

**Selección de cepas de *Rhizobium* y genotipos  
de frijol común con alta expresión simbiótica  
en condiciones de sequía y baja fertilidad**

**Jorge Ronny Díaz Valderrama  
Luis Patricio Moncayo Lema**

**Zamorano, Honduras**  
Noviembre, 2011

ZAMORANO  
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

# **Selección de cepas de *Rhizobium* y genotipos de frijol común con alta expresión simbiótica en condiciones de sequía y baja fertilidad**

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

Presentado por

**Jorge Ronny Díaz Valderrama**  
**Luis Patricio Moncayo Lema**

**Zamorano, Honduras**  
Noviembre, 2011

# **Selección de cepas de *Rhizobium* y genotipos de frijol común con alta expresión simbiótica en condiciones de sequía y baja fertilidad**

Presentado por:

Jorge Ronny Díaz Valderrama  
Luis Patricio Moncayo Lema

Aprobado:

---

Juan Carlos Rosas, Ph.D.  
Asesor principal

---

Abel Gernat, Ph.D.  
Director  
Carrera de Ciencia y Producción  
Agropecuaria

---

Ana Gabriela Varga, Ing.  
Asesora

---

Raúl Espinal, Ph.D.  
Decano Académico

## RESUMEN

Díaz, J.R.; Moncayo, L.P. 2011. Selección de cepas de *Rhizobium* y genotipos de frijol común con alta expresión simbiótica en condiciones de sequía y baja fertilidad. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería Agronómica, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 30 p.

La sequía y la baja fertilidad son los principales factores abióticos limitantes de la producción de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en América Latina. La arquitectura de raíces y la capacidad del frijol de establecer una simbiosis efectiva con cepas de *Rhizobium* son características que permiten un buen desempeño de la planta bajo dichas condiciones. Estudios han demostrado que ciertos patrones de raíces y la mayor capacidad de fijación de N<sub>2</sub>, deben ser considerados como criterios importantes para el desarrollo de variedades tolerantes a través del mejoramiento genético. El objetivo del estudio fue seleccionar cepas de *Rhizobium* y genotipos de frijol con expresión simbiótica superior y evaluar sus efectos en el crecimiento, nodulación y rendimiento bajo condiciones de estrés en invernadero, y en condiciones de campo parecidas a las de los pequeños productores locales durante la época de lluvias de primera. En ambos ensayos (invernadero y campo) se evaluaron 20 genotipos, 18 seleccionados previamente por su tolerancia a sequía y baja fertilidad y dos testigos (la variedad mejorada Amadeus 77 y la variedad criolla Seda), los cuales fueron inoculados con tres cepas de *Rhizobium* (CIAT 632, CIAT 899 y UPR 2010) y un testigo sin inoculación. Se utilizó un arreglo factorial de parcelas divididas en un diseño de bloques completos al azar (BCA), con distribución de las cepas en las parcelas y los genotipos en las subparcelas. En el ensayo en invernadero las cepas CIAT 632 y UPR 2010, los genotipos Seda e IBC 302-29, y las interacciones CIAT 632 × Seda, CIAT 632 × TLP 19 y UPR 2010 × Seda fue lo más destacado; mientras que en el ensayo de campo, la cepa *Rhizobium* UPR 2010, el genotipo Seda y la interacción UPR 2010 × Seda fue lo más sobresaliente.

**Palabras clave:** Arquitectura de raíces, especificidad, fijación biológica de nitrógeno, inoculación.

## ABSTRACT

Díaz, J. R.; Moncayo, L. P. 2011. *Rhizobium* strains and common bean genotypes selection with high symbiotic expression in drought and low fertility conditions. Special Graduation Project in Agricultural Engineering. Pan-American School, Zamorano. Honduras. 30 p.

The drought and low fertility are the main abiotic factors that limit the production of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Latin America. The root architecture and the ability of beans to establish an effective symbiosis with *Rhizobium* strains are characteristics that allow a good plant performance under such conditions. Studies have shown that certain patterns of roots and the greater capacity of N<sub>2</sub> fixation should be considered as important criteria for the development of tolerant varieties through breeding. The objective was to select *Rhizobium* strains and common bean genotypes with superior symbiotic expression and to evaluate its effects on growth, nodulation and yield under stress conditions in greenhouse and field conditions similar to those of small local producers during the first rains. In both trials (greenhouse and field) 20 genotypes, 18 pre-selected for their tolerance to drought and low fertility and two witnesses (the improved variety Amadeus 77 and the landrace Seda) were evaluated, who received four treatments of inoculation with *Rhizobium* strains (CIAT 632, CIAT 899 and UPR 2010) and without inoculation. We used a split-plot factorial design in a randomized complete block (RCB), with distribution of strains in the plots and genotypes in the sub-plots. In the greenhouse test the CIAT 632 and UPR 2010 strains, the Seda and IBC 302-29 genotypes, and CIAT 632 × Seda, CIAT 632 × TLP 19 y UPR 2010 × Seda interactions was the most outstanding; while in the field trial, the UPR 2010 strain, the Seda genotype and the UPR 2010 × Seda interaction was the most outstanding.

**Keywords:** Biological nitrogen fixation, inoculation, root architecture, specificity

## CONTENIDO

Portadilla .....	i
Página de firmas .....	ii
Resumen .....	iii
Abstract .....	iv
Contenido .....	v
Índice de cuadros y anexos.....	vi
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>4</b>
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>25</b>
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>26</b>
<b>6. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>27</b>
<b>7. ANEXOS... ..</b>	<b>30</b>

## ÍNDICE DE CUADROS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Efecto de las cepas de <i>Rhizobium</i> , los genotipos y su interacción sobre los pesos secos de raíces (PSR), nódulos (PSN), follaje (PSF) y total (PST), y área foliar (AF) en la etapa de floración, y el peso seco de semillas por planta (PSS) a la madurez de cosecha, bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.....	8
2. Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el peso seco de raíz (PSR), nódulos (PSN), follaje (PSF) y total (PST) a la floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.....	9
3. Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el peso seco de semilla (PSS) a la madurez de cosecha bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.....	9
4. Efecto de las cepas de <i>Rhizobium</i> , genotipos y su interacción sobre la longitud (LR), el área superficial (ASR), el diámetro promedio (DPR), y el volumen (VR) de las raíces (VR), el diámetro de la raíz principal (DRP), y el número de raíces adventicias (NAD) en la etapa de floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.....	11
5. Efecto de las cepas de <i>Rhizobium</i> , los genotipos y su interacción sobre el ángulo (°) de la coronaria uno (AC1) y coronaria dos (AC2), y el número de raíces coronarias uno (NC1) y coronarias dos (NC2) en la etapa de floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.....	12
6. Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el largo (LR), el área superficial (ASR), el diámetro promedio (DPR), el volumen (VR), y el diámetro promedio de la raíz principal (DRP) a la floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.....	13
7. Efecto de las cepas de <i>Rhizobium</i> , los genotipos y su interacción sobre el área superficial de nódulos total (ANT), en raíces adventicias (ANA), raíces a los 10 cm de profundidad desde la coronaria uno (AN10) y en raíces mayores a los 10 cm de profundidad (AN>10), el volumen de nódulos total (VNT) y la relación área superficial total: volumen de nódulos total (ANT/VNT), en la etapa de floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en Invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.....	15

8.	Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el área superficial de nódulos total (ANT), en raíces adventicias (ANA), raíces a los 10 cm de profundidad desde la coronaria uno (AN10), y la relación área superficial: volumen de nódulos totales (ANT/VNT) a la floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011. ....	16
9.	Efecto de las cepas de <i>Rhizobium</i> , los genotipos y su interacción sobre los pesos secos de raíces (PSR), nódulos (PSN), follaje (PSF) y total (PST) de las plantas a la floración, y el peso seco de 100 semillas (PSCS) y rendimiento (RDTO) a la madurez de cosecha. Zorrales 1, Zamorano, Honduras. 2011. ....	17
10.	Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el rendimiento de grano a la madurez de cosecha. Zorrales 1, Zamorano, Honduras. 2011. ....	18
11.	Efecto de las cepas de <i>Rhizobium</i> , genotipos y su interacción sobre el número de raíces adventicias (NAD), diámetro de la raíz principal (DRP), número de raíces coronarias uno (NC1) y coronarias dos (NC2), ángulo de la coronaria uno (AC1) y de la coronaria dos (AC2), en la etapa de floración. Zorrales 1, Zamorano, Honduras. 2011.....	20
12.	Efecto de las cepas de <i>Rhizobium</i> , genotipos y su interacción sobre el área superficial de nódulos total (ANT), y a diferentes profundidades de la raíz: en raíces adventicias (ANA), y en raíces a 10 cm de profundidad desde la coronaria uno (AN10), volumen de nódulos total (VNT), relación área superficial total/volumen total de nódulos (ANT/VNT), y evaluación visual de la nodulación (EVN, escala PIF) en la etapa de floración. Zorrales 1, Zamorano, Honduras. 2011.....	22
13.	Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el área superficial de nódulos (ASN), peso seco de nódulos (PSN), volumen de nódulos (VN), relación área superficial total: volumen total de nódulos (ANT/VNT) y evaluación visual de nodulación (EVN, escala PIF) a la floración. Zorrales 1, Zamorano, Honduras. 2011.....	23

Anexos	Página	
1.	Análisis de nutrientes del medio suelo: arena (1:2) utilizado en el ensayo de invernadero, realizado por el laboratorio de suelos de Zamorano, Honduras. 2011. ....	29
2.	Composición y preparación del caldo de levadura- manitol utilizado como medio que contiene el <i>Rhizobium</i> en el inoculante.....	29
3.	Análisis de nutrientes del lote de Zorrales 1, realizado por el laboratorio de suelos de Zamorano, Honduras. 2011.....	30
4.	Escala de evaluación visual de nodulación en frijol del Programa de Investigaciones en Frijol (PIF) .....	30



## 1. INTRODUCCIÓN

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es un cultivo de pequeños agricultores en América Latina y África, donde es generalmente cultivado bajo condiciones marginales y con insumos mínimos debido a la baja capacidad económica de los productores y a las condiciones desfavorables de suelo y clima (Beebe *et al* 2008; Rosas *et al* 2000). Un estimado del 60% de la producción mundial de frijol común es altamente vulnerable a la sequía; mientras que, aproximadamente el 40% del área de producción de frijol común en América Latina presenta deficiencias de nitrógeno, y el 50% de fósforo (Thung y Rao 1999). Es por esto que la sequía y la baja fertilidad son consideradas los factores abióticos más limitantes para la producción de frijol (White y Singh 1991).

**El problema de la sequía y baja fertilidad.** Uno de los aspectos más frustrantes en el mejoramiento para sequía es la carencia de criterios prácticos de selección, además del rendimiento *per se*. Estudios de los mecanismos que confieren tolerancia a la sequía han sugerido un amplio rango de criterios de selección, pero ninguno de ellos ha demostrado tener aplicación práctica en frijol (White y Singh 1991).

Se ha demostrado que la baja disponibilidad de nutrientes, especialmente del fósforo, tiene un efecto en el crecimiento y conformación del sistema radicular (Lynch y Brown 2001). Es por esto que la arquitectura de raíces es un criterio de selección muy utilizado en el desarrollo de cultivares tolerantes a sequía y a la baja fertilidad en la última década, y su importancia para la productividad de la planta se basa en que muchos recursos del suelo para su aprovechamiento, como el agua y nutrientes, están desigualmente distribuidos en espacio y tiempo (Lynch 2005). Es así que genotipos con mayor desarrollo radicular y con un mayor diámetro de la raíz principal, sugiere una mayor capacidad para penetrar en capas profundas del suelo y ser más eficientes en absorción de agua, y por ende ser más tolerantes a sequía (Sponchiado 1989). Mientras que genotipos con un mayor número de raíces adventicias y coronarias, y menor ángulo de coronarias con respecto a la horizontal, sugiere una mayor capacidad de exploración de la capa superficial del suelo y ser más eficiente en absorción de nutrientes del suelo, en especial de los menos disponibles como el fósforo (Lynch y Brown 2001). Algunos estudios sobre la importancia de las raíces en la tolerancia a la sequía y la baja fertilidad en frijol común, han sido realizados en Zamorano, Honduras (Ho *et al.* 2005; Henry *et al.* 2010).

**Fijación biológica de nitrógeno (FBN).** El frijol es una planta leguminosa que tiene la capacidad de asociarse con bacterias del género *Rhizobium*, las cuales fijan nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ) que puede ser aprovechado por la planta. A cambio de ello, la planta le provee carbohidratos y otros nutrimentos para su desarrollo. Este mecanismo simbiótico le permite a la planta tolerar condiciones de bajo contenido de nitrógeno en los suelos (López-Lara 2005), y es por ello que la FBN tiene el potencial para convertirse en una alternativa sostenible para el pequeño agricultor ante el incremento de los precios de fertilizantes sintéticos.

La simbiosis *Rhizobium*-leguminosa es actualmente el sistema fijador de nitrógeno más importante, ya que tiene un alto potencial de incrementar los niveles del mismo en tierras áridas y de baja fertilidad (Hamdi 1999). Sin embargo, la nodulación presenta diferentes respuestas en presencia de estos factores abióticos. La nodulación se ve favorecida en suelos bajos en nitrógeno en los que no hay aplicaciones de fertilizante sintéticos, ya que estos compiten con el mismo *Rhizobium* (Hardarson 1993); pero se ve afectada negativamente a causa del estrés hídrico (Valladares 2009).

El nivel de fijación depende del tipo de suelo y su contenido inicial de materia orgánica, nitrógeno y de la cepa y genotipo (Singh 1991; Vargas 2008). Varios estudios han hecho énfasis en la importancia de seleccionar genotipos que presenten una alta capacidad para realizar simbiosis con cepas de *Rhizobium* específicas que tengan un nivel alto de fijación de nitrógeno para el aprovechamiento de la planta (Montealegre y Kipe-Nolt 1994). A su vez, dichas cepas deben de ser capaces de competir con el *Rhizobium* nativo del suelo, el cual mayormente no realiza una efectiva simbiosis, y que por el contrario disminuye la efectividad de una cepa inoculada (Thies *et al.* 1991)

En el Programa de Investigaciones en Frijol (PIF) en Zamorano, se han llevado a cabo una serie de investigaciones que ayuden en el proceso de selección de genotipos capaces de tolerar condiciones de sequía y baja fertilidad. De una evaluación de 180 genotipos de frijol, se lograron seleccionar 25 genotipos superiores en tolerar condiciones de bajo contenido de N (Vargas 2008). Estos genotipos fueron seleccionados con base en su interacción con dos cepas de *Rhizobium* (*R. tropici* CIAT 899 y *R. etli* CIAT 632). En otro ensayo, se determinó las características fenotípicas de seis genotipos de frijol tanto con fertilización convencional y sin fertilización, como con riego y sin riego, para tratar de entender los mecanismos que confieren tolerancia a esos estreses abióticos (Benites 2008). Finalmente, se evaluó la respuesta de 12 genotipos de frijol a la inoculación con dos cepas de *Rhizobium* (CIAT 899 y CIAT 632) en condiciones de sequía y baja fertilidad (Valladares 2009). Actualmente en el PIF se desea evaluar conjuntamente con las cepas anteriores una cepa de *R. leguminosarum* (UPR 2010), especie que también realiza la simbiosis y fija nitrógeno en frijol de manera efectiva. Varios estudios realizados anteriormente sugieren la posibilidad de incrementar la capacidad de nodulación y fijación de  $N_2$  en el frijol común a través del mejoramiento genético (Rosas y Bliss 1986a; 1986b).

El objetivo de este estudio fue seleccionar cepas de *Rhizobium* y genotipos de frijol común con alta expresión simbiótica bajo condiciones de sequía y baja fertilidad, basado

en características superiores de raíces, nodulación y potencial de rendimiento. Las cepas de *Rhizobium* y genotipos de frijol seleccionados serán utilizados en programas de mejoramiento para desarrollar variedades con mayor tolerancia a la sequía y a la baja fertilidad, incluyendo las condiciones de suelo con bajo contenido de nitrógeno a través de la fijación simbiótica y otros mecanismos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### ENSAYO EN INVERNADERO

**Ubicación.** Este ensayo se llevó a cabo en el invernadero N° 2 del Programa de Investigaciones en Frijol (PIF), Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, entre octubre y diciembre del 2010. El lugar está a una altura de 783 msnm, tiene una temperatura media anual de 24° C y una precipitación promedio anual de 1100 mm.

**Material experimental.** Se utilizó semilla de 20 genotipos de frijol, 18 seleccionados en estudios anteriores por su buena adaptación a condiciones de sequía y baja fertilidad, y dos testigos, la variedad mejorada Amadeus 77 y la variedad criolla Seda.

**Tratamientos y diseño experimental.** Se utilizó un arreglo factorial (20 genotipos × 4 tratamientos de inoculación × 4 repeticiones) en un diseño de Bloques Completos al Azar (BCA), con distribución de los tratamientos de inoculación con cepas de *Rhizobium* en las parcelas y los genotipos en las sub-parcelas, con cuatro repeticiones cada una, y un total de 320 unidades experimentales. Cada unidad experimental constó de dos plantas, con el mismo tratamiento, de las cuales una fue evaluada a la floración y la otra a la madurez de cosecha.

**Siembra.** La siembra se llevó a cabo en maceteros plásticos de 8.3 pulgadas de diámetro × 15.7 pulgadas de altura, los cuales contenían un medio suelo: arena (1:2), bajo en N y P (Anexo 1). Se utilizaron semillas pre-germinadas por dos días con un tamaño uniforme de radícula. Se sembraron dos semillas por macetero para asegurar tener una plántula germinada después del raleo.

**Inoculación y estrés de sequía.** A los cuatro días después de la siembra (DDS) se inocularon las plántulas con las tres cepas de *Rhizobium* (*R. tropici* CIAT 899, *R. etli* CIAT 632 y *R. leguminosarum* UPR 2010) y un tratamiento testigo sin inoculación, utilizando inoculante líquido preparado en caldo de levadura-manitol (Anexo 2) a una concentración de  $1 \times 10^{25}$  rizobios/ml. Se aplicó 1 ml de inóculo por planta. Se realizó una nueva inoculación a los 8 DDS para asegurar una buena infección. Las plantas se regaron dos veces por día (9:00 am y 3:00 pm) con 500 ml de agua por macetero hasta los 20 DDS. Después se suspendió el riego con el fin de crear condiciones de estrés de sequía moderada.

## **Variables evaluadas**

**Raíces:** A la floración (aproximadamente 35-40 DDS) se cosecharon las plantas, separando el follaje (hojas y tallos) de las raíces. Las raíces fueron lavadas y almacenadas en etanol 25% para posteriormente ser evaluadas. Las variables evaluadas fueron el diámetro de la raíz principal (a los 10 cm a partir de la primera coronaria y con ayuda de un pie de rey), el número de raíces adventicias, el ángulo con respecto a la horizontal de las coronas (verticilos) 1 y 2 (con ayuda de un transportador), y el número de coronarias uno y 2. Con respecto a la nodulación, se estimó la distribución (%) de los nódulos a diferentes profundidades de la raíz incluyendo en las raíces adventicias, raíces a 10 cm a partir de la primera corona, y raíces a más de 10 cm (raíces profundas). Seguidamente, se separaron los nódulos de las raíces y con el software WinRhizo® se determinó la longitud, diámetro promedio, área superficial y volumen de las raíces; y el área superficial y volumen de los nódulos. Finalmente, los nódulos y raíces se secaron en un horno a  $70^{\circ}\text{C} \times 48 \text{ h}$  para determinar sus pesos secos.

**Parte aérea y semilla:** A la floración, las hojas fueron analizadas con el software WinRhizo® para determinar el área foliar de las plantas. Posteriormente toda la parte aérea se secó en un horno a  $70^{\circ}\text{C} \times 48 \text{ h}$  para determinar el peso seco de follaje.

En la etapa de madurez de cosecha, se determinó el peso seco de las semillas cosechadas de cada unidad experimental, colocándolas en un horno a  $70^{\circ}\text{C} \times 48 \text{ h}$ .

## **ENSAYO DE CAMPO**

**Ubicación.** Esta parte del estudio se llevó a cabo en un área experimental de  $100 \times 27 \text{ m}$  en el lote de Zorrales 1 de la Escuela Agrícola Panamericana, el cual se caracteriza por tener bajo contenido de nitrógeno (Anexo 3). Este ensayo se realizó en la época de primera, entre mayo y agosto del 2011; durante el ciclo del cultivo, se registró una precipitación de 510 mm. Este ensayo sirvió para evaluar la respuesta de las cepas y los genotipos bajo condiciones similares a las del pequeño agricultor promedio de la región Sur-Oriental de Honduras.

**Material Experimental.** Se utilizaron los mismos 20 genotipos evaluados en el ensayo de invernadero los cuales fueron manejados con los mismos tratamientos de inoculación con *Rhizobium* (tres cepas y un testigo sin inoculación).

**Tratamientos y Diseño Experimental.** El ensayo constó de un arreglo factorial de 20 genotipos  $\times$  4 tratamientos de inoculación de un diseño de bloques completos al azar (BCA) con cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron distribuidos en las parcelas y los genotipos en las subparcelas. La unidad experimental fue un surco de 4 m de largo con 40 plantas a 10 cm de distancia entre ellas.

**Inoculación.** Las semillas de las variedades fueron inoculadas inmediatamente antes de la siembra con cada una de las tres cepas de *Rhizobium*. El inóculo constaba de un caldo de levadura-manitol a una concentración de  $1 \times 10^{25}$  células/ml mezclado en turba. Para asegurar una buena adhesión del inóculo a la semilla, se usó goma arábica al 25% (p/v).

**Siembra.** El terreno donde se condujo el ensayo fue preparado cuatro días antes de la siembra con un pase de rastra. Los surcos fueron levantados con un distanciamiento de 0.6 m entre ellos. A la siembra se fertilizó el lote con 18-46-0 a razón de 130 kg/ha (2 quintales/manzana), dosis recomendada para pequeños productores. La siembra fue manual con un distanciamiento de 10 cm entre semillas. Se realizó un control de malezas preemergente luego de la siembra y dos desyerbas manuales en fases posteriores del cultivo. Las plagas y enfermedades fueron monitoreadas periódicamente y se efectuaron los controles químicos cuando fue necesario.

**Variables evaluadas.** En el ensayo de campo se evaluó las mismas variables que en el ensayo de invernadero con excepción del área foliar y el área superficial, longitud, diámetro promedio y volumen de raíces. En el porcentaje de nodulación de acuerdo a la profundidad de la raíz, sólo se consideró el porcentaje de nódulos en raíces adventicias y de nódulos en los primeros 10 cm a partir de la primera coronaria. No se consideró un porcentaje para los nódulos en raíces profundas, ya que en campo es casi imposible extraer todo el sistema radicular. Además se realizó la evaluación visual de la nodulación usando la escala propuesta por el PIF (Anexo 4), ajustada a las condiciones del ensayo.

**Análisis estadístico.** Se realizaron análisis de varianzas (ANDEVA) y separación de medias con el método de la Diferencia Mínima Significativa (DMS), con una probabilidad  $\leq 0.05$ , para todas las variables medidas en el invernadero y en el campo. Estos análisis se realizaron con ayuda del paquete estadístico Statistix 8.1.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### ENSAYO DE INVERNADERO

**Pesos secos de nódulos, raíces, follaje y semilla.** Las cepas presentaron diferencias altamente significativas en el peso seco de follaje y total de la planta y el área foliar a la floración; y el peso seco de semillas a la cosecha. La cepa UPR 2010 presentó los valores más altos en peso seco de follaje y total y el área foliar, a la floración; y junto con la cepa CIAT 899 superaron al tratamiento sin inoculación en el peso seco de semilla a la cosecha (Cuadro 1).

Los genotipos presentaron diferencias altamente significativas en todas las características de pesos secos y en el área foliar. Los genotipos Seda, MDSX 14797-6-1 e IBC 302-29 obtuvieron los mayores valores para pesos secos de raíces, nódulos, follaje, total, semilla y área foliar; también destaca el genotipo SX 14825-7-1 en algunas de estas características (Cuadro 1). Estos resultados tienen una alta similitud con los reportados por Benites (2008), quien encontró que los genotipos Seda y SX 14825-7-1 tuvieron un mayor crecimiento radicular bajo estrés de sequía y baja fertilidad. Además de Seda y MDSX 14797-6-1, los genotipos IBC 301-204 y MER 2226-28 presentan altos valores en el peso seco de semilla, a pesar de no haber presentado altos valores en las características anteriores, lo que sugiere que estos genotipos presentan diferentes mecanismos (posiblemente relacionados con la traslocación durante la etapa de llenado del grano) que les permite desempeñarse bien en condiciones de sequía y baja fertilidad.

La interacción cepa  $\times$  genotipo presentó diferencias altamente significativas en las características de pesos secos (Cuadro 1). En general las interacciones más sobresalientes fueron CIAT 632  $\times$  Aifi Wuriti, CIAT 632  $\times$  Seda, UPR 2010  $\times$  Seda, y UPR 2010  $\times$  MDSX 14797-6-1 que presentaron valores superiores en las variables de pesos secos de raíces, nódulos, follaje y total. (Cuadro 2). En cuanto al peso seco de semillas a la cosecha se presentaron interacciones con valores altos en las interacciones UPR 2010  $\times$  Seda (674 mg/planta) y CIAT 632  $\times$  MDSX 14797-6-1 (642 mg/planta) hasta valores muy bajos en las interacciones del Testigo  $\times$  IBC 309-23 (173 mg/planta) y CIAT 632  $\times$  PR0443-151 (186 mg/planta) sugiriendo la importancia de las interacciones en este ensayo (Cuadro 3).

Cuadro 1. Efecto de las cepas de *Rhizobium*, los genotipos y su interacción sobre los pesos secos de raíces (PSR), nódulos (PSN), follaje (PSF) y total (PST), y área foliar (AF) en la etapa de floración, y el peso seco de semillas por planta (PSS) a la madurez de cosecha, bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.

<b>Fuentes de Variación</b>	<b>PSR (mg)</b>	<b>PSN (mg)</b>	<b>PSF (g)</b>	<b>PST (g)</b>	<b>AF (m<sup>2</sup>)</b>	<b>PSS (mg)</b>
<b>Cepas (C)</b>						
CIAT 632	354	36	1.49	1.85	14.4	405
CIAT 899	342	35	1.37	1.73	13.6	447
UPR 2010	372	37	1.91	2.32	16.6	444
Testigo (sin inoculación)	354	36	1.40	1.81	12.6	362
DMS <sup>‡</sup> (p ≤ 0.05)	30 <sup>ns</sup>	6 <sup>ns</sup>	0.16 <sup>**</sup>	0.18 <sup>**</sup>	1.6 <sup>**</sup>	48 <sup>**</sup>
<b>Genotipos (G)</b>						
VAX 3	292	35	1.34	1.67	12.6	388
A 774	342	37	1.47	1.85	14.4	402
PR 0340-3-3-1	335	34	1.32	1.69	11.9	375
PR 0443-151	369	29	1.56	1.96	16.8	248
RBF 19-63	300	41	1.33	1.68	13.9	364
IBC 308-15	309	30	1.57	1.90	14.1	380
IBC 309-23	322	23	1.48	1.82	14.2	318
IBC 301-204	364	57	1.60	2.02	16.8	535
IBC 302-29	405	44	1.81	2.26	16.9	369
IBC 305-67	364	33	1.64	2.04	13.6	481
SX 14825-7-1	352	37	1.92	2.31	15.1	484
MDSX 14797-6-1	401	38	2.04	2.48	14.3	557
TLP 19	398	41	1.50	1.87	16.7	244
RAB 651	376	42	1.54	1.96	14.6	387
SRS 6-6	359	33	1.45	1.62	13.4	457
RBF 18-72	273	23	1.03	1.33	11.0	447
MER 2226-28	307	25	1.34	1.68	12.1	500
Aifi Wuriti	424	34	1.39	1.85	12.8	347
Amadeus 77	371	38	1.62	2.03	14.0	415
Seda	444	45	2.09	2.48	16.4	588
DMS (p ≤ 0.05)	72 <sup>**</sup>	14 <sup>**</sup>	0.38 <sup>**</sup>	0.45 <sup>**</sup>	3.8 <sup>**</sup>	163 <sup>**</sup>
<b>Interacción C×G</b>						
Probabilidad (p)	0.00 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.01 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>

<sup>‡</sup> = Diferencia mínima significativa

\*, \*\*, <sup>ns</sup> = Significativo (p≤0.05), altamente significativo (p≤0.01) y no significativo (p>0.05), respectivamente.



Cuadro 2. Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el peso seco de raíces (PSR), nódulos (PSN), follaje (PSF) y total (PST) a la floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.

<b>Interacción</b>	<b>PSR (mg)</b>	<b>PSN (mg)</b>	<b>PSF (g)</b>	<b>PST (g)</b>
CIAT 632 × Aifi Wuriti	398 <sup>ab§</sup>	34 <sup>a</sup>	1.53 <sup>a</sup>	1.96 <sup>a</sup>
CIAT 899 × Aifi Wuriti	522 <sup>a</sup>	38 <sup>a</sup>	1.33 <sup>a</sup>	1.89 <sup>a</sup>
UPR 2010 × Aifi Wuriti	430 <sup>ab</sup>	42 <sup>a</sup>	1.55 <sup>a</sup>	2.02 <sup>a</sup>
Testigo (sin inoculación) × Aifi Wuriti	344 <sup>b</sup>	34 <sup>a</sup>	1.15 <sup>a</sup>	1.52 <sup>a</sup>
CIAT 632 × Seda	495 <sup>a</sup>	61 <sup>a</sup>	1.94 <sup>b</sup>	2.49 <sup>b</sup>
CIAT 899 × Seda	407 <sup>a</sup>	64 <sup>a</sup>	1.68 <sup>b</sup>	1.74 <sup>b</sup>
UPR 2010 × Seda	445 <sup>a</sup>	30 <sup>b</sup>	3.10 <sup>a</sup>	3.58 <sup>a</sup>
Testigo (sin inoculación) × Seda	429 <sup>a</sup>	26 <sup>b</sup>	1.66 <sup>b</sup>	2.11 <sup>b</sup>
CIAT 632 × MDSX 14797-6-1	387 <sup>ab</sup>	40 <sup>ab</sup>	1.71 <sup>b</sup>	2.14 <sup>b</sup>
CIAT 899 × MDSX 14797-6-1	373 <sup>ab</sup>	22 <sup>b</sup>	2.04 <sup>ab</sup>	2.44 <sup>ab</sup>
UPR 2010 × MDSX 14797-6-1	496 <sup>a</sup>	61 <sup>a</sup>	2.59 <sup>a</sup>	3.15 <sup>a</sup>
Testigo (sin inoculación) × MDSX 14797-6-1	347 <sup>b</sup>	32 <sup>ab</sup>	1.80 <sup>ab</sup>	2.18 <sup>b</sup>

§ Letras diferentes en la misma columna difieren significativamente ( $p \leq 0.05$ )

Cuadro 3. Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el peso seco de semilla (PSS) a la madurez de cosecha bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011

<b>Interacción<sup>λ</sup></b>	<b>PSS (mg)</b>
UPR 2010 × Seda	674 <sup>a§</sup>
CIAT 632 × MDSX 14797-6-1	642 <sup>a</sup>
CIAT 632 × MER 2226-28	616 <sup>a</sup>
CIAT 632 × IBC 301-204	606 <sup>a</sup>
CIAT 899 × SX 14825-7-1	603 <sup>a</sup>
CIAT 632 × IBC 309-23	200 <sup>b</sup>
CIAT 899 × TLP 19	196 <sup>b</sup>
Testigo (sin inoculación) × PR 0443-151	195 <sup>b</sup>
CIAT 632 × PR 0443-151	186 <sup>b</sup>
Testigo (sin inoculación) × IBC 309-23	173 <sup>b</sup>

<sup>λ</sup> Sólo se muestran las cinco interacciones más altas y las cinco más bajas.

§ Letras diferentes en la misma columna difieren significativamente ( $p \leq 0.05$ )

**Características de raíces.** Las cepas también tuvieron efectos en la longitud, área superficial, diámetro promedio, volumen y el diámetro de la raíz principal (Cuadro 4). La cepa que presentó los mayores valores para estas características fue la CIAT 632; mientras la cepa UPR 2010 presentó valores similares a los de CIAT 632 en la longitud, diámetro promedio de la raíz y el diámetro de la raíz principal. Resultados parecidos sobre la superioridad de la cepa CIAT 632 sobre la CIAT 899 en características de raíces fueron reportados por Valladares (2009). No se observaron diferencias entre cepas para los ángulos de las raíces coronarias (o basales) con respecto a la horizontal de la coronaria uno y coronaria dos. No se observaron diferencias en el número de raíces coronarias uno, pero sí lo hubo en el número de coronarias dos, siendo la cepa UPR 2010 la que presentó el mayor valor (Cuadro 5).

Por otro lado, los genotipos presentaron diferencias altamente significativas en la longitud, área superficial, diámetro promedio, volumen de raíces, diámetro de la raíz principal y en el número de raíces adventicias, siendo los valores más altos los de IBC 302-29, TLP 19, Seda, RAB 651, MDSX 14797-6-1 y Aifi Wuriti, lo cual sugiere que estos genotipos presentan una mayor tolerancia a la sequía y baja fertilidad relacionada a algunas de estas características de raíces en comparación con los demás genotipos (Cuadro 4). También se encontró que estos genotipos presentaron un mayor número de las coronarias uno y 2, lo que sugiere una buena exploración de la capa superficial del suelo que le permita ser más eficiente en la absorción de nutrientes (Cuadro 5). Además se puede observar que las diferencias entre los ángulos de raíces coronarias y el número de las coronas fueron mayormente debidas a efectos de los genotipos y poco influenciadas por las cepas.

Se encontraron diferencias altamente significativas por efecto de la interacción cepa  $\times$  genotipo. La interacción más sobresaliente fue la del genotipo TLP 19  $\times$  CIAT 632, la que obtuvo los mayores valores para la longitud, área superficial, diámetro promedio y volumen de raíces. Por último, el genotipo IBC 302-29 presentó los más altos valores en el diámetro de la raíz principal en interacción con las cepas CIAT 632 y UPR 2010 (Cuadro 6).

Cuadro 4. Efecto de las cepas de *Rhizobium*, genotipos y su interacción sobre la longitud (LR), el área superficial (ASR), el diámetro promedio (DPR), y el volumen (VR) de las raíces (VR), el diámetro de la raíz principal (DRP), y el número de raíces adventicias (NAD) en la etapa de floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.

<b>Fuentes de Variación</b>	<b>LR (m)</b>	<b>ASR (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>DPR (mm)</b>	<b>VR (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DRP (mm)</b>	<b>NAD</b>
<b>Cepas (C)</b>						
CIAT 632	53.4	1130	3.9	19.2	0.82	10.1
CIAT 899	45.9	917	3.5	14.9	0.75	10.3
UPR 2010	48.4	930	4.2	14.6	0.85	10.9
Testigo (sin inoculación)	47.6	929	3.7	15.0	0.80	9.5
DMS <sup>‡</sup> (p ≤ 0.05)	5.1*	108**	0.4**	1.9**	0.05**	1.4 <sup>ns</sup>
<b>Genotipos (G)</b>						
VAX 3	50.8	994	3.9	15.9	0.77	9.1
A 774	44.9	888	3.7	14.3	0.74	11.6
PR 0340-3-3-1	49.8	992	4.1	16.1	0.73	8.8
PR 0443-151	51.2	1034	4.1	17.1	0.84	11.1
RBF 19-63	41.6	831	3.1	13.5	0.71	11.9
IBC 308-15	41.5	840	3.4	13.8	0.84	12.1
IBC 309-23	41.5	834	3.4	13.8	0.87	9.8
IBC 301-204	46.5	922	3.9	14.9	0.79	15.9
IBC 302-29	55.7	1145	4.2	19.2	0.87	11.3
IBC 305-67	47.1	953	3.7	15.7	0.90	7.7
SX 14825-7-1	53.7	1065	3.7	17.3	0.80	6.7
MDSX 14797-6-1	59.6	1152	4.1	18.1	0.79	9.1
TLP 19	60.9	1270	5.1	21.5	0.78	8.1
RAB 651	55.1	1107	4.0	18.1	0.67	10.6
SRS 6-6	46.3	904	3.7	14.5	0.80	10.7
RBF 18-72	36.5	732	3.0	12.0	0.71	8.9
MER 2226-28	35.7	694	3.1	11.0	0.89	10.3
Aifi Wuriti	53.9	1107	4.1	18.4	0.75	12.9
Amadeus 77	43.8	816	3.7	14.5	0.99	10.6
Seda	60.0	1189	4.4	19.3	0.79	7.2
DMS (p ≤ 0.05)	11.6**	246**	0.9**	4.4**	0.13**	3.4**
<b>Interacción C × G</b>						
Probabilidad (p)	0.00**	0.00**	0.00**	0.00**	0.00**	0.61 <sup>ns</sup>

<sup>‡</sup> = Diferencia mínima significativa

\*, \*\*, <sup>ns</sup> = Significativo (p ≤ 0.05), altamente significativo (p ≤ 0.01) y no significativo (p > 0.05), respectivamente.

Cuadro 5. Efecto de las cepas de *Rhizobium*, los genotipos y su interacción sobre el ángulo (°) de la coronaria uno (AC1) y coronaria dos (AC2), y el número de raíces coronarias uno (NC1) y coronarias dos (NC2) en la etapa de floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.

<b>Fuentes de Variación</b>	<b>AC1 (°)</b>	<b>AC2 (°)</b>	<b>NC1</b>	<b>NC2</b>
<b>Cepas (C)</b>				
CIAT 632	23	37	3.3	3.4
CIAT 899	20	40	3.4	3.4
UPR 2010	20	37	3.5	3.7
Testigo (sin inoculación)	21	41	3.3	3.3
DMS <sup>‡</sup> (p ≤ 0.05)	3 <sup>ns</sup>	4 <sup>ns</sup>	0.2 <sup>ns</sup>	0.3*
<b>Genotipos (G)</b>				
VAX 3	17	34	3.1	2.8
A 774	19	32	3.5	3.4
PR 0340-3-3-1	20	37	3.3	3.6
PR 0443-151	22	41	3.2	3.1
RBF 19-63	20	43	3.6	2.9
IBC 308-15	23	43	3.4	2.8
IBC 309-23	19	32	3.2	3.6
IBC 301-204	21	44	3.6	3.6
IBC 302-29	21	34	3.3	3.6
IBC 305-67	18	38	3.4	3.4
SX 14825-7-1	20	38	3.2	3.9
MDSX 14797-6-1	23	38	3.8	3.8
TLP 19	22	41	3.4	3.1
RAB 651	24	38	3.4	3.8
SRS 6-6	21	41	3.7	3.8
RBF 18-72	25	41	3.3	3.6
MER 2226-28	20	39	3.5	3.6
Aifi Wuriti	21	47	3.4	3.6
Amadeus 77	22	38	3.3	3.8
Seda	19	38	3.7	3.4
DMS (p ≤ 0.05)	7 <sup>**</sup>	6 <sup>**</sup>	0.6 <sup>**</sup>	0.7*
<b>Interacción C × G</b>				
Probabilidad (p)	0.00 <sup>**</sup>	0.05 <sup>*</sup>	0.67 <sup>ns</sup>	0.68 <sup>ns</sup>

<sup>‡</sup> = Diferencia mínima significativa

\*, \*\*, ns = Significativo (p ≤ 0.05), altamente significativo (p ≤ 0.01) y no significativo (p > 0.05), respectivamente.

Cuadro 6. Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el largo (LR), el área superficial (ASR), el diámetro promedio (DPR), el volumen (VR), y el diámetro promedio de la raíz principal (DRP) a la floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.

<b>Interacción</b>	<b>LR (m)</b>	<b>ASR (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>DPR (mm)</b>	<b>VR (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>DRP (mm)</b>
CIAT 632 × TLP 19	98.2 <sup>a§</sup>	2191 <sup>a</sup>	8.0 <sup>a</sup>	39.3 <sup>a</sup>	0.87 <sup>a</sup>
CIAT 899 × TLP 19	49.4 <sup>b</sup>	1001 <sup>b</sup>	4.0 <sup>b</sup>	16.3 <sup>b</sup>	0.72 <sup>a</sup>
UPR 2010 × TLP 19	48.0 <sup>b</sup>	970 <sup>b</sup>	4.4 <sup>b</sup>	16.0 <sup>b</sup>	0.77 <sup>a</sup>
Testigo (sin inoculación) × TLP 19	48.2 <sup>b</sup>	918 <sup>b</sup>	3.8 <sup>b</sup>	14.5 <sup>b</sup>	0.78 <sup>a</sup>
CIAT 632 × IBC 302-29	62.9 <sup>a</sup>	1279 <sup>a</sup>	3.9 <sup>a</sup>	20.8 <sup>a</sup>	1.00 <sup>a</sup>
CIAT 899 × IBC 302-29	46.9 <sup>a</sup>	956 <sup>a</sup>	3.3 <sup>a</sup>	15.7 <sup>a</sup>	0.68 <sup>b</sup>
UPR 2010 × IBC 302-29	58.1 <sup>a</sup>	1177 <sup>a</sup>	5.0 <sup>a</sup>	19.4 <sup>a</sup>	1.01 <sup>a</sup>
Testigo (sin inoculación) × IBC 302-29	54.7 <sup>a</sup>	1168 <sup>a</sup>	4.6 <sup>a</sup>	20.7 <sup>a</sup>	0.81 <sup>ab</sup>

§ = Letras diferentes en la misma columna difieren significativamente (p<0.05).

**Características de nodulación.** Sólo se observó diferencias en área superficial de nódulos en las raíces adventicias (ANA) por efectos de las cepas, siendo CIAT 632 la de mayor valor; junto con la cepa CIAT 899 superaron al testigo no inoculado (Cuadro 7). Este resultado sugiere mayor competitividad de estas cepas en cuanto a formación de nódulos en estas raíces localizadas en las capas más superficiales, donde el inóculo puede competir más efectivamente con las cepas nativas presentes en el suelo y realizar una simbiosis más efectiva, características muy importantes que deben tener las cepas inoculadas (Thies *et al.* 1996).

La efectividad de la simbiosis también se espera que se encuentre en función de la distribución de los nódulos a lo largo de la arquitectura de las raíces; el tener una mayor proporción de nódulos en las partes más superficiales, que incluyen a las raíces adventicias y coronarias, estos nódulos tendrán mayor tiempo de formados desde la infección y mayor fijación de nitrógeno que aquellos nódulos en raíces profundas (Morales 2010).

Los genotipos presentaron diferencias altamente significativas en todas las variables de nodulación. Los genotipos con los mayores valores para estas características fueron el A774, RBF 19-63, IBC 301-204, IBC 302-29, Aifi Wuriti y Seda. La importancia de una mayor formación de nódulos en las partes más superficiales donde el inóculo es más efectivo, permite el establecimiento de una simbiosis más efectiva. Características como mayor área superficial por volumen de nódulos (ANT/VNT) sugiere mayor contacto con aire en el suelo y mayor posibilidad de fijación de N<sub>2</sub>.

Como se pudo observar, hubo diferencias altamente significativas en todas las variables evaluadas por efecto de los genotipos. Estos resultados contrastan con los obtenidos por Valladares (2009), quien no encontró diferencias significativas en los genotipos bajo condiciones de estrés de sequía. Esto se puede deber a que en este estudio se utilizó tubos

de PVC con un área para el desarrollo y exploración de las raíces aproximadamente nueve veces menor a los maceteros de PVC que se utilizó en el presente estudio.

El efecto de la interacción cepa  $\times$  genotipo mostró diferencias altamente significativas en las características de nodulación. Las interacciones más contrastantes se presentaron con el genotipo Aifi Wuriti. La interacción CIAT 899  $\times$  Aifi Wuriti presentó los valores más altos en área superficial de nódulos total y en las raíces a 10 cm a partir de la coronaria uno (Cuadro 8), lo que sugiere que se debe tener cuidado al seleccionar los genotipos para su uso en mejoramiento y las cepas con las que se van a llevar el proceso de mejoramiento y selección para mayor capacidad de nodulación y fijación de  $N_2$ , sobre todo en presencia de estrés de sequía y/o baja fertilidad para una región meta en particular. Los casos de interacción observados en este estudio son ejemplos de la especificidad que tienen los genotipos de frijol con determinadas cepas de *Rhizobium*, con las cuales presentan un desempeño superior en comparación con cualquier otra cepa, ocasionando así una eficiente simbiosis (Yadav 2010).

Cuadro 7. Efecto de las cepas de *Rhizobium*, los genotipos y su interacción sobre el área superficial de nódulos total (ANT), en raíces adventicias (ANA), raíces a los 10 cm de profundidad desde la coronaria uno (AN10) y en raíces mayores a los 10 cm de profundidad (AN>10), el volumen de nódulos total (VNT) y la relación área superficial total: volumen de nódulos total (ANT/VNT), en la etapa de floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en Invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.

Fuentes de Variación	ANT (cm <sup>2</sup> )	ANA (cm <sup>2</sup> )	AN10 (cm <sup>2</sup> )	AN>10 (cm <sup>2</sup> )	VN (cm <sup>3</sup> )	ANT/VNT (cm <sup>-1</sup> )
<b>Cepas (C)</b>						
CIAT 632	13.2	2.9	6.7	3.6	0.61	24.6
CIAT 899	14.5	2.0	7.1	5.3	0.71	22.4
UPR 2010	12.7	1.2	6.1	5.3	0.60	24.1
Testigo (sin inoculación)	10.9	1.0	5.6	4.3	0.53	23.1
DMS <sup>‡</sup> (p ≤ 0.05)	3.3 <sup>ns</sup>	0.6 <sup>**</sup>	2.0 <sup>ns</sup>	1.5 <sup>ns</sup>	0.22 <sup>ns</sup>	2.1 <sup>ns</sup>
<b>Genotipos (G)</b>						
VAX 3	13.4	2.2	7.5	3.7	0.65	22.0
A 774	13.7	2.1	7.9	3.7	0.61	24.8
PR 0340-3-3-1	10.8	1.5	5.9	3.4	0.57	22.2
PR 0443-151	10.3	1.3	5.4	3.6	0.51	22.2
RBF 19-63	16.1	3.1	6.8	6.2	0.65	25.3
IBC 308-15	8.6	1.3	3.7	3.6	0.43	27.4
IBC 309-23	7.1	1.1	3.4	2.7	0.34	24.5
IBC 301-204	16.3	2.7	8.2	5.5	0.84	19.9
IBC 302-29	13.5	1.6	6.9	5.0	0.65	24.9
IBC 305-67	10.6	1.4	6.0	3.2	0.51	23.0
SX 14825-7-1	15.6	2.0	6.5	7.2	0.67	24.2
MDSX 14797-6-1	14.6	1.3	7.4	5.8	0.66	22.3
TLP 19	14.9	2.3	6.5	6.0	0.70	20.9
RAB 651	12.5	2.0	6.0	4.5	0.59	21.8
SRS 6-6	14.4	2.5	7.2	4.7	0.66	23.0
RBF 18-72	8.4	1.8	3.2	3.4	0.38	24.6
MER 2226-28	8.0	0.7	3.8	3.4	0.34	25.9
Aifi Wuriti	20.3	1.9	10.5	7.9	1.21	22.0
Amadeus 77	12.1	1.6	6.3	4.3	0.58	22.7
Seda	15.5	1.7	9.0	4.7	0.67	27.5
DMS (p ≤ 0.05)	7.6 <sup>**</sup>	1.5 <sup>**</sup>	4.4 <sup>**</sup>	3.3 <sup>**</sup>	0.49 <sup>**</sup>	4.8 <sup>**</sup>
<b>Interacción C × G</b>						
Probabilidad (p)	0.00 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.02 <sup>*</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.06 <sup>ns</sup>	0.00 <sup>**</sup>

<sup>‡</sup> = Diferencia mínima significativa

<sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup>, <sup>ns</sup> = Significativo (p ≤ 0.05), altamente significativo (p ≤ 0.01) y no significativo (p > 0.05), respectivamente.

Cuadro 8. Efectos específicos de la interacción cepa  $\times$  genotipo en el área superficial de nódulos total (ANT), en raíces adventicias (ANA), raíces a los 10 cm de profundidad desde la coronaria uno (AN10), y la relación área superficial: volumen de nódulos totales (ANT/VNT) a la floración bajo condiciones de sequía y baja fertilidad en invernadero. Zamorano, Honduras. 2011.

<b>Interacción</b>	<b>ANT (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>ANA (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>AN10 (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>ANT/VNT (cm<sup>-1</sup>)</b>
CIAT 632 $\times$ Aifi Wuriti	11.9 <sup>bs</sup>	2.7 <sup>a</sup>	5.2 <sup>b</sup>	25.8 <sup>a</sup>
CIAT 899 $\times$ Aifi Wuriti	49.6 <sup>a</sup>	3.2 <sup>a</sup>	28.2 <sup>a</sup>	19.2 <sup>a</sup>
UPR 2010 $\times$ Aifi Wuriti	10.4 <sup>b</sup>	0.1 <sup>a</sup>	4.6 <sup>b</sup>	23.3 <sup>a</sup>
Testigo (sin inoculación) $\times$ Aifi Wuriti	9.3 <sup>b</sup>	1.6 <sup>a</sup>	3.9 <sup>b</sup>	19.7 <sup>a</sup>

<sup>s</sup> Letras diferentes en la misma columna difieren significativamente ( $p \leq 0.05$ )

## ENSAYO DE CAMPO

**Efectos en los pesos secos y rendimiento de las plantas.** Los valores de pesos secos de raíces, total de la planta, de 100 semillas y rendimiento presentaron diferencias significativas debido a las cepas; siendo CIAT 632 la más sobresaliente en pesos de raíces y total y rendimiento de grano (Cuadro 9). Paralelo a esto, el efecto genotipo presentó diferencias altamente significativas para las variables de pesos secos y rendimiento, destacándose por los rendimientos más altos, los genotipos IBC 308- 15, IBC 309 – 23, RAB 651 y SRS 6-6. Estos genotipos sobresalieron en pesos secos de raíces, follaje y total de la planta, pero no en todas las variables. El genotipo Seda presentó una alta nodulación con respecto al resto, pero no estuvo entre los de mayor rendimiento. Sin embargo, para fines de mejoramiento se le debe considerar como un progenitor importante, el cual en combinación con otros que aporten otras características favorables incluyendo alto potencial de rendimiento, podrían ser útiles en el desarrollo de variedades tolerantes a baja fertilidad, donde una mayor nodulación y fijación de N<sub>2</sub> favorecerían la adaptación a suelos pobres en materia orgánica y nitrógeno presentes en muchas regiones de América Latina.

En cuanto a los efectos de la interacción cepa  $\times$  genotipo, se presentaron diferencias muy marcadas en rendimiento. En el cuadro 10 se indican las interacciones que presentaron los valores de rendimiento más altos y más bajos, lo que nos permite sugerir que se debe tener en cuenta aquellas interacciones más sobresalientes de este ensayo, en cuanto a las cepas y genotipos que se van a seleccionar para estudios posteriores; sobre todo en los genotipos que se estarán usando como padres en procesos de mejoramiento, y las cepas con las que se estarán haciendo la selección para incrementar la capacidad de nodulación y fijación de N<sub>2</sub> bajo condiciones de estrés.



Cuadro 9. Efecto de las cepas de *Rhizobium*, los genotipos y su interacción sobre los pesos secos de raíces (PSR), nódulos (PSN), follaje (PSF) y total (PST) de las plantas a la floración, y el peso seco de 100 semillas (PSCS) y rendimiento (RDTO) a la madurez de cosecha. Zorralles 1, Zamorano, Honduras. 2011.

<b>Fuentes de Variación</b>	<b>PSR (mg)</b>	<b>PSN (mg)</b>	<b>PSF (g)</b>	<b>PST (g)</b>	<b>PSCS (g)</b>	<b>RDTO (kg/ha)</b>
<b>Cepas (C)</b>						
CIAT 632	2.6	26.3	22.7	26.4	22.4	5654
CIAT 899	2.4	30.5	21.8	25.8	22.9	4925
UPR 2010	2.4	36.6	22.7	25.3	22.9	5451
Testigo(sin inoculación)	2.2	30.7	21.9	24.0	23.6	5272
DMS <sup>y</sup> (p ≤ 0.05)	0.2 <sup>**</sup>	9.6 <sup>ns</sup>	1.4 <sup>ns</sup>	1.8 <sup>*</sup>	0.6 <sup>**</sup>	409 <sup>**</sup>
<b>Genotipos (G)</b>						
VAX 3	2.2	21.5	19.4	22.5	24.0	4823
A 774	2.3	53.3	25.9	28.3	22.3	5324
PR 0340-3-3-1	2.7	6.1	22.5	26.6	22.4	5548
PR 0443-151	2.1	12.3	18.7	22.0	16.3	4976
RBF 19-63	2.4	51.2	25.6	28.0	21.4	4409
IBC 308-15	2.9	26.0	25.8	31.4	22.5	5853
IBC 309-23	2.7	24.6	24.3	28.7	23.3	5696
IBC 301-204	2.0	39.8	18.6	20.9	23.7	4931
IBC 302-29	2.2	35.9	19.3	22.1	24.8	5653
IBC 305-67	2.6	15.5	23.6	26.0	24.8	6068
SX 14825-7-1	2.3	14.5	23.6	27.0	25.0	4473
MDSX 14797-6-1	2.0	18.6	20.6	22.8	24.6	4701
TLP 19	2.6	39.9	22.8	26.3	18.1	4975
RAB 651	2.6	38.0	27.1	30.5	24.2	6423
SRS 6-6	3.0	32.8	22.2	25.8	26.1	6746
RBF 18-72	2.8	29.3	21.7	24.3	19.2	5525
MER 2226-28	2.4	24.3	24.8	27.9	24.7	4846
Aifi Wuriti	2.1	11.1	18.1	20.6	22.0	4419
Amadeus 77	2.4	18.7	20.2	23.6	25.3	5881
Seda	1.7	107.8	21.1	21.8	24.6	5237
DMS (p ≤ 0.05)	0.7 <sup>**</sup>	21.4 <sup>**</sup>	3.4 <sup>**</sup>	3.9 <sup>**</sup>	1.2 <sup>ns</sup>	847 <sup>**</sup>
<b>Interacción C × G</b>						
Probabilidad (p)	0.00 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.04 <sup>*</sup>	0.01 <sup>*</sup>	0.00 <sup>**</sup>

<sup>y</sup> = Diferencia mínima significativa

<sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup>, <sup>ns</sup> = Significativo (p≤0.05), altamente significativo (p≤0.01) y no significativo (p>0.05), respectivamente.

Cuadro 10. Efectos específicos de la interacción cepa × genotipo en el rendimiento de grano a la madurez de cosecha. Zorralles 1, Zamorano, Honduras. 2011.

Interacción <sup>λ</sup>	Rendimiento (kg/ha)
CIAT 632 × SRS 6-6	7724 <sup>a</sup>
CIAT 632 × RAB 651	7344 <sup>a</sup>
Testigo (sin inoculación) × SRS 6-6	6904 <sup>a</sup>
UPR 2010 × SRS 6-6	6825 <sup>a</sup>
UPR 2010 × IBC 302-29	6628 <sup>a</sup>
UPR 2010 × Amadeus 77	6490 <sup>a</sup>
UPR 2010 × Seda	6189 <sup>a</sup>
CIAT 899 × Amadeus 77	5534 <sup>b</sup>
CIAT 899 × Seda	4405 <sup>b</sup>
UPR 2010 × SX 14825-7-1	4140 <sup>b</sup>
Testigo (sin inoculación) × VAX3	4047 <sup>b</sup>
CIAT 632 × Aifi Wuriti	3836 <sup>b</sup>
CIAT 899 × MER 2226-28	3675 <sup>b</sup>
CIAT 632 × RBF 19-63	3359 <sup>b</sup>

<sup>λ</sup> Sólo se muestran las cinco interacciones más altas y las cinco más bajas.

<sup>§</sup> Letras diferentes en la misma columna difieren significativamente ( $p \leq 0.05$ )

**Efectos en características de las raíces.** El efecto cepa presentó una diferencia altamente significativa solamente para la variable ángulo de la coronaria uno, mientras que para el resto de las variables (número de raíces adventicias, diámetro raíz principal, ángulo coronaria dos, número de coronarias uno y número de coronarias dos) no presentaron diferencias significativas (Cuadro 11). Es muy subjetivo inferir que las cepas tienen efecto directo sobre el ángulo de las coronarias, puesto que esta variable es una respuesta varietal y arquitectónica de la raíz por medio de hormonas ante determinadas condiciones de estrés como son la sequía o la deficiencia de fósforo. En el caso de sequía, éste desencadena la producción de ácido abscísico que resulta en un incremento de la profundidad de la raíz (Spollen *et al* 2000). Por otro lado la baja disponibilidad de fósforo puede resultar en una respuesta de etileno que provoca que las raíces sean menos profundas (Lynch y Brown, 2001).

En los genotipos existe una diferencia altamente significativa para las variables de número de raíces adventicias, diámetro raíz principal, número de coronarias uno, ángulo de coronarias uno y ángulo de coronarias dos, mientras que existe una diferencia significativa para el número de coronarias dos. Estas diferencias en la arquitectura de la raíces se producen por componentes genotípicos y fenotípicos que juegan un rol importante en la

adquisición de los recursos del suelo (Fitter, 1987; Lynch, 1995). Los genotipos A 774, TLP 19 y Amadeus 77 presentan los valores más altos para las variables de diámetro de raíz principal y número de coronarias dos. De acuerdo a Ochoa (2006), la raíz principal y las raíces basales o coronarias están cercanamente relacionadas con el crecimiento de la parte aérea; por lo que se puede relacionar los valores bajos en diámetro de la raíz principal y el número de coronarias dos con el bajo peso de follaje y peso total del genotipo Aifi Wuriti.

En los ángulos de la coronaria uno y coronaria dos, los genotipos PR 0443-151, RBF 19-63, IBC 301-204, SX 14825-7-1, Aifi Wuriti y Amadeus 77 presentan los más altos grados ( $24 - 27^\circ$  para la coronaria uno y  $38 - 42^\circ$  para la coronaria dos), mientras que el genotipo RBF 18-72 presenta los valores más bajos ( $19^\circ$  para la coronaria uno y  $36^\circ$  para la coronaria dos). De acuerdo a Ho *et al* (2004), los genotipos de frijol común que son mejor adaptados a medioambientes bajos en fósforo, donde el fósforo es localizado en la superficie del suelo, presentan un ángulo de raíces coronarias menos profundo. Sin embargo, el presente ensayo se llevó a cabo en un terreno con alta fertilidad por fósforo, lo cual determinaría que el comportamiento de las raíces coronarias debería ser diferente. No obstante modelos arquitectónicos de raíces demuestran que las plantas deberían tener raíces menos profundas para tomar ventaja de la disponibilidad de fósforo en ambientes donde el agua, aunque escasa, se encuentra distribuida uniformemente en el perfil del suelo y el fósforo se encuentra en mayores concentraciones en la superficie (Ho *et al*. 2004).

Cuadro 11. Efecto de las cepas de *Rhizobium*, genotipos y su interacción sobre el número de raíces adventicias (NAD), diámetro de la raíz principal (DRP), número de raíces coronarias uno (NC1) y coronarias dos (NC2), ángulo de la coronaria uno (AC1) y de la coronaria dos (AC2), en la etapa de floración. Zorrales 1, Zamorano, Honduras. 2011.

Fuentes de Variación	NAD	DRP (mm)	NC1	NC2	AC1 (°)	AC2 (°)
<b>Cepas (C)</b>						
CIAT 632	11	1.37	3.3	2.9	23	39
CIAT 899	11	1.33	3.4	3.0	26	39
UPR 2010	11	1.40	4.6	3.1	22	37
Testigo (sin inoculación)	11	1.29	3.3	3.1	21	37
DMS <sup>‡</sup> ( $p \leq 0.05$ )	2 <sup>ns</sup>	0.12 <sup>ns</sup>	0.3 <sup>ns</sup>	0.2 <sup>ns</sup>	2 <sup>**</sup>	2 <sup>ns</sup>
<b>Genotipos (G)</b>						
VAX 3	10	1.00	3.1	3.2	22	37
A 774	15	1.48	3.5	3.3	21	37
PR 0340-3-3-1	10	1.20	3.3	2.9	23	37
PR 0443-151	13	1.14	3.2	3.3	27	39
RBF 19-63	11	1.29	3.6	2.9	25	42
IBC 308-15	9	1.53	3.4	2.9	21	36
IBC 309-23	10	1.38	3.2	2.7	22	36
IBC 301-204	13	1.47	3.6	3.1	26	42
IBC 302-29	10	1.46	3.3	3.1	23	37
IBC 305-67	9	1.47	3.4	3.0	21	35
SX 14825-7-1	10	1.27	3.2	2.9	25	38
MDSX 14797-6-1	12	1.23	3.8	3.1	22	36
TLP 19	9	1.54	3.4	3.4	21	38
RAB 651	11	1.44	3.4	3.0	26	37
SRS 6-6	13	1.51	3.7	3.2	23	38
RBF 18-72	9	1.44	3.3	3.1	19	36
MER 2226-28	13	1.33	3.5	2.8	22	38
Aifi Wuriti	6	1.21	3.4	2.7	25	41
Amadeus 77	8	1.34	3.3	3.2	24	40
Seda	20	1.28	3.7	3.1	22	41
DMS ( $p \leq 0.05$ )	4 <sup>**</sup>	0.24 <sup>**</sup>	0.6 <sup>**</sup>	0.6 <sup>*</sup>	5 <sup>**</sup>	4 <sup>**</sup>
<b>Interacción C × G</b>						
Probabilidad (p)	0.00 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.67 <sup>ns</sup>	0.04 <sup>*</sup>	0.32 <sup>ns</sup>	0.02 <sup>*</sup>

<sup>‡</sup> = Diferencia mínima significativa.

<sup>\*</sup>, <sup>\*\*</sup>, <sup>ns</sup> = Significativo ( $p \leq 0.05$ ), altamente significativo ( $p \leq 0.01$ ) y no significativo ( $p > 0.05$ ), respectivamente.

**Efectos en la nodulación.** El efecto cepa mostró una diferencia altamente significativa para las variables de área superficial de nódulos totales y área superficial de nódulos en raíces adventicias (Cuadro 12). Para las variables de volumen de nódulos total y evaluación visual de la nodulación se presentaron diferencias significativas, mientras que para el área superficial de nódulos en raíces a 10 cm de profundidad desde la coronaria uno y la relación área superficial total: volumen total de nódulos no se presentaron diferencias significativas. La cepa UPR 2010 presentó los más altos valores para todas las variables de nodulación.

El efecto de genotipo presentó diferencias significativas para todas las variables de nodulación (Cuadro 12). El genotipo Seda presentó los más altos valores para todas las variables de nodulación, excepto para la variable de la relación área superficial total: volumen total de nódulos, que por el contrario presentó el valor más bajo. Según Menéndez (1982), la formación de raíces coronarias es una respuesta positiva al inóculo, presentándose un mayor desarrollo radicular en el área donde se establece la cepa.

Cuadro 12. Efecto de las cepas de *Rhizobium*, genotipos y su interacción sobre el área superficial de nódulos total (ANT), y a diferentes profundidades de la raíz: en raíces adventicias (ANA), y en raíces a 10 cm de profundidad desde la coronaria uno (AN10), volumen de nódulos total (VNT), relación área superficial total/volumen total de nódulos (ANT/VNT), y evaluación visual de la nodulación (EVN, escala PIF) en la etapa de floración. Zorrales 1, Zamorano, Honduras. 2011.

Fuentes de Variación	ANT (cm <sup>2</sup> )	ANA (cm <sup>2</sup> )	AN10 (cm <sup>2</sup> )	VNT (cm <sup>3</sup> )	ANT/VNT (cm <sup>-1</sup> )	EVN (1-9)
<b>Cepas (C)</b>						
CIAT 632	9.7	4.2	5.5	0.4	32.6	2.9
CIAT 899	9.5	3.5	5.9	0.4	34.8	3.1
UPR 2010	16.1	6.4	9.7	1.1	31.0	3.3
Testigo (sin inoculación)	9.6	3.3	6.3	0.4	32.5	2.7
DMS <sup>‡</sup> (p ≤ 0.05)	4.5 <sup>**</sup>	1.7 <sup>**</sup>	3.3 <sup>ns</sup>	0.5 <sup>*</sup>	3.9 <sup>ns</sup>	0.4 <sup>*</sup>
<b>Genotipos (G)</b>						
VAX 3	7.6	3.6	4.0	0.3	37.1	3.1
A 774	18.3	8.1	10.2	0.7	28.9	4.3
PR 0340-3-3-1	3.2	1.2	2.0	0.1	43.0	1.9
PR 0443-151	4.8	2.3	2.5	0.2	34.5	2.6
RBF 19-63	16.9	7.1	9.7	0.7	28.8	3.7
IBC 308-15	10.0	3.9	6.1	0.5	28.9	2.6
IBC 309-23	9.8	3.5	6.2	0.5	31.9	2.3
IBC 301-204	13.8	5.5	8.3	0.7	25.6	3.6
IBC 302-29	11.9	4.7	7.2	0.4	30.2	3.2
IBC 305-67	7.8	3.1	4.7	0.4	36.6	2.2
SX 14825-7-1	4.6	1.0	3.6	0.2	32.0	2.8
MDSX 14797-6-1	5.6	2.1	3.5	0.2	45.5	2.4
TLP 19	13.5	3.7	9.8	0.6	26.6	3.4
RAB 651	21.2	5.1	16.2	2.3	29.1	2.9
SRS 6-6	12.5	5.1	7.3	0.4	29.8	3.3
RBF 18-72	9.6	3.2	6.4	0.4	30.9	3.1
MER 2226-28	7.6	2.7	4.8	0.3	33.8	2.8
Aifi Wuriti	4.7	2.1	2.6	0.2	44.4	2.3
Amadeus 77	6.4	1.8	4.6	0.2	34.6	2.7
Seda	35.2	17.5	17.6	1.7	24.2	5.1
DMS (p ≤ 0.05)	9.0 <sup>**</sup>	3.0 <sup>*</sup>	6.9 <sup>**</sup>	1.2 <sup>*</sup>	9.4 <sup>**</sup>	0.8 <sup>**</sup>
<b>Interacción C × G</b>						
Probabilidad (p)	0.00 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.02 <sup>*</sup>	0.05 <sup>*</sup>	0.00 <sup>**</sup>	0.00 <sup>**</sup>

<sup>‡</sup>= Diferencia mínima significativa.

\*, \*\*, ns = Significativo (p≤0.05), altamente significativo (p≤0.01) y no significativo (p>0.05), respectivamente.

Finalmente, se identificó las interacciones más sobresalientes entre cepa  $\times$  genotipo de las variables de nodulación. La cepa más sobresaliente fue UPR 2010, que estableció las mejores interacciones con los genotipos Seda y RAB 651, para lo cual se presenta en las interacciones de estos genotipos con los tratamientos de inoculación (Cuadro 13), observándose diferencias para peso seco de nódulos en las interacciones con el genotipo Seda y en las cinco variables de nodulación en las interacciones con el genotipo RAB 651. Cabe resaltar que el testigo presenta valores para las diferentes variables de nodulación debido a la simbiosis entre los genotipos y el *Rhizobium* nativo presente en el suelo.

Las variables área superficial de nódulos, volumen de nódulos, relación área superficial total: volumen total de nódulos y evaluación visual de nódulos no presentan diferencia significativa al comparar la interacción cepa (CIAT 632, CIAT 899, UPR 2010 y Testigo)  $\times$  genotipo (Seda). Mientras que sí hubo diferencia significativa para la variable peso seco de nódulos, del cual la interacción UPR 2010  $\times$  Seda resultó tener el mayor valor.

Por otro lado la interacción cepa  $\times$  genotipo entre UPR 2010  $\times$  RAB 651 respectivamente, presentó el mayor valor para las variables área superficial de nódulos, peso seco de nódulos, volumen de nódulos y evaluación visual de nódulos, mientras que la interacción cepa  $\times$  genotipo entre CIAT 632  $\times$  RAB 651 presenta el mayor valor para la variable relación área superficial total: volumen total de nódulos.

Cuadro 13. Efectos específicos de la interacción cepa  $\times$  genotipo en el área superficial de nódulos (ASN), peso seco de nódulos (PSN), volumen de nódulos (VN), relación área superficial total: volumen total de nódulos (ANT/VNT) y evaluación visual de nodulación (EVN, escala PIF) a la floración. Zorral 1, Zamorano, Honduras. 2011.

<b>Interacciones</b>	<b>ASN (cm<sup>2</sup>)</b>	<b>PSN (mg)</b>	<b>VN (cm<sup>3</sup>)</b>	<b>ANT/VNT (cm<sup>-1</sup>)</b>	<b>EVN (1-9)</b>
CIAT 632 $\times$ Seda	31.1 <sup>a§</sup>	87.7 <sup>b</sup>	1.2 <sup>a</sup>	26.8 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
CIAT 899 $\times$ Seda	30.6 <sup>a</sup>	87.7 <sup>b</sup>	1.2 <sup>a</sup>	25.7 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
UPR 2010 $\times$ Seda	44.5 <sup>a</sup>	150.7 <sup>a</sup>	2.7 <sup>a</sup>	20.2 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
Testigo (sin inoculación) $\times$ Seda	34.5 <sup>a</sup>	105.3 <sup>ab</sup>	1.6 <sup>a</sup>	24.1 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>
CIAT 632 $\times$ RAB 651	2.7 <sup>b</sup>	6.3 <sup>b</sup>	0.1 <sup>b</sup>	38.5 <sup>a</sup>	2 <sup>b</sup>
CIAT 899 $\times$ RAB 651	11.0 <sup>b</sup>	47.0 <sup>ab</sup>	0.4 <sup>b</sup>	35.4 <sup>ab</sup>	3 <sup>ab</sup>
UPR 2010 $\times$ RAB 651	62.5 <sup>a</sup>	68.7 <sup>a</sup>	8.2 <sup>a</sup>	18.3 <sup>b</sup>	4 <sup>a</sup>
Testigo (sin inoculación) $\times$ RAB 651	8.8 <sup>b</sup>	30.0 <sup>ab</sup>	0.35 <sup>b</sup>	24.4 <sup>ab</sup>	3 <sup>ab</sup>

<sup>§</sup> Letras diferentes en la misma columna difieren significativamente ( $p \leq 0.05$ )

## 4. CONCLUSIONES

### ENSAYO DE INVERNADERO

- Las cepas de *Rhizobium* presentaron efectos en los pesos secos de follaje, semilla y total, el área foliar, y en las características de raíces de las plantas, siendo las cepas CIAT 632 y UPR 2010 las más destacadas.
- Los genotipos influenciaron en todas las variables de pesos secos, características de raíces y nodulación de las plantas, sobresaliendo Seda e IBC 302-29.
- Se observaron efectos de interacción cepa × genotipo en todas las variables; pero los valores superiores variaron dependiendo de la variable estudiada, sugiriendo especificidad. Entre las interacciones más sobresalientes se incluye CIAT 632 × Seda y UPR 2010 × MDSX 147976-1 para características de pesos secos; CIAT 632 × TLP 19 para características de raíces; CIAT 899 × Aifi Wuriti, CIAT 632 × Seda y CIAT 899 × Seda para las características de nodulación; y UPR 2010 × Seda para el peso seco de semilla.

### ENSAYO DE CAMPO

- Las cepas de *Rhizobium* tuvieron efectos en pesos secos de follaje y raíces, en algunas características de raíces y de nodulación, así como en el rendimiento y peso seco de cien semillas. La cepa más destacada fue UPR 2010.
- Los genotipos influenciaron en los pesos secos de follaje y total de la planta, y en todas las características de raíces, nodulación y el rendimiento. La variedad Seda fue la más sobresaliente.
- El efecto de las interacciones Cepa × Genotipo se observó en la mayoría de las características evaluadas, siendo la interacción UPR 2010 × Seda la más sobresaliente para características de nodulación y la CIAT 632 × SRS 6-6 para rendimiento.



## 5. RECOMENDACIONES

- Analizar correlaciones de las variables estudiadas para entender mejor las posibles relaciones existentes.
- Realizar estudios más detallados de interacciones cepa × genotipo con alta expresión simbiótica (p.ej. UPR 2010 × Seda y otras) en condiciones de estrés.
- Llevar a cabo ensayos de campo complementarios en condiciones de sequía y baja fertilidad.
- Evaluar los genotipos más sobresalientes con inoculación de las cepas individualmente y en mezclas.
- Debido a las diferencias notorias en tamaño observadas en las raíces adventicias, además del conteo se las debe evaluar con el software Whinrhizo®.

## 6. LITERATURA CITADA

Benites M. 2008. Características fenotípicas de líneas de frijol común tolerantes a la sequía y a la baja fertilidad. Proyecto especial de Ingeniero Agrónomo en Ciencia y Producción Agropecuaria, Zamorano, Honduras. 18p.

Bonser, A.M.; Lynch, J.; Snapp, S. 1996. Effect of phosphorus deficiency on growth angle of basal roots in *Phaseolus vulgaris*. *New Phytologist* 132:281-288.

Fitter, A. H. 1987. An architectural approach to the comparative ecology of plant root systems. *New Phytologist* 106(1):61-77

Hamdi, H.Z. 1999. *Rhizobium*-legume symbiosis and nitrogen fixation under severe conditions and in an arid climate. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 63(4):968-989.

Hardarson, G. 1993. Methods for enhancing symbiotic nitrogen fixation. *Plant and Soil* 152:1-17.

Hardason, G; Bliss, F.A.; Cigales-Riveros, M.R.; Henson, R.A.; Kipe-Nolt, J.A.; Longeri, L.; Manrique, A.; Peña-Cabriales, J.J.; Pereira, P.; Sanabria, C.A.; Tsai, S.M. 1993. Genotypic variation in biological nitrogen fixation by common bean. *Plant Soil* 172:59-70.

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

Ho, M. D.; McCannon, B. C.; Lynch, J. P. 2004. Optimization modeling of plant root architecture for water and phosphorus acquisition. *Theoretical Biology* 226:331-340.

Ho, M.D.; Rosas, J.C.; Brown, K.M.; Lynch, J.P. 2005. Root architectural tradeoffs for water and phosphorus acquisition. *Functional Plant Biology* 32:737-748.

López-Lara, I.M. 2005. *Rhizobium* y su destacada simbiosis con las leguminosas. Centro de Investigación de Nitrógeno, Universidad Autónoma de México. 16p.

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

Lynch, J.P.; Brown, K. M. 2001. Topsoil foraging: an architectural adaptation to low phosphorus availability. *Plant and Soil* 237:225-237.

Lynch, J.P. 2005. Root architecture and nutrient acquisition. *In* H. BassiriRad (ed) *Nutrient acquisition by plants: an ecological perspective*. Springer. Berlín, Alemania. p 147-184.

Menéndez, J. 1982. Evaluación en Guatemala de nueve cepas de *Rhizobium phaseoli*, seleccionadas para pruebas internacionales de fijación de nitrógeno atmosférico en frijol, probadas en la variedad ICTA-81. Tesis Ing. Agr. Guatemala. Universidad de San Carlos, 42 p.

Montealegre, C; Kipe-Nolt, J. 1994. Ability of selected accessions of *Phaseolus vulgaris* L. to restrict nodulation by particular rhizobia. *Arch. Microbiol.* 162:352-356.

Morales, Y. 2010. Caracterización fenotípica de líneas endogámicas de la variedad de frijol rojo Amadeus 77 en condiciones de baja fertilidad. Proyecto especial de graduación del programa de Ingeniería Agronómica, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. Honduras. 21 p.

Ochoa, I. E.; Blair, M. W.; Lynch, J. P. 2006. QTL Analysis of Adventitious Root Formation in Common Bean under Contrasting Phosphorus Availability. *Crop Science* 46(4):1609-1621.

Rosas, J.C.; Castro, A.; Flores, E. 2000. Mejoramiento genético de frijol rojo y negro mesoamericano para Centroamérica y el Caribe. *Agronomía Mesoamericana* 11(2):37-46.

Rosas, J.C.; Bliss, F.A. 1986a. Mejoramiento de la capacidad de fijación de nitrógeno del frijol común. *CEIBA* 27(1):89-93.

Rosas, J.C.; Bliss, F.A. 1986b. Utilización del potencial de fijación de nitrógeno del frijol común en Centro América. *CEIBA* 27(1):105-115.

Singh, S.P. 1991. Bean Genetics. *In* A. van Schoonhoven and O. Voysest (ed). *Common beans: Research for crop improvement*. CAB International. Wallingford. UK & CIAT. Cali, Colombia. p 199- 286.

Spollen, W. G.; LeNoble, M. E.; Samuels, T. D.; Bernstein, N.; Sharp, R. E.2000. Abscisic acid accumulation maintains maize primary root elongation at low water potentials by restricting ethylene production. *Plant Physiology* 122:967–976.

Sponchiado, B.N.; White, J.W.; Castillo, J.A.; Jones, P.G. 1989. Root growth of four common bean cultivars in relation to drought tolerance in environments with contrasting soil types. *Experimental Agriculture* 25:249-257.

Thies, J.E.; Singleton P.W.; Bohlool B.B. 1991. Influence of the size of indigenous rhizobial populations on establishment and symbiotic performance of introduced rhizobia on field-grown legumes. *Appl. Environ. Microbiol.* 57:19-28.

Thung, M; Rao, I.M. 1999. Integrated management of abiotic stresses. *In* S.P. Singh (ed) Common bean improvement in the twenty-first century. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands. p 331-370.

Valladares R. 2009. Respuesta de 12 genotipos de frijol a la inoculación con *Rhizobium* bajo condiciones de estrés hídrico y de baja fertilidad. Proyecto especial de Ingeniero Agrónomo, Zamorano, Honduras, 19 p.

Vargas, A. 2008. Selección de genotipos de frijol común tolerantes a bajo contenido de nitrógeno en el suelo. Proyecto especial del programa de Ingeniería en Ciencia y Producción Agropecuaria, Zamorano, Honduras, 17 p.

White, J.W; Singh, S.P. 1991. Breeding for adaptation to drought. *In* A. van Schoonhoven and O. Voysest (ed) Common beans: Research for crop improvement. CAB International. Wallingford. UK & CIAT. Cali, Colombia. p 501- 560.

Yadav, J. 2010. Specificity of french bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes and *Rhizobium phasoeli* to establish symbiotic N-fixation in inceptisols of Varanasi, Uttar Pradesh, India. *IJBSM* 1(2):59-62.

## 7. ANEXOS

Anexo 1. Análisis de nutrientes del medio suelo: arena (1:2) utilizado en el ensayo de invernadero, realizado por el laboratorio de suelos de Zamorano. Honduras, 2011.

pH	%		mg/Kg (extractable)				
	M.O.	N	P	K	Ca	Mg	Na
	Bajo	Bajo	Bajo	Alto	Medio	Medio	Normal
6.29	1.8	0.09	8	264	1070	140	133
<b>Rango</b>	<b>2.00</b>	<b>0.20</b>	<b>13</b>				
<b>medio</b>	<b>4.00</b>	<b>0.50</b>	<b>30</b>		<b>Por saturación de bases</b>		

Anexo 2. Composición y preparación del caldo de levadura- manitol utilizado como medio que contiene el *Rhizobium* en el inoculante.

### Composición para 1,000 ml de medio:

Fosfato de Potasio Monobásico ( $K_2HPO_4$ )	0.5 g
Sulfato de Magnesio Heptahidratado ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ )	0.2 g
Cloruro de Sodio (NaCl)	0.1 g
Manitol	10.0 g
Extracto de levadura	0.5 g

### Preparación:

En un frasco Erlenmeyer de 1,000 ml, mezclar todos los ingredientes con el agua destilada y agitar hasta su completa dilución (líquido color amarillo). Medir el pH y normalizarlo a 6.8-7.3 si es necesario. Luego esterilizar.

Anexo 3. Análisis de nutrientes del lote de Zorrales 1, realizado por el laboratorio de suelos de Zamorano, Honduras. 2011.

pH	%		mg/Kg (extractable)								
	M.O.	N	P	K	Ca	Mg	Na	Cu	Fe	Mn	Zn
	Media	Bajo	Alto	Alto	Medio	Bajo	Medio	Bajo	Alto	Alto	Alto
5.8	3.2	0.16	68.5	637	182	220	143	1.3	291.1	138.7	5.0
<b>Rango medio</b>	<b>2.00</b>	<b>0.20</b>	<b>13</b>	<b>Por saturación de bases</b>				<b>1.7</b>	<b>56</b>	<b>28</b>	<b>1.7</b>
	<b>4.00</b>	<b>0.50</b>	<b>30</b>					<b>3.4</b>	<b>112</b>	<b>112</b>	<b>3.4</b>

Anexo 4. Escala de evaluación visual de nodulación en frijol del Programa de Investigaciones en Frijol (PIF).

### Escala de nodulación de frijol

