes (LER) de la variedad de frijol rojo Amadeus 77 (Morales González 2010); estas líneas fueron generadas por el método de Retrocruza-Autofecundación, utilizando la variedad Amadeus 77 como el padre recurrente y las líneas L88-13, L88-33 y L88-62 como los padres donantes (Román Sánchez 2009).

En el presente estudio se utilizaron seis LER seleccionadas de estudios previos, por sus diferencias en las características de raíces relacionadas a la tolerancia a los estreses abióticos mencionados. El estudio se llevó a cabo en las facilidades de casa de malla y lotes de investigación del PIF en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Las LER son similares en sus características fenológicas, agronómicas y comerciales, pero difieren en las características de raíces bajo condiciones de baja fertilidad y sequía. Los ensayos se condujeron bajo condiciones de fertilización y sin fertilización, y en siembras de primera (lluviosa) y en casa de malla, para medir los efectos de baja fertilidad y de sequía. En esta investigación se define tolerancia a la sequía como la obtención del mayor rendimiento con limitada humedad del suelo en relación a otros genotipos de frijol.

- Determinar las características fenotípicas de las raíces de frijol común relacionadas a la tolerancia a sequía y baja fertilidad utilizando líneas endogámicas recombinantes (LER).
- Determinar los efectos de la baja fertilidad en genotipos de frijol (LER) en ausencia (ensayo de campo) y en presencia de estrés hídrico (ensayo en casa de malla).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se llevó a cabo en dos lugares. La siembra en campo, en el lote La Vega 4 de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, departamento de Francisco Morazán, km. 32 al este de Tegucigalpa, Honduras. El lote está ubicado a 800 msnm, con una temperatura media anual de 24 °C y una precipitación promedio anual de 1,100 mm. La evaluación de baja fertilidad en condiciones de sequía se realizó en la casa de malla #2 del Programa de Investigaciones en Frijol (PIF) de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. La investigación se desarrolló durante los meses de mayo a diciembre del 2012.

Se utilizaron seis líneas endogámicas recombinantes (BRT 101-189, BRT 101-232, BRT 102-183, BRT 102-221, BRT 103-182 y BRT 103-204). Como testigos se utilizó la variedad mejorada (Amadeus 77, utilizada como padre recurrente de las LER) y una variedad criolla (Seda). Los progenitores de las líneas BTR 101 son Amadeus 77 y L88-13, los de las líneas BTR 102 son Amadeus 77 y L88-33, y los de las líneas BTR 103 son Amadeus 77 y L88-62. Las líneas L88 se caracterizan por presentar diferencias en algunos patrones de sus sistemas radiculares, y fueron seleccionadas de estudios previos conducidos en la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano bajo condiciones de estrés de sequía y baja fertilidad (Román Sánchez 2009; Morales González 2010).

Ensayo en campo. Se utilizó un arreglo factorial de parcelas divididas de un diseño en Bloques Completos al Azar. Los tratamientos con y sin fertilización fueron distribuidos en las parcelas y los genotipos de frijol en las sub-parcelas, se utilizaron cuatro repeticiones. El ensayo de campo se condujo en la época de primera (mayo- agosto) con precipitación de 319 mm, en la que se evaluó el comportamiento de las LER bajo tratamientos con y sin fertilización en un lote relativamente de baja fertilidad. Los análisis de suelos del lote La Vega 4 muestran los siguientes datos: 16,3 g/kg de materia orgánica (bajo); 0,8 g/kg de Nitrógeno total (bajo), 13 mg/kg de Fósforo (medio), 428 mg/kg de Potasio (alto), 1490 mg/kg de Calcio (alto) y 168 mg/kg de magnesio (medio).

La unidad experimental fue de tres surcos de 5 m de largo y los surcos estuvieron distanciados a 0.7 m. El distanciamiento entre las plantas dentro de los surcos fue de 0.1 m. Se realizó el control químico de malezas a la siembra y antes de la floración, así como control manual cuando fue necesario. Al momento de la siembra las parcelas con fertilización fueron fertilizadas con fosfato di-amónico (18-46-0) en la dosis recomendada para pequeños productores (130 kg/ha). Al momento del aporque (25 DDS), las parcelas

con fertilización recibieron 32.5 kg/ha de Urea (46-0-0). También se realizó monitoreo y control de insectos hasta el llenado de vainas.

La toma de datos se realizó en dos etapas de desarrollo del cultivo, el primero a la floración y el segundo a la madurez de cosecha. En la floración (a los 40 DDS), se tomó una muestra de cinco plantas del surco central de cada LER y testigos (sub-parcelas), dejando por lo menos dos plantas de borde para el muestreo. Se realizó un corte diagonal en el tallo al ras de la superficie del suelo para separar la parte aérea de la planta de la raíz. El follaje (parte aérea) fue secado al horno a 70°C x 72 horas, y posteriormente se determinó el peso seco. El análisis de las raíces consistió en la evaluación de las siguientes variables: número y ángulo de las raíces coronarias 1 y 2 con relación al eje horizontal, número y diámetro de raíces adventicias y diámetro de la raíz principal después de los 10 cm de longitud.

A la madurez de cosecha (75 DDS) se tomaron muestras de 15 plantas de cada sub-parcela (genotipo). Las variables que se midieron fueron: número de vainas/planta, número de semillas/vaina, peso seco de 100 semillas, y el peso de semillas de la muestra de 15 plantas. El rendimiento en kg/ha fue calculado con base en las plantas cosechadas y el peso de semillas de la sub-parcela.

Se realizó el análisis de varianza (ANDEVA), para determinar la significancia del modelo; separación de medias (DMS) con probabilidad $P < 0.05$ para determinar si existe diferencia entre los tratamientos. Para los análisis estadísticos se utilizó el programa “Statistix® 10”.

Ensayo en casa de malla. Se utilizó un arreglo factorial de parcelas divididas en Bloques Completamente al Azar; los tratamientos con y sin fertilización fueron distribuidos en las parcelas; los ocho genotipos de frijol en las sub-parcelas. Se realizaron cuatro repeticiones. Se sembraron semillas pre-germinadas en platos Petri con agar en completa oscuridad durante dos días. La siembra se hizo en maceteros (40 cm de alto x 21 cm de diámetro) conteniendo un sustrato suelo: arena en relación 1:1. El análisis del sustrato muestra los siguientes resultados: 16,4 g/kg de materia orgánica (bajo); 0,8 g/kg de Nitrógeno total (bajo), 13 mg/kg de Fósforo (medio), 226 mg/kg de Potasio (alto), 967 mg/kg de Calcio (medio), 159 mg/kg de magnesio (medio) y 35 mg/kg de Sodio (normal). Para asegurar que quede una planta por macetero se colocaron dos semillas por macetero; posteriormente se hizo un raleo, dejando la planta más vigorosa. El riego diario fue de 120 ml de agua por macetero el cual se suspendió a partir de los 20 DDS. A los maceteros del tratamiento con fertilización se les aplicó diariamente 12 ml de la solución nutritiva Broughton y Dilworth (1971) libre de nitrógeno más 2 g de urea/1000 ml agua, desde los 9 a los 20 DDS.

La toma de muestras se realizó a la floración. Además, de las variables consideradas en el ensayo de campo, se utilizó el programa “WinRhizo®” para análisis de raíces escaneadas para medir las variables de área superficial, longitud total, volumen y diámetro de la raíz. También se determinó el peso seco de la raíz con una balanza digital de precisión. A la

madurez de cosecha, se evaluó el peso seco de las semillas de cada planta para calcular el rendimiento de los genotipos por tratamiento.

Se utilizó análisis de varianza (ANDEVA), para determinar la significancia del modelo; separación de medias (DMS) con probabilidad $P < 0.05$ para determinar si existen diferencias entre los tratamientos. Para los análisis estadísticos se utilizó el programa "Statistix 10".

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados generales. El análisis de varianza de todas las características, tanto en campo como casa de malla muestran que se trata de grupos homogéneos. El coeficiente de variación máximo fue de 65%, valor aceptado para ensayos de este tipo.

Ensayo en campo: Evaluación en floración. A continuación se muestran los resultados de las ocho variables evaluadas al momento de la floración (siete características de la raíz y una de la parte aérea).

Efecto de Fertilización. Se observaron diferencias significativas ($P < 0.05$) debidas a los efectos de los tratamientos de fertilización en las variables evaluadas en la floración en peso seco de la parte aérea (PSA), número de raíces en la corona 1 (RC1) y diámetro de raíces adventicias (DiRA) (Cuadro 1). Hubo un incremento en el PSA y el RC1 con el tratamiento con fertilización; pero el DiRA fue menor. El incremento en PSA y el RC1 son explicados por las condiciones de mayor disponibilidad de nutrientes (Benites Panchi 2008). En el caso del DiRA, se puede argumentar que bajo condiciones de estrés de baja fertilidad las plantas tienden a incrementar el número o volumen de raíces adventicias para aumentar la superficie de absorción de nutrientes en las capas superficiales del suelo.

Efecto de Genotipo. Se encontraron diferencias significativas en todas las variables entre los genotipos, con excepción de la variable DiRP. Los genotipos Seda y BRT 102-221 fueron significativamente superiores a los otros genotipos en PSA (Cuadro 1). La variedad criolla Seda destaca en número de raíces adventicias (21). En cambio, en las variables ángulo de corona 1 (AC1) y 2 (AC2), RC1 y RC2y DiRA, sólo se presenta diferencias significativas entre algunos genotipos.

Cuadro 1. Resultados de separación de medias del peso seco de la parte aérea (PSA), ángulo de corona 1 y 2 (AC1 y AC2), número de raíces en corona 1 y 2 (RC1 y RC2), número (RA) y diámetro (DiRA) de raíces adventicias y diámetro de la raíz principal (DiRP) a la floración del ensayo en el campo. La Vega 4, Zamorano.

Fuentes de variación	PSA (g)	AC1 (°)	AC2 (°)	RC1	RC2	RA	DiRA (mm)	DiRP (mm)
<i>Tratamiento</i>								
--Sin fertilización	6.2	13.4	27.6	2.2	1.1	16.7	0.54	1.5
Con fertilización	9.3	14.7	29.1	2.8	1.5	13.2	0.46	1.6
DMS 0,05	1.4*	ns ^o	ns	0.4*	ns	ns	0.02*	ns
<i>Genotipo</i>								
BRT 101-189	7.9	17.0	28.8	2.5	1.6	9.9	0.36	1.7
BRT 101-232	7.9	16.5	28.5	2.1	1.4	15.0	0.49	1.4
BRT 102-183	7.7	15.8	29.0	2.5	1.3	13.7	0.53	1.5
BRT 102-221	8.4	14.0	27.0	2.7	1.1	12.7	0.49	1.6
BRT 103-182	6.3	11.8	28.2	2.7	1.0	14.3	0.50	1.6
BRT 103-204	6.0	9.3	30.9	2.7	1.0	16.3	0.56	1.4
Amadeus 77	7.2	18.0	31.0	2.4	1.5	13.4	0.45	1.7
Seda	10.2	10.0	23.3	2.3	1.3	21.1	0.62	1.5
DMS 0,05	1.9 *	6.6*	6.8*	0.5*	0.6*	4.0*	0.17*	ns

*Los promedios tiene diferencia significativa según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

^o Los promedios de la columna no son significativamente diferentes según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

Efecto de la interacción Fertilización × Genotipo. En todas las variables evaluadas, se presentan diferencias significativas debidas a los efectos de la interacción Fertilización × Genotipo, con excepción del DiRP (Cuadro 2). En el tratamiento con fertilización, los genotipos BRT 101-189, BRT 101-232, BRT 102-183, Amadeus 77 y Seda presentaron valores significativamente superiores de PSA. En la variable RA presentaron valores superiores los genotipos BRT 103-182, BRT 103-204 sin fertilización y Seda en ambos tratamientos de fertilización. Los genotipos BRT 102-183, BRT 102-221, BRT 103-182 y BRT 103-204 con fertilización presentaron resultados significativamente superiores en RC1. De igual modo, que en los resultados del factor tratamiento, se puede argumentar que bajo condiciones de estrés de baja fertilidad las plantas tienden a incrementar el RA y DiRA para aumentar la superficie de absorción de nutrientes en las capas superficiales del suelo, como los efectos observados en el ensayo en las parcelas sin fertilización.

Ensayo en campo: Evaluación en cosecha. A continuación se muestran los resultados de las tres variables evaluadas al momento de cosecha. El número de semillas por vaina, número de vainas por planta y peso de 100 semillas, son utilizadas para obtener el valor del rendimiento, característica muy importante en este tipo de investigación.

Efecto de Fertilización. No hubo diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización para ninguna de las variables (Cuadro 3). Esto contradice a lo esperado, que las plantas con fertilización tengan mayores rendimientos que las no fertilizadas debido a la mayor disponibilidad de nutrientes. Por un lado, se pudiera pensar que ciertas características de las plantas y sus raíces le permiten a los genotipos una mejor adaptación a la baja fertilidad en el medio. Por otro lado, se pudieron haber presentado restricciones en el crecimiento de las plantas fertilizadas relacionadas a algunas las condiciones del ensayo que hay que analizar más detenidamente.

Efecto de Genotipo. Las diferencias significativas debidas al efecto de genotipos se encontraron en todas las variables con excepción de número de vainas (Cuadro 3). El hecho que el número de vainas por planta no muestre deferencia entre genotipos puede responder a que esta característica genética es común por tener el mismo padre recurrente (Amadeus 77). En la variable ancho de vaina es significativamente superior la variedad Seda (10.6 mm). En número de semillas destacan los genotipos BRT 103-204, BRT 102-183 y BRT 103-182.

Efecto de la interacción fertilización × genotipo. En la interacción Fertilización × Genotipo todas las variables presentan diferencias significativas (Cuadro 4). En número de vainas destaca el genotipo BRT 101-232 con fertilización (14 vainas). En ancho de vaina se pueden reconocer como interacciones superiores Seda con ambos tratamientos y BRT 102-183 sin fertilización. En peso de 100 semillas responden mejor los genotipos BRT 101-232 y Seda, sin y con fertilización, respectivamente. En la variable rendimiento las interacciones fertilización x genotipo se destacan la variedad Seda y la línea BRT 103-182 sin fertilización.

Cuadro 2. Interacción fertilización × genotipo en peso seco de parte aérea (PSA), ángulo de corona 1 y 2 (AC1 y AC2), raíces en corona 1 y 2 (RC1 y RC2), número (RA), y diámetro de raíces adventicias (DiRA) y diámetro de la raíz principal (DiRP) a la floración del ensayo en campo.

Fuentes de variación	PSA (g)	AC1 (°)	AC2 (°)	RC1 (mm)	RC2 (mm)	RA	DiRA (mm)	DiRP (mm)
<i>Fertilización × genotipo</i>								
				<u>Sin fertilización</u>				
BRT 101-189	6.0	16.5	25.1	2.3	1.5	9.7	0.30	1.7
BRT 101-232	6.1	16.0	33.0	2.2	1.2	16.7	0.49	1.3
BRT 102-183	6.0	18.0	28.8	2.2	1.2	13.7	0.62	1.5
BRT 102-221	8.2	12.0	22.2	2.2	0.8	13.8	0.54	1.6
BRT 103-182	5.4	8.5	27.4	2.3	0.9	17.4	0.61	1.5
BRT 103-204	4.0	5.0	30.6	2.1	1.0	17.4	0.65	1.4
Amadeus 77	5.1	17.0	29.4	2.3	1.2	15.3	0.51	1.7
Seda	8.8	14.0	24.6	2.1	1.6	23.0	0.63	1.5
				<u>Con fertilización</u>				
BRT 101-189	9.8	17.5	32.5	2.7	1.7	10.0	0.43	1.6
BRT 101-232	9.8	17.0	24.0	2.0	1.6	13.3	0.49	1.5
BRT 102-183	9.5	13.5	29.3	2.9	1.5	13.8	0.44	1.6
BRT 102-221	8.7	16.0	31.9	3.2	1.4	11.5	0.43	1.6
BRT 103-182	7.3	15.0	29.0	3.2	1.1	11.3	0.38	1.7
BRT 103-204	8.0	13.5	31.3	3.4	1.1	15.2	0.48	1.4
Amadeus 77	9.3	19.0	32.6	2.5	1.9	11.5	0.38	1.7
Seda	11.7	6.0	22.0	2.6	0.5	19.2	0.61	1.5
DMS 0,05	6.6*	9.0*	10.8*	0.7*	0.9*	6.7*	0.23*	ns ^φ

* Los promedios tiene diferencia significativa según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

^φ Los promedios de la columna no son significativamente diferentes según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

Cuadro 3. Características analizadas en la cosecha del ensayo en campo según los factores tratamiento y genotipo.

Fuentes de variación	Semillas por vaina	Número de Vainas	Peso 100 semillas (g)	Rendimiento (kg/ha)
<i>Fertilización</i>				
Sin fertilización	5.6	8.9	14.5	1277
Con fertilización	5.7	11.2	15.8	1580
DMS 0,05	ns ^φ	ns	ns	ns
<i>Genotipo</i>				
BRT 101-189	5.5	10.3	12.7	1234
BRT 101-232	5.6	10.1	19.6	1551
BRT 102-183	5.8	10.4	14.2	1401
BRT 102-221	5.6	9.9	14.4	1384
BRT 103-182	5.7	10.4	15.4	1593
BRT 103-204	6.1	9.4	12.7	1260
Amadeus 77	5.5	10.0	15.2	1412
Seda	5.5	10.1	16.7	1591
DMS 0,05	0.5*	ns	5.6*	337*

^φ Los promedios de la columna no son significativamente diferentes según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

* Los promedios tiene diferencia significativa según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

Ensayo en casa de malla: Evaluación en floración. A continuación se muestran los resultados de las 14 variables evaluadas al momento de floración. A diferencia del análisis realizado en las muestras de campo, se analizaron características radicales con el programa “WinRhizo[®]”.

Cuadro 4. Efectos de la Interacción fertilización × genotipo a la madurez de cosecha del ensayo en campo.

Fuentes de variación	Semillas por vaina	Número de Vainas	Peso 100 semillas (g)	Rendimiento (kg/ha)
<i>Fertilización × genotipo</i>				
	<u>Sin fertilización</u>			
BRT 101-189	5.3	9.5	12.7	1098
BRT 101-232	5.5	6.0	24.9	1122
BRT 102-183	5.8	9.5	14.8	1312
BRT 102-221	5.5	10.3	13.7	1344
BRT 103-182	6	9.8	15.9	1601
BRT 103-204	6	8.0	13.0	1074
Amadeus 77	5.3	9.0	15.9	1265
Seda	5.8	9.3	15.4	1399
	<u>Con fertilización</u>			
BRT 101-189	5.8	11.0	12.8	1371
BRT 101-232	5.8	14.3	14.2	1980
BRT 102-183	5.8	11.3	13.6	1491
BRT 102-221	5.8	9.5	15.2	1423
BRT 103-182	5.3	11.01	15.0	1586
BRT 103-204	6.3	10.8	12.5	1446
Amadeus 77	5.8	11.0	14.5	1559
Seda	5.3	11.0	17.9	1784
DMS 0,05	0.7*	2.9*	8.8*	626*

* Los promedios tiene diferencia significativa según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

Efecto de Genotipo. Los genotipos mostraron diferencias significativas en la mayor parte de las variables evaluadas (Cuadro 5). Destacan el genotipo BRT 103-182 y las variedades Seda y Amadeus 77 en la el área superficial de la raíz (ASR). En la variable volumen de la raíz (VR) destacan las variedades Seda y Amadeus 77 con valores significativamente superiores. La variedad mejorada (Amadeus 77) y la variedad criolla (Seda) se caracterizan por la buena adaptación a niveles moderados de estos tipos de estrés. En cuanto a los AC se encontraron valores superiores en el ensayo en casa de malla en comparación al ensayo en campo. Esto puede ser respuesta al estrés hídrico, debido a que en condiciones de estrés la planta tiende a desarrollar una arquitectura radicular especial para facilitar la adquisición de recursos del suelo (Lynch 1995). Se debe considerar que la mayor distribución de la materia seca total en las raíces, que en este ensayo se encontró en Amadeus 77 y Seda, podría responder a genotipos con mejor nodulación (Vargas Palacios 2008). Sin embargo, esto sería materia de estudio de otra investigación para determinar la respuesta de estos genotipos a distintas cepas de *Rhizobium*.

Efecto de la interacción fertilización × genotipo. En los DiC1, DiC2 y DiRP no hubo diferencia significativa entre las interacciones (Cuadro 6). Los genotipos evaluados presentaron valores similares con ambos tratamientos de fertilización en condiciones de sequía en estas variables En las otras variables evaluadas no se puede destacar el resultado de alguna interacción, aunque muestran diferencias mínimas significativas forman grupos homogéneos muy grandes.

Cuadro 5. Peso seco de parte aérea (PSA), ángulo de corona 1 y 2 (AC1 y AC2), raíces en corona 1 y 2 (RC1 y RC2), raíces adventicias (RA) Diámetro de corona 1 y 2 (DiC1 y DiC2), Diámetro de raíces adventicias (DiRA), diámetro de raíz principal (DiRP), peso de la raíz (PR), longitud total de la raíz (LTR), área superficial de la raíz (ASR) y volumen de la raíz (VR) al momento de floración del ensayo en casa de malla.

Fuentes de variación	PSA (g)	AC1 (°)	AC2 (°)	RC1	RC2	RA	DiC1 (mm)	DiC2 (mm)	DiRA (mm)	DiRP (mm)	PR (g)	LTR (m)	ASR (cm ²)	VR (cm ³)
<i>Fertilización</i>														
Sin fertilizante	1.5	13.4	31.4	3.0	2.8	9.7	0.9	0.8	0.61	0.8	0.3	24.7	634.2	13.4
Con fertilizante DMS 0,05	1.5 ns ^φ	11.3 1,9*	31.6 ns	3.3 ns	3.3 ns	10.2 ns	0.9 ns	0.8 ns	0.58 ns	0.7 0.1*	0.3 ns	23.3 ns	609.9 ns	13.2 ns
<i>Genotipo</i>														
BRT 101-189	0.9	13.8	31.3	3.5	3.4	9.6	0.7	0.7	0.49	0.7	0.2	12.4	322.8	6.9
BRT 101-232	1.1	11.3	25.0	3.1	2.8	12.0	0.9	0.8	0.50	0.8	0.2	17.0	425.4	8.9
BRT 102-183	1.7	8.8	28.8	2.4	2.6	10.4	1.0	0.9	0.72	0.9	0.3	21.2	563.0	12.3
BRT 102-221	1.4	13.8	34.2	3.0	2.9	11.5	1.0	0.8	0.53	0.8	0.3	22.6	603.7	13.5
BRT 103-182	1.7	8.8	28.7	3.4	3.6	7.1	0.9	0.9	0.66	0.7	0.3	27.7	675.7	13.6
BRT 103-204	1.7	11.3	38.8	3.1	3.3	10.6	0.9	0.9	0.75	0.9	0.3	24.1	613.1	12.8
Amadeus 77	1.7	16.3	32.5	3.1	2.6	10.0	0.8	0.9	0.56	0.8	0.4	31.3	818.9	17.7
Seda	2.0	15.0	32.5	3.3	3.4	8.4	0.9	0.8	0.53	0.7	0.4	35.6	953.8	20.9
DMS 0,05	0.6*	6.6*	8.7*	1.1*	1.0*	4.2*	ns	ns	ns	0.2*	0.1*	11.7*	297.9*	6.4*

^φ Los promedios de la columna no son significativamente diferentes según la prueba de Diferencia Mínima Significativa al 5%.

* Los promedios tiene diferencia significativa según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

Cuadro 6. Interacción fertilización × genotipo en peso seco de parte aérea (PSA), ángulo de corona 1 y 2 (AC1 y AC2), raíces en corona 1 y 2 (RC1 y RC2), raíces adventicias (RA) Diámetro de corona 1 y 2 (DiC1 y DiC2), Diámetro de raíces adventicias (DiRA.), diámetro de raíz principal (DiRP), peso de la raíz (PR), longitud total de la raíz (LTR), área superficial de la raíz (ASR) y volumen de la raíz (VR) analizados al momento de floración del ensayo en casa de malla.

Fuentes de variación	PSA (g)	AC1 (°)	AC2 (°)	RC1	RC2	RA	DiC1 (mm)	DiC2 (mm)	DiRA (mm)	DiRP (mm)	PR (g)	LTR (m)	ASR (cm ²)	VR (cm ³)
<i>Fertilización × Genotipo</i>														
	<u>Sin fertilización</u>													
BRT 101-189	1.0	15.0	32.5	3.5	3.3	6.8	0.7	0.7	0.52	0.82	0.1	12.3	315.9	6.7
BRT 101-232	1.3	12.5	22.5	3.0	2.0	12.5	1.0	0.8	0.47	1.02	0.2	21.0	502.8	9.8
BRT 102-183	1.7	10.0	27.5	2.3	2.3	10.3	0.9	0.9	0.63	0.91	0.2	19.0	515.9	11.7
BRT 102-221	1.5	15.0	33.5	3.0	2.8	9.8	1.0	0.7	0.49	0.76	0.3	25.0	665.9	14.7
BRT 103-182	1.5	7.5	27.5	3.5	3.5	8.8	0.8	0.9	0.76	0.66	0.3	27.1	688.6	14.6
BRT 103-204	1.8	12.5	40.0	3.0	3.3	10.8	0.9	0.9	0.74	0.96	0.3	24.8	614.3	12.4
Amadeus 77	1.7	17.5	30.0	2.5	2.0	9.5	0.8	1.0	0.55	0.9	0.3	30.3	737.8	14.6
Seda	1.8	17.5	37.5	3.0	3.3	9.5	1.0	0.7	0.46	0.73	0.4	38.3	1032.6	22.8
	<u>Con fertilización</u>													
BRT 101-189	0.8	12.5	30.0	3.5	3.5	12.5	0.7	0.7	0.46	0.62	0.2	12.4	329.7	7.1
BRT 101-232	0.8	10.0	27.5	3.3	3.5	11.5	0.9	0.8	0.53	0.64	0.1	12.0	347.9	8.0
BRT 102-183	1.8	7.5	30.0	2.5	3.0	10.5	1.1	0.9	0.81	0.87	0.3	23.5	610.1	12.9
BRT 102-221	1.3	12.5	35.0	3.0	3.0	13.3	0.9	0.8	0.57	0.82	0.3	20.2	541.5	12.3
BRT 103-182	1.9	10.0	29.9	3.3	3.8	5.5	1.0	0.8	0.57	0.75	0.3	28.4	662.9	12.6
BRT 103-204	1.6	10.0	37.5	3.3	3.3	10.5	0.8	0.8	0.75	0.82	0.3	23.4	611.9	13.2
Amadeus 77	1.8	15.0	35.0	3.8	3.3	7.3	0.8	0.8	0.56	0.75	0.4	32.4	900	20.7
Seda	2.1	12.5	27.5	3.5	3.5	10.5	0.8	0.9	0.61	0.58	0.3	32.9	875	18.9
DMS 0,05	0.9*	9.0*	12.5*	1.5*	1.6*	7.7*	ns ^φ	ns	0.35*	ns	0.2*	16.5*	424.1*	9.3*

* Los promedios tiene diferencia significativa según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

^φ Los promedios de la columna no son significativamente diferentes según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

Ensayo en casa de malla: Evaluación en cosecha. La variable analizada en cosecha fue el peso seco de semillas por planta, no hubo diferencias significativas entre tratamiento de fertilización ni entre genotipos (Cuadro 7). En la interacción fertilización × genotipo, la separación de medias por diferencia mínima significativa (DMS) da como resultados dos grupos de 15 genotipos cada uno, por tal motivo no se puede destacar el resultado de uno de ellos frente a los demás (Cuadro 8).

Cuadro 7. Peso de semillas del ensayo en casa de malla según los factores tratamiento y genotipo.

Fuentes de variación	Peso de semillas por planta (g)
<i>Fertilización</i>	
Sin fertilizante	2.8
Con fertilizante	3.2
DMS 0,05	ns ^φ
<i>Genotipo</i>	
BRT 101-189	2.6
BRT 101-232	3.0
BRT 102-183	2.4
BRT 102-221	3.4
BRT 103-182	3.2
BRT 103-204	3.2
Amadeus 77	3.7
Seda	2.8
DMS 0,05	ns

^φ Los promedios de la columna no son significativamente diferentes según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

Cuadro 8. Interacción fertilización × genotipo en peso seco de semillas en la cosecha del ensayo en casa de malla.

Fuentes de variación	Peso de semillas por planta (g)
fertilización × Genotipo	
<u>Sin fertilización</u>	
SBRT 101-189	2.4
BRT 101-232	2.8
BRT 102-183	2.6
BRT 102-221	2.5
BRT 103-182	3.0
BRT 103-204	3.4
Amadeus 77	3.5
Seda	2.6
<u>Con fertilización</u>	
BRT 101-189	2.7
BRT 101-232	3.0
BRT 102-183	2.2
BRT 102-221	4.3
BRT 103-182	3.4
BRT 103-204	3.1
Amadeus 77	3.9
Seda	3.1
DMS 0,05	2.1*

* Los promedios tiene diferencia significativa según la prueba de Diferencia mínima significativa al 5%.

4. CONCLUSIONES

- A la floración, las diferencias significativas en las variables de raíces debidas a la fertilización fueron muy limitadas. En cambio, se presentaron diferencias por efectos de genotipos y de la interacción fertilización x genotipo (F x G) en la mayoría de las características, tanto en el campo (sin estrés hídrico) como en casa de malla (con estrés hídrico).
- A la madurez, no se observaron diferencias en rendimiento y sus componentes por efectos de la fertilización en el campo y en casa de malla. Pero, si se presentaron diferencias debidas a efectos de genotipos y de la interacción Fertilización x Genotipo en el campo.
- Entre los genotipos destacados en variables de raíces se incluyen a la variedad comercial Amadeus 77 y la criolla Seda.

5. RECOMENDACIONES

- Continuar los estudios de características de las raíces con otros genotipos tolerantes (variedades y líneas mejoradas), para entender mejor la adaptación del frijol común a condiciones de estrés abiótico (sequía, baja fertilidad), y determinar su uso como criterios de selección
- Evaluar las características de raíces de líneas derivadas de cruzamientos con genotipos destacados en este estudio (por ejemplo: poblaciones Seda).
- Utilizar los genotipos evaluados en posteriores investigaciones donde sean sometidos a baja fertilidad y estrés hídrico en condiciones de campo para determinar si hay diferencias significativas.

6. LITERATURA CITADA

Beaver, J. y J. Rosas. 2003. Investigación colaborativa de frijol en Centroamérica y el Caribe. III Seminario de Judía de la Península Ibérica. Lugo, España. 7 p.

Benites Panchi, M. 2008. Características fenotípicas de líneas de frijol común tolerantes a la sequía y a la baja fertilidad. Tesis Ing. Agr., Tegucigalpa, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 18 p.

CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe, sede subregional en México). 2011. Subregión norte de América Latina y el Caribe: información del sector agropecuario, 2000-2010. CEPAL. 69 p.

Christiansen, M. y C. Lewis. 1981. Breeding plants for stress environments. *In*: F. Kenneth (ed) Plant Breeding II. Iowa, United States of America. The Iowa State University Press. p 151- 177.

Quizenberry, J. 1987. Mejoramiento de la planta para la resistencia a la sequía y el aprovechamiento del agua. *In*: M, Christiansen. C, Lewis (eds). Mejoramiento de plantas en ambientes poco favorables. México D.F. Limusa. p. 233-256.

Henry, A., J. Rosas, J. Beaver, J. Lynch. 2010. Multiple stress response and belowground competition in multilines of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crops Research* 117: 209-218.

Jensen, N. 1988. Plant breeding methodology. United States of America. Jhon Wiley & sons. 676 p.

Lynch, J. 1995. Root architecture and plant productivity. *Plant Physiology* 109: 7-13.

Moncada Paz, J. 1990. Comportamiento Agronómico del Frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo estrés de sequía impuesto en diferentes etapas de crecimiento. Tesis Ing. Agr., Tegucigalpa Honduras, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 51 p.

Morales González, Y. 2010. Caracterización fenotípica de líneas endogámicas recombinantes de la variedad de frijol Amadeus 77 en condiciones de baja fertilidad. Tesis Ing. Agr., Tegucigalpa Honduras, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 28 p.

Román Sánchez, F. 2009. Evaluación fenotípica de líneas endogámicas de frijol común bajo condiciones de estrés hídrico y baja fertilidad. Tesis Ing. Agr., Tegucigalpa, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 29 p.

Rosas, J., J. Erazo y J. Moncada. 1991. Tolerancia a la sequía en germoplasma de frijol común y frijol tepari. CEIBA 32 (2): 91-106.

Rosas, J., J. Beaver, A. Castro, A. Morales, R. Lepiz y C. Perez. 2000. Mejoramiento genético para tolerancia a altas temperaturas y resistencia a mosaico dorado en frijol común. Agronomía Mesoamericana 11 (1): 1 – 10.

Rosas, J. 2001. Aplicación de metodologías participativas para el mejoramiento genético de frijol en Honduras. Agronomía Mesoamericana 12 (2): 219 - 228.

Rosas, J., O. Gallardo y J. Jiménez. 2003. Mejoramiento genético del frijol común mediante enfoques participativos en Honduras. Agronomía Mesoamericana 14 (1): 1 - 9.

Vargas Palacios, A. 2008. Selección de genotipos de frijol común tolerantes a bajo contenido de nitrógeno en el suelo. Tesis Ing. Agr. Tegucigalpa, Honduras, Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 17 p.

White, J. 1989. Frijol: Fisiología de potencial del rendimiento y la tolerancia al estrés. Santiago de Chile, Chile, FAO. 91 p.

7. ANEXOS

Anexo 1. Resultados de análisis de suelo del ensayo en campo (Henry *et al.* 2010).

Métodos:

K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn: Solución extractora Mehlich 3, determinados por absorción atómica.

P: Solución extractora Mehlich3, determinado por colorimetría

% M.O.: Método de Walkley & Black

% N total: 5% de M.O.

pH: Relación suelo agua 1:1

Muestra	pH	%		mg/Kg (extractable)			
		M.O.	N total	P	K	Ca	Mg
La Vega 4	6,03	Bajo 1,63	Bajo 0,08	Medio 13	Alto 428	Alto 1490	Medio 168

Rango medio	2.00	0.2	13	Por saturación de bases
	4.00	0.5	30	

Anexo 2. Resultados de análisis de suelo del ensayo en casa de malla.

Métodos:

K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, Zn: Solución extractora Mehlich 3, determinados por absorción atómica.

P: Solución extractora Mehlich3, determinado por colorimetría

% M.O.: Método de Walkley & Black

% N total: 5% de M.O.

pH: Relación suelo agua 1:1

Muestra	pH	%		mg/Kg (extractable)				
		M.O.	N total	P	K	Ca	Mg	Na
Tesis PIF baja F y S sustrato 1:1	5,57	Bajo 1,64	Bajo 0,08	Medio 13	Alto 226	Medio 967	Medio 159	Normal 35

Rango medio	2.00	0.2	13	Por saturación de bases
	4.00	0.5	30	

Anexo 3. Solución nutritiva Broughton y Dilworth (1971)

1. 1 L de agua destilada
294.1 g de cloruro de calcio hidratado

2. 1L agua destilada
136.1g de fosfato de potasio dibásico

3. 1L agua destilada
6.7 g de citrato de hierro
123.3 g de sulfato de magnesio o heptahidrato
87 g de sulfato de potasio
0.34 de sulfato de magnesio hidratado

4. 1L de agua destilada
0.25 g ácido bórico
0.29 g de sulfato de zinc heptahidratado
0.048 g molibdato de sodio hidratado