



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS
AGRÍCOLAS**

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE BOTÁNICA

**ESTUDIO COMPARATIVO DE
Phaseolus vulgaris L. DOMESTICADO Y
SILVESTRE**

MARISOL JAZMÍN FLORES DE LA CRUZ

**T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe, **Marisol Jazmín Flores de la Cruz**, Alumno (a) de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor **Josué Kohashi Shibata**, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis "**Estudio comparativo de *Phaseolus vulgaris* L. domesticado y silvestre**", y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 17 de julio de 2017.



Firma del
Alumno (a)



Dr. Josué Kohashi Shibata

Vo. Bo. del Consejero o Director de Tesis

La presente tesis titulada: **“Estudio comparativo de *Phaseolus vulgaris* L. domesticado y silvestre”** realizada por el (la) alumno (a): **“Marisol Jazmín Flores de la Cruz”** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
BOTÁNICA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO (A)

DR. JOSUÉ KOHASHI SHIBATA

ASESOR (A)

M.C. ANTONIO GARCÍA ESTEVA

ASESOR (A)

DRA. MA. CARMEN YBARRA MONCADA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, julio de 2017

Estudio comparativo de *Phaseolus vulgaris* L. domesticado y silvestre

Marisol Jazmín Flores de la Cruz, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2017.

RESUMEN

La semilla del frijol silvestre S13 tiene un alto contenido de proteína (28 %). En el año 2014 se cultivaron en invernadero del Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de Méx., el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) S13 y el domesticado Flor de Mayo X16441 ambos de crecimiento indeterminado trepador. El cultivo se realizó en hidroponía de tal manera que permitiera maximizar la expresión de su potencial genético. El objetivo fue realizar una mutua comparación de los materiales en su fenología, el peso de semilla por planta, y algunas variables fisiológicas. Se efectuaron tres muestreos: al inicio de la etapa de floración, al inicio de la etapa de llenado de vaina, y al término de la etapa de madurez fisiológica. S13 fue más tardío que Flor de Mayo X16441. S13 produjo más vainas que Flor de Mayo X16441 y gran parte de los fotoasimilados en S13 son destinados hacia un mayor número de semillas y al resto del vástago y raíz. El porcentaje de germinación fue similar en ambos materiales. En comparación con Flor de Mayo X16441, S13 produjo mayor cantidad total de materia seca por planta y registró una mayor duración del área foliar.

Palabras clave: S13, Flor de Mayo X16441, hidroponía, peso de semilla por planta, crecimiento indeterminado.

**Comparative study of
Phaseolus vulgaris L. domesticated and wild**

Marisol Jazmín Flores de la Cruz, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2017.

ABSTRACT

The seed of the wild bean S13 has a high (28 %) protein content. In 2014 in a greenhouse of the Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de Mex., were grown a wild bean (*Phaseolus vulgaris* L.) S13 and the domesticated Flor de Mayo X16441(FM) both of indeterminate climbing growth. These materials were grown employing hydroponics thus enabling the maximal expression of their genetic potential. The objective was to make a mutual comparison of their phenology, weight of seed per plant and several physiological variables. Three samplings were performed: at the beginning of the flowering stage, at the beginning of the pod filling and at the end of the physiological maturity. S13 was later than Flor de Mayo X16441. S13 yielded more pods than Flor de Mayo X16441, and a major portion of its photoassimilates are translocated to the large number of seeds and the remainder to other parts of the shoot and to the root. The germination percentage was similar for the two materials. In comparison to Flor de Mayo X16441, S13 produced more total dry matter per plant and registered a longer leaf area duration.

Keywords: S13, Flor de Mayo X16441, hydroponics, seed weight per plant, indeterminate growth.

DEDICATORIA

Con mucho cariño para mis hijitos Jahaziel, Judá y Yosef, deseo que este esfuerzo pueda ser un impulso para ustedes y en un futuro tengan la aspiración de mejorarlo, ustedes han sido parte en este paso más, “nunca se aparte de ustedes la misericordia y la verdad, átenlas a su cuello, escríbanlas en la tabla de su corazón y hallarán gracia y buena opinión ante Dios y los hombres, esfuércense y sean valientes”. Los amo tanto.

Para mis sobrinitos Aarón y Josué ojalá este trabajo sea como un pequeño ejemplo y cuando logren entenderlo pueda ser un impulso, que si bien no es lo más importante en la vida sepan que Dios nos ayuda en todo. Los quiero muchísimo.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a ti mi Dios por darme vida y fuerza y por ser quien puso los medios para poder lograr esta meta, tu palabra y tu presencia siempre conmigo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de Maestría en Ciencias.

Al Dr. Rodolfo García Nava por su apoyo, comprensión y disposición desde el momento de mi ingreso al Posgrado, así mismo por instruirme y guiarme tanto en el tema de investigación como en la formulación de mi plan de estudios, gracias por hacerlo parecer fácil. Mi respeto.

Al M.C. Antonio García Esteva por su tiempo, su instrucción y participación en todo el proceso de la investigación, así mismo por facilitarme todo lo que necesitara, pero sobre todo gracias por su amistad y sus consejos. Mi respeto.

Al Dr. Josué Kohashi Shibata por hacerme tener el Honor de ser mi consejero, por dedicar su tiempo y todo su esfuerzo para terminar satisfactoriamente este trabajo. Mi admiración y respeto.

A la Dra. Ma. Carmen Ybarra Moncada por aceptar ser parte de mi consejo, por su apoyo y sus acertados comentarios los cuales fueron indispensables para esta investigación.

A mi esposo Juan Cruz por hacer suyo este proyecto, por ser copartícipe y por impulsarme a comenzar y culminarlo, no pudo haber sido mejor, gracias por estar conmigo. Te amo corazón.

A mi papá Austroberto por estar al pendiente y ser parte crucial de la parte práctica de ésta investigación, he aprendido mucho de ti. Te quiero papi.

A mi mamá Ma. de Lourdes por tener cuidado de lo que yo necesitara, por avivar en mi la confianza y por hacerme sentir óptimamente tanto física y moralmente. Siempre están tus consejos en mi corazón. Te quiero mamita.

A mis hermanas Paloma, Zayra y Astrid que siempre estuvieron dispuestas cuando yo recurría a ellas, gracias por sus ánimos y por estar al pendiente a pesar de sus propias ocupaciones. Las quiero tanto hermanitas.

Al M. C. Ricardo Vega Muñoz por apoyarme en la herborización, montaje y etiquetado de mis ejemplares en el herbario-hortorio.

Al Dr. Ebandro Uscanga Mortera y a la M.C. Petra Yáñez Jiménez por su amistad, sus palabras de impulso y acertados comentarios, que quizá sin darse cuenta fueron fuente importante para que perseverara en la culminación de esta etapa. Mi admiración.

A la Sra. Janet Miranda por su profesionalismo y atender siempre a lo que necesitara. Gracias por hacer amenos los días.

A todos los que me apoyaron directa o indirectamente, gracias, sin ustedes esta meta no tendría la importancia que ahora tiene.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE CUADROS.....	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE APÉNDICES	xiv
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVO	3
3. HIPÓTESIS	3
4. REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1. Características distintivas de plantas silvestres y domesticadas.....	4
4.2. El frijol común silvestre.....	5
4.2.1. Distribución	5
4.2.3. Características morfológicas y fisiológicas	7
4.2.4. Otras características	9
4.3. El frijol domesticado.....	10
4.3.1. Importancia social y económica	10
4.3.2. Origen y Distribución.....	12
4.3.3. Características morfológicas y fisiológicas	13
4.3.4. Fenología.....	16
4.4. Importancia del germoplasma	16
4.5. Hábito de crecimiento.....	17
4.5.1. Descripción del frijol de hábito indeterminado tipo IV	18
4.6. Rendimiento agronómico y biológico	19

4.6.1. Componentes morfológicos y fisiológicos del rendimiento agronómico	20
4.6.1.1. <i>Fenómenos biológicos que afectan los componentes morfológicos del rendimiento</i>	20
4.6.2. Rendimiento biológico y sus componentes	21
4.7. Relación entre fuente y demanda de fotosintatos	22
4.8. Estimadores fisiológicos	23
4.8.1. Índice de área foliar (IAF)	23
4.8.2. Duración del área foliar (DAF)	24
4.8.3. Tasa media de asimilación neta (TAN)	24
4.8.4. Índice de llenado de la vaina	25
4.8.5. Índice de cosecha	25
4.9. Germinación de la semilla	26
5. Materiales y métodos	27
5.1. Localización del experimento	27
5.2. Material de frijol utilizado	27
5.3. Siembra y manejo del cultivo	27
5.4. Diseño experimental	29
5.5. Obtención y análisis de datos	30
5.5.1. Temperatura	30
5.5.2. Fenología y grados día desarrollo acumulados	30
5.5.3. Número de vainas	31
5.5.4. Semilla	31
5.5.5. Área foliar	34
5.5.6. Peso seco	34
5.5.7. Cálculo de índices fisiológicos	35
5.5.8. Análisis estadístico	37
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
6.1. Temperatura	38
6.2. Fenología y grados día desarrollo acumulados	38
6.3. Componentes morfológicos y fisiológicos del rendimiento agronómico	41
6.3.1. Número de vainas por planta	42

6.3.2. Semilla	44
6.3.2.1. Germinación de la semilla	48
6.3.3. Área foliar por planta.....	49
6.4. Componentes del rendimiento biológico (peso seco).....	53
6.4.1. Relación raíz/vástago (R/V)	55
6.5. Estimadores fisiológicos.....	56
7. Conclusiones.....	60
8. Literatura citada	61
9. Apéndice	68

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. pH, Conductividad eléctrica (CE) y contenido de cationes y aniones presentes en el agua empleada para la preparación de la solución nutritiva.....	28
Cuadro 2. Duración de las etapas fenológicas en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.....	41
Cuadro 3. Número de vainas por planta en S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.	44
Cuadro 4. Producción de semilla, peso de una semilla, peso seco del vástago, número de semillas por planta y por vaina en S13 y FM en la etapa R9 _F cultivados en hidroponía e invernadero.....	47
Cuadro 5. Porcentaje de germinación de la semilla (criterio agronómico) de S13 y de FM cultivados en hidroponía e invernadero.....	49
Cuadro 6. Peso seco total del vástago en S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.	54
Cuadro 7. Relación Raíz/Vástago (R/V) en porcentaje para S13 y FM en tres etapas cultivados en hidroponía e invernadero.....	56
Cuadro 8. Duración del área foliar e índice de llenado de vaina en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.....	57
Cuadro 9. Tasa media de asimilación neta (TAN) en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.....	57
Cuadro 10. Índice de cosecha en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de <i>Phaseolus vulgaris</i> silvestre en América.	6
Figura 2. Arreglo de las plantas de <i>P. vulgaris</i> con crecimiento indeterminado, en los tutores.	29
Figura 3. Características de vainas que fueron contabilizadas en los muestreos.	31
Figura 4. Pesado de la semilla para la determinación del porcentaje de humedad... ..	32
Figura 5. Prueba de germinación en semilla de frijol. a) S13 y b) FM	33
Figura 6. Medición del volumen de raíz.....	35
Figura 7. Temperatura media semanal registrada en invernadero en el periodo de mayo a septiembre del año 2014.	38
Figura 8. Etapas fenológicas de frijol con crecimiento indeterminado trepador.....	40
Figura 9. Color de la flor. Morada en el frijol S13 (izquierda) y blanca en el frijol FM (derecha).	42
Figura 10. Dehiscencia de la vaina de frijol S13.....	43
Figura 11. Semilla de frijol. a) S13 y b) FM.	45
Figura 12. Vainas de frijol. a) FM y b) S13.	47
Figura 13. Hojas compuestas de frijol. a) S13 y b) FM.....	50
Figura 14. Área foliar de frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441) en tres etapas fenológicas.....	51
Figura 15. Plantas de frijol de S13 y FM con crecimiento indeterminado.	52
Figura 16. Plantas de frijol en la etapa R9 (Madurez). a) FM y b) S13.....	53
Figura 17. Peso seco y volumen de la raíz en frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441) en tres etapas fenológicas.	55

LISTA DE APÉNDICES

Figura A1. Número de vainas en frijol domesticado (Flor de Mayo X16441) y silvestre (S13) en tres etapas fenológicas.....	68
Figura A2. Frijol silvestre S13 cultivado en invernadero.....	69
Figura A3. Frijol domesticado Flor de Mayo X16441 cultivado en invernadero.....	70
Cuadro A1. Área foliar en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero....	71
Cuadro A2. Peso seco por planta en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.	72
Cuadro A3. Peso seco y volumen de la raíz en S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.	73
Cuadro A4. Variantes del Índice de cosecha en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.	73

1. INTRODUCCIÓN

Las formas silvestres y domesticadas del frijol común *P. vulgaris* son importantes: las silvestres como reservorio de germoplasma para el mejoramiento genético del frijol, y las domesticadas por la importancia en la alimentación de la población.

López *et al.* (2005) indican la importancia de conservar los recursos fitogenéticos, ya que las variedades de frijol modernas tienen una base genética reducida y han ido desplazando a variedades tradicionales, que si bien son más heterogéneas y menos productivas, son sumamente adaptadas a su ambiente local y poseen una gran diversidad genética.

La domesticación de las plantas está relacionada con el afán del hombre de buscar mayores rendimientos en los cultivos, lo que se ha logrado mediante una selección de las características que se desean (Schwanitz, 1966), tales como mayor tamaño de la parte útil (vainas y grano p. ej.) y por mayor rendimiento (Hernández X. *et al.* 1979). Sin embargo, la domesticación no solamente debe referirse a la dependencia de la planta con el hombre sino que puede terminar en una interdependencia total entre ambos (Chacón, 2009).

Los estudios que comparan las formas silvestres con las cultivadas de *P. vulgaris* e investigaciones sobre las fuerzas evolutivas que relacionan las dos formas, proporcionan un mejor entendimiento de cómo se ha desarrollado el reservorio de genes del frijol común (Gepts y Debouck, 1991). Las poblaciones silvestres podrían tener características factibles de ser incorporadas a cultivares domesticados. Sin embargo, tal y como lo mencionan Peña *et al.* (2012), antes de aprovechar los beneficios de las poblaciones silvestres de frijol y de incorporarlos efectivamente al fitomejoramiento dichas poblaciones deben ser estudiadas con detalle, desde enfoques científicos diversos, que aseguren su conocimiento. Resulta interesante ampliar el conocimiento del frijol silvestre empleado en este estudio (S13) ya que

debido a investigaciones previas de Herrera y Acosta (2008) se sabe que tiene un alto contenido de proteína (28 %) y al ser empleado como progenitor de poblaciones segregantes se ha observado un mayor número de plantas con rendimiento significativamente superior.

En los cultivos hidropónicos se maneja totalmente la nutrición inorgánica de las plantas, y bajo condiciones apropiadas de otros factores como luz, temperatura y aporte satisfactorio de agua, las plantas son capaces de elaborar numerosas sustancias orgánicas (Sholto, 1985). El cultivo en hidroponía permite maximizar la expresión de las características del material en estudio.

Bajo la premisa de que un mayor número de semillas por planta (que conlleva un menor tamaño) es crucial para la persistencia y la diseminación de la forma silvestre, en contraste en la forma domesticada donde el tamaño de la semilla favorece un mayor rendimiento, se planteó la presente investigación, la cual intenta indagar qué características distinguen al frijol silvestre S13 de su contraparte domesticada Flor de Mayo X16441 que tienen el mismo hábito de crecimiento.

2. OBJETIVO

Comparar el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) silvestre “S13” y domesticado “Flor de Mayo X16441” cultivados en hidroponía, en: a) su fenología; b) crecimiento del vástago y de la raíz y c) algunos estimadores fisiológicos.

3. HIPÓTESIS

Existen diferencias entre el frijol silvestre “S13” y el domesticado “Flor de Mayo X16441” en cuanto a su fenología, crecimiento del vástago y de la raíz y algunos estimadores fisiológicos.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Características distintivas de plantas silvestres y domesticadas

Los individuos de una población de organismos están sujetos a las leyes de la herencia y la evolución. Para fines de este estudio es substancial puntualizar algunos términos, los cuales, según Wilson (1999) se definen de la siguiente manera: *especiación* “es el resultado de la evolución de cualesquier diferencia que impida que dos poblaciones produzcan híbridos fértiles bajo condiciones naturales”, *evolución* “es el cambio en las características de una población en el transcurso del tiempo, lo cual se traduce en ocasiones en la creación de una nueva especie”, así mismo, *especie* “es una población cuyos miembros son capaces de cruzarse libremente bajo condiciones naturales”. Schwanitz (1966) emplea el término “cultivada” cuando hace referencia a la planta domesticada, sin embargo, con la finalidad de estandarizar términos es importante definirlos bajo la premisa de que las especies (plantas y animales) pueden ser silvestres o domesticadas.

Al referirnos a planta silvestre, se dará como entendido que crece o se cría espontáneamente, sin cultivo en bosques o campos (El pequeño Larousse ilustrado, 2016) y domesticar (en el caso de las plantas) es realizar una serie de acciones conducentes al “síndrome de domesticación”. De acuerdo con Weeden (2007) dicho término fue utilizado por primera vez por Hammer (1984), el cual se refiere colectivamente a las diferencias fenotípicas conspicuas que a menudo exhiben las plantas cultivadas en contraste a sus progenitores silvestres (Koinage, *et al.* 1996). En el presente estudio se empleará el término de cultivar como verbo: “trabajar la tierra para que produzca plantas y frutos” y aquí lo entenderemos como tal, independientemente si es planta silvestre o domesticada.

A continuación se mencionan algunas diferencias entre plantas silvestres y domesticadas señaladas por Schwanitz (1966):

- a) Las plantas domesticadas, a diferencia de las silvestres, presentan una característica llamada “gigantismo”, es decir, presentan un tamaño mayor en hojas, tallos, flores, frutos y semillas.
- b) La forma domesticada produce menos frutos y semillas que su forma silvestre.
- c) En la planta domesticada hay pérdida o disminución del mecanismo de dispersión de la semilla.
- d) En las plantas domesticadas hay disminución o pérdida importante de metabolitos secundarios.
- e) En las plantas domesticadas se han perdido aspectos morfológicos exclusivos para protección de la misma.
- f) Maduración de frutos en forma simultánea en las plantas domesticadas, mientras en el silvestre se presenta en forma escalonada.
- g) El ciclo de vida de la planta domesticada es más corto comparada con su forma silvestre.
- h) Hay cambios en la morfología de la raíz, y quizá haya sido modificada intencionalmente si es éste el órgano de interés para el hombre.

Actualmente hay nuevas herramientas que permiten detectar la diferenciación genética entre las formas silvestres y domesticadas de frijol común y establecer grados de similitud entre las accesiones intermedias, tal es el caso del marcador ISTR (Inverse Sequence Tagged Repeat) (Castellanos *et al.*, 2017).

4.2. El frijol común silvestre

4.2.1. Distribución

Estrictamente se consideraría que las plantas de *Phaseolus vulgaris* en su forma silvestre crecerían vigorosamente en una vegetación no perturbada, sin embargo, Delgado *et al.* (1988) menciona que debido a la gran deforestación en México se pueden encontrar en ciertas vegetaciones secundarias y en un futuro con mayor frecuencia en áreas perturbadas; según Toro *et al.* (1990) para poder determinar la

distribución de frijol común silvestre, considerando que pueden habitar dichas áreas alteradas, y para no confundir las plantas con frijoles “maleza” las cuales tienden a desaparecer si se alteran las condiciones que le permitieron proliferar, deben tomarse en cuenta varias características de los frijoles que sí se han encontrado en vegetaciones “clímax” natural; dicho autor ilustra la distribución de frijol común silvestre en la Figura 1, que tomando como base la colección tenida del CIAT hasta 1990 muestra una distribución casi continua (por lo general por encima 1000 msnm) extendiéndose desde Chihuahua México, hasta San Luis, Argentina.



Figura 1. Distribución de *Phaseolus vulgaris* silvestre en América.

Fuente: Datos según la colección del CIAT hasta 1990 (Toro et al. 1990).

4.2.3. Características morfológicas y fisiológicas

No se sabe a ciencia cierta el aspecto del frijol común silvestre en sus primeros intentos de domesticación; se hacen deducciones de lo que se observa actualmente, los restos arqueológicos muestran un aumento de tamaño de la semilla en el frijol domesticado (aunque también el tamaño de la semilla aumenta a medida que se avanza hacia el sur del rango de la distribución del frijol común silvestre, dependiendo del centro de domesticación en el que se encuentre) (Toro *et al.*, 1990).

La alta dehiscencia abrupta en las vainas del frijol común silvestre es clave como principal característica (Schwanitz, 1966; Miranda, 1979; Delgado *et al.*, 1988; Toro *et al.*, 1990; Gepts y Debouck, 1991). En consonancia las vainas son pequeñas midiendo de 6 a 8 cm de largo con 5 a 8 óvulos, a diferencia de las domesticadas que bien pueden ser pequeñas pero generalmente son de mayor tamaño llegando a medir hasta 30 cm (Gepts y Debouck, 1991). Sin embargo, algunas variedades primitivas de frijol actualmente tienen dehiscencia y pueden ser similares a las silvestres, se cree que difieren por lo menos en el tamaño de semilla ya que son mucho más pequeñas en las silvestres (Toro *et al.*, 1990). Para el caso de las semillas mexicanas de frijol común silvestre, pueden medir de 5 a 7 mm de longitud y 3.5 a 5 mm de anchura según señalan Gepts y Debouck (1991) y Hernández X. *et al.* (1979) señalan que el largo de la semilla silvestre puede ser de 3 a 7 mm, con un ancho de 3 a 6 mm. Es precisamente en las características de la semilla en las que se enfoca el CIAT para clasificar e identificar los materiales de las variedades que se cultivan en varios países, tales como tamaño y color, quienes emplean en su catálogo nueve grupos de colores y el tamaño se expresa como peso de 100 semillas, pudiendo ser pequeños, medianos y grandes (Voyses, 1983) y pueden ser usadas como descriptores para las formas silvestres, por lo que Gepts y Debouck (1991) las catalogan como pequeñas, pesando de 6 a 14 g/100 semillas. Así mismo puede emplearse otro criterio para expresar el tamaño de semilla y este criterio se basa en sus dimensiones tal como lo enuncian varios autores mencionados por Singh (1991).

La raíz suele ser fibrosa y fasciculada en frijol común silvestre (Delgado *et al.*, 1988; Gepts y Debouck, 1991), con nodulación abundante (Delgado *et al.*, 1988).

El hábito de crecimiento del frijol común silvestre *in situ* comúnmente es indeterminado trepador (Miranda, 1979; Delgado *et al.*, 1988; Gepts y Debouck, 1991), hábito que se caracteriza regularmente por presentar de 20 a 30 nudos principales en el tallo, el domesticado con el mismo hábito de crecimiento puede presentar la misma cantidad de nudos. Los entrenudos en la forma silvestre son largos midiendo de 10 a 20 cm, mientras en el domesticado pueden medir lo mismo o pueden ser cortos (2-5 cm) (Gepts y Debouck, 1991). Sin embargo, Bayuelo *et al.* (1999) señalan lo siguiente: pueden presentar de 52.3 a 109.5 racimos, de 8.4 a 15.2 ramas por planta, de 0.2 a 0.3 cm de diámetro del tallo principal, de 48.4 a 65 botones florales por planta, de 73.5 a 145 inflorescencias por planta, de 29.7 a 71.7 dm² en el área foliar, de 108.5 a 205.5 hojas por planta, de 150 a 267 cm de longitud del tallo principal, de 12.8 a 35.5 inflorescencias del tallo principal, de 24.1 a 30 nudos en el tallo principal, de 11.4 a 15.5 nudos por rama, de 124 a 261.8 nudos por planta, de 136.6 a 284.2 vainas por planta, de 307.6 a 512.5 semillas por planta, 2.5 semillas por vaina, de 60 a 160 mg en el peso de una semilla, de 17.1 a 50 g en el peso de la semilla por planta (rendimiento) y de 136.5 a 399.6 g por m².

La inflorescencia es un racimo que tiene hasta 7 cm de largo, con 2 a 5 nudos biflorales (Delgado *et al.*, 1988).

Las hojas son pequeñas (Gepts y Debouck, 1991); los folíolos son membranosos, de ovados a subrómicos-lanceolados, así mismo, tanto en su parte adaxial como abaxial se encuentra en menor o mayor proporción pubescencia intercalada y enganchada bastante estrigilosa, estos folíolos pueden medir de 3.2 a 9 cm de longitud y de 3 a 7 cm de ancho; agudos en la punta y redondeados o truncados en la base (Delgado *et al.*, 1988).

Bajo el hábito de crecimiento indeterminado trepador la altura de la planta silvestre es generalmente de 2 a 5 m, las inflorescencias son laterales y no terminales (Gepts y Debouck, 1991). Las bractéolas son ovadas a lanceoladas, raramente orbiculadas,

de 3.5 a 6 mm de longitud y de 2.5 a 4 mm de ancho, no se añade completamente al cáliz en material fresco, generalmente son persistentes (Delgado *et al.*, 1988).

Gepts y Debouck (1991) mencionan que el estandarte de las flores puede estar curvado hacia atrás, y que no es común que las flores sean blancas; sobre este último punto, García-Hernández *et al.* (1999), registraron flores blancas, rosas y moradas en frijol común silvestre de hábito de crecimiento determinado, siendo mayor la proporción para blanco y rosa; y para hábito de crecimiento indeterminado los colores rosa, lila y morado, siendo los de mayor proporción lila y morado; mientras que en domesticado el color predominante de la flor es blanca, al menos registrado para el tipo de crecimiento indeterminado; Delgado *et al.* (1988) indican que el tamaño de la flor en frijol común silvestre puede ser de 13 a 18 mm de longitud.

El gineceo es un ovario con 7 a 10 óvulos (Delgado *et al.*, 1988). Las vainas del frijol común silvestre de hábito de crecimiento indeterminado se ha visto que pueden ser de color rosa y morado, predominando el morado, mientras que en el domesticado predomina el color castaño claro; y el hipocótilo para el caso de la forma silvestre es morado y rosa, entretanto en la forma domesticada es rosa (García-Hernández *et al.*, 1999).

El frijol silvestre es sensible al fotoperiodo (Toro *et al.*, 1990).

En su hábitat el frijol común silvestre es anual, o raramente perenne de corta vida (Delgado *et al.*, 1988) y Miranda (1979).

4.2.4. Otras características

La fenología en el frijol común silvestre es susceptible a cierto grado de modificación si se cultiva, ya sea en campo o en invernadero. En este último caso si se cultiva en invernadero el ciclo puede acortarse (Peña *et al.*, 2012), así mismo puede haber fluctuaciones significativas en algunas etapas fenológicas de una misma muestra de frijol silvestre entre diferentes años de cultivo (cultivado en campo) (Bayuelo *et al.*,

1997). En el caso de un frijol común silvestre, cultivado en invernadero con un hábito de crecimiento indeterminado trepador, Meza *et al.* (2015) reportan 127 días a madurez fisiológica.

Existen algunas características que también se han evaluado en frijol común silvestre que no se tratan en el presente trabajo, que fueron compilados por Peña *et al.* (2012), como son: índice estomático; intercambio gaseoso y fotosíntesis foliar; actividad fotosintética en los frutos; clorofila foliar (contenido de clorofila, fluorescencia); actividad fotosintética en los frutos; reacción al frío; en la semilla se ha estudiado temperatura, latencia, germinación, almacenamiento, dimensiones y otros aspectos morfológicos de ésta, así como reacción a factores abióticos de estrés, diferencias hícticas y reacción al déficit de agua; tolerancia radical a la sequía; y en cuanto al grano, calidad, dureza, cocción, composición química, minerales, proteínas, fibra, endurecimiento y reacción al almacenamiento.

4.3. El frijol domesticado

4.3.1. Importancia social y económica

Del año 2010 en adelante, la cosecha mundial de frijol ha tenido una ligera tendencia al alza, debido a aumentos en la superficie cosechada y rendimientos. Los principales productores de frijol son: Myanmar, India, Brasil, México, Tanzania, Estados Unidos y China, los cuales aportan el 64.8 % de la oferta global (FIRA, 2015).

En México, el frijol es el tercer cultivo en importancia por la superficie que ocupa, después del maíz y el sorgo. En el año 2014 se cosecharon 1.68 millones de hectáreas de frijol, con una producción de 1.27 millones de toneladas. El consumo de frijol en los últimos tres años fue en promedio de 1.1 millones de toneladas, esto es el 88 % de la producción nacional promedio de frijol entre 2013 y 2015. Sin embargo, México importó 82, 206 toneladas de frijol en 2014 (FIRA, 2015).

El consumo *per capita* mundial es de 2.5 kg por persona por año. En el centro y este de África es cercano a 31 kg. En México se reportó un consumo *per capita* de 16 kg en la década de 1980 y en la actualidad es de 10 kg sin embargo sigue siendo de los más altos en Latinoamérica). Lo anterior es debido a diversos factores entre los que destacan la migración, el urbanismo, la reducción en el número de miembros en las familias, cambios en el poder adquisitivo, y la incorporación de la mujer a la actividad laboral. Asimismo, se observa que ha ocurrido sustitución del consumo de frijol en grano por frijol industrializado, debido a su más fácil preparación (FIRA, 2015).

El 79.5 % de la cosecha nacional en 2014 se distribuyó en: Zacatecas (27.9 %), Durango (15.1 %), Sinaloa (12.7 %), Chihuahua (9.8 %), Chiapas (4.8 %), San Luis Potosí (4.7 %) y Guanajuato (4.5 %) (FIRA, 2015).

En 2014, el 31.1 % de la producción nacional fue frijol Pinto, el 25.4 % frijol Negro (Negro San Luis, Negro Jamapa y Negro Querétaro, principalmente) y el 24.2 % frijol claro: Flor de Mayo (9.7 %), Flor de Junio (7.7 %), Bayo (3.6 %), Canario (1.9 %) y otros claros (3.2 %). El 16.3 % del volumen total correspondió a frijol Azufrado, Mayocoba y Peruano. En Sinaloa se produce principalmente frijol Azufrado, en Zacatecas predomina el cultivo de frijol Negro, así como las variedades Flor de Mayo y Flor de Junio, mientras que en Durango y Chihuahua se cultiva en mayor proporción el frijol Pinto (principalmente de la variedad Saltillo). Sinaloa es la entidad con la mayor superficie cultivada de riego, y reporta los más altos rendimientos en el cultivo del frijol entre los principales estados productores, con 1.34 t/ha. En comparación con el resto de entidades productoras de frijol de temporal, la mayor productividad se registra en el estado de Chihuahua, con 1.0 t/ha en 2014. Sin embargo el 87 % de la superficie destinada a este cultivo se ubica en áreas de temporal (FIRA, 2015).

En México, la regionalización, la cultura, hábitos de consumo, gustos y preferencias juegan un papel importante en la demanda de las distintas variedades de frijol. El consumo regional principalmente se diferencia en el color del grano (Norte-pintos, Occidente-claros, Centro y Sur-Negros); aunque en el mercado mexicano se ofrece

gran cantidad de variedades de frijol, la demanda se concentra principalmente en los negros, pintos, flor de mayo, flor de junio, peruanos y bayos, y ha sido también en éstos donde la industria de frijol se ha basado para darles un valor agregado; lo que provoca un superávit en una gran cantidad de variedades y déficit en otras, no obstante con eso éstas compiten con variedades provenientes de Estados Unidos (Negro Michigan y pinto americano) que son de mejor calidad y con un buen precio. Aunado o consecuentemente a esto, otros factores que han influido de manera importante en el consumo son el urbanismo, la migración, el crecimiento poblacional, el poder adquisitivo, el clima, la reducción en el número de miembros en las familias y la incorporación de la mujer a la actividad laboral (Rodríguez *et al.*, 2010).

4.3.2. Origen y Distribución

Existe la necesidad de tomar en cuenta diferentes métodos para determinar el centro de origen de las plantas domesticadas, tales como la historia, estudios botánicos, arqueológicos y filogenia (De Candolle, 1885). Bajo estas normas, diversas evidencias incluyendo análisis con espectrómetro de masas (Accelerator Mass Spectrometry-AMS) de restos arqueológicos vegetales más antiguos de *Phaseolus vulgaris* domesticados (Kaplan y Lynch, 1999) y la distribución actual de sus parientes silvestres (Toro *et al.*, 1990) dan testimonio de dos centros de domesticación: el Mesoamericano y el Andino, éste es un caso de domesticación múltiple e independiente, que según los resultados de Kaplan y Lynch (1999) ocurrieron probablemente en diferente tiempo iniciando en el Perú. Aunque se ha propuesto la presencia de un tercer centro de domesticación como lo mencionan Hernández López *et al.* (2013) las pruebas actuales no permiten justificar al “Norte Andino” como un centro de domesticación adicional.

México forma parte del centro de domesticación Mesoamericano contando con una gran diversidad de *Phaseolus* silvestres, criollos y mejorados (Peña *et al.*, 2012).

Exploraciones botánicas realizadas en México han mostrado que las variedades silvestres de *Phaseolus vulgaris* L., (frijol común) crecen a lo largo de la Sierra Madre

Occidental, también se han encontrado variedades silvestres en Guatemala y al noroeste de Argentina, con una mayor frecuencia en altitudes de 1,200 m.s.n.m., sin embargo, se cultiva desde el nivel del mar hasta los 2700 m.s.n.m., además, en el área de distribución de las variedades silvestres de frijol común se encuentra una amplia diversidad genética de la especie y existen otras especies del género *Phaseolus* conviviendo con éste (Miranda, 1967).

La temperatura óptima para el crecimiento del frijol es de 20 a 25 °C, aunque puede soportar temperaturas extremas de 5 a 40 °C (Masaya y White, 1991) y la temperatura base (temperatura mínima a la que estiman deja de crecer el follaje) más adecuada para las variedades mexicanas es de 8.3 °C (Barrios y López, 2009).

4.3.3. Características morfológicas y fisiológicas

El frijol domesticado es una planta C-3 (Kohashi, 1990), muestra una variación de hábito de crecimiento desde trepador hasta tipo mata, es principalmente autógamo, sin embargo la polinización cruzada puede ocurrir en diferentes grados según la variedad, la distancia entre plantas, las condiciones ambientales de la localidad y la época del año y es mayor el porcentaje en el frijol domesticado que en la forma silvestre (Miranda, 1979). Chaves *et al.* (2014) menciona una polinización cruzada baja en frijol común (menor del 1 %) y Miranda (1979) hace mención de varios autores que señalan un porcentaje de cruzamiento cruzado no mayor al 13 %.

A lo largo del tallo (eje principal) de *P. vulgaris* existen varios nudos donde se encuentran las yemas principales que pueden dar origen a ramas (nudos vegetativos) o inflorescencias (nudos reproductivos), las ramas darán origen a otras ramas que tendrán la función de eje y tendrán la estructura del eje principal. Todas las yemas tienen a su vez tres yemitas. En el caso de un nudo vegetativo los ejes de la yema y de las yemitas originarán inflorescencias o ramas, en orden variable. Un nudo reproductivo dará origen a tres yemitas las cuales serán flores y por lo menos una de ellas será abortiva (Engleman, 1979). La floración (en una planta y a nivel inflorescencia) y el desarrollo consecuente de los frutos son secuenciados o

"escalonados", el lapso de tiempo en el que estos ocurran dependerá según la variedad, el hábito de crecimiento y las condiciones ambientales. La producción de estructuras reproductivas (botones, flores y vainas jóvenes) son mayores que el de las vainas normales que llegan a alcanzar la madurez, esto debido a que presentan abscisión o caída controlada fisiológicamente, modulada por el ambiente; además por la ocurrencia de vainas "vanas" que bien pueden ser retenidas en la planta hasta la madurez (Kohashi, 1990).

La semilla es exalbuminosa (semilla sin endospermo a la madurez). Las partes externas más importantes son la testa o cubierta, el hilo (cicatriz dejada por el funículo, el cual conecta la semilla con la placenta), micrópilo (abertura en la cubierta o corteza de la semilla cerca del hilo) y la rafe (proveniente de la soldadura del funículo con los tegumentos externos del óvulo (CIAT, 1982 a).

El sistema radical es pivotante, aunque puede ser también fasciculado y fibroso en algunos casos (CIAT, 1982 a), las raíces forman nódulos (Kohashi, 1990) y en sus partes jóvenes se pueden apreciar los pelos radicales o absorbentes; éstos, en conjunto con la región subapical, juegan un papel importante en la absorción de agua y nutrimentos. Debido a la simbiosis, que puede establecerse entre el frijol y bacterias del género *Rhizobium*, la raíz puede presentar nódulos distribuidos en la parte superior y media del sistema radical. Por lo tanto, el aspecto y tamaño que presente dicho sistema radical, dependen de características del suelo, tales como la textura, estructura, porosidad, capacidad de retención de agua, temperatura, contenido de nutrimentos, etc. (CIAT, 1982 a).

Vástago o porción aérea: el tallo principal, el cual se origina directamente del desarrollo de la plúmula, en éste se encuentran los dos cotiledones, que posteriormente se desprenden y el sitio donde se encontraban insertados constituye el primer nudo; en el siguiente nudo, se localizan las hojas primarias, que son simples. El resto de las hojas se encuentran en posición alterna y son compuestas. En las axilas, tanto de los cotiledones como de las hojas primarias y de las hojas compuestas, se encuentran las yemas axilares, estas pueden dar origen a una rama

secundaria o a una inflorescencia. La porción del tallo comprendida entre dos nudos constituye un entrenudo. El tallo tiene muchas características de las cuales algunas son muy utilizadas en la identificación de variedades. Dentro de éstas se pueden mencionar: color, pilosidad, tamaño, número de nudos, carácter de la parte terminal, diámetro, largo de los entrenudos, aptitud para trepar, filotaxia y ángulos de las inserciones de diferentes partes de la planta (CIAT, 1982 a).

Diversos investigadores, entre ellos Harper (1977), han apoyado la idea de conceptualizar al vástago o porción aérea de la planta, como un conjunto de módulos que tienen un sistema radical común. Cada unidad modular está constituida de un entrenudo, la hoja correspondiente en la parte superior, y las yemas que esta subtiende; a esta unidad se le da el nombre de fitómero.

Lépiz *et al.* (2010) hicieron una caracterización morfológica de formas cultivadas, silvestres e intermedias de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae) de hábito trepador, y registraron que la forma domesticada muestra valores mayores a la silvestre en longitud y anchura de vaina; longitud, anchura y espesor de semilla y peso de 100 semillas; el peso de 100 semillas fue de 5.04 g (silvestre) contra 42.93 g (domesticada). Las variables longitud de tallo y número de entrenudos no mostraron diferencias entre las formas de frijol trepador. Los caracteres número de vainas por planta y número de semillas por vaina identificados como componentes del rendimiento, no se redujeron en el frijol domesticado; estos caracteres se asocian con el mayor potencial de rendimiento de los frijoles domesticados.

En la clasificación e identificación de especies, razas y variedades vegetales, los rasgos morfológicos desempeñan un papel importante; así mismo, son elementos básicos para conocer y medir la variabilidad genética dentro de una población (Meza, *et al.* 2015).

4.3.4. Fenología

En frijol, el ciclo biológico se ha dividido en dos fases principales sucesivas: vegetativa y reproductiva. Según el CIAT (1982 b), la fase vegetativa inicia con la germinación de la semilla y termina con la aparición de los primeros botones florales, y se divide en cinco etapas: germinación (V0), emergencia (V1), hojas primarias (V2), primera hoja compuesta (V3) y tercera hoja compuesta (V4). La fase reproductiva comprende desde la aparición de los botones florales, hasta la madurez fisiológica de la semilla y consta de cinco etapas: prefloración (R5), floración (R6), formación de vainas (R7), llenado de vainas (R8) y madurez fisiológica (R9).

Meza *et al.* (2015) indican que las dos etapas de desarrollo de mayor duración en especies silvestres del género *Phaseolus* se registraron entre la tercera hoja compuesta (V4) y la prefloración (R5), y entre llenado de vaina (R8) y madurez fisiológica (R9). Con disponibilidad de humedad y ausencia de heladas las especies perennes siguen floreciendo y produciendo frutos, aún después de que las primeras vainas alcanzan la madurez.

4.4. Importancia del germoplasma

Según Krishnamurthy y Sahagún (1991), el germoplasma se encuentra en la lista de los recursos naturales, el cual es el más importante y probablemente único en el planeta Tierra, ya que dicho germoplasma determina el desarrollo de cada ser vivo.

El germoplasma es el material que controla la herencia biológica; la suma de las cualidades y potencial que se derivan genéticamente de los ancestros, El germoplasma gobierna el proceso de la herencia y los genes son parte de este proceso. El germoplasma es importante para la agricultura y pertenece a una de las siguientes fuentes: parientes silvestres, parientes semi-silvestres (weedy relatives), cultivares primitivos, cultivares modernos y material élite (Krishnamurthy y Sahagún, 1991).

Los parientes silvestres son, estrictamente hablando, producto de la evolución natural y pueden proveer genes importantes a los cultivos. Debido a que estas formas vegetales han permanecido expuestas a la naturaleza, usualmente son portadoras de genes que permiten enfrentar exitosamente los riesgos que la naturaleza les plantea, tales como temperaturas altas, heladas, sequías, inundaciones, suelos salinos, plagas y enfermedades (Krishnamurthy y Sahagún, 1991).

Las definiciones de “germoplasma” que aparecen en el “Elsevier’s Dictionary of Plant Genetic Resources” (Elsevier, 1991; IPGRI, 1991) son textualmente: “El material genético que constituye la base física de la herencia y que es transmitido de una generación a otra mediante las células germinales” y “Un individuo o un clon que representa a un tipo, especie o cepa que podría ser un archivo (o almacén) para la agronomía, la historia u otras razones”.

El trabajo de los bancos de germoplasma involucra aspectos de exploración, colección, conservación, caracterización, evaluación, documentación, entrenamiento e investigación. El objetivo esencial es la utilización de los recursos genéticos en el desarrollo agrícola (Krishnamurthy y Sahagún, 1991). Uno de los bancos de germoplasma más famosos se debe al ruso Vavilov (Anderson, 1997).

4.5. Hábito de crecimiento

Las plantas de frijol pueden ser de hábito de crecimiento determinado o indeterminado, lo cual está definido fundamentalmente por las características de la parte terminal del tallo y de las ramas. Si al empezar la fase reproductiva el tallo y las ramas terminan en un racimo, la planta es de hábito determinado y si terminan en un meristemo vegetativo, la planta es de hábito indeterminado (CIAT, 1982 a).

El CIAT (1982 a) ha definido cuatro tipos de hábito de crecimiento en base a las características de la parte terminal del tallo, el número de nudos, la longitud de los entrenudos y la aptitud para trepar: Tipo I, determinado arbustivo; Tipo II,

indeterminado arbustivo; Tipo III, indeterminado postrado; y Tipo IV, indeterminado trepador, del cual se presentará la descripción por tratarse del tipo utilizado en este estudio.

4.5.1. Descripción del frijol de hábito indeterminado tipo IV

Debouck e Hidalgo (1984) señalan que el frijol tipo IV presenta un hábito de crecimiento indeterminado trepador, éste es el tipo de hábito de crecimiento que se encuentra generalmente en la asociación maíz-frijol, el cual tiene las siguientes características:

- A partir de la primera hoja compuesta el tallo desarrolla la doble capacidad de torsión lo que se traduce en su aptitud trepadora.
- Ramas muy poco desarrolladas (exceptuando algunas), a consecuencia de la dominancia apical.
- El tallo el cual puede tener de 20 a 30 nudos, puede alcanzar más de dos metros de altura si se le proporciona un soporte adecuado.
- La etapa de floración es significativamente más larga que la de los otros hábitos, de tal manera que en la planta se presentan a un mismo tiempo las etapas de floración, formación de las vainas, llenado de las vainas y maduración.

Por lo general hay de 10 a 20 nudos en el tallo de las plantas de los tipos II y III; este número de nudos se considera intermedio si se compara con el que tienen las plantas de los tipos I y IV; la altura de la planta es también intermedia (Debouck e Hidalgo, 1984).

En los tipos IV se tienen subdivisiones según la distribución de las vainas en la planta; por ejemplo, cuando las vainas se distribuyen uniformemente a lo largo de la planta se denomina IVa y si las vainas se concentran en la parte superior de la planta se denomina IVb (Debouck e Hidalgo, 1984).

La distinción entre los hábitos indeterminados podría basarse en diferencias en las correlaciones internas entre las partes de las plantas, por ejemplo: el diferente grado de expresión de la dominancia apical del tallo en las plantas de hábito de crecimiento tipo III y las de tipo IV, en relación con el desarrollo de las ramas (Debouck e Hidalgo, 1984).

4.6. Rendimiento agronómico y biológico

El rendimiento es la expresión fenotípica resultante final de los procesos fisiológicos que se reflejan en la morfología y en la fisiología de la planta (Kohashi, 1990).

El rendimiento puede referirse al rendimiento biológico, el cual representa el total de materia seca del sistema de una planta, o rendimiento económico (rendimiento agronómico), que se refiere al peso o volumen de los órganos vegetales que constituyen el producto de valor económico o agrícola (Gardner *et al.*, 1985).

El rendimiento agronómico, es el resultante de eventos previos como la formación de raíces, tallos, hojas y flores; es decir, de una "infraestructura", sin la cual sería imposible lograr algún rendimiento (Kohashi, 1990).

Gardner *et al.* (1985) mencionan que el rendimiento del grano es el producto de un número de subfracciones llamadas "componentes del rendimiento" y lo expresan de la siguiente forma:

$$R = N_r N_g P_g$$

Donde:

R=	rendimiento de grano
N _r =	número de unidades reproductivas
N _g =	número de granos por unidad reproductiva
P _g =	peso promedio por grano

En base a lo anterior Kohashi (1990) aplicó este concepto al caso particular del frijol, de esta manera, Escalante y Kohashi (2015) emplearon los dos conceptos de rendimiento para desglosar los componentes morfológicos y fisiológicos del

rendimiento agronómico en el frijol; así mismo los componentes del rendimiento biológico.

Es importante realizar el análisis de crecimiento, su dinámica y desglosar el rendimiento en sus componentes para poder saber de qué manera influyen diversos factores del medio, una práctica agrícola o la misma variedad, es decir, el análisis de los componentes del rendimiento nos permite saber, en una situación dada, cuál de ellos es el que limita en mayor grado al rendimiento (Kohashi, 1990).

4.6.1. Componentes morfológicos y fisiológicos del rendimiento agronómico

Los componentes morfológicos y sus cambios influyen de manera directa en el rendimiento. Algunos componentes morfológicos son los siguientes: número de semillas normales, tamaño de la semilla, número de vainas normales, número de semillas normales por vaina (SNV), número de flores, número de botones, número de racimos, número de nudos y número de ramas (en el frijol los componentes morfológicos más correlacionados con el rendimiento son el número de vainas y de semillas normales.). Entre los componentes fisiológicos se tienen el número de hojas y el área foliar, para esta última existen métodos directos e indirectos para determinarla; la mayoría son destructivos (Escalante y Kohashi, 2015).

4.6.1.1. Fenómenos biológicos que afectan los componentes morfológicos del rendimiento

En las transformaciones de los órganos reproductores, cuya secuencia conduce a la formación de la semilla, ocurren diferentes fenómenos fisiológicos, tales como la polinización, la fecundación, la abscisión de órganos reproductores (botones, flores, vainas), el aborto de semillas, ocurrencia de vainas vanas y rudimentos abortados. Todos ellos pueden contribuir a abatir el rendimiento (Escalante y Kohashi, 2015).

A partir de los botones que son retenidos en la planta, se produce diariamente un número variable de flores, siguiendo una tendencia semejante a la de una curva de campana, durante todo el periodo de floración. Las primeras flores en el periodo de

floración tienen una probabilidad más alta de transformarse en vainas maduras y a mayor número de días después del inicio de la floración aumenta el porcentaje de flores que se transforman en vainas vanas o sufren abscisión prematura (Prieto y Kohashi, 1981), García-Esteva y Kohashi (1992) mencionan que las vainas que han logrado una longitud de 3 cm o más generalmente ya no sufren abscisión (esto observado en frijol domesticado, no registrado aún en frijol silvestre donde habitualmente sus vainas tienen una longitud menor al llegar a madurez). El número de semillas normales por vaina también disminuye conforme fue ocurriendo la anthesis de las flores que les dieron origen y aumenta el número de semillas abortadas por vaina (Prieto y Kohashi, 1981). Asimismo, en una misma inflorescencia, las primeras flores que se desarrollan son las de las yemas laterales de cada triada floral (racimo secundario) CIAT (1982a). La abscisión de órganos reproductores es la fuente más importante de disminución del rendimiento potencial. Al haber floración escalonada se ocasiona lo mismo en el desarrollo de los frutos, lo cual permite la imbricación o traslapeo del periodo de desarrollo de los botones y flores, con el crecimiento de las vainas y llenado de las semillas. Esto hace posible que la planta ajuste la potencia de la demanda, con la de la fuente. La abscisión de órganos reproductores y de hojas aumenta cuando la planta ha sido sometida a agobio (estrés) (Kohashi, 1990).

4.6.2. Rendimiento biológico y sus componentes

El rendimiento biológico se expresa en términos de peso; estrictamente la biomasa debería involucrar solo tejidos vivos, pero dada la dificultad de separar tejidos no vivos (como la corteza y el xilema) de los vivos, se incluyen a ambos. Así mismo, regularmente el peso de la raíz no se toma en cuenta, sin embargo debería considerarse. La materia seca se obtiene al colocar el material vegetal en una estufa a 80 °C, hasta que el peso sea constante (Escalante y Kohashi, 2015).

4.7. Relación entre fuente y demanda de fotosintatos

El concepto de fuente y demanda de fotosintatos es más bien fisiológico que morfológico, ya que un órgano puede actuar en cierto momento como demanda y después como fuente e incluso la transición puede ser gradual en un mismo órgano, como es el caso de las hojas; es así como a todas aquellas regiones que en cierto momento son productoras o exportadoras de fotosintatos se consideran como "fuente". Son consideradas como fuente principal las hojas, pero pueden ser en cierto momento los tallos y raíces que están reexportando fotosintatos que fueron almacenados en forma temporal (Taiz y Zeiger, 2010), tal como mencionan Volkmar y Woodbury (1995) que ocurre en *Phaseolus perennes*, donde la raíz puede convertirse en fuente en etapas iniciales del rebrote, posterior al primer año ya que acumulan reservas.

Por otro lado, a todos aquellos órganos o parte de ellos que se encuentran en crecimiento activo y requieren o demandan fotosintatos, se les considera "demanda". Estas pueden ser, por ejemplo, las raíces jóvenes, las hojas jóvenes que importan fotosintatos, tallos (especialmente en sus porciones apicales), pero muy especialmente las vainas y semillas durante el periodo reproductivo. Vainas y semillas pueden representar alrededor del 40 % de la biomasa aérea de una planta, y además los fotosintatos se acumulan en estas estructuras en un lapso de alrededor de la mitad del periodo de desarrollo de la planta (Kohashi, 1990).

La capacidad de exportación de fotosintatos desde la hoja se inicia en el ápice de la lámina y progresa hacia la base hasta que toda la hoja se convierte en exportadora de azúcares. El carbono fijado en una célula puede tener varios destinos como: a) síntesis de compuestos de reserva, b) utilización metabólica para cubrir necesidades energéticas y para proporcionar cadenas carbonadas para síntesis de otros compuestos y c) síntesis de compuestos de transporte. La regulación de la partición del carbono fijado en las diversas rutas metabólicas se denomina "asignación" y ésta es un proceso clave en los tejidos demanda, mientras que la distribución diferencial de fotoasimilados en la planta se denomina "reparto", el reparto determina los

patrones de crecimiento y este patrón de crecimiento se da tanto en el vástago como en la raíz. La mejora de los rendimientos de los cultivos vegetales es uno de los objetivos del estudio de la asignación y reparto de asimilados (Taiz y Zeiger, 2010). Existe una interdependencia funcional entre el sistema radical y el vástago en una planta, la raíz sirve de sostén al vástago y le proporciona agua, nutrimentos, y algunas hormonas; a su vez el vástago proporciona fotosintatos y algunas hormonas a la raíz; las fitohormonas participan en la coordinación funcional de la planta. La relación raíz-vástago está definida como el peso seco de raíz por unidad de peso seco de vástago (Volkmar y Woodbury, 1995).

Tanto en el caso de la fuente como en el de la demanda, puede hacerse referencia al "tamaño", que puede ser el área foliar, en el primer caso, o el número de botones y flores, en el segundo. También se puede hacer referencia a "actividad", que sería la tasa de asimilación neta o la tasa fotosintética en el caso de la fuente, y la tasa de crecimiento, en el de la demanda (Kohashi, 1990).

El área foliar es importante porque es la base para la producción de fotosintatos que se traducen en el peso seco de la misma hoja y de otros órganos de la planta. Así mismo es determinante en la pérdida de agua de la planta por la transpiración. El área foliar de una planta está constituida por el número de hojas y el área individual de cada hoja activa (Jeuffroy y Ney, 1997); y puede considerarse como la fuente principal de fotosintatos, ya que la lámina (el clorénquima del mesófilo) es la productora prístina de fotosintatos; la porción con la que contribuyen las otras partes verdes (pecíolo, tallos jóvenes, pericarpio) es mucho menor.

4.8. Estimadores fisiológicos

4.8.1. Índice de área foliar (IAF)

Es el área de las láminas foliares por unidad de área sembrada. Por convención se considera solamente el área de una cara de la hoja, calculada bajo la siguiente fórmula (Tanaka y Yamaguchi, 2014):

$$IAF = \frac{\text{Área foliar}}{\text{Área sembrada}}$$

El índice de área foliar es adimensional.

4.8.2. Duración del área foliar (DAF)

Es el área bajo la curva que resulta de graficar el IAF contra el tiempo, entre dos momentos particulares. La DAF es un área pero debido a que el IAF no posee unidades, la DAF determinada mediante integración se expresa en unidades de tiempo, usualmente días o semanas IAF. El valor de la DAF indica los días durante los cuales el cultivo o la planta mantendría un IAF igual a 1, por lo que se proporciona una estimación del tiempo en el cual el follaje es funcional como maquinaria productora de fotosintatos (Rodríguez y Leihner, 2006). Si no se conoce la ecuación de la curva, al tratarse de pocos puntos graficados, se puede obtener un valor aproximado de la DAF mediante la fórmula según Escalante y Kohashi (2015):

Donde:

$$DAF = \frac{(IAF_1 + IAF_2)(t_2 - t_1)}{2}$$

IAF₁= índice de área foliar en un tiempo inicial.

IAF₂= índice de área foliar en un tiempo final.

t₁= tiempo inicial (días después de la siembra).

t₂= tiempo final (días después de la siembra).

4.8.3. Tasa media de asimilación neta (TAN)

La tasa media de asimilación neta es una medida de la eficiencia del follaje, es la ganancia fotosintética neta que se asimila por unidad de área foliar y el tiempo (Gardner *et al.*, 1985); por lo que es la velocidad de incremento en peso por unidad de área foliar, expresada bajo la siguiente función (Tanaka y Yamaguchi, 2014):

$$TAN = \frac{dw}{dt} * \frac{1}{IAF}$$

Donde:

W=peso de la planta.

t=tiempo expresado en días.

IAF= índice de área foliar (expresado en días).

4.8.4. Índice de llenado de la vaina

El índice de llenado de la vaina (iv) es un parámetro para determinar el porcentaje de materia seca que se acumula en la semilla en relación al total acumulado en el fruto (pericarpio + semilla) y nos da una idea del grado de llenado de la vaina (Escalante y Kohashi, 2015).

4.8.5. Índice de cosecha

El índice de cosecha (IC) es la relación entre el rendimiento agronómico y el biológico; se determina una vez que las plantas han llegado a su madurez fisiológica, y se calcula mediante el planteamiento siguiente (Wallace *et al.*, 1972):

$$IC = \frac{\text{Rendimiento económico}}{\text{Peso seco total de la planta}} \times 100$$

En el frijol, la mayor parte de las hojas después de experimentar la senescencia se desprenden por abscisión antes y durante la cosecha, por lo que todo órgano caído debe colectarse y tomarse en cuenta para el rendimiento biológico, tal como lo proponen Kohashi *et al.* (1980), tomando el nombre de “índice de cosecha modificado (ICM)”, bajo la siguiente fórmula (Kohashi *et al.* (1980), Escalante y Kohashi, 2015):

$$ICM = \frac{\text{Rendimiento de semilla (órgano de interés antropogénico)}}{\text{Rendimiento biológico a la madurez + Peso seco de órganos caídos}}$$

4.9. Germinación de la semilla

Existen tres criterios para definir germinación: fisiológico, biológico y agronómico.

Fisiológicamente la germinación de la semilla es el proceso de reanudación del crecimiento del embrión y se inicia con la absorción de agua (imbibición) y finaliza con la emergencia de la radícula a través de la cubierta o testa de la semilla. La imbibición da lugar a una pérdida de solutos y reanuda la actividad metabólica (respiración, síntesis de proteínas, ácidos nucleicos, etc.) (Simón y Moysset, 2006).

Biológicamente (como definición operativa) la germinación ocurre cuando la radícula rompe la testa de la semilla, aunque en realidad es en este momento donde la germinación se hace visible, ya que este proceso inicia antes.

Agronómicamente (forma operativa) Moreno (1984) define germinación como la emergencia y desarrollo de aquellas estructuras esenciales que provienen del embrión, y que manifiestan la capacidad de la semilla para producir una planta normal bajo condiciones favorables, definición que es semejante a la que maneja la Asociación Internacional de Análisis de Semillas (por sus siglas en inglés ISTA), ya que indica que la germinación de una semilla es la emergencia y desarrollo de la plántula, período en el cual es posible determinar si es o no posible que se desarrolle en el futuro una planta bajo condiciones favorables en el suelo; por lo que bajo este concepto, el objetivo de la prueba de germinación es poder determinar el potencial máximo de germinación de un lote de semillas, las pruebas que propone el ISTA (2014) no se limitan únicamente a evaluar el porcentaje de semillas en las cuales la radícula rompió la testa, sino en continuar una evaluación *a posteriori* de las plántulas que han desarrollado estructuras sanas, el tiempo a evaluar dependerá de la especie, que para el caso de frijol común recomienda sea de 5 a 9 días; uno de los métodos propuestos es el llamado “entre papel” que consiste en germinar la semilla entre dos capas de papel, los métodos de laboratorio han sido desarrollados para condiciones externas controladas para producir una germinación más regular, rápida y completa posible para la mayoría de las muestras de una especie particular.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Localización del experimento

La fase experimental se llevó a cabo en un invernadero del Posgrado en Botánica del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Estado de México (19° 30' N y 98° 51' O y a 2250 msnm).

5.2. Material de frijol utilizado

Se utilizaron dos materiales de frijol (*Phaseolus vulgaris*), uno silvestre y uno domesticado.

El silvestre “S13” (S13) originalmente colectado en Santa Isabel, Cholula, Estado de Puebla, Méx. (18.97°N y 98.38°O, a 1430 m.s.n.m) registrado bajo la serie G23429 y colectado en el año de 1987 por Daniel Gabriel Debouck y José Socorro Muruaga Martínez según lo marca su pasaporte en el Programa de recursos genéticos del CIAT (2017), proporcionado por el Dr. Jorge A. Acosta Gallegos, del INIFAP (García-Nava, 2006).

El frijol domesticado Flor de Mayo, registrado bajo el número “X16441” (FM), colectado por el Dr. Efraím Hernández Xolocotzi; dicho frijol proviene de un criollo de Ixmiquilpan, Hgo., Méx., cultivado con riego; sembrado en Queréndaro, Mich., Méx. igualmente con riego y con espaldera (Fanjul, 1978).

5.3. Siembra y manejo del cultivo

Tanto en la siembra como en el trasplante se empleó tezontle como sustrato con partículas menores o iguales a 1 cm, bajo hidroponía en sistema abierto. Para la siembra se utilizaron vasos de poliuretano (unicel) con una capacidad de 250 mL y en el trasplante macetas de plástico con una capacidad de 19 L, con 18 kg de sustrato.

La siembra se realizó el 6 de mayo de 2014, se depositaron 3 semillas por vaso y una vez ocurrida la emergencia se conservó solo una planta; al presentarse la primera hoja compuesta expuesta, correspondiente a la etapa V2 según el CIAT (1982b), se trasplantaron a la maceta de 19 L.

Se regó a saturación con agua destilada durante los primeros cinco días después de la siembra (dds), posteriormente con solución Steiner (1984) con un potencial osmótico de -0.036 MPa hasta su trasplante (20 días después de la siembra). A partir del trasplante el cultivo se regó diariamente, bajo la misma solución nutritiva pero con un potencial osmótico de -0.072 MPa. Una vez por semana se regó con agua acidulada con un pH de 5.5.

Para la preparación de solución nutritiva se empleó agua de la llave a la cual se le realizó previamente un análisis químico en el laboratorio del Posgrado en Hidrociencias del Colegio de Posgraduados (Cuadro 1) y de acuerdo al contenido de cationes y aniones se ajustó la cantidad de fertilizantes utilizados; así mismo se ajustó el pH a 5.5 con ácido sulfúrico 1N. La composición de la solución es la siguiente (concentración de iones en mol·m³): 7 de K⁺, 9 de Ca²⁺, 4 de Mg²⁺, 12 de NO₃⁻, 1 de H₂PO₄⁻ y 7 de SO₄⁻ (Steiner, 1984). Se emplearon fertilizantes comerciales excepto para el fosfato de potasio para el cual se utilizó producto químico de grado reactivo. Los micronutrientes se adicionaron mediante el uso del producto Fermil[®] Soluble.

Cuadro 1. pH, Conductividad eléctrica (CE) y contenido de cationes y aniones presentes en el agua empleada para la preparación de la solución nutritiva.

pH	CE	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CL ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ(+)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ(+)
	ds m ⁻¹	Aniones (meq L ⁻¹)					Cationes (meq L ⁻¹)				
7.23	0.515	0	3.70	0.60	0.56	4.86	1.30	2.10	0.80	0.06	4.26

A los 42 dds el tallo y las ramas se guiaron verticalmente empleando hilo de polipropileno (Figura 2).



Figura 2. Arreglo de las plantas de *P. vulgaris* con crecimiento indeterminado, en los tutores.

5.4. Diseño experimental

Se empleó un diseño completamente al azar, con cinco repeticiones para cada muestreo; la unidad experimental consistió en una planta por maceta.

5.5. Obtención y análisis de datos

Se efectuaron tres muestreos destructivos a lo largo del ciclo: al inicio de la etapa R6 (Floración), al inicio de la etapa R8 (Llenado de vaina), y al término de la etapa R9 (Madurez fisiológica) que en este estudio se le ha denotado R9_F.

Para el inicio de la etapa R6 se consideró que el 50 % de la población de cada variedad presentara al menos una flor en anthesis; para el inicio de la etapa R8 que el 50 % de la población de cada variedad presentara al menos una vaina en llenado; y el término de la etapa R9 que más del 50 % de las vainas presentaran un color café-amarillento propias de la madurez fisiológica.

5.5.1. Temperatura

Se registró diariamente la temperatura (°C) con un Datalogger marca Extech RHT10; de esta manera se calculó la temperatura promedio semanal durante el periodo en el que el experimento permaneció en invernadero.

5.5.2. Fenología y grados día desarrollo acumulados

Desde que se realizó la siembra se registró el momento en que ocurrió cada una de las etapas fenológicas, bajo el criterio del CIAT (1982b). Los grados día desarrollo acumulados (GDA) son probablemente la mejor forma para medir cuánto tarda una especie en alcanzar una etapa fenológica, por lo que se calcularon según el método de Snyder (1985), usando como temperatura base (T_b) 8.3 °C, determinada por Barrios y López (2009) para variedades mexicanas quienes consideran que la T_b de 10 °C comúnmente usada en frijol es muy alta. De esta manera la ecuación empleada fue la siguiente:

$$GDA = \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{T_{\text{máx}} + T_{\text{mín}}}{2} \right) - T_b \right]_i$$

Donde:

T_{máx} = temperatura máxima diaria (°C).

T_{mín} = temperatura mínima diaria (°C).

T_b = temperatura base (°C).

5.5.3. Número de vainas

En cada muestreo se contaron las vainas por planta; se contó como vaina desde la más pequeña donde recién había colgado o desprendido la corola hasta las vainas normales de mayor tamaño (Figura 3).



Figura 3. Características de vainas que fueron contabilizadas en los muestreos.

Fotos tomadas a diferente escala.

5.5.4. Semilla

Las siguientes variables de la semilla se registraron al finalizar la etapa de madurez fisiológica (R9F):

- a) Peso de una semilla. Se contaron y pesaron 100 semillas por planta, tomadas al azar al momento de la cosecha, y calculó el peso para una semilla.
- b) Número de semillas por planta. Se determinó con base en el peso de semilla por planta y el peso de 100 semillas al momento de la cosecha.
- c) Porcentaje de humedad. Se tomaron muestras aleatoriamente de ± 5 g con cinco repeticiones por cada tipo de frijol (Figura 4). Posteriormente las semillas se secaron en una estufa a 105 °C por 72 horas y se pesaron. Los datos obtenidos se emplearon para calcular el porcentaje de humedad bajo la siguiente ecuación (Turner, 1981):

$$\%H = \left(\frac{PF - PS}{PS} \right) (100)$$

Donde:

%H= porcentaje de humedad.

PF= peso fresco de la semilla.

PS= peso seco de la semilla.



Figura 4. Pesado de la semilla para la determinación del porcentaje de humedad.

- d) Peso de semilla por planta. Se separó la semilla de las vainas y libre de impurezas se pesó al momento de la cosecha.

- e) Número de semillas por vaina. Se tomó una muestra aleatoria de 20 vainas normales por planta en madurez fisiológica, registrándose la cantidad de semillas.
- f) Prueba de germinación. Por cada tipo de frijol (FM y S13) se homogeneizó la semilla obtenida; se emplearon 4 repeticiones de 25 semillas cada una; empleando la prueba de germinación llamada “entre papel” según el ISTA (2014).

Se usaron toallas de papel absorbente (Sanitas® de Kimberly Clark) como sustrato, dos de éstas se extendieron sobre una hoja de “polipapel”: Se empaparon con agua destilada y se colocaron las semillas en un arreglo de 5 x 5. Enseguida se cubrieron con otras dos toallas empapadas y otra hoja de “polipapel” (Figura 5); finalmente se colocaron en una cámara de germinación “Wisconsin oven” a 28 °C (en oscuridad). Se realizó el conteo de semillas germinadas a las 24 y 48 horas después de haberlas puesto en la cámara, se consideró la semilla germinada si la radícula había emergido de la testa. Así mismo se realizó un conteo de plantas normales a los 5, 6, 7, 8 y 9 días después de ponerlas a germinar, bajo los criterios del ISTA (2014); el porcentaje de plantas normales a los 9 días es el que se registró como porcentaje de germinación.

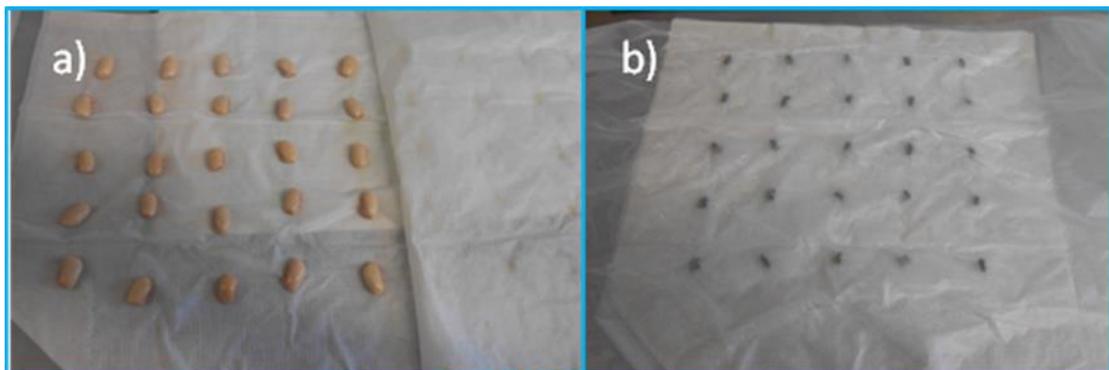


Figura 5. Prueba de germinación en semilla de frijol. a) S13 y b) FM

Las pruebas de germinación fueron realizadas a una temperatura de 28 °C y en condiciones de oscuridad.

5.5.5. Área foliar

En cada uno de los muestreos se separaron todos los órganos de la planta; se despojó de las hojas pecíolos, peciólulos y raquis, de esta manera cada folíolo se extendió cuidadosamente, se mantuvieron frescos en papel periódico húmedo y para evitar al máximo la pérdida de turgencia se colocaron en bolsas de plástico y se cuantificó el área con un integrador electrónico LI-COR modelo LI-3100.

Para calcular la duración del área foliar (DAF) se empleó la ecuación siguiente (Escalante y Kohashi, 2015):

$$DAF = \frac{(IAF_1 + IAF_2)(t_2 - t_1)}{2}$$

Donde:

IAF₁= índice de área foliar en un tiempo inicial.

IAF₂= índice de área foliar en un tiempo final.

t₁= tiempo inicial (días después de la siembra).

t₂= tiempo final (días después de la siembra).

Índice de área foliar (IAF): En este caso se consideró el área foliar de 2 plantas y el área de la sombra proyectada al mediodía por la planta (100 dm²), utilizando la fórmula de Tanaka y Yamaguchi (2014).

5.5.6. Peso seco

Antes de su secado, el material vegetal (incluyendo los órganos caídos que se colectaron durante todo el ciclo del cultivo) se separaron en bolsas de papel de la siguiente manera:

- a) Folíolos.
- b) Pecíolos, peciólulos y raquis.
- c) Tallo, ramas y racimos con todas sus estructuras incluyendo yemas, botones, flores y vainas que no llegaron a madurez fisiológica.
- d) Pericarpio. La semilla se separó del pericarpio de cada una de las vainas normales (para el último muestreo que fue donde se llegó a madurez

fisiológica), con la finalidad de someter a secado el pericarpio sin afectar la semilla.

- e) Raíz. En cada uno de los muestreos se extrajo el sistema radical del sustrato y se lavó con agua corriente. En una probeta graduada (con capacidad de un litro) se colocó un volumen conocido de agua donde fue sumergida la raíz y la cantidad de agua desplazada fue considerada como volumen de raíz (Figura 6).

Se secaron en una estufa marca “Blue M” a 70 °C por 72 horas (o las requeridas) para obtener el peso constante del material vegetal. Posteriormente se pesaron en una báscula marca “Scout Pro”.



Figura 6. Medición del volumen de raíz.

5.5.7. Cálculo de índices fisiológicos

Con el área foliar y peso seco se procedió al cálculo de los siguientes índices fisiológicos:

a) Índice de cosecha:

- Índice de cosecha tradicional (ICT), donde no se toma en cuenta el peso seco de órganos caídos, bajo la fórmula siguiente (Wallace *et al.*, 1972):

$$ICT = \frac{R_e}{R_b}$$

Donde:

R_e = rendimiento agronómico (económico), en este caso rendimiento de semilla (peso seco de semilla).

R_b = peso seco de la planta (rendimiento biológico de la planta con o sin raíz, incluyendo peso seco de los frutos y peso seco de la semilla).

- Índice de cosecha modificado (ICM) propuesto por Kohashi *et al.* (1980), donde se toma en cuenta el peso seco de órganos caídos, bajo la fórmula siguiente (Escalante y Kohashi, 2015):

$$ICM = \frac{R_s}{R_b + PS_a}$$

Donde:

R_s = rendimiento agronómico, en este caso rendimiento de semilla AK 12 % de humedad.

R_b = rendimiento biológico de la planta en madurez fisiológica (peso seco de la planta con o sin raíz, incluyendo peso seco de los frutos y peso de la semilla).

PS_a = peso seco de los órganos caídos por abscisión (hojas, flores, vainas, etc.).

b) Tasa de asimilación neta (TAN) se calculó bajo la ecuación práctica que señalan Tanaka y Yamaguchi (2014):

$$TAN = \frac{(W_2 - W_1)(\log_e IAF_2 - \log_e IAF_1)}{(t_2 - t_1)(IAF_2 - IAF_1)}$$

Donde:

W=peso de la planta.

t=tiempo expresado en días.

IAF= índice de área foliar (expresado en días).

- c) Índice de llenado de la vaina (iv) según Escalante y Kohashi (2015), bajo la siguiente fórmula:

$$iv = \frac{PSS}{PS_{VAI}}$$

Donde:

PSS= peso seco de la semilla.

PS_{VAI}= peso seco de la vaina (pericarpio + semilla).

5.5.8. Análisis estadístico

Se realizó una comparación de medias con la prueba de Mann-Whitney para las variables: número de vainas, número de semillas por planta y número de semillas por vaina. Así mismo la prueba de “t” de Student para las variables: peso de semilla por planta, peso de una semilla, área foliar, peso del vástago, peso y volumen de la raíz, porcentaje de humedad y germinación de la semilla, duración de área foliar, índice de llenado de vaina, tasa de asimilación neta e índice de cosecha. Se usó el paquete estadístico Infostat (2016) con un nivel de significancia teórico del 5 % y para la realización de los gráficos se empleó el paquete SIGMA PLOT (2008) versión 11.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Temperatura

La temperatura media semanal en todo el ciclo del cultivo se mantuvo en el rango de 20 a 25 °C, la cual según Masaya y White (1991) es la óptima para el crecimiento del frijol (Figura 7).

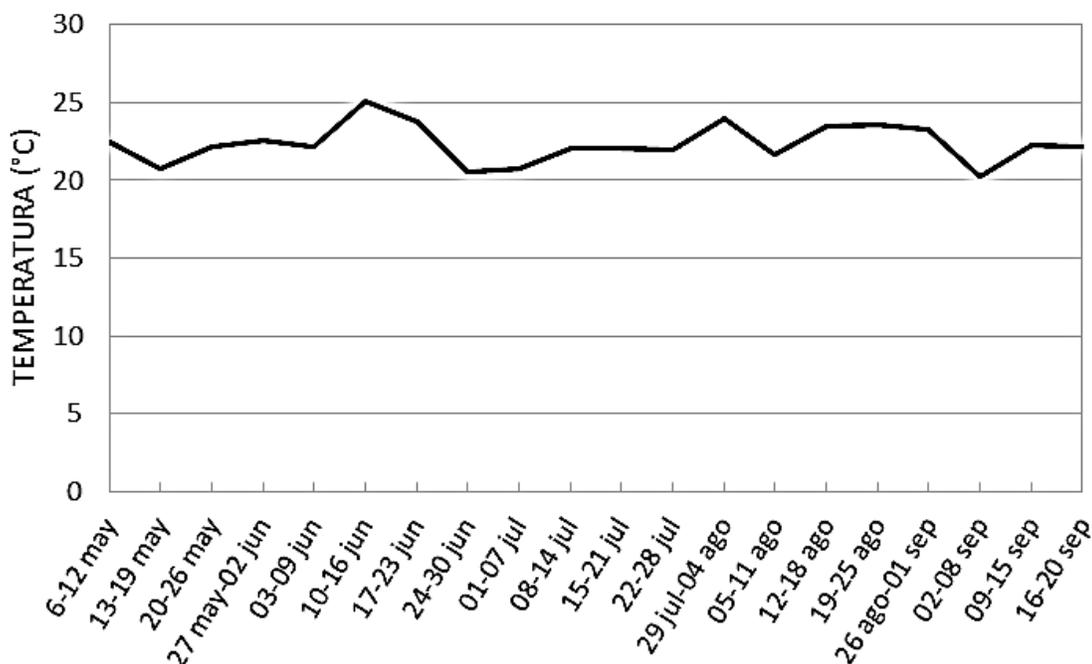


Figura 7. Temperatura media semanal registrada en invernadero en el periodo de mayo a septiembre del año 2014.

6.2. Fenología y grados día desarrollo acumulados

Tanto S13 como FM, muestran cotiledones epígeos, esto coincide con lo que señala Miranda (1979) para el caso de *P. vulgaris*; con base en la clasificación dada por el CIAT (1982 a), el 100 % de las plantas de ambos materiales presentaron el **hábito de crecimiento** indeterminado “Tipo IV”.

El ciclo y duración de cada etapa fenológica se muestran en la Figura 8 y Cuadro 2. El ciclo del cultivo en FM fue de 118 días (R_{9F}); Fanjul *et al.* (1982) reportan un ciclo mayor para este mismo material (“Flor de Mayo” X16441) que es de 153 días (días

después de la emergencia), sembrado en campo bajo condiciones de riego y a una densidad de 1 pl m⁻² en Chapingo, Méx. En el presente estudio el frijol S13 tuvo un ciclo de 137 días. El ciclo de cultivo de S13 fue más largo que de FM. Fernández *et al.* (1986) señalan que la duración de las distintas etapas fenológicas en frijol están afectadas no sólo por el hábito de crecimiento, sino también por el clima, el suelo y el genotipo.

La fase vegetativa del S13 es más larga que la del FM, sus duraciones promedio son de 63 y 51 días, respectivamente. El hecho de que la etapa vegetativa sea más larga en S13 que en FM puede representar una ventaja para ciertos lugares y condiciones climáticas específicas, ya que le confiere la posibilidad de seguir formando estructuras que sean fuente de fotosintatos y de esta manera lograr mayor número de semillas.

Se ha observado que las etapas fenológicas se traslapan, la presencia de botones y flores en las etapas R6, R8 y R9_F apoyan lo anterior; el traslazo entre las etapas se ha reportado también en otros materiales de frijol domesticados y silvestres con hábitos de crecimiento II y IV (Peña *et al.*, 2012).

Desde la etapa de prefloración (R5) el frijol FM es más precoz que el S13. En nuestro caso, comparado con el cultivo en campo (Fanjul, 1978) las condiciones de invernadero podrían haber influido para acelerar las etapas fenológicas en FM. Asimismo, Peña *et al.* (2012) reportan que un ejemplo de frijol silvestre del estado de Tlaxcala (“ST” hábito IV) acorta su fenología respecto a lo registrado bajo su cultivo en campo, floreciendo en promedio 20 días antes. El inicio de la etapa de floración (R6) en S13 tuvo lugar a los 67 días después de la siembra (dds), mientras García-Urióstegui (2015) reporta que da inicio a los 61 dds (bajo las mismas condiciones de cultivo); en FM tuvo lugar a los 57 dds, variando con el número de días reportado por Fanjul *et al.* (1982), donde bajo condiciones de riego en campo, ocurrió a los 86 días pero después de la emergencia.

Fanjul (1978) reporta que para el caso de FM cultivado en campo el grano comienza a aumentar de peso a una tasa constante después de 20 días una vez ocurrida la

antesis (R6), que es cuando puede considerarse el inicio de la etapa R8 en este frijol. Los resultados aquí consignados para el caso de FM esta etapa inició a los 14 días después de la antesis. En S13 la etapa R8 se inició a los 16 días después de la antesis, contrastando con lo reportado por García-Urióstegui (2015) donde para este mismo material silvestre (S13) se inició aproximadamente 9 días después de la antesis, indicando que la duración entre las etapas R6 y la R8 son muy similares entre S13 y FM.

FM estaba por entrar en la etapa de madurez fisiológica cuando se presentaron temperaturas máximas por lo que no debió afectar a la planta, S13 estaba casi al 50 % del periodo de llenado de vaina por lo que podría haber influido y presentarse aborto de semillas (Prieto y Kohashi, 1981), sin embargo esto no se cuantificó.

En general el frijol S13 acumula más grados día en cada una de las etapas fenológicas, respecto al FM (Cuadro 2).

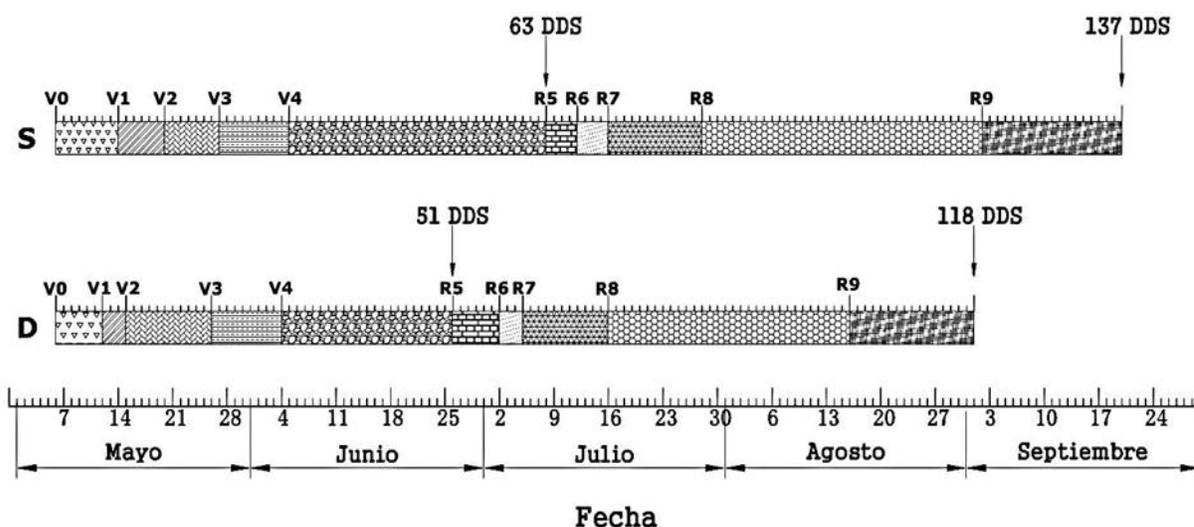


Figura 8. Etapas fenológicas de frijol con crecimiento indeterminado trepador.

S=S13. D= FM. DDS=días después de la siembra. V0=germinación, V1= emergencia, V2=hojas primarias, V3=primera hoja compuesta, V4= tercera hoja compuesta, R5=prefloración, R6= floración, R7=formación de vainas, R8=llenado de vainas y R9=maduración. No se indica el traslape que existe entre etapas.

El cultivo de frijol fue en el año 2014 bajo condiciones de hidroponía e invernadero.

Cuadro 2. Duración de las etapas fenológicas en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Etapa fenológica	S13		FM	
	GDA*	DDS	GDA*	DDS
V1	168.75	8	135.45	6
V2	253.65	14	182.85	9
V3	378.95	21	358.25	20
V4	536.60	30	522.10	29
R5	1147.45	63	943.60	51
R6	1224.35	67	1054.55	57
R7	1296.15	71	1099.30	60
R8	1528.20	83	1296.15	71
R9	2345.90	119	1955.40	102
R9F	2704.20	137	2319.80	118

V1=emergencia, V2=hojas primarias, V3=primera hoja compuesta, V4=tercera hoja compuesta, R5=prefloración, R6=floración, R7=formación de vainas, R8=llenado de vainas, R9=inicio de maduración y R9F= fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

*Se empleó 8.3 °C como temperatura base.

GDA=grados día desarrollo acumulados.

DDS=días después de la siembra.

6.3. Componentes morfológicos y fisiológicos del rendimiento agronómico

Es importante indicar que los datos obtenidos para el ciclo de la planta se registraron para un primer año, no hay evidencia que indique que S13 pueda ser bienal o perenne. Para el caso de *Phaseolus vulgaris* L. silvestre en su hábitat es anual, o raramente perenne de corta vida (Delgado et al. 1988). En el caso del frijol domesticado la morfología de la raíz puede variar y dependerá de su hábito de crecimiento (Gepts y Debouck, 1991). Tanto S13 como FM presentaron raíces fibrosas, fasciculadas y nodulación, características que son propias del frijol común silvestre, según lo mencionan Delgado *et al.* (1988), así como Gepts y Debouck (1991).

La presencia de botones en la etapa R8 y R9F hizo evidente que la etapa R5 tuvo traslapo durante el ciclo de cultivo con todas las etapas reproductivas tanto en S13 como en FM; esto se debe a que ambos materiales son de hábito de crecimiento indeterminado trepador y ésta es una de sus características, ya que el ápice

permanece como una yema vegetativa y por lo tanto tiene la posibilidad de proseguir su crecimiento.

En cuanto al color de la flor, la de S13 es morada y la de FM es blanca (Figura 9).



Figura 9. Color de la flor. Morada en el frijol S13 (izquierda) y blanca en el frijol FM (derecha).

No se muestra la escala.

6.3.1. Número de vainas por planta

En la etapa R6 se presentaron unas pequeñas vainas en las cuales apenas se había desprendido la corola de la flor, se contabilizaron y se notó que no hubo diferencias en la cantidad presentada entre frijol S13 y FM (Cuadro 3).

En las etapas R8 y R9_F (en la etapa R8 se tomó en cuenta el total de las vainas presentes y en la R9_F únicamente las vainas normales que llegaron a madurez) se apreció la diferencia en cantidad de vainas, siendo superior en S13 (con respecto a FM) ya que produjo 1014 vainas por planta en la etapa R9_F (Cuadro 3). García-Urióstigui (2015) reportó 817 vainas por planta para S13 en las mismas condiciones de crecimiento. Sin embargo, esta diferencia podría deberse a que García-Urióstegui (2015) cosechó a los 94 días dds debido a que no tomó en cuenta aquellas vainas que se produjeron después de los 94 dds debido al objetivo de su trabajo.

En S13 el número de vainas en la etapa el nR9_F resultó significativamente superior con respecto a la R8. En la R8, FM presentó una cantidad de vainas ligeramente mayor que en la R9_F, posiblemente porque hubiera ocurrido abscisión de órganos reproductivos; sin embargo, al tratarse de muestreos diferentes no se puede afirmar que esto es lo que marcó una diferencia aparente, ya que estadísticamente la cantidad de vainas entre estas dos etapas son iguales (Figura A1).

Es importante mencionar que las vainas de S13 mostraron una alta tendencia a la dehiscencia¹, característica presente en el frijol común silvestre según lo señalan algunos autores como Schwanitz (1966), Delgado *et al.* (1988), Toro *et al.* (1990), Gepts y Debouck (1991) (Figura 10).



Figura 10. Dehiscencia de la vaina de frijol S13.

No se muestra escala.

¹Cuando las vainas de frijol silvestre alcanzan la madurez, las dos valvas de la vaina se separan y se retuercen abruptamente, provocando un movimiento similar a una honda, logrando proyectar semillas a distancias de varios metros.

Cuadro 3. Número de vainas por planta en S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Etapa fenológica	Tipo de frijol	Número de vainas.pl⁻¹	
R6	S13	4*	a
	FM	6*	a
R8	S13	454*	a
	FM	197*	b
R9_F	S13	1014**	a
	FM	131**	b

Medias con distinta letra por etapa fenológica son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

**Número de vainas (se incluye vainas mayores y/o menores a 3 cm).*

***Número de vainas normales que llegaron a madurez.*

6.3.2. Semilla

En el presente estudio puede aceptarse que la polinización tanto en el frijol S13 como en FM fue principalmente autógama, ya que debido a las características de las condiciones del cultivo era poco probable la presencia de polinizadores; y según Chaves *et al.* (2014) indican que en el frijol domesticado aún en condiciones naturales la polinización cruzada es muy baja (menor del 1 %), así mismo Miranda (1979) menciona a varios autores quienes señalan un porcentaje de cruzamiento no mayor al 13 %.

El porcentaje de humedad en la semilla al momento de la cosecha en S13 (16.64) como en FM (16.84 %), fue estadísticamente igual.

El tamaño de la semilla de S13 es menor que el de FM (Cuadro 4). La semilla de S13 tiene 6 mm de largo y 5 mm de ancho, estando dentro del intervalo

de que Gepts y Debouck (1991) señalan para el frijol común silvestre (5 a 7 mm de largo y de 3.5 a 5 mm de ancho) así como también están dentro del rango que mencionan Hernández X. *et al.* (1979) (3 a 7 mm de largo con un ancho de 3 a 6 mm). Otro criterio para estimar el tamaño de la semilla es su peso; para S13 se registró un valor de 42.38 mg/semilla (Cuadro 4), que es menor al indicado para frijol común silvestre por Gepts y Debouck (1991) (60 a 140 mg/semilla) y Lépiz *et al.* (2010) (50 mg/semilla). Asimismo, el tamaño reportado en la presente investigación para S13 es muy cercano a lo que indican García-Nava *et al.* (2014) (51 mg/semilla) y García-Urióstegui (2015) (44 mg/semilla), quienes también lo cultivaron en invernadero.

Para poder homogeneizar términos entre S13 y FM, en lugar de “rendimiento” se usará la locución “**producción de semilla**”. En cuanto a la semilla del frijol FM se registra 1.24 cm de largo y 0.76 cm de ancho y un peso de 305 mg/semilla (Figura 11), éste valor es cercano al peso (361 mg/semilla) reportado por Vargas *et al.* (2006). Sin embargo, no coincide con lo reportado por Fanjul *et al.* (1982) quienes cultivaron “Flor de Mayo X16441” en campo, ya que ellos registraron casi el doble de tamaño (524.8 mg/semilla) y casi el cuádruple de **producción de semilla por planta** (747.9 g/pl) en comparación a lo consignado en la presente investigación (Cuadro 4). La semilla de S13 es de color negro, y la de FM es de color rosa jaspeado (Figura 11).

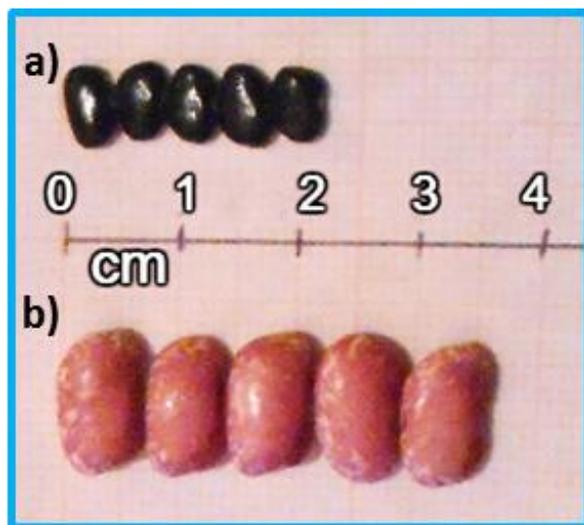


Figura 11. Semilla de frijol. a) S13 y b) FM.

En cuanto a la **producción de semilla por planta y número de semillas por planta** en el frijol S13 (Cuadro 4) concuerdan con los reportados por García-Urióstegui (2015) quien cultivó el mismo frijol silvestre (S13) en invernadero en las mismas condiciones que la presente investigación, pero contrasta con García-Nava *et al.* (2014) quienes obtuvieron resultados menores al cultivarlo en una maceta más pequeña (4.5 kg de sustrato) ya que por planta obtuvieron 1120 semillas pesando 51.9 g. No existen reportes de la producción de semillas de S13 cultivado en campo, por lo que no se sabe si fue afectado de la misma manera que el FM.

En el frijol S13 **el número de semillas por planta** fue 4.4 veces mayor que del FM (Cuadro 4), condición que según Schwanitz (1966) caracteriza a las plantas silvestres.

Existe diferencia estadística en el **número de semillas por vaina** entre el frijol FM y S13 (Cuadro 4). El frijol FM presenta en promedio 6 semillas por vaina, lo que coincide con lo indicado por Fanjul *et al.* (1982) y el frijol S13 presenta 4, concordando con García-Urióstegui (2015); en la Figura 12 se muestran las vainas (con semillas) de ambos tipos de frijol, mismas que representan la longitud media presente en cada uno cuando llegan a su madurez fisiológica; la longitud está de acuerdo con la caracterización realizada por Lépiz *et al.* (2010) quienes indican que la forma domesticada de frijol común muestra valores mayores a la forma silvestre.

Por lo tanto, la producción de semilla por planta y el peso de una semilla en el S13 respecto al FM son 61 % y 14 %, respectivamente (1.6 veces más producción de semilla y 7.2 veces más pesada la semilla del FM respecto al S13) (Cuadro 4).

Cuadro 4. Producción de semilla, peso de una semilla, peso seco del vástago, número de semillas por planta y por vaina en S13 y FM en la etapa R9_F cultivados en hidroponía e invernadero.

Tipo de frijol	Producción de semilla (g pl ⁻¹)*	Peso de una semilla (mg)*	Peso seco de vástago** (g pl ⁻¹)	Número de semillas pl ⁻¹	Número de semillas por vaina
S13	129.65 b	42.38 b	445.68 a	3067 a	4 (± 1.19) b
FM	213.80 a	305.00 a	299.16 b	698 b	6 (± 1.03) a

Medias con distinta letra por columna son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

pl⁻¹=por planta

*Dato de peso al 12 % de humedad.

**Exceptuando el peso de la semilla.



Figura 12. Vainas de frijol. a) FM y b) S13.

Una relación respecto a la asignación de fotoasimilados que puede ayudar a determinar su eficiencia es: peso seco del vástago (exceptuando semilla) respecto al

peso de semilla (**Peso seco del vástago²/peso de semilla³**); esta relación en S13 es de 3.4 y en FM de 1.4 (estadísticamente diferentes). El valor de dicha relación muestra que comparado con FM, S13 destina el doble de fotoasimilados al vástago por cada gramo que se destina al peso seco de semilla.

6.3.2.1. Germinación de la semilla

La prueba de germinación se llevó a cabo a la cosecha (R9F), tanto en S13 como en FM. S13 alcanzó el 100 % de germinación a las 24 h después de iniciada la prueba, mientras que FM alcanzó este mismo porcentaje a las 48 h, disminuyendo el porcentaje de plantas sanas en ambos tipos de frijol al noveno día, con lo cual el porcentaje de plantas sanas fue similar (Cuadro 5). Según Acosta *et al.* (2007) no existe una verdadera latencia en frijol domesticado, pero la testa dura puede inhibir la imbibición de agua [“There is no true dormancy in common bean, but hard seed coat or hard shell that inhibits water uptake is not uncommon”]. Asimismo en la forma silvestre de frijol es frecuente que la testa de la semilla sea impermeable y pueda inhibir la imbibición de agua (Miranda, 1979). Para el caso del frijol S13 (y otros materiales silvestres) Pérez y Acosta (2002) determinaron que la testa de la semilla es impermeable y según Gómez *et al.* (1999) el espesor de S13 (86 μm) no tiene influencia en el proceso de absorción de agua (no es más gruesa que la de la semilla domesticada con la que compararon). Sin embargo, en el presente estudio, tanto en S13 como FM se registró un alto porcentaje de germinación (Cuadro 5), específicamente para S13 coincide con lo reportado por García-Urióstegui (2015). Así mismo coincide con Gómez *et al.* (1999) y Gómez (2000) quienes indican que el hilo es por donde se lleva a cabo la imbibición. La humedad en la semilla de S13 a la cosecha fue de 16.6%; posiblemente a una humedad menor la impermeabilidad en la semilla podría aumentar.

² Exceptuando el peso de la semilla.

³ Al 12 % de humedad

Cuadro 5. Porcentaje de germinación de la semilla (criterio agronómico) de S13 y de FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Tipo de frijol	Días después de inicio de la prueba de germinación					
	1	2	6	7	8	9
S13	100 a	100 a	100 a	93 a	88 a	88 a
FM	14 b	100 a	92 b	87 a	87 a	84 a

Medias con distinta letra en cada columna son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

6.3.3. Área foliar por planta

Según Gepts y Debouck (1991) existe una correlación positiva entre el tamaño de la hoja y el de la semilla; la selección de tamaño de la semilla más grande durante el proceso de domesticación podría haberse traducido en un aumento del tamaño de las hojas. La lámina de una compuesta representativa de S13 registró un área de 35.12 cm² y una de FM de 86.85 cm² (ambas de la misma edad y mismo estrato) donde el área de la lámina de la hoja de S13 representa el 40.4 % respecto al tamaño de la de FM. Los resultados obtenidos tanto para el tamaño de semilla (Figura 11) como para área de la hoja (Figura 13) confirman la aseveración de Gepts y Debouck (1991) para el caso de estos dos materiales estudiados. En las figuras A2 y A3 se muestran los ejemplares de herbario (tanto de S13 como FM) depositados en el Herbario-Hortorio "CHAPA" del Posgrado en Botánica del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México.

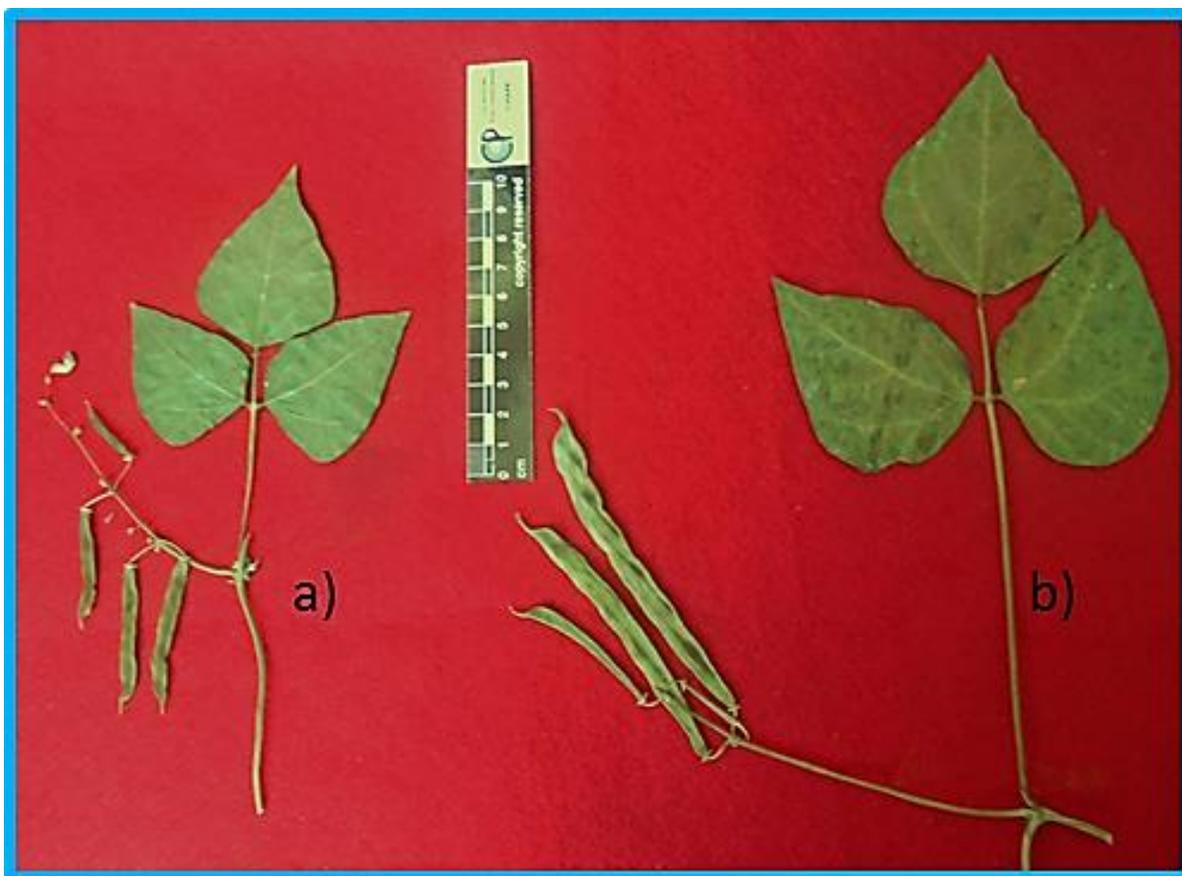


Figura 13. Hojas compuestas de frijol. a) S13 y b) FM.

Esc. 1:4.5 La regla que aparece en la parte superior está graduada en cm.

El área foliar de S13 y FM fue estadísticamente igual en las etapas R6 y R8, mientras que en la R9_F fue superior en S13 (Cuadro A1). Para la etapa R9_F, S13 conservó gran cantidad de hojas, si bien perdió hojas por abscisión éstas no afectaron significativamente el área foliar respecto a la registrada en la etapa R8, sin embargo FM perdió poco más del 50 % del área foliar respecto a la presentada en la etapa R8, esto debido a la abscisión causada durante la maduración de la planta (Figura 14).

Ambos tipos de frijol alcanzaron su máxima área foliar en la etapa R8 (Figura 14). En la Figura 15 se aprecian las columnas cilíndricas que se formaron con las hojas y ramas a lo largo del tutor en S13 y FM.

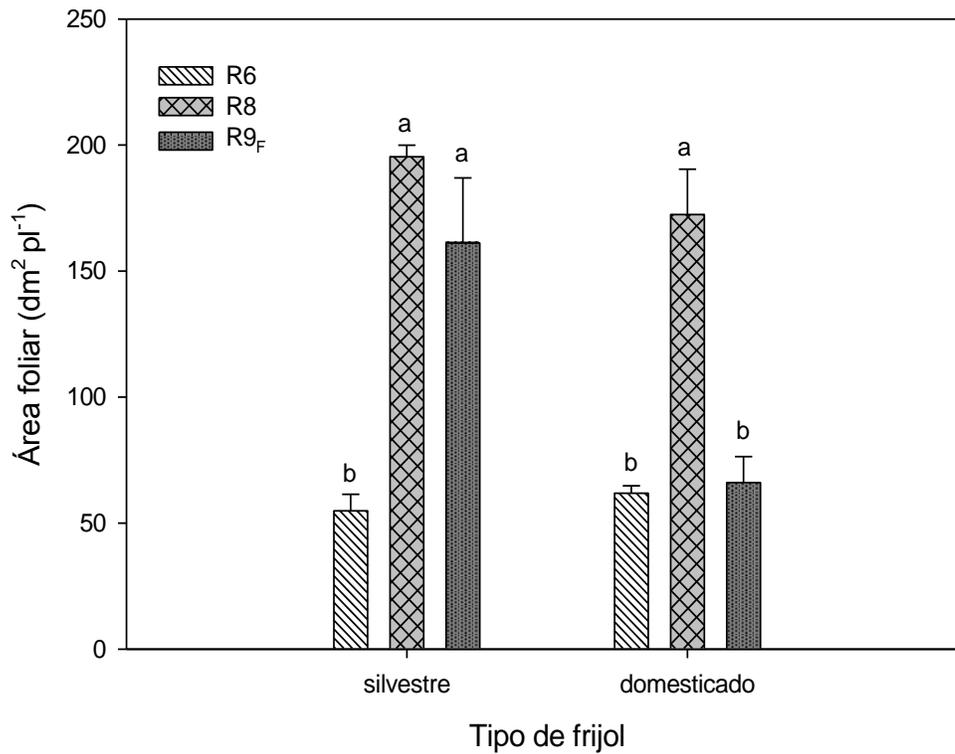


Figura 14. Área foliar de frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441) en tres etapas fenológicas.

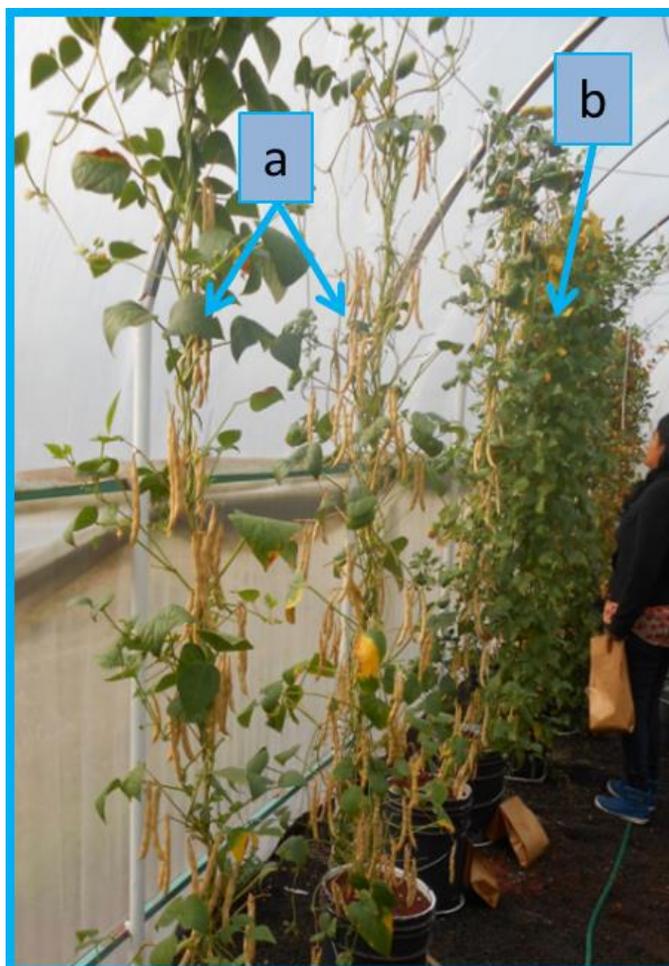
Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Comparación realizada entre etapas para cada tipo de frijol. R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

El cultivo de frijol fue en el año 2014 bajo condiciones de hidroponía e invernadero.



Figura 15. Plantas de frijol de S13 y FM con crecimiento indeterminado.

En la Figura 16, se observa el aspecto de las plantas de frijol FM y S13 en la etapa R9_F, las plantas de FM (a) son las que presentan menos hojas, mientras las de S13 aún tenían la mayoría de su follaje (b).



**Figura 16. Plantas de frijol en la etapa R9 (Madurez).
a) FM y b) S13.**

6.4. Componentes del rendimiento biológico (peso seco)

A pesar de que en la etapa R8 el área foliar fue similar en ambos tipos de frijol, el peso seco (PS) de las láminas foliares en esta misma etapa es mayor en FM (Cuadro A2), lo cual indica que las láminas tienen un mayor grosor.

Es importante resaltar que el PS del pericarpio fue mayor en S13 (Cuadro A2).

En el PS total del vástago que se presenta en el Cuadro 6 se consideró también el PS de los órganos caídos, hay diferencias entre frijol S13 y FM en las etapas R8 y R9. Si bien en la etapa R8 es mayor el peso en el FM, se debe a que las vainas han comenzado su llenado y el peso que representa la semilla en crecimiento (el cual es

mayor a la madurez fisiológica), juntamente con el peso de las láminas foliares que persistieron a la fecha en que se realizó el muestreo, hacen que sea mayor en esta etapa, tal desglose de peso de materia seca se puede observar en el Cuadro A2.

En la etapa R9_F también hay diferencia en el peso total del vástago entre S13 y FM, siendo mayor en S13 (Cuadro 6) a pesar que en FM se tiene una mayor producción de semilla, ya que la materia seca se concentró en otros órganos, ya sea por la cantidad de ellos y/o por su tamaño, tal fue el caso de los racimos, tallo, ramas, pericarpio y demás estructuras del vástago sin tomar en cuenta el peso de las láminas foliares y de los órganos caídos, ya que estos dos últimos no representan diferencia entre ambos tipos de frijol (Cuadro A2).

Cuadro 6. Peso seco total del vástago en S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Etapa fenológica	Tipo de frijol	Peso seco total del vástago (g pl⁻¹)	
R6	S13	36.71	a
	FM	39.49	a
R8	S13	177.14	b*
	FM	207.28	a*
R9_F	S13	575.33	a*
	FM	512.96	b*

Medias con distinta letra en cada etapa fenológica son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

**Se incluyó el peso seco de las vainas con sus semillas, pero sólo en R9_F el peso seco de las semillas se encuentran al 12 % de humedad.*

El PS y volumen de la raíz en frijol S13 y FM reflejan diferencias únicamente en la etapa R6 donde los del FM son mayores y podría estar indicando también su precocidad. En las etapas R8 y R9_F no existen diferencias entre ambos materiales (Cuadro A3).

El peso de la materia seca total por planta (órganos reproductivos persistentes, órganos vegetativos persistentes, órganos caídos totales, raíz, y en el caso de la

etapa R9_F peso de semilla al 12% de humedad) fue mayor en S13, respecto FM (Cuadro A2), contrariamente a lo que se esperaría, ya que en FM donde se obtuvo mayor producción de semilla. En el caso de la raíz no hay datos de las pérdidas que pudieron haber ocurrido en el sistema radical.

El peso seco de la raíz refleja un crecimiento de ésta en S13 y FM tanto de la etapa R6 a la R8, como de la R8 a la R9_F; mientras que el volumen indica que únicamente de la etapa R6 a la R8 (de ambos materiales) se observaron diferencias (Figura 17).

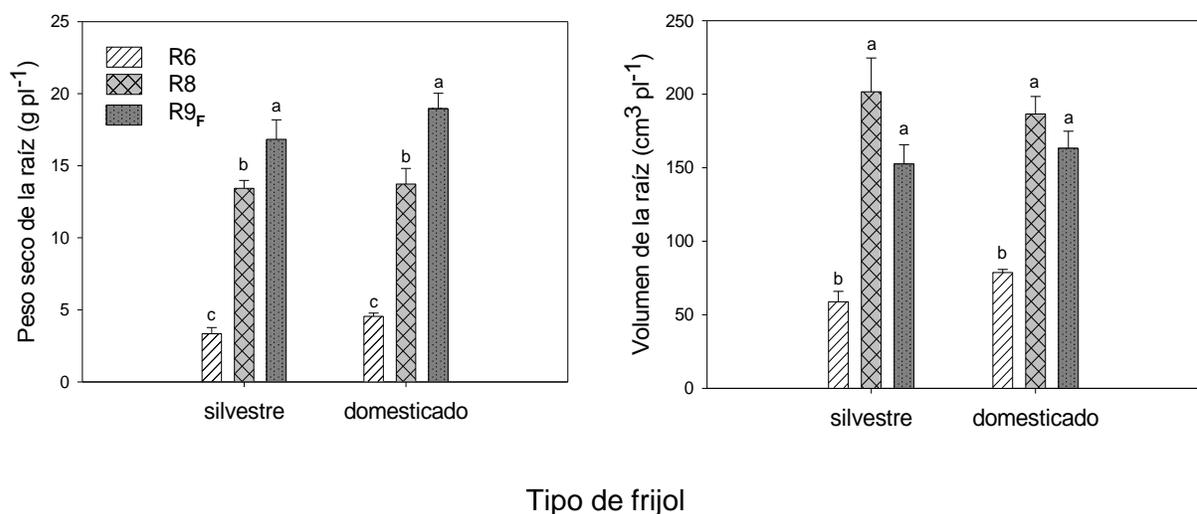


Figura 17. Peso seco y volumen de la raíz en frijol silvestre (S13) y domesticado (Flor de Mayo X16441) en tres etapas fenológicas.

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Comparación realizada entre etapas para cada tipo de frijol. R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

El cultivo de frijol fue en el año 2014, bajo condiciones de hidroponía e invernadero.

6.4.1. Relación raíz/vástago (R/V)

El peso seco de la raíz en las tres etapas muestreadas fue menor que el del vástago tanto en S13 como en FM. Tanto en S13 como en FM se muestra que la relación R/V disminuyó de la etapa R6 a la R9_F, lo cual indica un aumento mayor y no proporcional del peso seco del vástago respecto al incremento del peso seco de la raíz a lo largo de la fase reproductiva. La relación R/V entre tipo de frijol presentó diferencias significativas en las etapas R6 y R9_F, pero no en la R8 (Cuadro 7).

Cuadro 7. Relación Raíz/Vástago (R/V) en porcentaje para S13 y FM en tres etapas cultivados en hidroponía e invernadero.

Tipo de frijol	Etapa fenológica		
	R6	R8	R9 _F
S13	9.1 b	7.6 a	3.0 b
FM	11.5 a	6.6 a	3.7 a

Medias con distinta letra por columna son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

R6= inicio de la etapa de floración, R8= inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F= fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

6.5. Estimadores fisiológicos

La duración del área foliar (DAF) es mayor en S13 de la etapa R8 a la R9_F respecto a FM, mientras que entre estas mismas etapas la tasa media de asimilación neta (TAN) es menor en S13 (Cuadro 8 y Cuadro 9).

Lo anterior debido a que el **índice de área foliar (IAF)** de la etapa R8 a la R9_F permanece estadísticamente igual en el S13 (3.91 y 3.22, respectivamente), mientras que en el FM disminuyó drásticamente de un IAF de 3.45 a 1.32. Es decir, la DAF nos indica que el frijol S13 tiene más posibilidades de seguir generando fotosintatos para ser empleados en las estructuras reproductivas que están aún en desarrollo, al tener un mayor tiempo en el cual el follaje es funcional, sin embargo, según la **TAN** se acumula biomasa más rápidamente en el frijol FM, lo cual explica su precocidad.

La DAF fue menor en el periodo comprendido de la etapa R6-R8 respecto al periodo comprendido de la etapa R8-R9_F, tanto en frijol FM como en el S13 (comparación no registrada).

El TAN se mantuvo constante en el periodo comprendido de la etapa R6-R8 al periodo de la R8-R9_F en el frijol FM; en contraste, el TAN fue mayor en el periodo comprendido de la etapa R6-R8 en el frijol S13 comparado con el periodo R8-R9_F, se

ve disminuido por su menor producción de semilla, respecto al FM, ya que en esta última etapa se contempla el peso de la semilla que llegó a madurez (comparación no registrada).

El **índice de llenado de vaina (iv)** (Cuadro 8) en el frijol FM es mayor respecto al S13, esto coincide con lo mencionado por Peña *et al.* (2012) quienes indican que probablemente en la forma silvestre del frijol se asigna una cantidad mayor de fotoasimilados para la síntesis de algunos polímeros estructurales que son importantes para el mecanismo natural de dispersión de las semillas.

Cuadro 8. Duración del área foliar e índice de llenado de vaina en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Tipo de frijol	DAF (días)		iv** (%)
	R6-R8	R8-R9 _F	
S13	50.04 a	178.23 a	47.30 b
FM	49.20 a	95.41 b	72.07 a

Medias con distinta letra por columna son estadísticamente diferentes (p<0.05). DAF=duración del área foliar. iv=índice de llenado de vaina. R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

**Cálculo incluyendo peso seco de raíz.*

*** Cálculo incluyendo peso de semilla al 12 % de humedad.*

Cuadro 9. Tasa media de asimilación neta (TAN) en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Tipo de frijol	TAN _{SR} (g dm ⁻² día ⁻¹)		TAN _{CR} (g dm ⁻² día ⁻¹)	
	R6-R8	R8-R9 _F	R6-R8	R8-R9 _F
S13	0.06 a	0.05* b	0.07 a	0.05* b
FM	0.08 a	0.07* a	0.08 a	0.07* a

Medias con distinta letra por columna son estadísticamente diferentes (p<0.05). SR=sin incluir peso seco de raíz, CR=incluyendo peso seco de raíz. R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

**Cálculo incluyendo peso de semilla al 12 % de humedad.*

Tanto el **índice de cosecha tradicional (ICT)** como el **modificado (ICM)** (ambos calculados con y sin PS de la raíz) es mayor en el frijol FM, lo cual ya se esperaba debido a que ha sido seleccionado y mejorado con el fin de tener altos rendimientos de semilla (Cuadro 10). Kohashi *et al.* (1980) reporta un índice mucho menor, cultivado en campo, donde a una densidad de 2 pl/m², reportan un ICT de 0.24 y un ICM de 0.12, ambos sin considerar PS de la raíz; hay que tomar en cuenta que las condiciones en las que se desarrolló el estudio fueron diferentes al presente trabajo.

Cuadro 10. Índice de cosecha en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Tipo de frijol	ICT*	ICT _{CR} *	ICM*	ICM _{CR} *
S13	0.26 b	0.25 b	0.23 b	0.22 b
FM	0.49 a	0.47 a	0.42 a	0.40 a

Medias con distinta letra en cada columna son estadísticamente diferentes (p<0.05).

ICT=índice de cosecha tradicional, donde no se incluye peso seco de órganos caídos.

ICM=índice de cosecha modificado, donde se incluye peso seco de órganos caídos.

CR=cálculo incluyendo peso seco de raíz.

**Cálculos incluyendo peso de semilla al 12 % de humedad, tanto en rendimiento agronómico como en biológico. En rendimiento biológico se incluyó peso seco de los frutos (pericarpio).*

Paralelamente, se tiene como resultado que tanto para el frijol FM como para el S13, la inclusión del PS de los órganos caídos simultáneamente con el PS de la raíz en el cálculo del IC, resulta ser significativamente diferente comparado con el ICT. Sin embargo, es solo en el frijol S13 donde el ICT es diferente al ICM; así mismo, solo en S13 hay diferencia del ICT respecto al ICM donde se ha incluido el PS de la raíz (Cuadro A4). El ICM calculado por García-Urióstegui (2015) para el frijol silvestre “S13” fue sin incluir el PS de la raíz, sin embargo, lo reporta mayor (0.31) al calculado en el presente estudio, quizá debido a la exclusión del peso seco de algún

otro órgano, aun así fue menor a los índices reportados de las líneas de frijol que investigó.

El fenotipo es la resultante del genotipo, del medio y de la interacción de ambos. Consecuentemente en la discusión de los resultados se debe tener en cuenta: 1) que el genotipo de los diversos materiales es diferente (a menos de que se trate específicamente de un mismo material identificado); 2) que las condiciones del medio en los diferentes trabajos que se discuten varían (unos se realizaron en campo, otros en invernadero -con diferentes sustratos y tamaño de maceta y el manejo agronómico, etc.-).

7. CONCLUSIONES

En la comparación del frijol silvestre (S13) con el domesticado (Flor de Mayo X16441) cultivados en invernadero e hidroponía se pueden derivar las siguientes conclusiones:

La duración de la fase vegetativa es mayor en el frijol silvestre con respecto al domesticado, lo cual implica que para el silvestre dicha fase es importante para conformar una mayor infraestructura para la producción de componentes del rendimiento. El tamaño de las vainas y de la semilla del frijol silvestre es menor respecto al del domesticado pero la cantidad de éstas es mayor. La producción de semilla (peso por planta) en el frijol silvestre es menor debido a que los fotoasimilados son destinados primordialmente a la producción de un mayor número de semillas y al resto del vástago (incluyendo al pericarpio de las vainas), en contraste con el domesticado donde son destinados para una mayor producción de semilla (peso por planta), así mismo su semilla es más grande. La producción total de materia seca por planta es mayor en el frijol silvestre respecto al domesticado. De acuerdo a una mayor duración del área foliar se infiere que el frijol silvestre tiene más posibilidades de seguir generando fotosintatos para ser empleados en las estructuras reproductivas que están aún en desarrollo, al tener un mayor tiempo en el cual el follaje es funcional. Sin embargo, según la tasa de asimilación neta se acumula biomasa más rápidamente en el frijol domesticado, lo cual se refleja en su precocidad.

La selección bajo domesticación se tradujo en la obtención del frijol domesticado, seleccionado para una mayor producción de semilla (peso) y eficiencia que se traduce en un mayor valor del índice de cosecha tradicional y modificado, excluyendo e incluyendo la raíz.

8. LITERATURA CITADA

- Acosta Gallegos, J. A.; Kelly J., D. and Gepts, P. 2007. Prebreeding in Common Bean and Use of Genetic Diversity from Wild Germplasm. *Crop Science*. 47(S3):S44-S59.
- Aguirre R., J. R.; Peña Valdivia, C. B. and Bayuelo Jiménez. J. S. 2003. Morphology, phenology and agronomic traits of two wild Mexican common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) populations under cultivation. *South African Journal of Botany*. 69(3):410-421.
- Anderson, Edgar. 1997. *Plants, man and life*. Missouri Botanical Garden. 251 p.
- Barrios Gómez, E. J. y López Castañeda., C. 2009. Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia*. 43: 29-35.
- Bayuelo Jiménez, J. S.; Peña Valdivia, C. B. and Aguirre R., J. R. 1996. Phenotypic expression of the wild common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) populations from two contrasting geographical areas. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative*. (39):205-206.
- Bayuelo Jiménez, J. S.; Aguirre R., J. R. and Peña Valdivia, C. B. 1997. Yield determining traits in two mexican wild common bean populations from contrasting geographical origin. *Annual Report of the Bean Improvement Cooperative* (40):28-29.
- Bayuelo Jiménez, J. S.; Peña Valdivia, C. B. and Aguirre R., J. R. 1999. Yield components of samples of two wild Mexican common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) populations grown under cultivation. *South African Journal of Plant and Soil*. 16(4):197-203.
- Castellanos Hernández, O. A.; Lépez Ildelfonso, R.; Castellanos Enríquez, G. E.; Rodríguez Sahagún, A. y Torres Morán, M. I. 2017. Relaciones genéticas basadas en marcadores ISTR entre formas silvestres, cultivadas e intermedias de frijol de guía colectado en Jalisco, México. *Acta Botánica Mexicana*. (118): 53-63.
- Chacón Sánchez, M. I. 2009. Darwin y la domesticación de plantas en las Américas: el caso del maíz y el frijol. *Acta Biológica Colombiana*. 14(4):1-11.
- Chaves Barrantes, N. F.; Araya Villalobos, Rodolfo y Debouck, D. G. 2014. Cruzamiento Natural en frijol común en Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*. 25 (1):23-33.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1982 a. Guía de estudio: Morfología de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). Cali, Colombia. 50 p.

- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1982 b. Guía de estudio: Etapas de desarrollo de la planta de frijol común. Cali, Colombia. 26 p.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 2017. Programa de Recursos Genéticos. Colecciones. <http://ciat.cgiar.org/what-we-do/crop-conservation-and-use/>.
- De Candolle, A. 1885. Origin of cultivated plants. New York: The International Scientific Series. 468 pp. <https://archive.org/details/origincultivate03candgoog>.
- Debouck D., G. e Hidalgo H., R. 1984. Morfología de la planta de frijol Común (*Phaseolus vulgaris* L.). Centro Internacional de Agricultura Tropical. 21-22 pp. books.google.com.mx/books?id=AtOLF2NhJogC .
- Delgado Salinas, A.; Bonet, A. and Gepts, P. 1988. The wild relative of *Phaseolus vulgaris* in Middle America. *In: Genetic resources of Phaseolus beans: Their maintenance, domestication, evolution and utilization.* Gepts, P. (ed.). Kluwer, Dordrecht, Netherlands. 163-184 pp.
- El pequeño Larousse ilustrado. 2016. Vigésima segunda Edición. París. 1824 p.
- Elsevier (Elsevier's dictionary of plant genetic resources). 1991. IBPGR. Amsterdam (Netherlands). 187 pp.
- Engleman, E. M. 1979. Anatomía y morfología. En: Contribuciones al conocimiento del frijol (*Phaseolus*) en México. Engleman Mark, E. (ed.). Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 23-37 pp.
- Escalante Estrada, J. y Kohashi Shibata, J. 2015. El rendimiento y crecimiento del frijol: manual para la toma de datos. Colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, Méx. 84 p.
- Fanjul Peña, L. 1978. Análisis del crecimiento de una variedad de *Phaseolus vulgaris* L. de hábito de crecimiento indeterminado y ensayo para el estudio de las relaciones entre la fuente y la demanda de los fotosintatos. Tesis de M. C. Colegio de Postgraduados, Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México. 157 p.
- Fanjul Peña, L.; Kohashi Shibata, J. and Hernández Xolocotzi, E. 1982. Yield Potencial and Stratified Growth Analysis of an indeterminate climbing pole bean (*Phaseolus vulgaris*) in México. *Experimental Agriculture*. 18:167-175.
- Fernández de C., F.; Gepts, P. y López, M. 1986. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). CIAT. Cali, Colombia. 33 p.
- FIRA (Fideicomisos instituidos en relación con la agricultura). 2015. Panorama agroalimentario: Frijol 2015. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial. 31 p.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61950/Panorama_Agroalimentario_Frijol_2015.pdf.

- García-Esteva, A. and Kohashi Shibata, J. 1992. Growth curves for normal and abortive bean (*Phaseolus vulgaris* L.) pods. Bean Improvement Cooperative. (35):162-163.
- García-Hernández, E.; Peña Valdivia, C. B.; Aguirre Rivera, J. R. y Muruaga Martínez, J. S. 1999. Contraste Morfológico y Fisiológico de *Phaseolus vulgaris* L. silvestre y domesticado. Revista Chapingo Serie Ingeniería Agropecuaria. 2(1):61-68.
- García-Nava, J. R. 2006. The effects of maturation environment and drying on seed development and hardseedness of wild bean (*Phaseolus vulgaris* L.). PhD. Thesis. University of Reading. United Kingdom. 114 p.
- García-Nava, J. R.; García Esteva, A.; Kohashi Shibata, J.; Uscanga Mortera, E. and Peña Valdivia, C. B. 2014. Seed yield and its components of wild and cultivated *Phaseolus vulgaris* L. Bean Improvement Cooperative. (57):303-304.
- García-Urióstegui, A. 2015. Secado de la semilla y su calidad fisiológica, y el rendimiento de frijol silvestre, domesticado y sus líneas. Tesis de Maestría en Ciencias. Montecillo, Texcoco, Edo Mex. 71 p.
- Gardner F., P.; Pearce R., B. and Mitchell R., L. 1985. Physiology of Crop Plants. The Iowa State University Press, Ames, Iowa. 327 p.
- Gepts, P. and Debouck, D. 1991. Origin, domestication, and evolution of the common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: Common Beans: Research for crop improvement. A. V. Schoonhoven and O. Voysest. (Eds.). CAB International y CIAT: Wallingford. UK. 7-43 pp.
- Gómez Roldán, M. C. 2000. Caracterización genética y microestructural de la testa del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado y silvestre. Tesis Doctoral: Biotecnología de plantas. Córdoba, Veracruz, Méx. 92p.
- Gómez Roldán, M. C.; Pérez Herrera, P.; Valdés Carrasco, J. and Acosta Gallegos, J. A. 1999. Characteristics of the seed coat in wild and cultivated *Phaseolus vulgaris* L. Annual Reports. Bean Improvement Cooperative. (42):91-92.
- Hammer, K. 1984. The domestication syndrome (In German.) Kulturpflanze. (32):11-34.
- Harper, J.L. 1977. Population biology of plants. Academic Press. London. 892 p.
- Hernández López, V. M.; Vargas Vázquez, M. P.; Muruaga Martínez, J. S.; Hernández Delgado, S. y Mayek Pérez, N. 2013. Origen, domesticación y

- diversificación del frijol común. Avances y perspectivas. Fitotecnia Mexicana. 36(2):95-104.
- Hernández X., E.; Ramos Rodríguez, A. y Martínez Alfaro, M. A. 1979. Etnobotánica. En: Contribuciones al conocimiento del frijol (*Phaseolus*) en México. Engleman Mark, E. (ed.). Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 113-138 pp.
- Herrera Flores, T. S. y Acosta Gallegos, J. A. 2008. Rendimiento de tres tipos de cruza entre genotipos silvestres y cultivados de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Agricultura Técnica en México. 34(2):167-176.
- InfoStat. 2016. InfoStat versión estudiantil. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- IPGRI (International Board for Plant Genetic Resources). 1991. Elsevier's Dictionary of Plant Genetic Resource. Rome, Italy. 187 p.
- ISTA (International Seed Testing Association). 2014. The germination test. International Rules for Seed Testing. Bassersdorf, CH Switzerland. Cap. 5.:1-50 pp.
- Jeuffroy H., M. and Ney, B. 1997. Crop physiology and productivity. Field Crops Research. (53):3-16.
- Kaplan, L. and Lynch, T. F. 1999. *Phaseolus* (Fabaceae) in Archaeology: AMS Radiocarbon Dates and Their Significance for Pre-Colombian Agriculture. Economic Botany. 53(3):261-272.
- Kohashi Shibata, J. 1990. Aspectos de la Morfología y Fisiología del Frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y su Relación con el Rendimiento. Colegio de Postgraduados. Instituto de Recursos Naturales. Programa de Botánica. Montecillo, México. 42 p.
- Kohashi Shibata, J.; Caprio da Costa, J. and Miranda Colín, S. 1980. Harvest index in *Phaseolus vulgaris* L. Annual Report of the Bean Improvement Cooperative. (23):87-89.
- Koinage, E. M. K.; Singh, S. P. and Gepts, P. 1996. Genetic control of the domestication syndrome in common bean. Crop Science. (36):1037-1045.
- Krishnamurthy, L. y Sahagún Castellanos, J. 1991. Recursos fitogenéticos. Su conservación para un desarrollo sostenible. Universidad Autónoma Chapingo. México. 106 p.

- Lépiz Ildelfonso, R.; López Alcocer, J. Jesús; Sánchez González, J. Jesús; Santacruz Ruvalcaba, Fernando; Nuño Romero, Ricardo y Rodríguez Guzmán, Eduardo. 2010. Características morfológicas de formas cultivadas, silvestres e intermedias de frijol común de hábito trepador. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 33(1): 21-28.
- López S., J. L.; Ruíz C., J. A.; Sánchez G., J. y Lépiz I., R. 2005. Adaptación climática de 25 especies de frijol silvestre (*Phaseolus* spp) en la República Mexicana. *Revista Fitotecnia Mexicana*. (28):221-230.
- Masaya, P. and White J., W. 1991. Adaptation Photoperiod and Temperature. *In: Common Beans: Research for Crop Improvement*. Schoonhoven A. van, y Voysest O. (eds.). CAB International y CIAT. Wallingford. UK. 445-500 pp.
- Meza Vázquez, K. E.; Lépiz Ildelfonso, R.; López Alcocer, J. J. y Morales Rivera, M. M. 2015. Caracterización morfológica y fenológica de especies silvestres de frijol (*Phaseolus*). *Revista Fitotecnia Mexicana*. 38(1):17-28.
- Miranda Colín, S. 1967. Origen de *Phaseolus vulgaris* L. (frijol común). *Agrociencia*, 1(2):99-109.
- Miranda Colín, S. 1979. Evolución de *Phaseolus vulgaris* y *P. coccineus*. En: *Contribuciones al conocimiento del frijol (Phaseolus) en México*. Engleman Mark, E. (ed.). Colegio de Postgraduados. Chapingo, México. 83-99 pp.
- Moreno M., E. 1984. Análisis físico y biológico de semillas agrícolas. Universidad Autónoma de México. México, D.F. 383 p.
- Peña Valdivia, C. B.; Aguirre R., R. y Arroyo Peña, V. B. 2012. El frijol silvestre. Síndrome de domesticación. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. México. 206 p.
- Pérez Herrera, P. y Acosta Gallegos, J. A. 2002. Permeabilidad de la testa y la porción micrópilo-Hilio en semilla de frijol silvestre y cultivado. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 25(1):57-63.
- Prieto Barrera, V. y Kohashi Shibata, J. 1981. El orden de antesis y la ubicación de las flores: su relación con el rendimiento y sus componentes en frijol, *Phaseolus vulgaris* L., de hábito determinado cv. cacahuete 72. Chapingo, Nueva Época. (29-30):90 p.
- Rodríguez Licea, G.; García Salazar, J. A.; Rebollar Rebollar, S. y Cruz Contreras, C. 2010. Preferencias del consumo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en México: factores y características que influyen en la decisión de compra diferenciada por tipo y variedad. *Paradigma económico*. Año 2 (1):121-145.

- Rodríguez-Montero, W. y Leihner, D. 2006. Análisis del crecimiento vegetal. En: Fisiología de la producción de los cultivos tropicales. Rodríguez E., V. (Ed.). Universidad de Costa Rica. Vol. 7. 42 p.
- Schwanitz, F. 1966. The Origin of Cultivated Plants. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts. 175 p.
- Sholto D., J. 1985. Advanced guide to hydroponics; (Soilless cultivation). New York. Pelham Books. 368 p.
- SIGMAPLOT. 2008. Sigmaplot 2008 V.11.0. Systat Software Inc., Point Richmond, California.
- Simón M., E.; Moysset A., LI. 2006. Prácticas de crecimiento y desarrollo de los vegetales. Universidad de Barcelona, España. 3 pp.
books.google.com.mx/books?isbn=8447530787.
- Singh, S. P. 1991. Bean genetics. *In*: Common Beans: Research for crop improvement. A. V. Schoonhoven and O. Voysest. (Eds.). CAB International y CIAT: Wallingford. UK. 199-286 pp.
- Snyder R., L. 1985. Hand calculating degree days. Agricultural and Forest Meterology. Issues 1-4, 35:353-358.
- Steiner, A. A. 1984. The Universal Nutrient Solution. ISOSC. 6th Intern Congress on Soilless Culture. 633-649 pp.
- Taiz, L., and Zeiger, E. 2010. Plant Physiology. Fifth Edition. Sunderland, Massachusetts U.S.A. 782 p.
- Tanaka, A. y Yamaguchi, J. 2014. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz. 4a ed. Centro de Botánica. Colegio de Postgraduados. 86 pp.
- Toro, O.; Tohme, J. and Debouck, D. 1990. Wild bean (*Phaseolus vulgaris* L.): Description and Distribution. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia. 106 p.
- Turner N., C. 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. Plant and Soil. (58):339-366.

- Vargas Vázquez, M.L.P; Muruaga Martínez, J. S.; Acosta Gallegos, J.A.; Navarrete Maya, R.; Pérez Herrera, P.; Esquivel Esquivel, G. y Irizar Garza, M.B.G. 2006. Colección Núcleo de *Phaseolus vulgaris* L. del INIFAP: Catálogo de accesiones de la forma domesticada. Instituto nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chapingo, Texcoco, Edo. de Méx. Méx. Número 10. 461 p.
- Volkmar K., M. and Woodbury, W. 1995. Water and environment. Handbook of plant and crop physiology. (36):23.
- Voysest, O. 1983. Variedades de frijol en América Latina y su origen. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical. 87 p.
- Wallace, D.; Ozbun, J. and Munger, H. 1972. Physiological genetics of crop yield. (24):97-146.
- Weeden Norman, F. 2007. Genetic changes accompanying the domestication of *Pisum sativus*: is there a common genetic basis to the “domestication syndrome” for legumes. Annals of Botany. (100):1017-1025.
- Wilson E., O. 1999. The diversity of life. Norton and Company. London. 424 p.

9. APÉNDICE

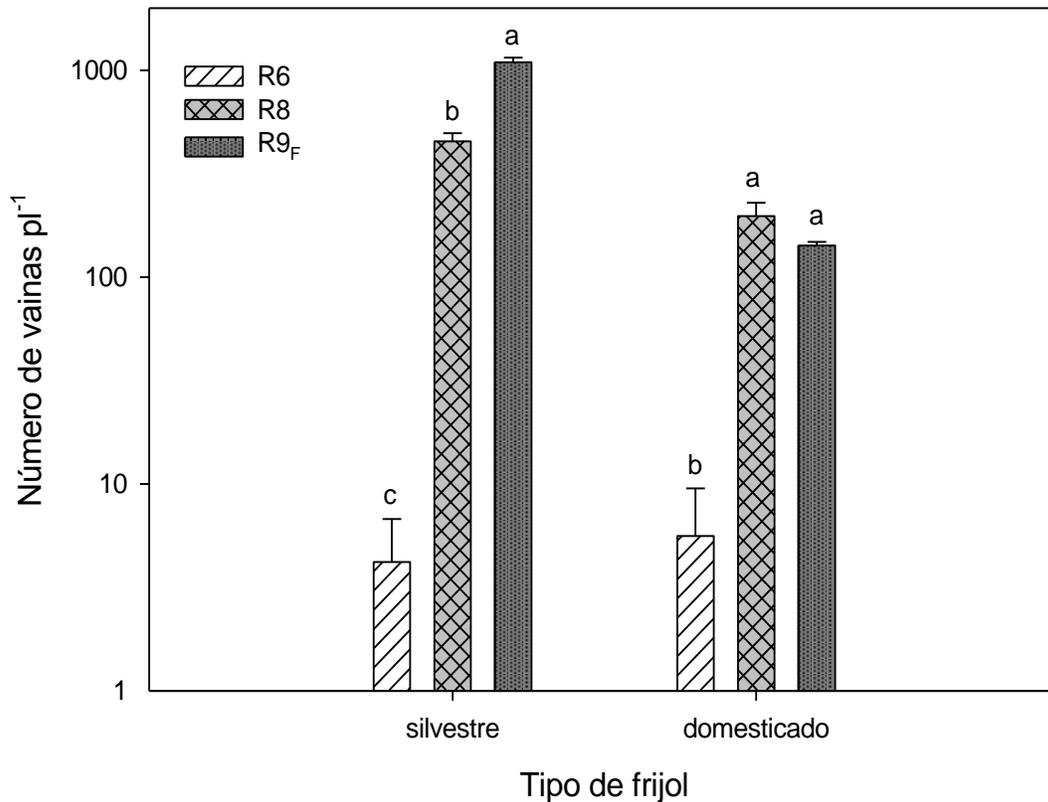


Figura A1. Número de vainas en frijol domesticado (Flor de Mayo X16441) y silvestre (S13) en tres etapas fenológicas.

Medias con distinta letra son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$). Comparación realizada entre etapas para cada tipo de frijol. R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

El cultivo de frijol fue en el año 2014 bajo condiciones de hidroponía e invernadero.



Figura A2. Frijol silvestre S13 cultivado en invernadero.

Material depositado en el Herbario-Hortorio "CHAPA" del Posgrado en Botánica del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México. No se muestra escala.



Figura A3. Frijol domesticado Flor de Mayo X16441 cultivado en invernadero.

Material depositado en el Herbario-Hortorio "CHAPA" del Posgrado en Botánica del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Edo. de México. No se muestra escala.

Cuadro A1. Área foliar en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Etapa fenológica	Tipo de frijol	Área foliar* (dm² pl⁻¹)	
R6	S13	54.89	a
	FM	61.83	a
R8	S13	195.34	a
	FM	172.45	a
R9_F	S13	161.12	a
	FM	66.08	b

Medias con distinta letra en cada etapa fenológica son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

**Área de las hojas persistentes.*

Cuadro A2. Peso seco por planta en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Et-fen.	Tipo de frijol	PS Órganos reproductivos persistentes (g)		P Semilla* (g)	PS Órganos vegetativos persistentes (g)		PS oc (g)	PS total del vástago (g)	PS raíz (g)	PS total (g)
		R-1	R-2		Lf	R-vast				
R6	S13	1.06 a			19.63 a	15.89 a	0.13 a	36.71 a	3.34 b	40.06 a
	FM	0.76 a			22.09 a	16.29 a	0.35 a	39.49 a	4.55 a	44.03 a
R8	S13	7.65 a	21.49 b [◇]		65.27 b	79.94 a	2.80 a	177.14 b	13.43 a	190.57 b
	FM	2.16 b	49.52 a [◇]		81.35 a	72.18 a	2.07 a	207.28 a	13.73 a	221.01 a
R9 _F	S13	4.46 a	144.91 a*	129.65 b	84.96 a	137.48 a	73.87 a	575.33 a	16.83 a	592.16 a
	FM	1.25 b	82.28 b*	213.80 a	52.52 a	89.93 b	73.18 a	512.96 b	18.95 a	531.91 b

Medias con distinta letra en cada etapa fenológica son estadísticamente diferentes ($p < 0.05$).

Et-fen.=etapa fenológica. R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica. P=peso. PS=peso seco.

R-1=racimos con botones, flores y vainas menores a 3 cm con sus semillas en crecimiento. R-2=racimos con vainas mayores a 3 cm. Lf=lámina foliar. R-vast=resto de los órganos pertenecientes al vástago no mencionados particularmente en este apéndice. oc= órganos caídos.

* Peso de semilla a la cosecha con un 12 % de humedad.

◇Se incluye las semillas en crecimiento.

◆Peso de los frutos sin semillas (pericarpio).

Cuadro A3. Peso seco y volumen de la raíz en S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Etapa fenológica	Tipo de frijol	Peso seco de la raíz (g pl ⁻¹)		Volumen de la raíz (cm ³ pl ⁻¹)	
R6	S13	3.34	b	58.80	b
	FM	4.55	a	78.70	a
R8	S13	13.43	a	201.60	a
	FM	13.73	a	186.50	a
R9 _F	S13	16.83	a	152.60	a
	FM	18.95	a	163.20	a

Medias con distinta letra en cada etapa fenológica son estadísticamente diferentes (p<0.05). R6=inicio de la etapa de floración, R8=inicio de la etapa de llenado de vainas, R9_F=fin de la etapa de maduración o madurez fisiológica.

Cuadro A4. Variantes del Índice de cosecha en frijol S13 y FM cultivados en hidroponía e invernadero.

Tipo de frijol	Variantes del índice de cosecha*						Valor-p
S13	ICT _{CR}	0.25	vs	ICT	0.26		0.6169
	ICT _{CR}	0.25	vs	ICM _{CR}	0.22		0.0457
	ICT _{CR}	0.25	vs	ICM	0.23		0.0963
	ICT	0.26	vs	ICM _{CR}	0.22		0.0191
	ICT	0.26	vs	ICM	0.23		0.0400
	ICM _{CR}	0.22	vs	ICM	0.23		0.5908
FM	ICT _{CR}	0.47	vs	ICT	0.49		0.5965
	ICT _{CR}	0.47	vs	ICM _{CR}	0.40		0.0710
	ICT _{CR}	0.47	vs	ICM	0.42		0.1505
	ICT	0.49	vs	ICM _{CR}	0.40		0.0290
	ICT	0.49	vs	ICM	0.42		0.0616
	ICM _{CR}	0.40	vs	ICM	0.42		0.5876

**Comparación de métodos de cálculo del IC (p<0.05). En cada variante se ha incluido peso de semilla al 12 % de humedad, tanto en rendimiento agronómico como en biológico; así mismo, en rendimiento biológico se incluyó el peso seco de los frutos (pericarpio).*

ICT=índice de cosecha tradicional, donde no se incluye peso seco de órganos caídos.

ICM=índice de cosecha modificado, donde se incluye peso seco de órganos caídos.

CR=cálculo incluyendo peso seco de raíz.