



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

**CAMPUS MONTECILLO**  
**RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**  
**GENÉTICA**

**VARIACIÓN EN RESISTENCIA A SEQUÍA Y**  
**TOLERANCIA A ALTAS TEMPERATURAS EN**  
**FRIJOL TIPO FLOR DE MAYO**

**EDWIN JAVIER BARRIOS GÓMEZ**

**TESIS**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL**  
**PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO**

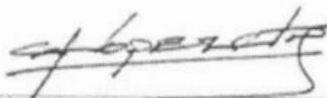
**2010**

La presente tesis titulada: **VARIACIÓN EN RESISTENCIA A SEQUÍA Y TOLERANCIA A ALTAS TEMPERATURAS EN FRIJOL TIPO FLOR DE MAYO**, realizada por el alumno: **EDWIN JAVIER BARRIOS GÓMEZ**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
GENÉTICA**

**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO:



DR. CÁNDIDO LÓPEZ CASTAÑEDA

ASESOR:



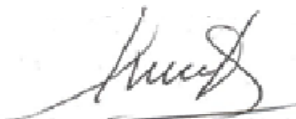
DR. JOSUÉ KOHASHI SHIBATA

ASESOR:



DR. JORGE ALBERTO ACOSTA GALLEGOS

ASESOR:



DR. SALVADOR MIRANDA COLÍN

ASESOR:



DR. NETZAHUALCÓYOTL MAYEK PÉREZ

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO, 30 DE OCTUBRE DE 2010**

# VARIACIÓN EN RESISTENCIA A SEQUÍA Y TOLERANCIA A ALTAS TEMPERATURAS EN FRIJOL TIPO FLOR DE MAYO

Edwin Javier Barrios Gómez  
Colegio de Postgraduados, 2010

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis tuvo como objetivo general estudiar la respuesta en el rendimiento y sus componentes, relaciones hídricas y tolerancia a altas temperaturas, de un grupo de cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) tipo Flor de Mayo (FM) resistentes y susceptibles a sequía, en condiciones de riego y secano. Se sembraron tres experimentos (primavera-verano de 2007); uno en secano (con dos riegos suplementarios antes de la floración) en Celaya, Guanajuato, México y dos en Montecillo, Texcoco, Estado de México, de los cuales, uno estuvo en riego (aplicación semanal de riego por gravedad) y el otro en secano (a merced de la lluvia durante el ciclo). Se observó que los cultivares FM Noura, FM Anita y FM M38 produjeron mayor ( $P \leq 0.05$ ) rendimiento de semilla (RS), biomasa aérea final (BF), vainas normales  $\text{m}^{-2}$  ( $V \text{ m}^{-2}$ ), semillas normales  $\text{m}^{-2}$  ( $SN \text{ m}^{-2}$ ) y peso de 100 semillas (P100S) que los demás cultivares en promedio de los tres ambientes de humedad edáfica. FM Noura, FM Anita y FM M38, redujeron sus potenciales hídrico ( $\psi$ ) y osmótico ( $\pi$ ) en mayor grado ( $P \leq 0.05$ ) que los otros cultivares, logrando mayores niveles de ajuste osmótico (AO). Estos cultivares también sufrieron menor grado de estrés por alta temperatura, al reducir ( $P \leq 0.05$ ) su diferencia de temperatura del dosel del cultivo secano-riego (TDCs-r) en mayor medida que los demás cultivares. EL RS se relacionó positiva y significativamente con el AO en Celaya en secano y Montecillo en secano; la relación fue más estrecha en el ambiente más seco (Montecillo en secano). El RS también estuvo positiva y significativamente relacionado con la BF,  $V \text{ m}^{-2}$ ,  $SN \text{ m}^{-2}$  y P100S en promedio de los tres ambientes de humedad edáfica; la relación entre RS y BF fue más estrecha que RS con los otros componentes, por lo que la obtención de nuevos cultivares para ambientes de sequía y calor, podría ser más efectiva, al seleccionar por alta BF y AO, y menor TDCs-r.

**Palabras clave:** *Phaseolus vulgaris* L., riego, secano, relaciones hídricas, altas temperaturas.

# VARIATION IN DROUGHT RESISTANCE AND TOLERANCE TO HIGH TEMPERATURE IN BEAN FLOR DE MAYO TYPE

Edwin Javier Barrios Gómez  
Colegio de Postgraduados, 20010

## SUMMARY

Research work presented in this thesis was carried out in order to study the response of a group of drought tolerant and susceptible cultivars of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Flor de Mayo type, in seed yield (SY) and its components, water relationships and tolerance to high temperature under irrigation and rainfed conditions. Cultivars were grown in the spring-summer season (2007) in rainfed conditions (with two irrigation applications before flowering) at Celaya, Guanajuato, México and rainfed (depending upon rainfall only), and irrigation (irrigation applications weekly up to maturity) at Montecillo, Texcoco, Estado de México. Results showed that FM Noura, FM Anita y FM M38 produced greater mean seed yield (SY), final above-ground biomass (FAGB), normal pods  $m^{-2}$  (NP  $m^{-2}$ ), normal seeds  $m^{-2}$  (NS  $m^{-2}$ ) and one hundred seed weight (100SW) than the other cultivars over the three soil moisture environments. FM Noura, FM Anita y FM M38, reduced their water ( $\psi$ ) and osmotic ( $\pi$ ) potentials at a greater extent than the other cultivars, developing greater levels of osmotic adjustment (OA). These cultivars also experienced less stress by high temperature, decreasing ( $P \leq 0.05$ ) their rainfed-irrigation canopy temperature difference (RICTD) to a greater extent than the other cultivars. SY was positive and significantly associated with OA at Celaya and Montecillo in rainfed conditions; this relationship was stronger at the drier site (Montecillo). SY was also related to FAGB, NP  $m^{-2}$ , NS  $m^{-2}$  and 100SW positive and significantly in average of the three soil moisture environments; the relation between SY and FAGB was stronger than the relation between SY and the other yield components. Therefore, it is suggested that new cultivars for dry and hot environments should integrate high values for FAGB and OA, and low values for RCTD traits.

**Keywords:** *Phaseolus vulgaris* L., irrigation, rainfed, water relationships, high temperatures.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología que con su apoyo económico hizo posible mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados, por haberme brindado la oportunidad de superarme en mis estudios de postgrado.

Al Dr. Cándido López Castañeda, por sus valiosas enseñanzas, sugerencias e incondicional disposición en la organización, dirección y culminación del presente trabajo.

Al Dr. Josué Kohashi Shibata por el apoyo incondicional durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados, y por impulsarme a ser mejor día a día.

Al Dr. Jorge Alberto Acosta Gallegos, por su amistad incondicional, apoyo, y disposición no solamente en la revisión y finalización de este trabajo, sino en toda mi formación académica desde mis estudios de licenciatura.

Al Dr. Salvador Miranda Colín, con todo mi respeto y agradecimiento por sus innumerables e incansables consejos, y conocimientos que me transmitió, así como por la revisión del presente trabajo de investigación.

Al Dr. Amalio Santacruz Varela por su gran amistad, su incondicional ayuda académica, y todo el apoyo brindado durante mi estancia y mis estudios en el Colegio de Postgraduados.

Al Dr. Netzahualcoyotl Mayek Pérez por su amistad y el apoyo brindado en la revisión del presente trabajo.

Al M. C. Antonio García Esteva por su amistad y su incondicional ayuda en la revisión de este trabajo de investigación.

A la M. C. Petra Yáñez Jiménez por su amistad y sus valiosas sugerencias y consejos que me dio a lo largo de mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

A la M. C. Greta Hanako Rosas Saito y M. C. Jorge Valdez Carrasco por su amistad y su ayuda en parte de esta tesis en Colegio de Postgraduados.

A los trabajadores de campo Juan Raymundo Espinosa Alvarado y Fidel Pérez Romero, por su confianza, amistad y la ayuda que me brindaron en mi trabajo de investigación.

## DEDICATORIA

A la Gloria del Gran Arquitecto del Universo por permitirme coincidir en este espacio y tiempo, junto a todas las personas que de alguna manera he conocido y han hecho de mi la persona que soy, gracias por dejar conocerlos y gracias por dejar compartir momentos inolvidables en mi vida.

A mis padres José Ángel Barrios Becerra y Adela Gómez Rivera, por el cariño y apoyo incondicional que me han brindado, sin esperar mucho o poco de mi y por confiar siempre en mis decisiones de vida.

A mis abuelos Rogelio, Martha y Cecilia (QEPD), por ser grandes pilares de ejemplo en mi vida.

A mi querida esposa, Marian G. Hernández Arenas por su incondicional paciencia, comprensión y apoyo; y a mi niña Martha Fernanda y Saúl Xavier por ser una nueva inspiración en mi vida.

A mis hermanos José Ángel, Carlos Raúl, Rogelio, Toño, Susy, Oscar y Arnoldo, por el apoyo y amor que me han brindado para alcanzar mi superación personal.

Con todo mi aprecio a mis tíos Marco Antonio-Romelia, Elsa, Magdalena-Librado, Celia-Israel (QEPD), Teresa, Arcenio, Epifanio quienes me han brindado su incondicional apoyo y cariño a lo largo de mis estudios.

A mis amigos César del Ángel, Ezequiel, Myrna, René, Eliel, Jaime, Mario, Yola, Juanelo, Enrique, Jorge, Ivan; a los integrantes de los equipos de fútbol de Genética y Ganadería, quienes me brindaron su amistad y apoyo incondicional durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

## CONTENIDO

	iii
<b>RESUMEN</b> .....	iv
<b>SUMMARY</b> .....	v
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	vi
<b>DEDICATORIA</b> .....	vi
<b>CONTENIDO</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	ix
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	x
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, OBJETIVO GENERAL Y REFERENCIAS</b> .....	1
<b>1.1 INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1.2 OBJETIVO GENERAL</b> .....	3
<b>1.3 REFERENCIAS</b> .....	3
<b>CAPÍTULO II. RENDIMIENTO DE SEMILLA Y SUS COMPONENTES EN FRIJOL     FLOR DE MAYO EN EL CENTRO DE MÉXICO</b> .....	5
<b>2.1 RESUMEN</b> .....	5
<b>2.2 INTRODUCCIÓN</b> .....	5
<b>2.3 MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	6
<b>2.3.1 Localización de los experimentos</b> .....	6
<b>2.3.2 Material genético</b> .....	7
<b>2.3.3 Diseño experimental</b> .....	7
<b>2.3.4 Variables registradas</b> .....	7
<b>2.3.5 Contenido hídrico edáfico</b> .....	8
<b>2.3.6 Datos meteorológicos</b> .....	8
<b>2.3.7 Análisis estadístico</b> .....	9
<b>2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	10
<b>2.4.1 Inicio a floración y madurez fisiológica</b> .....	10
<b>2.4.2 Rendimiento de semilla y sus componentes entre experimentos y cultivares</b> .....	11
<b>2.5 CONCLUSIONES</b> .....	14
<b>2.6 REFERENCIAS</b> .....	14

<b>CAPÍTULO III. RELACIONES HÍDRICAS Y TOLERANCIA A ALTAS TEMPERATURAS EN FRIJOL TIPO FLOR DE MAYO.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 RESUMEN.....</b>	<b>16</b>
<b>3.2 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>16</b>
3.2.1 Potencial hídrico y sus componentes.....	18
3.2.2 Ajuste osmótico.....	19
3.2.3 Tolerancia a altas temperaturas.....	20
<b>3.3 MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>22</b>
3.3.1 Localización de los experimentos.....	22
3.3.2 Material genético.....	22
3.3.3 Diseño experimental.....	22
3.3.4 Variables medidas.....	23
3.3.5 Contenido hídrico edáfico y datos meteorológicos.....	24
3.3.6 Análisis estadístico.....	25
<b>3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>26</b>
3.4.1 Temperatura, precipitación pluvial y humedad edáfica.....	26
3.4.2 Relaciones hídricas.....	27
3.4.3 Ajuste osmótico.....	31
3.4.4 Temperatura del aire y del dosel del cultivo.....	34
3.4.5 Desviación de la temperatura del dosel del cultivo.....	36
3.4.6 Temperatura del cultivo, relaciones hídricas y rendimiento y sus componentes.	37
3.4.7 Diferencia secano-riego, relaciones hídricas y rendimiento, y sus componentes.	41
3.4.8 Diferencia en temperatura secano-riego y ajuste osmótico.....	43
<b>3.5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>45</b>
<b>3.6 REFERENCIAS.....</b>	<b>46</b>
<b>CAPITULO IV. DISCUSIÓN GENERAL.....</b>	<b>52</b>
<b>4.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>52</b>
<b>4.2 EXPERIMENTAL.....</b>	<b>53</b>
<b>4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>54</b>
<b>4.4 CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
<b>4.5 REFERENCIAS.....</b>	<b>56</b>



## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro</b>	<b>Pág.</b>
<b>Cuadro 2.1 Cultivares de frijol utilizados en el estudio, 2007.....</b>	<b>7</b>
<b>Cuadro 2.2 Días a inicio de floración y madurez fisiológica en Celaya (S) y Montecillo (R y S). 2007.....</b>	<b>11</b>
<b>Cuadro 2.3 Rendimiento de semilla (RS), biomasa aérea final (BF), vainas normales m<sup>-2</sup> (VN), semillas normales m<sup>-2</sup> (SN), semillas vaina<sup>-1</sup> (S vaina<sup>-1</sup>) y peso de 100 semillas (P100S) para ambientes y los cultivares, y en promedio de tres ambientes, 2007.....</b>	<b>12</b>
<b>Cuadro 3.2 Potencial osmótico (<math>\pi</math>) y ajuste osmótico (AO) para frijol en Montecillo en riego (MR), Celaya en seco (CS) y Montecillo en seco (MS). 2007.....</b>	<b>32</b>
<b>Cuadro 3.3 Desviación media de la temperatura del dosel del cultivo (T<sub>d</sub>), para nueve cultivares de frijol en tres ambientes de humedad edáfica y en promedio de los tres ambientes.....</b>	<b>37</b>
<b>Cuadro 3.4 Rendimiento de semilla (RS), biomasa aérea final (BAF), número de vainas m<sup>-2</sup> (V m<sup>-2</sup>) y peso de 100 semillas (P100S) promediados en los tres ambientes de humedad edáfica. El valor para cada cultivar se calculó del % de la media de cada ambiente y después se promedió entre los tres ambientes. 2007.....</b>	<b>40</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Pág.</b>
<b>Figura 2.1</b> Temperaturas máximas y mínimas promedio, y precipitación pluvial mensual acumulada, en los experimentos de Celaya y Montecillo, 2007.....	9
<b>Figura 2.2</b> Relación entre rendimiento de semilla y número de vainas normales m <sup>-2</sup> (a), número de semillas m <sup>-2</sup> (b), biomasa aérea final (c) y peso de 100 semillas (d). Promedio de los tres ambientes. 2007.....	13
<b>Figura 3.1</b> Temperatura máxima y mínima promedio semanal, y precipitación semanal acumulada en Celaya (a) y Montecillo (b) y contenido hídrico edáfico a las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm en Celaya en secano (c, e g) y Montecillo en secano (d, f y h), respectivamente. 2007.....	25
<b>Figura 3.2</b> Potencial hídrico (a), potencial osmótico (b) y potencial de turgencia (c) en Celaya en secano, Montecillo en riego y Montecillo en secano. 2007.....	29
<b>Figura 3.3</b> Potencial hídrico (a, d, g), osmótico (b, e, h) y de turgencia (c, f, i) en Montecillo en riego, Celaya en secano y Montecillo en secano. 2007...	30
<b>Figura 3.4</b> Relación entre el ajuste osmótico y el rendimiento de semilla (a), y la biomasa aérea final (b) en Celaya en secano y Montecillo en secano (c y d), y en promedio de los dos ambientes (e y f). 2007.....	34
<b>Figura 3.5</b> Temperatura del dosel del cultivo en Celaya en secano y Montecillo en riego y secano, respectivamente. 2007.....	35
<b>Figura 3.6</b> Relación entre la temperatura del dosel del cultivo y la temperatura promedio del aire entre las etapas R5 (50 dds) y R6 (70 dds) en Celaya en secano, Montecillo en riego y en secano (Figura 3.6a) y en promedio de los tres ambientes (Figura 3.6b). 2007.....	36

<b>Figura 3.7</b> Relación entre el promedio de la temperatura del dosel del cultivo y potencial hídrico (a), y potencial osmótico (b) en Montecillo en riego, Celaya en secano y Montecillo en secano. 2007.....	<b>38</b>
<b>Figura 3.8</b> Relación entre el promedio de la temperatura del dosel del cultivo y rendimiento de semilla (a), biomasa aérea final (b), número de vainas m <sup>-2</sup> (c) y peso de 100 semillas (d). 2007.....	<b>40</b>
<b>Figura 3.9</b> Diferencia secano-riego para la temperatura del dosel del cultivo en Celaya en secano (a) y Montecillo en secano (b). 2007.....	<b>41</b>
<b>Figura 3.10</b> Relación entre la diferencia de la temperatura del dosel del cultivo secano-riego y el potencial hídrico (a) y osmótico (b) en Montecillo en secano, y en promedio de la diferencia de la temperatura del dosel del cultivo secano-riego y promedio del potencial hídrico (c) y el potencial osmótico (d) en los dos ambientes. 2007.....	<b>42</b>
<b>Figura 3.11</b> Relación entre el promedio de la diferencia en la temperatura del dosel del cultivo secano-riego y el rendimiento de semilla (a) y la biomasa aérea final (b) en Celaya en secano, Montecillo en secano (c y d) y en promedio de los dos ambientes. 2007.....	<b>44</b>
<b>Figura 3.12</b> Relación entre el ajuste osmótico y la diferencia de temperatura del dosel del cultivo secano-riego en Celaya en secano (a), Montecillo en secano (b) y en promedio de los dos ambientes (c). 2007.....	<b>45</b>

# CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN, OBJETIVO GENERAL Y REFERENCIAS

## 1.1 INTRODUCCIÓN

En el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), al igual que en muchos otros cultivos, los factores ambientales son causales de la disminución del rendimiento potencial. Esta disminución se manifiesta en forma diferencial de acuerdo con los cultivares empleados. Entre los factores ambientales en cuestión, se cuenta a la precipitación pluvial (monto y distribución), la temperatura y humedad relativa atmosférica, y el fotoperiodo. Cuando uno o más de estos factores se presenta en un nivel sub-óptimo, ocurre estrés hídrico en la planta, se inhibe el crecimiento y se afecta el proceso reproductor.

Dependiendo del grado del estrés, y de la fase fenológica y condición de la planta en que incida, esto se traduce en una disminución y hasta en pérdida total del rendimiento.

El resultado final depende como ya se indicó, del cultivar empleado, dictado por el grado del estrés, y de la fase fenológica y condición de la planta en que éste incida.

En el caso de México, el frijol se cultiva en aproximadamente 2.3 millones de ha, con una producción anual de 1.12 millones de toneladas; 20 % de esta superficie se siembra en riego con rendimientos de 1442 kg ha<sup>-1</sup> y 80 % en secano con menores rendimientos, del orden de 500 kg ha<sup>-1</sup> (SAGARPA, 2009), debido a que las siembras de frijol se han ido desplazando de las regiones de buen temporal a las de temporal incierto. En dichas regiones, los bajos rendimientos se deben principalmente a periodos de sequía intermitente, causados por prolongadas interrupciones de la precipitación durante el ciclo del cultivo (primavera-verano, PV) (SAGARPA, 2009).

Por otra parte, en las regiones tropicales (p. ej. en Nayarit), el frijol se siembra bajo humedad residual al final de la temporada de lluvias, donde a pesar del alto promedio de precipitación, el cultivo con frecuencia experimenta los efectos de la sequía terminal durante la etapa reproductora. En este tipo de sequía se han sugerido diferentes estrategias para reducir los efectos del déficit hídrico, entre las que sobresale el mejoramiento para precocidad (Singh *et al.*, 1998).

Ambos tipos de sequía (intermitente y terminal) se traducen en estrés por sequía en la planta, condición que constituye el principal factor limitante del crecimiento, desarrollo y rendimiento del frijol. En los sistemas agrícolas de secano la disminución del rendimiento puede ser desde un 60 hasta 100 % (Acosta-Gallegos *et al.*, 2000). Cuando las deficiencias

son moderadas, se reduce el crecimiento de la planta y se afectan sus procesos de desarrollo, lo cual se traduce en bajos rendimientos, mientras que las sequías prolongadas pueden causar la pérdida total. La disminución del rendimiento se agudiza en áreas de cultivo con suelos pobres (Acosta-Gallegos *et al.*, 2000) y en presencia de enfermedades de la raíz (Mayek-Pérez *et al.*, 2003), y de altas temperaturas.

Las deficiencias hídricas de la planta afectan muchos procesos fisiológicos; entre ellos, el crecimiento de la célula es quizás el más sensible, debido a que la energía requerida para el alargamiento celular depende de la turgencia. Las respuestas metabólicas y regulatorias de la expansión celular también pueden influir en los efectos del estrés hídrico en la turgencia celular (Begg y Turner, 1976), entre ellas el ajuste osmótico.

Después de la sequía, las altas temperaturas que ocasionan en la planta un estrés por temperatura, constituyen otro factor abiótico que ocasiona problemas serios en la producción. El incremento gradual de la temperatura debido al cambio climático contribuirá a agravar estos problemas.

De acuerdo con Yan y Wallace (1998), la temperatura y el fotoperiodo son los dos factores ambientales de mayor importancia para la determinación de la fenología, la adaptación y el rendimiento para diferentes cultivos.

En general, la tolerancia del frijol a las altas temperaturas es muy reducida, y los cultivares utilizados están adaptados a regiones de elevación media a alta o a siembras en épocas con temperaturas moderadas.

Con el cambio climático global (determinado principalmente por un incremento en CO<sub>2</sub> y temperatura) es cada vez más frecuente que los cultivos de secano experimenten estrés, causado por sequía y calor o ambos, en las etapas reproductoras cuando las plantas son más sensitivas a las variaciones en temperatura y humedad. Estos cambios inevitablemente tienen efectos significativos en los procesos fisiológicos relacionados con la absorción y transporte de agua del suelo al sistema vascular de la planta. Un sistema radical profundo y extenso que favorezca mayor absorción de agua del perfil del suelo y una conducción axial eficaz a través de los vasos del xilema, son caracteres que pueden ayudar a mantener en cierto grado, la transpiración (pérdida de H<sub>2</sub>O) y la fotosíntesis (fijación de CO<sub>2</sub>), aun en condiciones de sequía (Passioura, 1982). Sí la planta continúa transpirando a pesar del estrés hídrico, la transpiración ayudará a enfriar el dosel del cultivo y reducir el efecto de la alta temperatura.

Reynolds *et al.* (1998) determinaron una alta correlación genética entre la depresión de la temperatura del dosel [p. ej., DTDC = Temperatura del aire circundante al dosel (°C) – Temperatura del dosel del cultivo (°C)] y el rendimiento de grano en trigo en ambientes cálidos y templados, y altos valores en la respuesta a la selección por DTDC. En frijol se ha reportado que el incremento en la temperatura del aire causa alta acumulación de fibra en las vainas, lo que reduce el rendimiento y calidad de la semilla (Peet y Wolfe, 2000).

## 1.2 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de la presente tesis fue estudiar la respuesta de un grupo de cultivares de frijol tipo Flor de Mayo, unas resistentes y otras susceptibles a sequía en: rendimiento y sus componentes, relaciones hídricas, y tolerancia a altas temperaturas en condiciones de riego y secano.

## 1.3 REFERENCIAS

- Acosta-Gallegos J. A., R. Rosales-Serna, R. Navarrete-Maya, E. López-Salinas. 2000. Desarrollo de variedades mejoradas de frijol para condiciones de riego y temporal en México. *Agricultura Técnica en México* 26 (1): 79-98.
- Begg J. E. and N. C. Turner. 1976. Crop water deficits. *Advances in Agronomy* 28: 161-217.
- Mayek-Pérez N., C. López-Castañeda, E. López-Salinas, Cumpián-Gutiérrez J., Joaquín-Torres I. C., Padilla-Ramírez J. S., Acosta-Gallegos J. A. 2003. Effect of *Macrophomina phaseolina* (Tassi) Goid. on grain yield of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and its relationship with yield stability parameters. *Revista Mexicana de Fitopatología* 21(1): 168-175.
- Passioura J. B. 1982. The role of root system characteristics in the drought resistance of crop plants. *In: Drought resistance in crops with emphasis on rice*. IRRI, The Philippines. Pp. 71-82.
- Peet M. M. and D. Wolfe. 2000. Crop ecosystem responses to climatic change: vegetable crops. *In: K.R. Reedy and H.F. Hodges (eds.). Climate change and global crop productivity*. CABI Publishing, United Kingdom. Pp. 213-243.

- Reynolds M. P., R. P. Singh, A. Ibrahim, O. A. A. Ageeb, A. Larqué-Saavedra, and J.S. Quick. 1998. Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments. *Euphytica* 100: 84-95.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2009. Servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera. Anuario estadístico de la producción agrícola. (<http://www.siap.org/Anuarios/Agricolas.DDR>, consultado; Agosto, 2009).
- Singh S. P. 1998. Uso de marcadores y selección de gametos para el mejoramiento simultáneo de caracteres múltiples de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) para Mesoamérica y el Caribe. *Agronomía Mesoamericana* 9: 1-9.
- Yan W. and D. H. Wallace. 1998. Simulation and prediction of plant phenology for five crops based on photoperiod x temperature interaction. *Annals of Botany* 81: 705-716.

## CAPÍTULO II. RENDIMIENTO DE SEMILLA Y SUS COMPONENTES EN FRIJOL FLOR DE MAYO EN EL CENTRO DE MÉXICO<sup>1</sup>

### 2.1 RESUMEN

En el Centro de México el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) tipo Flor de Mayo (FM) es uno de los tipos comerciales de mayor demanda. El objetivo del presente estudio fue caracterizar cultivares de frijol del tipo FM, por su rendimiento de semilla, y componentes de rendimiento en condiciones de riego y secano. Durante primavera-verano de 2007 se diseñaron tres experimentos en bloques completos al azar: uno en Celaya con riegos de auxilio (punta de riego), Guanajuato, y uno en riego y otro en secano en Montecillo, Estado de México. Se evaluaron ocho cultivares del tipo FM y el cultivar Michoacán 128, del Estado de Michoacán, México; todas de hábito indeterminado tipo III. Los análisis estadísticos mostraron diferencias altamente significativas para ambientes, cultivares, pero no para la interacción ambientes x cultivares. En promedio de ambientes Celaya fue el que presentó los rendimientos de semilla más altos, seguido por Montecillo en Riego. En promedio de cultivares por ambientes, FM Noura, Anita y M38 produjeron mayor rendimiento de semilla, biomasa aérea final, vainas y semillas normales y peso de 100 semillas que los demás cultivares ( $p \leq 0.01$ ). Michoacán 128 presentó los más bajos valores para rendimiento de semilla y sus componentes. El rendimiento de semilla se asoció con biomasa aérea final ( $R^2=0.99^{**}$ ), vainas normales ( $R^2=0.76^{**}$ ), semillas normales ( $R^2=0.71^*$ ) y peso de 100 semillas ( $R^2=0.6^*$ ). Los cultivares de más reciente liberación presentaron mayor rendimiento de semilla, y de sus componentes, y biomasa aérea final ( $p \leq 0.01$ ).

**Palabras clave:** *Phaseolus vulgaris* L., hábito de crecimiento tipo III, rendimiento de semilla, riego, secano.

### 2.2 INTRODUCCIÓN

En México, el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) se cultiva en promedio en 2.3 millones ha, con una producción anual de 1.12 millones t. El 20 % de la superficie se siembra en riego con rendimientos de 1442 kg ha<sup>-1</sup> y 80 % en secano (S) con rendimientos de 500 kg ha<sup>-1</sup>. Los bajos rendimientos en S se deben principalmente a periodos de sequía intermitente en el ciclo

---

<sup>1</sup> Artículo publicado en Agrociencia 44: 481-489. 2010.



primavera-verano (PV) (SAGARPA, 2008). Este problema se agudiza en áreas de cultivo con suelos pobres (Acosta-Gallegos *et al.*, 2000) y altas temperaturas. Más de las tres cuartas partes de la superficie sembrada en S se establece en PV en el Altiplano Mexicano, donde la sequía intermitente es el principal factor limitante del rendimiento. La respuesta de las plantas a la sequía depende de la etapa fenológica en la que ésta ocurra. La fenología es una de las características más importantes para la adaptación del frijol a las zonas de S donde se requiere un rápido desarrollo del cultivo (Turner, 1979; Acosta-Gallegos *et al.*, 2000). Otras características favorables de la planta para la adaptación del frijol a la sequía o temporal errático son el tamaño de la semilla, el hábito de crecimiento y las características del sistema radical (Terán y Singh, 2002), así como la acumulación de biomasa y la tasa de removilización de fotoasimilados de ramas y tallo hacia la semilla (Rosales-Serna *et al.*, 2004b). Asimismo, la selección de plantas con resistencia a plagas y a enfermedades foliares y radicales debe integrarse en los programas de mejoramiento (Singh *et al.*, 2007). Las enfermedades y los bajos rendimientos causaron que se pusiera énfasis en estos aspectos en los programas de mejoramiento. Los cultivares de frijol tipo Flor de Mayo utilizadas en el presente estudio se han incluido en muchas investigaciones; sin embargo, no se ha determinado el avance de su mejoramiento en conjunto, y se tiene la hipótesis que el mejoramiento ha dado como resultado que los cultivares de más reciente liberación sean de mayor rendimiento. El objetivo del presente estudio fue caracterizar a un grupo de cultivares frijol del tipo Flor de Mayo, por su rendimiento de semilla en condiciones de riego y secano.

## **2.3 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.3.1 Localización de los experimentos**

Se establecieron tres experimentos en el ciclo PV 2007; uno en punta de riego en el Campo Agrícola Experimental del Bajío, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), en Celaya, Guanajuato, México (20° 34' LN y 100° 50' LO y 1765 msnm); y otros dos riego (R) y secano (S) en el Campo Agrícola Experimental del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Estado de México, México (19° 21' N y 98° 55' O y 2250 msnm). En adelante, dichos ambientes serán referidos como Celaya, Montecillo R y Montecillo S, respectivamente.

### 2.3.2 Material genético

Se incluyeron ocho cultivares de frijol tipo Flor de Mayo (FM) utilizadas en siembras de R y S en la región templada subhúmeda, además el material criollo Michoacán 128 (Cuadro 2.1).

**Cuadro 2.1 Cultivares de frijol utilizados en el estudio, 2007.**

Cultivar <sup>†</sup>	Año de liberación	Días a floración
Flor de Mayo M38	1994	50-57
Flor de Mayo Corregidora	2000	48-56
Flor de Mayo Sol	1996	45-51
Flor de Mayo RMC	1981	44-55
Flor de Mayo Bajío	1989	45-47
Flor de Mayo Noura	2006	47-50
Flor de Mayo Anita	2002	44-62
Flor de Mayo 2000	2001	45-50
Michoacán 128 <sup>‡</sup>	1974 <sup>§</sup>	47-53

<sup>†</sup>Cultivares proporcionadas por el INIFAP, Celaya, Guanajuato. <sup>‡</sup>Material proveniente de Michoacán, proporcionado por el Dr. Salvador Miranda Colín, Colegio de Postgraduados, Montecillo. <sup>§</sup>Año en que se colecto.

### 2.3.3 Diseño experimental

Para los tres experimentos se utilizó el diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones; la unidad experimental consistió de dos surcos de 0.80 m de separación y 4 m de longitud. En Celaya, se aplicó un riego antes de la siembra (3 de abril de 2007) en hileras en el fondo del surco; 15 días después de la siembra (dds) se hizo un aclareo para ajustar la población a 150,000 plantas ha<sup>-1</sup>. Por la falta de precipitación en Celaya, se aplicaron tres riegos complementarios a los 20 (etapa vegetativa), 55 y 65 dds (plena y final de la floración), por lo que ese consideraría como punta de riego. Los experimentos en Montecillo se sembraron el 12 de abril de 2007; en el de R se aplicó agua de acuerdo a las necesidades del cultivo y en S, se aplicó un riego solamente hasta los 24 dds (25 días antes del inicio de la floración), posteriormente el desarrollo de las plantas dependió de la precipitación pluvial.

### 2.3.4 Variables registradas

Las variables fenológicas registradas fueron días a inicio de floración (IF) y días a madurez fisiológica (MF). Una vez que se alcanzó la madurez fisiológica, se cosecharon todas las plantas obtenidas en un 1.0 m lineal (0.8 m<sup>2</sup>) en cada unidad experimental con el propósito de determinar el rendimiento de semilla (g m<sup>-2</sup>) y sus componentes [vainas normales m<sup>-2</sup>,

semillas normales  $m^{-2}$ , semillas vaina<sup>-1</sup> y peso de 100 semillas (g)] y la biomasa aérea final ( $g m^{-2}$ ).

### **2.3.5 Contenido hídrico edáfico**

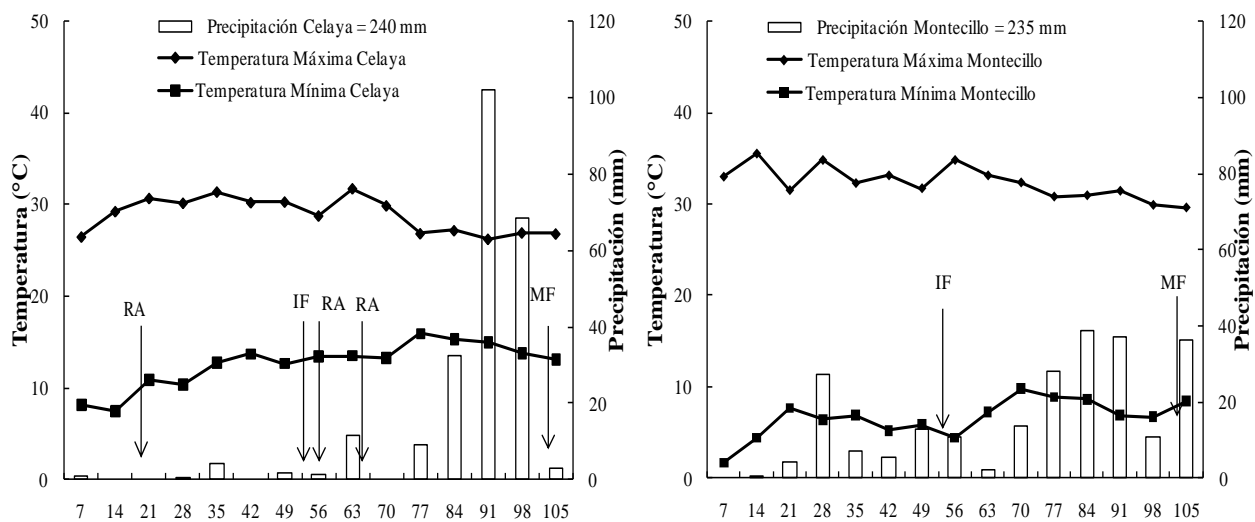
El contenido hídrico edáfico en Celaya alcanzó un nivel cercano al porcentaje de punto de marchitez permanente (PMP) en las profundidades de 0-20 y 20-40 cm entre los 40 y 55 dds, periodo en el que ocurrió la floración; después del segundo y tercer riego de auxilio (55 y 65 dds), el contenido de humedad en el suelo aumentó y se mantuvo cercano a la capacidad de campo (CC) hasta la madurez, dentro de los límites de la humedad aprovechable, debido a la gran cantidad de lluvia que se presentó al final del ciclo. En Montecillo R el contenido hídrico edáfico a las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm se mantuvo cercano a la CC durante el ciclo del cultivo. En Montecillos S el contenido de humedad disminuyó por debajo del PMP en la profundidad de 0-20 cm entre los 35 y 70 dds, y en la profundidad de 20-40 cm entre los 56 y 70 dds. La floración coincidió con el periodo de más bajo contenido hídrico edáfico en la profundidad de 0-20 cm (datos no mostrados).

### **2.3.6 Datos meteorológicos**

Las temperaturas máximas y mínimas promedio del aire y la precipitación mensual acumulada (Figura 2.1) se obtuvieron de las estaciones meteorológicas del INIFAP y del Colegio de Postgraduados, ubicadas a una distancia aproximada de 200 m de los sitios experimentales, respectivamente. La temperatura (t) óptima para el crecimiento del frijol es de 25 °C (Masaya y White, 1991) y la t base de 8 °C (Barrios-Gómez y López-Castañeda, 2009). Para los ambientes, la t máxima promedio de 31.7 °C en Montecillo y en Celaya de 28.1 °C (Figura 2.1) fueron mayores que la óptima para el crecimiento del frijol. Las altas temperaturas máximas en el período de mayor deficiencia hídrica edáfica favorecieron un alto grado de estrés en las plantas, lo cual concuerda con lo que indican White y Singh (1991), y Wang *et al.* (2006).

La t mínima promedio para Montecillo de 5.3 °C (Figura 2.1) fue menor que la t base de frijol; sin embargo, no se observaron daños en las láminas foliares de las plántulas. Estos resultados coinciden con los publicados por otros autores (Machado *et al.*, 2006; Barrios-Gómez y López-Castañeda, 2009) en el sentido de que todavía hay crecimiento sin daño a temperaturas

entre 4 y 10 °C. En Celaya, la  $t$  mínima promedio (11.9 °C) estuvo por arriba de la  $t$  base, lo que favoreció un rápido desarrollo de la planta. La distribución irregular de la lluvia se reflejó en un bajo contenido hídrico edáfico en el ambiente de Montecillo S, con niveles de humedad inferiores al PMP para los estratos de 0-20 y 20-40 cm; y en Celaya muy próxima al PMP en la profundidad de 0 a 20 cm. Según Halterlein (1983), aproximadamente el 50 % de la densidad radical y la acumulación de materia seca en las raíces del frijol se localizan hasta una profundidad de 30 cm.



**Figura 2.1** Temperaturas máximas y mínimas promedio, y precipitación pluvial mensual acumulada, en los experimentos de Celaya y Montecillo, 2007. RA= riegos de auxilio, IF=inicio de la floración, MF= madurez fisiológica.

### 2.3.7 Análisis estadístico

El análisis de varianza se hizo para todas las variables medidas con el programa SAS (2000) en forma individual como bloques completamente al azar ( $Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + E_{ij}$ ) y en forma combinada como serie de experimentos ( $Y_{ijk} = \mu + L_i + T_j + LT_{ij} + B_{(i)j} + E_{ijk}$ ); para determinar las diferencias entre ambientes (L), cultivares (T), y la interacción cultivares x ambientes (L\*T). Se aplicó la prueba de rango múltiple, diferencia mínima significativa honesta, Tukey (DSH,  $p \leq 0.05$ ) para la comparación de medias.

## **2.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **2.4.1 Inicio a floración y madurez fisiológica**

En el análisis combinado en serie de experimentos se detectó diferencias ( $p \leq 0.01$ ) entre ambientes, cultivares, cultivares dentro de ambientes y en la interacción ambientes x cultivares. Los ambientes de Celaya y Montecillo S presentaron menor número de días a inicio de la floración y madurez fisiológica que el de Montecillo R (Cuadro 2.2), debido a que la duración de las fases vegetativa y reproductiva se acortó por la menor disponibilidad de humedad en el suelo (Rosales-Serna *et al.*, 2004b; Muñoz-Perea *et al.*, 2007) y mayor temperatura (Singh, 2006). En promedio, de los tres ambientes, FM Bajío y Corregidora, tuvieron el menor número de días a inicio de la floración y FM Anita y Michoacán 128 fueron las más tardías. FM Bajío, RMC y Corregidora, fueron las primeras y FM Anita y M38 fueron las últimas en alcanzar la madurez (Cuadro 2.2). Los cultivares antiguas y de reciente liberación han mantenido el número de días a floración y madurez fisiológica en un intervalo entre 50 y 57, y 105 y 110 días, respectivamente. La excepción fue FM Bajío, cultivar muy precoz (Acosta-Díaz *et al.*, 2004).

En relación al comportamiento de los cultivares por ambiente, en Celaya se presentaron los cultivares más precoces ( $p \leq 0.01$ ) en cuanto a inicio a floración (FM M38 y Bajío), y los cultivares tardías se presentaron en Montecillo R (Michoacán 128 y FM Anita). Los cultivares más precoces para madurez fisiológica se presentaron en Celaya (FM Bajío y Corregidora); en Montecillo R se presentaron los cultivares más tardías (Michoacán 128 y FM Anita) (Cuadro 2.2).

**Cuadro 2.2 Días a inicio de floración y madurez fisiológica en Celaya (S) y Montecillo (R y S), 2007.**

Cultivar	Celaya (S)		Montecillo (R)		Montecillo (S)		MGV	
	IF	MF	IF	MF	IF	MF	IF	MF
FM M38	46	104	59	116	57	111	54	110
FM Corregidora	47	95	53	115	50	109	50	106
FM Sol	48	97	54	113	51	110	51	107
FM RMC	50	97	54	111	51	108	51	105
FM Bajío	46	87	49	105	47	101	48	98
Michoacán 128	51	98	61	118	57	111	56	109
FM Noura	47	102	61	113	58	107	55	107
FM Anita	50	100	63	117	59	113	57	110
FM 2000	47	99	53	115	49	113	50	107
DHS ( $p \leq 0.05$ )	6	8	6	5	7	6	4	4
<b>MGE</b>	<b>48</b>	<b>97</b>	<b>56</b>	<b>114</b>	<b>53</b>	<b>109</b>	<b>52</b>	<b>106</b>

IF= Inicio de floración; MF= Madurez fisiológica; MGV= Media general para cultivares; MGE= Media general para ambientes.

#### 2.4.2 Rendimiento de semilla y sus componentes entre experimentos y cultivares

La interacción ambientes x cultivares para rendimiento de semilla y sus componentes, y biomasa aérea final, no fue significativa, por lo que los cultivares tuvieron el mismo comportamiento en los diferentes ambientes y en el análisis combinado de los tres ambientes permitió observar con mayor detalle el comportamiento de cada cultivar. Se observaron diferencias ( $p \leq 0.01$ ) entre ambientes para la mayoría de las variables, a excepción del número de vainas  $m^{-2}$  que fue solamente significativo ( $p \leq 0.01$ ). En cultivares hubo diferencias ( $p \leq 0.01$ ) para todas las variables medidas; y no hubo interacción entre ambientes x cultivares. En el análisis por ambientes en Celaya se produjo ( $p \leq 0.01$ ) mayor rendimiento de semilla, biomasa aérea final, semillas normales  $m^{-2}$ , semillas vaina<sup>-1</sup> y peso de 100 semillas que en Montecillo S, y mayor rendimiento de semilla, semillas normales  $m^{-2}$  y semillas vaina<sup>-1</sup> que en Montecillo R (Cuadro 2.3).

El mayor rendimiento de semilla producido en Celaya respecto a Montecillo R y S, se debió a que las plantas se recuperaron del estrés hídrico edáfico al que estuvieron sujetas durante el periodo de inicio de floración, después de la aplicación de tres riegos de auxilio, además a la presencia de lluvias durante el resto del ciclo del cultivo. La disponibilidad de humedad durante la floración y el llenado de la semilla contribuyó a la formación de un mayor número de semillas normales y de mayor tamaño (Singh, 2006; Muñoz-Perea *et al.*, 2007). En promedio de ambientes los cultivares FM Noura, Anita y M38, produjeron mayor rendimiento

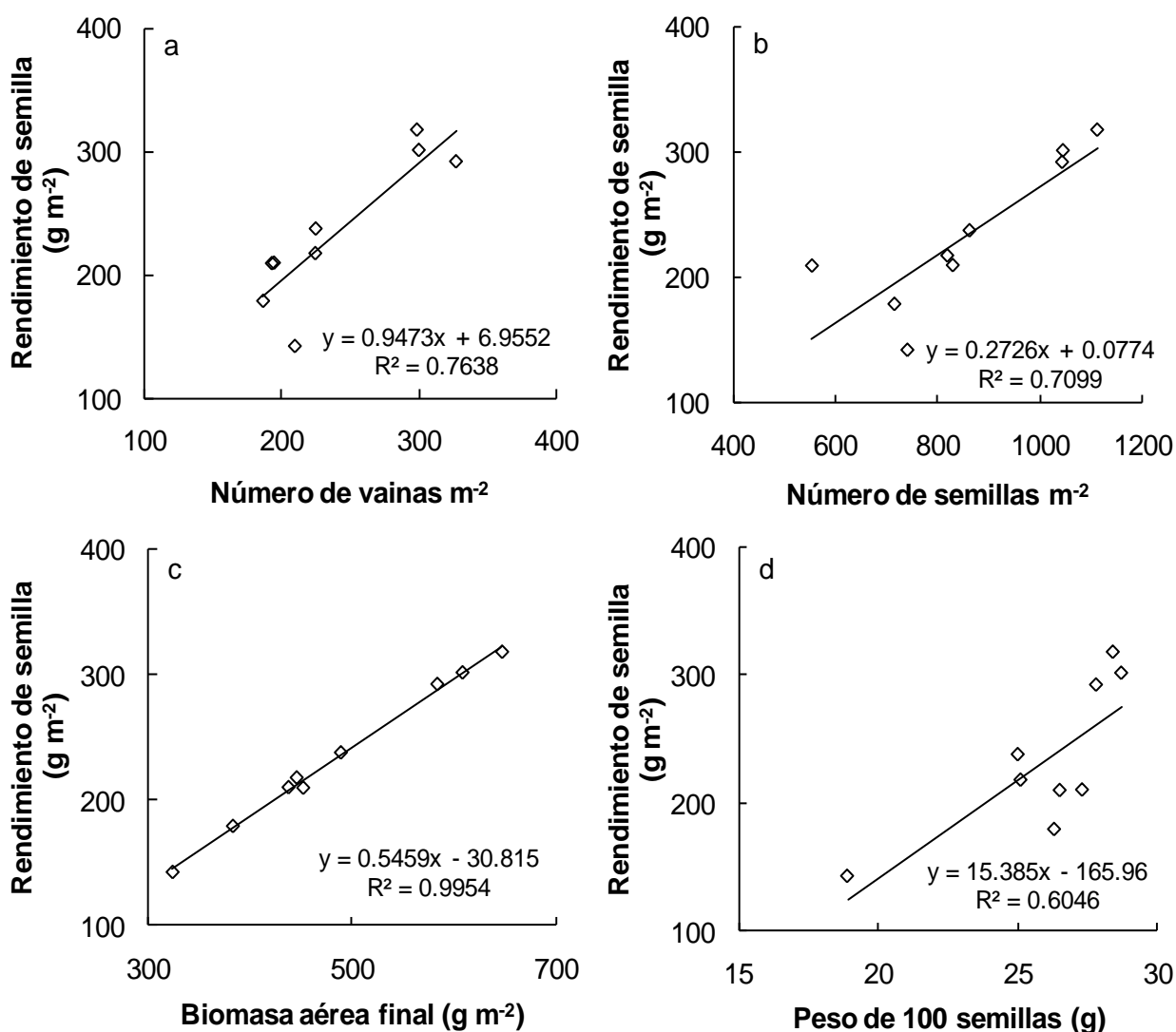
de semilla que el resto de los cultivares; su alto rendimiento de semilla estuvo asociado con la producción de biomasa aérea final, vainas normales  $m^{-2}$ , semillas normales  $m^{-2}$ , semillas vaina<sup>-1</sup> y peso de 100 semillas, excepto en el cultivar FM M38 que tuvo significativamente menor número de semillas vaina<sup>-1</sup> que FM Noura y Anita (Cuadro 2.3). Nótese que los cultivares de reciente liberación son las que tuvieron los mejores rendimientos de semilla, excepto FM M38, cultivar relativamente antigua pero con buen comportamiento en este estudio. Tal parece que en los nuevos cultivares los criterios de selección aplicados han sido biomasa aérea final y el rendimiento de semilla y sus componentes. Resultados similares de cultivares similares han sido reportados por Wang *et al.*, 2006; Singh, 2006. El cultivar Michoacán 128 fue la que produjo el rendimiento de semilla más bajo; así como de biomasa aérea final y peso de 100 semillas (Cuadro 2.3).

**Cuadro 2.3 Rendimiento de semilla (RS), biomasa aérea final (BF), vainas normales  $m^{-2}$  (VN), semillas normales  $m^{-2}$  (SN), semillas vaina<sup>-1</sup> (S vaina<sup>-1</sup>) y peso de 100 semillas (P100S) para ambientes y los cultivares, y en promedio de tres ambientes, 2007.**

Ambientes/ Cultivares	RS g $m^{-2}$	BF g $m^{-2}$	VN $m^{-2}$	SN $m^{-2}$	S vaina <sup>-1</sup>	P100S g
<b>Ambientes</b>						
Celaya Secano	282.5a	555.1a	258.0a	1019.5a	4.4a	26.9a
Montecillo Riego	244.0b	516.0a	246.1a	873.2b	3.7b	26.6a
Montecillo Secano	175.6c	384.5b	215.0a	681.8c	3.3b	24.5b
DSH ( $P \leq 0.05$ )	27.0	52.5	38.0	95.0	0.4	0.9
<b>Cultivares</b>						
FM Noura	317.4a	646.6a	298.9a	1112.8a	3.9a	28.4a
FM Anita	301.0a	607.8a	300.3a	1045.6a	3.7a	28.7a
FM M38	291.8a	583.1a	327.6a	1044.0a	3.4b	27.8a
FM Sol	237.5b	488.6b	224.6b	862.5b	4.1a	25.0b
FM Bajío	217.6b	445.3b	224.3b	819.0b	3.8a	25.1b
FM Corregidora	209.9b	437.3b	194.0b	829.7b	4.4a	27.3a
FM 2000	209.5b	451.7b	192.4b	553.7c	3.1b	26.5b
FM RMC	179.1b	382.8b	186.0b	715.3b	4.1a	26.3b
Mich-128	142.6c	323.7c	209.3b	740.8b	3.7a	18.9c
DHS ( $P \leq 0.05$ )	67.1	130.7	94.5	236.4	0.9	2.1
<b>Media general</b>	<b>234.0</b>	<b>485.2</b>	<b>239.7</b>	<b>858.2</b>	<b>3.8</b>	<b>26.0</b>

Medias con distinta letra en una hilera son estadísticamente diferentes ( $P \leq 0.05$ ).

El rendimiento de semilla estuvo positiva y significativamente ( $p \leq 0.01$ ) asociado con el número de vainas normales  $m^{-2}$  (Figura 2a) y semillas normales  $m^{-2}$  (Figura 2b), la biomasa aérea final (Figura 2c) y el peso de 100 semillas (Figura 2d); lo cual confirma que el rendimiento, sus componentes y la biomasa aérea final podría utilizarse en la selección de cultivares sobresalientes de frijol (Rosales-Serna *et al.*, 2004b). Previamente había informado Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998 que en frijol una alta biomasa aérea está asociada con mayor producción de fotoasimilados que pueden ser removilizados a las vainas y semillas para incrementar el rendimiento.



**Figura 2.2** Relación entre rendimiento de semilla y número de vainas normales  $m^{-2}$  (a), número de semillas  $m^{-2}$  (b), biomasa aérea final (c) y peso de 100 semillas (d). Promedio de los tres ambientes. 2007.



## 2.5 CONCLUSIONES

Los cultivares con mayor rendimiento de semilla en promedio de los tres ambientes fueron FM Noura, Anita (estas de reciente liberación) y M38 (antigua), relacionado con alta biomasa aérea final, vainas normales  $m^{-2}$ , semillas normales  $m^{-2}$  y peso de 100 semillas. La biomasa aérea final fue el componente del rendimiento más estrechamente relacionado con el rendimiento de semilla.

## 2.6 REFERENCIAS

- Acosta-Díaz E., C. Trejo-López, L. Ruiz-Posadas, S. Padilla-Ramírez, y J. A. Acosta-Gallegos. 2004. Adaptación del frijol a sequía en la etapa reproductiva. *Terra* 22:49-58.
- Acosta-Gallegos J. A., R. Rosales-Serna, R. Navarrete-Maya y E. López-Salinas. 2000. Desarrollo de variedades mejoradas de frijol para condiciones de riego y temporal en México. *Agricultura Técnica en México* 26:79-98.
- Barrios-Gómez E. J. y C. López-Castañeda. 2009. Temperatura base y tasa de extensión foliar. *Agrociencia* 43:29-35.
- Halterlein A. J. 1983. Bean. *In*: Teare I. D., and Peet M. M. (eds). *Crop-Water Relations*. Wiley Pub., New York. Pp. 157-185.
- Machado, N. N. B., P. M. Regina, A. B. Gatti, and V. J. Mendes. 2006. Temperature effects on seed germination in races of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Acta Scientiarum Agronomy* 28:155-164.
- Masaya P., and J. W. White. 1991. Adaptation to photoperiod and temperature. *In*: Schoonhoven A. V., and Voysest O. (eds). *Common Beans: Research for Crop Improvement*. C. A. B. Intl. U. K. and CIAT, Cali, Colombia. Pp. 445-500.
- Muñoz-Perea C. G., H. Terán, R. G. Allen, J. L. Wright, D. T. Westermann, and S. P. Singh. 2007. Selection for drought resistance in dry bean landraces and cultivars. *Agronomy Journal* 99:1458-1462.
- Ramírez-Vallejo P., and J. D. Kelly. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99:127-136.
- Rosales S. R., J. A. Acosta G., S. Muruaga J., M. Hernández J., G. Esquivel y P. Pérez. 2004a. Variedades mejoradas de frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,

- Agrícolas y Pecuarias (Libro Técnico No. 6). SAGARPA, INIFAP, CIRCE, Campo Experimental Valle de México. Chapingo. México. México. 148 p.
- Rosales-Serna R., J. Kohashi-Shibata, J. A. Acosta-Gallegos, C. Trejo-López, J. Ortiz-Cereceres, and J. D. Kelly. 2004b. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed bean cultivars. *Field Crops Research* 85:203-211.
- SAGARPA. 2008. Servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera, Anuario estadístico de la producción agrícola. (<http://www.siap.org/Anuarios/Agricolas.DDR>, Consultada en Agosto, 2008).
- Singh P. S. 2006. Drought resistance in the Race Durango dry bean landraces and cultivars. *Crop Science* 46:2111-2120.
- Singh S. P., H. Terán, M. Lema, D. M. Webster, C. A. Strausbaugh, P. N. Miklas, H. F. Schwartz, and M. A. Brick. 2007. Seventy-five years of breeding dry bean of the western USA. *Crop Science* 47:981-989.
- Statistical Analysis System, Versión 8 para Windows (2000). SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.
- Terán H., and S. P. Singh. 2002. Comparison of sources and lines selected for drought resistance in common bean. *Crop Science* 42:64-70.
- Turner, N.C. 1979. Drought resistance and adaptation to water deficit in crop plants. *In: Mussell H., and Staples R. C. (eds). Stress physiology in crop plants. Jonh Wiley and Sons. New York. Pp. 343-372.*
- Wang J., Y. T. Gan, F. Clarke, and C. L. Mcdonald. 2006. Response of chickpea yield to high temperature stress during reproductive development. *Crop Science* 46:2171-2178.
- White J. W., and S. P. Singh 1991. Breeding for adaptation to drought. *In: Schoonhoven A. V., and Voysest O. (eds). Common beans: Research for crop improvement. C. A. B. Intl. U. K. and CIAT, Cali, Colombia. Pp. 501-560.*

## CAPÍTULO III. RELACIONES HÍDRICAS Y TOLERANCIA A ALTAS TEMPERATURAS EN FRIJOL TIPO FLOR DE MAYO

### 3.1 RESUMEN

Se determinó el efecto del déficit hídrico edáfico y la alta temperatura del aire en las relaciones hídricas, temperatura del dosel del cultivo ( $T_c$ ) y rendimiento de semilla (RS), y sus componentes en un grupo de cultivares de frijol de tipo Flor de Mayo (FM). Se incluyeron ocho cultivares (FM) y un cultivar criollo en tres ambientes de humedad edáfica; Montecillo en riego (MR) con la aplicación de agua de la siembra a la madurez, Montecillo en seco (MS) con la lluvia como fuente única de humedad y Celaya en seco (CS) con lluvia y dos riegos suplementarios en la floración. Se utilizó una dosis de fertilización de  $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de nitrógeno y  $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  de fósforo. En MR el promedio del potencial hídrico ( $\psi = -0.33 \text{ MPa}$ ), osmótico ( $\pi = -1.26 \text{ MPa}$ ) y de turgencia ( $P = 0.93 \text{ MPa}$ ) fue más alto que en CS ( $\psi = -0.77$ ,  $\pi = -1.36$  y  $P = 0.59 \text{ MPa}$ ) y MS ( $\psi = -1.22$ ,  $\pi = -1.57$  y  $P = 0.35 \text{ MPa}$ ); MS con mayor deficiencia hídrica edáfica tuvo mayor reducción en  $\pi$  y mayor ajuste osmótico ( $\text{AO} = 0.70 \text{ MPa}$ ). El AO se relacionó positiva y significativamente con el RS y biomasa aérea final (BMAF) en los dos ambientes de seco. El promedio de  $T_c$  en MR ( $26.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ) fue más bajo que en CS ( $30.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y MS ( $36.6 \text{ }^\circ\text{C}$ ); el estrés por calor se agudizó con el descenso en el contenido hídrico de las plantas en el ambiente más seco (MS);  $T_c$  se relacionó negativa y significativamente con  $\psi$  y  $\pi$  en MS. La alta  $T_c$  también tuvo efecto significativo en la producción de BMAF y RG, y sus componentes; la alta  $T_c$  redujo el RS, BMAF, número de vainas  $\text{m}^{-2}$  ( $\text{V m}^{-2}$ ) y peso de 100 semillas (P100S) en 12.5, 10.7, 10.2 y 3.4 % por cada  $^\circ\text{C}$  ( $^{-1} \text{ }^\circ\text{C}$ ) de aumento en la  $T_c$ , respectivamente.

### 3.2 INTRODUCCIÓN

El déficit hídrico edáfico es el principal factor limitante del crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en los sistemas agrícolas de seco; aproximadamente una tercera parte de la superficie cultivada mundial presenta una disponibilidad inadecuada de agua y los rendimientos en las otras dos terceras partes de la superficie agrícola son periódicamente reducidos por la sequía. Las deficiencias hídricas moderadas reducen el crecimiento de la planta y afectan sus procesos de desarrollo, traduciéndose en bajos rendimientos, mientras que

las sequías prolongadas pueden causar la pérdida total del rendimiento, de tal forma que la única manera de maximizar la producción es manteniendo un alto contenido hídrico de la planta durante el ciclo del cultivo.

Las deficiencias hídricas afectan muchos procesos fisiológicos; entre ellos, el crecimiento de las células es quizás el más sensible, debido a que la fuerza física requerida para el alargamiento celular depende de la turgencia; las respuestas metabólicas y regulatorias de la expansión celular también pueden influir en los efectos del estrés hídrico en la turgencia celular (Begg y Turner, 1976). Los procesos de desarrollo son también muy sensibles a las deficiencias hídricas en las plantas cultivadas; uno de los mayores avances en el mejoramiento genético para ambientes con limitaciones de humedad, se ha logrado mediante el acortamiento del ciclo biológico, permitiendo a las plantas escapar a la sequía. En trigo y cebada se ha determinado que entre 40 y 90 % de la variación en rendimiento de grano estuvo determinada por la precocidad (Fischer y Maurer, 1978).

Por otra parte, los efectos del estrés por alta temperatura o calor en las plantas, muchas veces se confunden con los efectos causados por el estrés hídrico, porque usualmente la sequía se presenta acompañada de altas temperaturas, lo que incrementa la tasa de transpiración y acelera la ocurrencia del daño por deshidratación (Turner, 1986). También, puede ocurrir mayor consumo de carbohidratos, debido a que la máxima tasa de respiración usualmente ocurre a una mayor temperatura que la máxima tasa de fotosíntesis; en estas condiciones el enfriamiento de las hojas a expensas de la transpiración se reduce en plantas bajo estrés hídrico, resultando en un incremento en la temperatura del área foliar, lo cual disminuye la fotosíntesis aparente y puede interrumpir el metabolismo del nitrógeno y los lípidos, y también puede dañar a las membranas celulares (Turner, 1986).

En condiciones de estrés ambiental donde la sequía y el calor se presentan juntos en las etapas críticas de desarrollo del cultivo, el rendimiento podría incrementarse al seleccionar cultivares con características fisiológicas que contribuyan a mantener un alto nivel hídrico en la planta, para minimizar los efectos desfavorables de estos factores en los procesos de crecimiento y desarrollo, con una reducción mínima en la acumulación de materia seca y rendimiento de semilla.

El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto del déficit hídrico edáfico y la alta temperatura del aire en las relaciones hídricas, temperatura del dosel del cultivo y el

rendimiento de semilla y sus componentes, en un grupo de cultivares de frijol tipo Flor de Mayo.

La hipótesis planteada establece que los cultivares de frijol presentan una respuesta diferencial al estrés hídrico y térmico en sus relaciones hídricas, temperatura del dosel del cultivo, rendimiento y sus componentes.

### **3.2.1 Potencial hídrico y sus componentes**

El desarrollo conceptual para el estudio del movimiento del agua a través del continuo suelo-planta-atmósfera, la utilización de las leyes de la termodinámica en la estimación del potencial hídrico total de la planta y sus componentes, y el desarrollo de métodos prácticos para la medición del potencial hídrico total, ha permitido correlacionar los procesos de crecimiento del cultivo con el potencial hídrico total. Estos estudios también han permitido establecer que la tasa de transpiración y los procesos del flujo de agua están muy relacionados con el potencial hídrico total, y que los procesos morfológicos y fisiológicos de crecimiento del cultivo están más relacionados con el potencial osmótico y de turgencia de los tejidos (Turner, 1986). El potencial hídrico total o potencial hídrico ( $\psi$ ) en la planta se representa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\psi = \pi + P$$

donde,  $\pi$  es el potencial de soluto que representa el efecto debido a la presencia de solutos disueltos en el citoplasma y  $P$  que es el potencial de turgencia debido a la presión que ejerce el protoplasma sobre la membrana y la pared celulares; el potencial hídrico es función del potencial osmótico y de turgencia cuando los tejidos de la planta están completamente túrgidos (Begg y Turner, 1976). Cuando las plantas están sujetas a deficiencias hídricas se reduce la turgencia de las células, causando cierre de estomas y reducción del alargamiento celular, y en consecuencia una disminución del área foliar y la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar; si el déficit hídrico en la planta es severo, la maquinaria fotosintética es dañada, resultando en una fuerte reducción de la tasa fotosintética por unidad de área foliar (Turner, 1986). En las plantas vasculares con baja tasa de transpiración, se ha observado que los tejidos que se encuentran en la fase de expansión rápida tienen un potencial hídrico más bajo que los tejidos maduros adyacentes (Nonami y Boyer, 1993); la diferencia en el potencial hídrico

entre estos tejidos es inducida por el crecimiento (Molz y Boyer, 1978) y favorece el movimiento del agua al interior de las células en elongación, para el aumento del volumen celular como parte esencial del proceso de crecimiento (Matyssek *et al.*, 1991).

### 3.2.2 Ajuste osmótico

El ajuste osmótico (AO) involucra la acumulación activa de solutos dentro de la planta en respuesta a una disminución del contenido hídrico del suelo, reduciendo los daños por el déficit hídrico (Morgan, 1984); como consecuencia de la acumulación de solutos, el potencial osmótico de la célula disminuye, atrayendo agua al interior de la célula para mantener la turgencia. La acumulación de solutos en las raíces disminuye el potencial osmótico de las mismas, lo que ayuda a mantener la fuerza de tensión para extraer agua del suelo bajo condiciones de déficit hídrico. El AO es un mecanismo importante para la adaptación a la sequía de las plantas cultivadas en ambientes con limitaciones de humedad, ya que contribuye a una mejor extracción de humedad edáfica, estimula el crecimiento de la raíz (Morgan y Condon, 1986) y facilita la removilización de reservas acumuladas en la planta antes de la floración a la semilla, durante el periodo de llenado del grano (Subbarao *et al.*, 2000). Diversos estudios en trigo (Morgan, 1983; 1992; 1995; Morgan y Condon, 1986) han demostrado la existencia de diferencias genéticas consistentes entre cultivares y que los cultivares con alto AO se comportan mejor que cultivares con bajo AO en condiciones de sequía. También, se ha demostrado que el AO estuvo positiva y significativamente asociado con el rendimiento de grano y la biomasa aérea en trigo en condiciones de estrés hídrico en la etapa de la hoja bandera (inicio de la aparición de la hoja bandera y hoja bandera completamente expandida o ligulada); los cultivares con mayor capacidad de AO produjeron mayor rendimiento de grano y biomasa aérea que los cultivares con bajo AO (Blum *et al.*, 1999). En líneas S<sub>4</sub> de maíz derivadas de una población obtenida al cruzar un cultivar con alto AO y un cultivar con bajo AO, se observó que las líneas seleccionadas por su alta capacidad de AO presentaron mayor AO (0.47 MPa) que las líneas seleccionadas por bajo AO (0.06 MPa) en condiciones de sequía antes y durante la floración; independientemente de si la sequía ocurrió antes o durante la floración, las líneas con alto AO extrajeron más agua de una mayor profundidad en el perfil del suelo durante el periodo de estrés hídrico, tuvieron mayor duración del área foliar verde y produjeron mayor rendimiento de grano que las líneas de bajo

AO; las líneas con alto AO tuvieron mayor índice de cosecha que las líneas con bajo AO cuando la sequía ocurrió durante la floración (Chimenti *et al.*, 2006). Cultivares de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) con alta capacidad de AO produjeron mayor rendimiento de semilla que cultivares con bajo AO en condiciones de sequía moderada (26%) y sequía severa (48%), y estos valores de rendimiento de semilla coincidieron con valores de AO que variaron de 0.28 a 0.48 MPa y 0.37 a 0.71 MPa, respectivamente (Moinuddin y Khanna-Chopra, 2004). En frijol se realizaron estudios del efecto de la sequía (aplicación de riego por gravedad cada tres semanas en campo) en la capacidad de ajuste osmótico, extensibilidad de la pared celular y volumen celular en seis cultivares; aunque la variación en ajuste osmótico entre cultivares no fue muy amplia (posiblemente debido a que la sequía aplicada no fue muy severa), se observó que sólo uno de seis cultivares de frijol presentó algún grado de ajuste osmótico (Martínez *et al.*, 2007).

### **3.2.3 Tolerancia a altas temperaturas**

El frijol produce sus mejores rendimientos a temperaturas óptimas que varían entre los 20 y 25 °C (Watanabe, 1953); temperaturas > 30 °C durante el día o > 20 °C durante la noche en las etapas de antesis y desarrollo de la semilla pueden reducir severamente la producción (Rainey y Griffiths, 2005). La presencia de altas temperaturas del aire durante las etapas reproductoras causa severas pérdidas en el rendimiento (Laing *et al.*, 1984); uno de los efectos más importantes del estrés por calor en frijol es la reducción en el número de vainas y semillas, debido a la abscisión de botones, flores y vainas jóvenes, y fallas en la fertilización y desarrollo de la semilla (Ofir *et al.*, 1993). Las altas temperaturas del aire durante el ciclo de las plantas de frijol pueden reducir la viabilidad del polen y crecimiento del tubo polínico; causar abscisión excesiva de botones, flores y vainas jóvenes, y disminuir considerablemente el número de semillas por vaina, tamaño de la semilla y rendimiento; Agtunong *et al.* (1992) determinaron que la alta temperatura (34/29 °C, día/noche) en la etapa de floración incrementó severamente la abscisión de botones, flores y vainas; Monterroso y Wien (1990) observaron que el 82 % de las estructuras reproductivas que sufrieron abscisión, debido al estrés por alta temperatura (dos días a 35 °C, 10 h cada día) durante la ontogenia de las flores (ocho días antes de la antesis hasta la antesis) fueron vainas pequeñas (< 2 cm) y que la más alta sensibilidad a temperaturas altas se registró en el período de pre-fertilización (seis días antes

de la antesis, hasta la antesis). Otros estudios más detallados han mostrado que la sensibilidad al estrés por calor en frijol cambia con la ontogenia de la flor; la etapa de post-fertilización y crecimiento inicial de la vaina fueron más tolerantes al calor que las etapas de pre-fertilización; la exposición a temperaturas altas de plantas durante la esporogénesis causó esterilidad masculina debido a la inviabilidad del polen y fallas en la dehiscencia de las anteras, mientras que el funcionamiento del gineceo no fue afectado. En etapas posteriores, el calor redujo la penetración del tubo polínico en el estigma, traduciendo en una disminución en la producción de vainas y semillas, sobre todo en cultivares sensitivos a altas temperaturas; la sensibilidad del polen al calor disminuyó con la maduración del polen y el efecto negativo de la alta temperatura en el gineceo aumentó en la antesis; la reducción en la fertilización de los óvulos y la producción de semillas por efecto del calor fue mayor en las posiciones más alejadas del estigma y las más cercanas al pedúnculo, y posiblemente reflejó el efecto de las altas temperaturas en el crecimiento del tubo polínico, de tal forma que la disminución en el número de vainas y semillas causada por la alta temperatura se debió a la combinación de una baja viabilidad del polen y daño en la estructura femenina en una alta proporción de flores (Gross y Kigel, 1994).

El mejoramiento genético de la tolerancia al calor en frijol podría realizarse identificando las bases genéticas y fisiológicas de la reacción a las altas temperaturas con base al rendimiento de semilla; con este propósito se han utilizado diferentes índices que van desde el uso de la temperatura del dosel vegetal o follaje hasta algunos índices que utilizan al rendimiento de semilla como base de cálculo; por ejemplo, la media geométrica, el índice de tolerancia al estrés, el índice de susceptibilidad al estrés y las desviaciones de regresión entre ambientes de estrés y no estrés (Smith, 2004). Rainey y Griffiths (2005) estudiaron el comportamiento de 24 cultivares de frijol bajo cuatro regímenes de temperatura (24/21; 27/24; 30/27 y 33/30 °C; día/noche) en invernadero y observaron que el tratamiento de temperatura más alta redujo el número de semillas, vainas y semillas por vaina, y el peso promedio de la semilla en 83, 63, 47 y 73 %, respectivamente; también observaron que los cultivares tolerantes a calor mostraron una respuesta diferencial a la alta temperatura, sugiriendo la existencia de diferentes mecanismos genéticos de tolerancia al calor.

El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto del déficit hídrico edáfico y la alta temperatura del aire en las relaciones hídricas, temperatura del dosel del cultivo y el



rendimiento de semilla y sus componentes, en un grupo de cultivares de frijol tipo Flor de Mayo.

La hipótesis planteada establece que los cultivares de frijol presentan una respuesta diferencial al estrés hídrico y térmico en sus relaciones hídricas, temperatura del dosel del cultivo, rendimiento y sus componentes.

### **3.3 MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.3.1 Localización de los experimentos**

Se llevaron a cabo tres experimentos en el ciclo primavera-verano (PV) del 2007; uno en el Campo Agrícola Experimental del Bajío del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Celaya, Guanajuato, México (20° 34' N y 100° 50' O y 1765 msnm) y los otros dos en el Campo Agrícola Experimental del Colegio de Postgraduados en Montecillo, Estado de México, México (19° 21' N y 98° 55' O y 2250 msnm) (García, 1988).

#### **3.3.2 Material genético**

Se incluyeron ocho cultivares de frijol tipo Flor de Mayo (FM) que se utilizan en la siembra comercial bajo riego y secano con buena precipitación en la región templada sub-húmeda (Acosta-Gallegos *et al.*, 2000; Rosales-Serna *et al.*, 2004) y el cultivar criollo Michoacán 128 de hábito indeterminado procedente del Estado de Michoacán, México, mismas utilizadas en el Capítulo II de esta tesis (Cuadro 3.1).

#### **3.3.3 Diseño experimental**

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones para los tres experimentos; la unidad experimental consistió de dos surcos de 4 m de longitud y 0.80 m de ancho. Se aplicó una dosis de fertilización de 40-40-00 de NPK en la primera escarda a los 30 días después de la siembra (dds) y 40-00-00 en la segunda a los 40 dds. En Celaya, se aplicó un riego antes de la siembra y ésta se realizó el 3 de abril de 2007 en hileras en el fondo del surco a cuatro cm de profundidad; 15 dds se hizo un aclareo para ajustar la población a una densidad de 150,000 plantas ha<sup>-1</sup>; 20 dds se aplicó un riego para favorecer el establecimiento de las plántulas y dos riegos suplementarios durante la floración (55 y 65 dds), debido a la

ausencia de lluvias. En Montecillo, los experimentos se sembraron el 12 de abril de 2007; en riego se aplicó agua de acuerdo a las necesidades del cultivo durante el ciclo y en secano, la aplicación de agua se hizo solamente hasta los 24 dds (21 días antes de la floración) y posteriormente el desarrollo de las plantas se dejó a merced de la precipitación pluvial.

### 3.3.4 Variables medidas

Temperatura del dosel del cultivo ( $T_c$ , °C); se midió a una distancia de 0.4 m de la superficie expuesta del área foliar con un termómetro infrarrojo (modelo Raytek Spectrum Technologies, Inc.); las mediciones (un total de 16) se hicieron al mediodía entre los 50 y 70 dds, en condiciones de alta radiación solar ( $1800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) y calma (velocidad del viento  $< 5 \text{ km h}^{-1}$ ).

Potencial hídrico ( $\psi$ , MPa); se midió entre los 50 y 70 dds en el foliolo central de cuatro hojas trifoliadas completamente expandidas y expuestas a la radiación solar en cada unidad experimental; las hojas se colectaron y depositaron en bolsas de plástico con una porción de estopa húmeda en su interior e inmediatamente se llevaron a la bomba de Scholander, para determinar su  $\psi$ .

Potencial osmótico ( $\pi$ , MPa); se determinó en una porción del tejido foliar utilizado para medir el  $\psi$  en cada muestra; el tejido foliar se colocó en viales de plástico de 1.5 ml, mismos que se depositaron en un termo con nitrógeno líquido ( $-195.8 \text{ °C}$ ), para matar el tejido, romper la pared celular y facilitar la extracción de la savia; las mediciones del  $\pi$  se hicieron en las muestras de savia con un osmómetro marca Wescor, modelo 5100C en el laboratorio.

Potencial de turgencia ( $P$ , MPa); se calculó como la diferencia entre el  $\psi$  y  $\pi$  ( $P = \psi - \pi$ ) para cada muestra analizada (Begg y Turner, 1976).

Ajuste osmótico (AO, MPa); se calculó como la diferencia entre el  $\pi$  determinado en riego ( $\pi_R$ ) y el  $\pi$  determinado en los ambientes de secano ( $\pi_S$ ) ( $\text{AO} = \pi_R - \pi_S$ ) para cada cultivar (Morgan, 1995; Babu *et al.*, 1999).

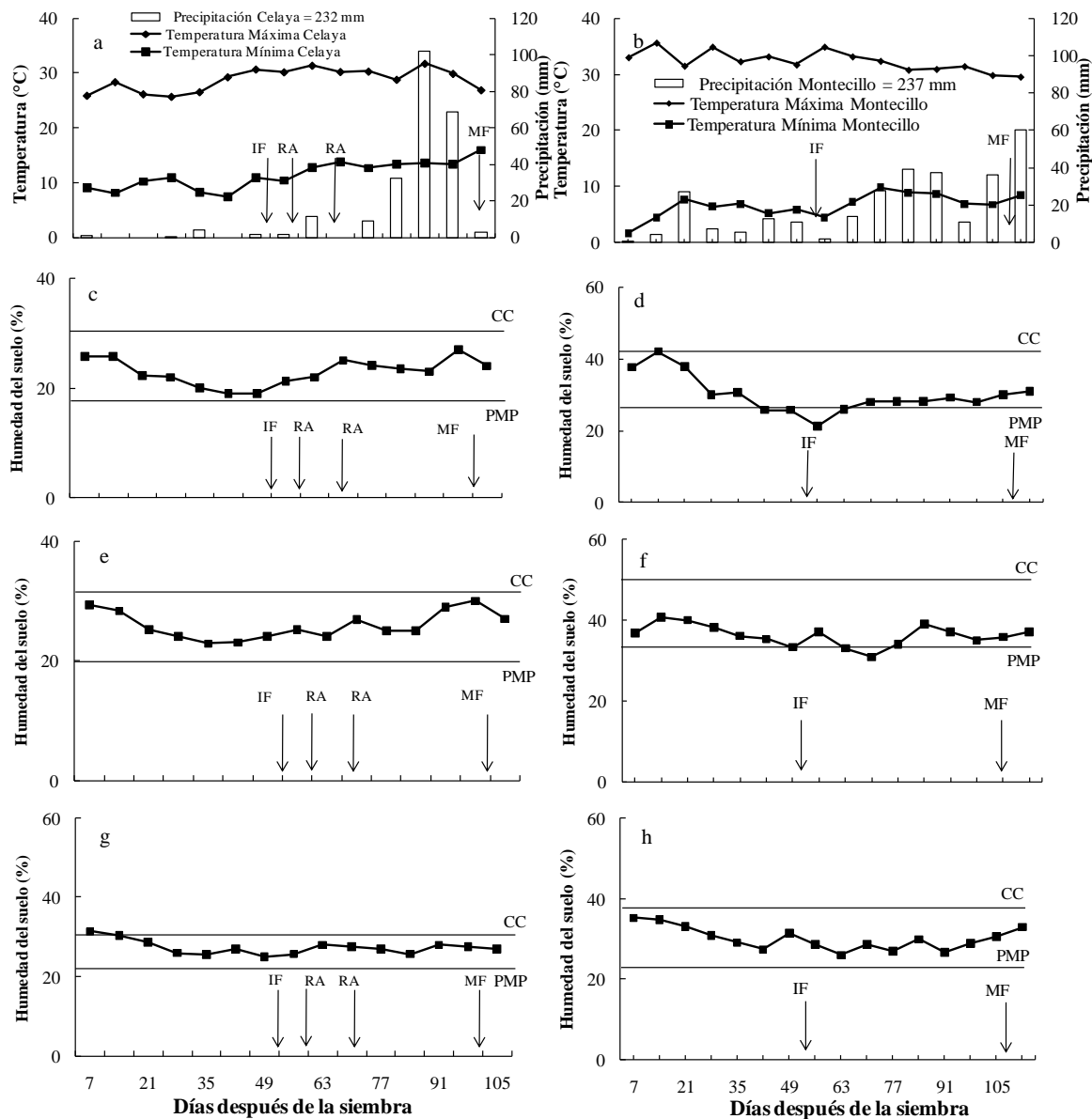
En la madurez fisiológica se cosechó la parte aérea de las plantas en 1.0 m lineales del surco ( $0.8 \text{ m}^2$ ) de cada unidad experimental, para determinar el rendimiento de semilla (RE,  $\text{g m}^{-2}$ ) y sus componentes [vainas normales  $\text{m}^{-2}$  (VN  $\text{m}^{-2}$ ), número de semillas normales  $\text{m}^{-2}$  (SN  $\text{m}^{-2}$ ), semillas vaina<sup>-1</sup> (S vaina<sup>-1</sup>), peso de 100 semillas (P100S, g)] y la biomasa aérea final (BAF,  $\text{g m}^{-2}$ ).

### 3.3.5 Contenido hídrico edáfico y datos meteorológicos

En Montecillo el contenido hídrico edáfico (%) en el experimento de riego a las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm, se mantuvo cercano a la capacidad de campo (CC) durante el ciclo de cultivo (datos no mostrados), mientras que en el experimento de secano, el contenido de humedad disminuyó por debajo del porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) en la profundidad de 0-20 cm (Figura 3.1d) entre los 35 y 70 dds, y en la profundidad de 20-40 cm (Figura 3.1f) entre los 56 y 70 dds; la floración coincidió con el período de más bajo contenido hídrico edáfico en la profundidad de 0-20 cm. El contenido hídrico a 40-60 cm (Figura 3.1h) varió a lo largo del ciclo del cultivo, sin alcanzar el PMP.

El contenido hídrico edáfico en el experimento en Celaya, alcanzó un nivel cercano al PMP en las profundidades de 0-20 cm (Figura 3.1b) y 20-40 cm (Figura 3.1c) entre los 40 y 55 dds, período en el que ocurrió el inicio a floración; después del primer riego de auxilio (55 dds), el contenido de humedad del suelo aumentó y se mantuvo cercano a la capacidad de campo (CC) hasta la madurez, dentro de los límites de la humedad aprovechable; el contenido de humedad a la profundidad de 40-60 cm (Figura 3.1d), presentó menores fluctuaciones que en las profundidades de 0-20 y 20-40 cm durante el ciclo de cultivo.

Los datos de temperatura máxima y mínima (°C) diaria del aire y la precipitación (mm) semanal acumulada para Celaya, se obtuvieron en la Estación Agrometeorológica del Campo Agrícola Experimental del Bajío, ubicada en Celaya, Guanajuato, a una distancia de 200 m del sitio donde se realizó el experimento (Figura 3.1a). Los datos meteorológicos para Montecillo se obtuvieron de la Estación Agrometeorológica del Colegio de Postgraduados, ubicada en Montecillo, Estado de México a una distancia aproximada de 300 m del sitio en el que se realizaron los experimentos (Figura 3.1b).



**Figura 3.1** Temperatura máxima y mínima promedio semanal, y precipitación semanal acumulada en Celaya (a) y Montecillo (b) y contenido hídrico edáfico a las profundidades de 0-20, 20-40 y 40-60 cm en Celaya en seco (c, e g) y Montecillo en seco (d, f y h), respectivamente. 2007. Las líneas indican el porcentaje de marchitamiento permanente (PMP) y capacidad de campo (CC) en las diferentes profundidades; IF= Fecha promedio del inicio de la floración; MF= Fecha promedio de la madurez fisiológica; RA=Riego de auxilio.

### 3.3.6 Análisis estadístico

Se calculó el análisis de varianza para todas las variables con el programa SAS versión 9.1 para Windows (SAS, 2006) en forma individual para cada ambiente de humedad edáfica

( $Y_{ij} = \mu + T_i + B_j + E_{ij}$ ). La comparación de medias se realizó al calcular la diferencia significativa de Tukey (DSH,  $p \leq 0.05$ ).

### 3.4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.4.1 Temperatura, precipitación pluvial y humedad edáfica

En Montecillo la temperatura máxima promedio durante el ciclo (Figura 3.1b) fue mayor (31.7 °C) que en Celaya (28.1 °C) y por el contrario, la temperatura mínima promedio durante el ciclo fue menor en Montecillo (9.2 °C) que en Celaya (11.9 °C) (Figura 3.1a). La alta temperatura máxima en Montecillo en el período de mayor deficiencia hídrica edáfica, favoreció un alto grado de estrés hídrico y térmico en las plantas (White y Singh, 1991; Wang *et al.*, 2006). La temperatura mínima tendió a incrementarse después de la floración en Celaya en secano (55 dds) y en Montecillo en riego y secano (63 dds), presentando un incremento más marcado en Montecillo que en Celaya, mientras que la temperatura máxima registrada después de la floración tendió a disminuir hacia el final del ciclo en ambas localidades.

En Celaya la temperatura mínima promedio (11.9 °C) estuvo por arriba de la temperatura base para frijol (8 °C) (Barrios-Gómez y López-Castañeda, 2009), lo que favoreció un más rápido desarrollo inicial de las plantas que en Montecillo. La baja temperatura mínima ocurrida en Montecillo (Figura 3.1b) coincidió con la germinación y la etapa de plántula, pero no se detectó ningún daño por frío o bajas temperaturas; la baja temperatura sólo se reflejó en un retraso en el desarrollo que se tradujo en un mayor número de días a inicio de floración y madurez fisiológica; estas bajas temperaturas no coincidieron con la incidencia del estrés hídrico edáfico.

En Celaya se observó una severa deficiencia de precipitación (Figura 3.1a) durante la etapa de inicio de floración y crecimiento de vainas por lo que se aplicaron riegos de auxilio a los 54 y 65 dds; posteriormente se presentaron lluvias abundantes hasta la madurez, lo que permitió tener altos rendimientos. Por el contrario, en Montecillo en secano la precipitación (237 mm) durante el ciclo fue muy irregular, lo que se reflejó en un menor crecimiento y consecuentemente menor rendimiento (Figura 3.1b). La distribución irregular de la lluvia en Montecillo, se reflejó en un bajo contenido hídrico edáfico en el experimento de secano, con niveles de humedad inferiores al PMP para los estratos de 0-20 (Figura 3.1d) y 20-40 cm (Figura 3.1f). Se ha estimado que aproximadamente el 50 % de la densidad radical y

acumulación de materia seca en las raíces de cultivares comerciales de frijol, se localizan hasta la profundidad de 30 cm (Halterlein, 1983) y sólo las raíces de cultivares de frijol tolerantes a sequía pueden penetrar hasta 50 cm (White e Izquierdo, 1991). En Celaya no se presentaron lluvias hasta los 80 dds, por lo que se tuvieron que aplicar riegos en la siembra y en la etapa de floración (55 y 65 dds), debido a que el contenido hídrico del suelo en la profundidad de 0 a 20 cm (Figura 3.1b) disminuyó por debajo del PMP. No se detectaron porcentajes de humedad por abajo del PMP en las profundidades de 20-40 (Figura 3.1c) y 40-60 cm (Figura 3.1d) durante los muestreos, debido principalmente a los riegos de auxilio proporcionados en las fechas mencionadas anteriormente.

### 3.4.2 Relaciones hídricas

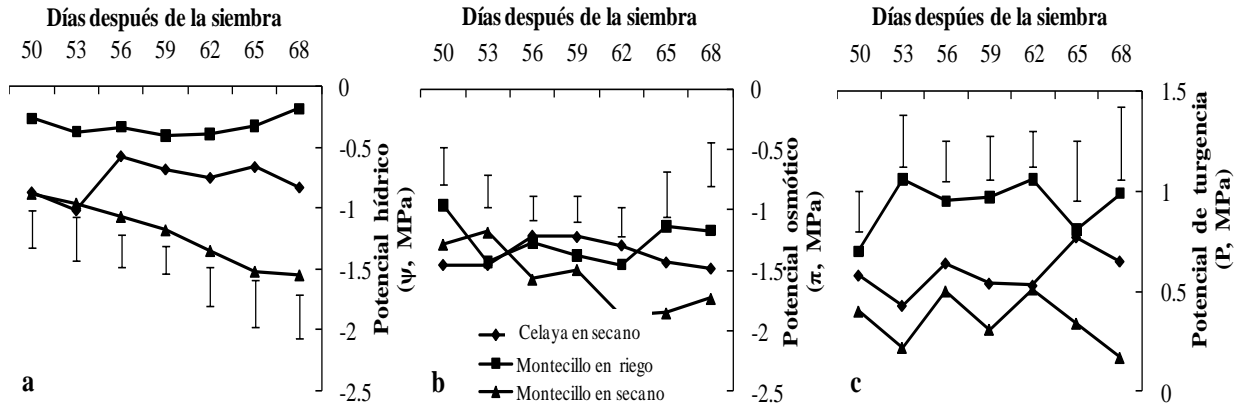
Las deficiencias hídricas edáficas registradas en la profundidad de 0 a 20 cm fueron más marcadas en Montecillo en secano que en Celaya en secano y Montecillo en riego; estas deficiencias hídricas en el suelo se reflejaron en fuertes variaciones en el contenido hídrico de las plantas en los tres ambientes. El potencial hídrico ( $\psi$ ), osmótico ( $\pi$ ) y de turgencia ( $P$ ) presentaron diferencias ( $p \leq 0.01$ ) entre los tres ambientes de humedad edáfica en promedio de todas los cultivares y entre cultivares dentro de los tres ambientes en todas las mediciones realizadas. El  $\psi$  presentó los valores más altos ( $p \leq 0.05$ ) en Montecillo en riego (-0.32 MPa) y los valores extremos más bajos en Montecillo en secano (-1.22 MPa) en promedio de todos los cultivares y mediciones realizadas (Figura 3.2a).

El  $\psi$  en Montecillo en secano disminuyó conforme se redujo el contenido de agua en el suelo en las profundidades de 0-20 y 20-40 cm, al registrar un valor de -1.55 MPa en la última medición a los 68 dds, lo que se reflejó en síntomas severos de marchitez en las hojas entre las 12:00 y las 15:00 horas (Figura 3.2a); estos síntomas de estrés hídrico en las plantas reflejaron la disminución en el  $\psi$  durante el período de deficiencias hídricas edáficas; la diferencia en  $\psi$  entre la primera medición (58 dds) y la última medición (68 dds) fue de -0.72 MPa (Figura 3.2a). Un ambiente de sequía edáfica más severo puede causar disminuciones más acentuadas en el  $\psi$ ; Morgan (1995) observó una diferencia en  $\psi$  entre los 50 y los 110 dds de -1.5 MPa en trigo en condiciones de sequía en campo. En Celaya en secano el  $\psi$  registró su valor más bajo (-1.02 MPa) a los 53 dds (Figura 3.2a); posteriormente, mantuvo valores (-0.77 MPa) cercanos a los observados en Montecillo en riego en promedio de todos los cultivares y mediciones,

debido a que se le proporcionaron dos riegos de auxilio (55 y 65 dds) por la falta de lluvia. Otros estudios en frijol mostraron resultados similares, al determinar el efecto de la sequía en el ajuste osmótico, elasticidad de la pared y volumen celular en condiciones de campo. Se observó que las plantas en sequía tuvieron un  $\psi$  de -1.4 MPa y las plantas en riego un  $\psi$  de -0.9 MPa en promedio de todos los cultivares (Martínez *et al.*, 2007); la diferencia entre el  $\psi$  observado en el presente estudio en riego (-0.32 MPa) y el reportado por Martínez *et al.* (2007) (-0.9 MPa), puede deberse a que las plantas en este estudio, pudieron estar sometidas a mayores temperaturas del aire que causaron mayores tasas de transpiración y una mayor reducción en el  $\psi$ .

El  $\pi$  fue más alto en Montecillo en riego (-1.25 MPa) y en Celaya en secano (-1.28 MPa) que en Montecillo en secano (-1.57 MPa) y presentó diferencias ( $p \leq 0.01$ ) entre los tres ambientes de humedad edáfica a los 53, 62, 65 y 68 dds (Figura 3.2b). Las plantas en Montecillo en secano alcanzaron sus  $\pi$  más bajos (-1.9 MPa, 62 y 65 dds) en plena floración (R4-R5), cuando las deficiencias hídricas edáficas fueron más drásticas y las plantas presentaron síntomas más severos de marchitez en las hojas, en comparación con las plantas en Celaya en secano y Montecillo en riego; Martínez *et al.* (2007) observaron que las plantas bajo sequía redujeron su  $\pi$  a -1.7 MPa, mientras que en riego el  $\pi$  se redujo a -1.5 MPa; estos valores de  $\pi$  son más bajos que los observados en el presente estudio, debido posiblemente a un mayor grado de estrés por alta temperatura. La diferencia en  $\pi$  entre la primera y la última medición en Montecillo en secano fue de -0.45 MPa (Figura 3.2b); un trabajo de investigación en zarzamora mostró que un período de cinco días bajo sequía disminuyó el  $\pi$  -0.65 MPa, lo que muestra la amplia variabilidad en la respuesta de las plantas cultivadas a las deficiencias hídricas edáficas.

El  $P$  en Montecillo en secano y Celaya en secano fue más bajo que en Montecillo en riego a los 53, 56, 59 y 62 dds; después del segundo riego de auxilio (65 dds), el  $P$  en Celaya en secano fue similar al  $P$  en Montecillo en riego, mientras que el  $P$  en Montecillo en secano continuó disminuyendo debido las fuertes deficiencias hídricas edáficas hasta alcanzar un valor cercano a cero (0.15 MPa) (Figura 3.2c).



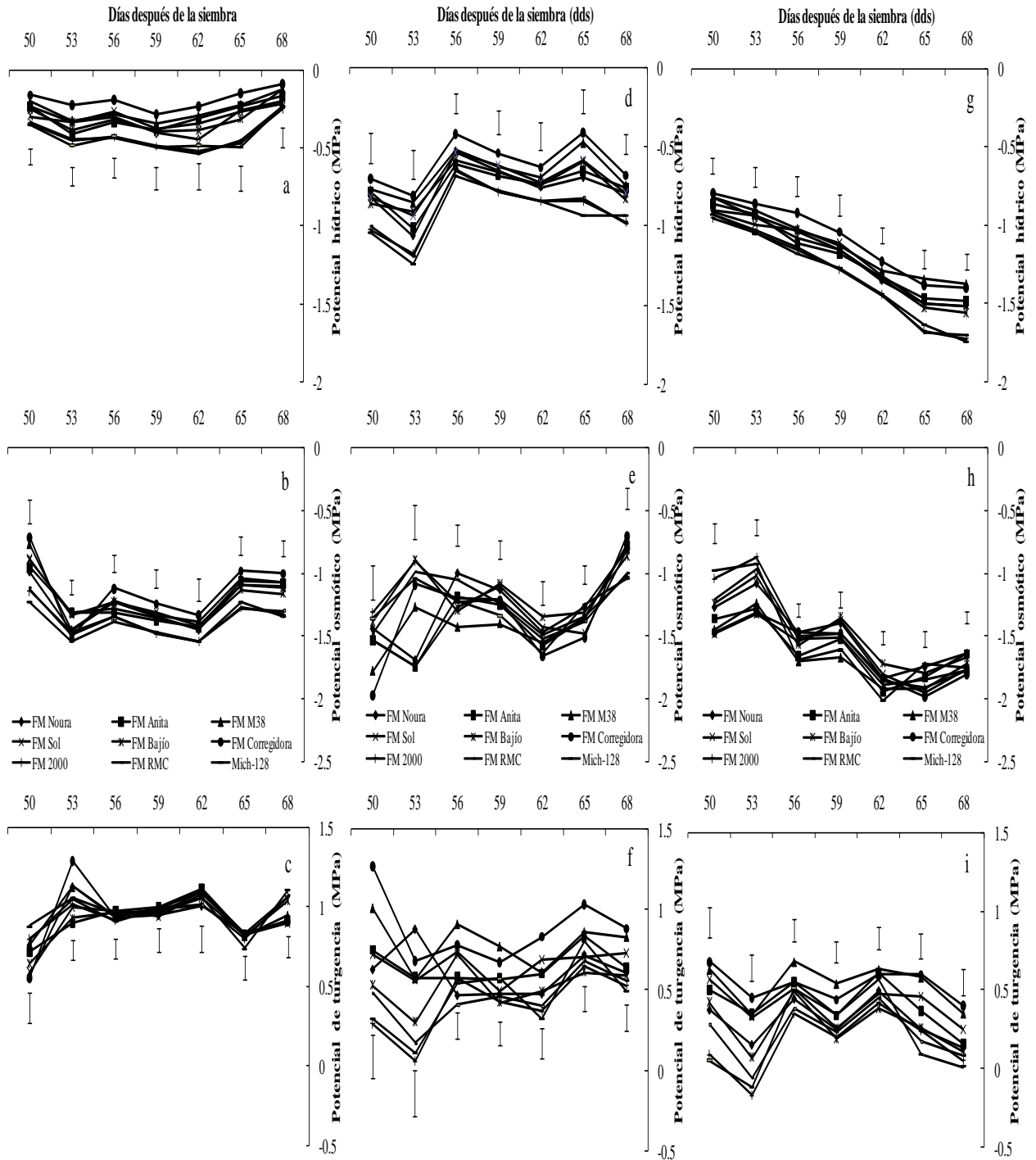
**Figura 3.2** Potencial hídrico (a), potencial osmótico (b) y potencial de turgencia (c) en Celaya en seco, Montecillo en riego y Montecillo en seco. 2007. Las barras verticales indican la diferencia mínima significativa de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) en cada fecha de medición.

Los déficits hídricos edáficos también se reflejaron en el  $\psi$ ,  $\pi$  y  $P$  de los cultivares en los tres ambientes en forma individual (Figura 3.3). Los cultivares FM Corregidora y FM M38 tuvieron mayores  $\psi$  y  $P$  que los demás cultivares en Montecillo en riego, Celaya en seco y Montecillo en seco, y el más bajo  $\pi$  en los tres ambientes en todo el período de medición. En Montecillo en seco, ambiente con mayor grado de sequía edáfica, los cultivares FM Corregidora y FM M38 presentaron el más alto  $\psi$  acompañado por el más bajo  $\pi$ , procesos fisiológicos que les permitieron mantener un alto  $P$  a lo largo del período de medición (Figura 3.3). El  $\psi$ ,  $\pi$  y  $P$  observados en los cultivares FM Corregidora y FM M38 a los 68 dds en Montecillo en seco fue de -1.4 y -1.37; -1.8 y -1.72; 0.4 y 0.35 MPa, respectivamente. Otros estudios en el efecto del estrés hídrico en las relaciones hídricas de *Phaseolus vulgaris* y *Phaseolus acutifolius*, mostraron que la sequía disminuyó más el  $\psi$  y el  $\pi$  en *Phaseolus acutifolius* que en *Phaseolus vulgaris*, y que ésta reducción en el  $\psi$  y el  $\pi$ , se reflejó en una mayor turgencia de las plantas en *Phaseolus acutifolius* que en *Phaseolus vulgaris*, característica que explica la superioridad en resistencia a sequía de *Phaseolus acutifolius* sobre *Phaseolus vulgaris* (Parsons y Howe, 1984).

El mantenimiento de la turgencia puede lograrse a través de una mayor acumulación de solutos (más bajo  $\pi$  en el citoplasma de la célula) o por cambios en la elasticidad de la pared celular; los bajos  $\pi$  observados en los cultivares FM Corregidora y FM M38, sugieren que la



turgencia se mantuvo como resultado de un incremento en la acumulación de solutos y una mayor capacidad de ajuste osmótico (Silva-Robledo *et al.*, 2006).



**Figura 3.3** Potencial hídrico (a, d, g), osmótico (b, e, h) y de turgencia (c, f, i) en Montecillo en riego, Celaya en secano y Montecillo en secano. 2007. Las barras verticales indican la diferencia mínima significativa de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) en cada fecha de medición.

### 3.4.3 Ajuste osmótico

El proceso de ajuste osmótico (AO) se define como la acumulación activa de solutos dentro de los tejidos de la planta en respuesta a una disminución en la disponibilidad de agua, que conlleva una disminución en el  $\pi$  y el  $\psi$  de las raíces y los órganos aéreos de la planta (Turner, 1979); este proceso permite a las plantas, continuar extrayendo agua a bajos potenciales hídricos del suelo y mantener la turgencia de las células (Al-Dakheel, 1989). El  $\pi$  disminuyó considerablemente más en las plantas en Celaya en secano (-1.38 MPa) y Montecillo en secano (-1.83 MPa) que en Montecillo en riego (-1.13 MPa) (Cuadro 3.2). La disminución en el  $\pi$  fue más acentuada en el ambiente de secano con mayores deficiencias hídricas del suelo, lo que se reflejó también en un mayor grado de AO; en Montecillo en secano, ambiente con mayores deficiencias hídricas edáficas durante la floración el AO fue de 0.70 MPa, mientras que en Celaya, con menores deficiencias hídricas del suelo, el AO fue de sólo 0.25 MPa en promedio de todos los cultivares (Cuadro 3.2). La disminución en el  $\pi$  se ha identificado como una de las estrategias más importantes para mantener la turgencia de la planta bajo sequía en leguminosas; se observó que cuando las plantas de frijol, garbanzo, haba y chícharo se sometieron a un déficit humedad equivalente a un potencial hídrico del suelo de -0.64 MPa, el  $\psi$  foliar disminuyó a -0.34, -1.32, -1.67 y -1.83 MPa y el rendimiento se redujo en 17.6, 14.5, 36.4 y 23.9 %, respectivamente; la menor reducción en el rendimiento de garbanzo y frijol se debió a que en éstas especies, la turgencia se mantuvo alrededor de 1.0 MPa a consecuencia de un aumento en la concentración de solutos que resultó de la pérdida de agua y la inhibición del crecimiento; en garbanzo fue importante además el tipo de solutos acumulados que en su mayoría fueron de origen orgánico; por ejemplo, azúcares y aminoácidos que contribuyeron con un 50 y 20 % del total de la concentración de solutos, y calcio, el único elemento inorgánico que contribuyó con solamente un 19 % (Amede y Schubert, 2003).

Los cultivares FM RMC, FM 2000 y Michoacán 128; FM Corregidora, FM Noura y FM Sol presentaron los más bajos  $\pi$  en Montecillo en riego, Celaya en secano y Montecillo en riego, respectivamente. En el ambiente con mayor grado de estrés hídrico los cultivares FM Anita, FM M38 y FM RMC tuvieron el más bajo  $\pi$  (Cuadro 3.2); este bajo  $\pi$  se reflejó en altos valores de AO en Celaya en secano para el cultivar FM Corregidora y en Montecillo en secano para los cultivares FM Anita, FM M38, FM Noura y FM Sol, que también tuvieron un

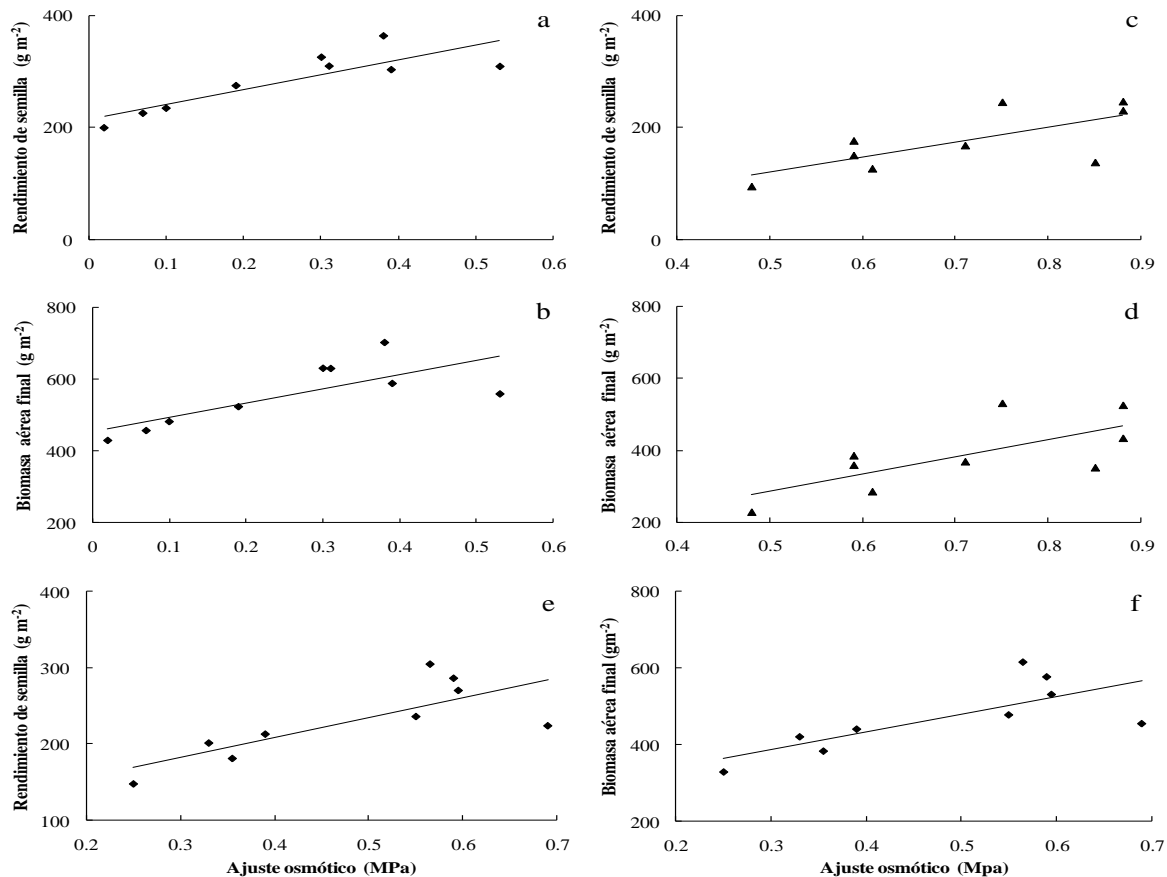
ajuste osmótico similar a FM Corregidora, y mayor AO que los cultivares FM Bajío, Michoacán 128, FM 2000 y FM RMC en Montecillo en seco (Cuadro 3.2). Al considerar que el AO es una respuesta inducida y su grado de expresión es afectado por la duración y la intensidad de la sequía es posible observar una respuesta diferencial entre cultivares en los diferentes ambientes; se ha determinado que tasas rápidas de desecamiento muestran menores niveles de expresión de AO (Jones y Rawson, 1979). También, se ha observado que la expresión del AO en sorgo fue más baja en invernadero que en campo, debido a que en ambientes controlados no puede mantenerse una demanda evaporativa uniforme y un rápido desarrollo del déficit hídrico, puede impedir la síntesis y translocación de solutos osmóticos, de tal forma que la tasa de aumento del AO es incapaz de balancear la tasa de disminución del  $\psi$  (Basnayake *et al.*, 1996).

**Cuadro 3.2 Potencial osmótico ( $\pi$ ) y ajuste osmótico (AO) para frijol en Montecillo en riego (MR), Celaya en seco (CS) y Montecillo en seco (MS). 2007.**

Cultivar	$\pi$ (MPa) <sup>†</sup>			AO (MPa)	
	MR	CS	MS	CS	MS
FM Noura	-1.09	-1.47	-1.84	0.38	0.75
FM Anita	-1.06	-1.36	-1.94	0.30	0.88
FM M38	-1.04	-1.35	-1.92	0.31	0.88
FM Sol	-1.09	-1.48	-1.80	0.39	0.71
FM Bajío	-1.13	-1.32	-1.72	0.19	0.59
FM Corregidora	-0.98	-1.51	-1.83	0.53	0.85
FM 2000	-1.27	-1.34	-1.86	0.07	0.59
FM RMC	-1.28	-1.38	-1.89	0.10	0.61
Michoacán 128	-1.23	-1.25	-1.71	0.02	0.48
<b>Media general</b>	<b>-1.13</b>	<b>-1.38</b>	<b>-1.83</b>	<b>0.25</b>	<b>0.70</b>
DSH (P $\leq$ 0.05)	0.09	-0.07	-0.12	0.08	0.11

La variación en el ajuste osmótico entre cultivares presentó una relación positiva y significativa con la variación en rendimiento de semilla en Celaya en seco ( $RS = 265(AO) + 215$ ,  $r=0.85$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.4a), en Montecillo en seco ( $RS = 400(AO) + 453$ ,  $r=0.75$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.4b) y en promedio de los dos ambientes seco ( $RS = 261(AO) + 104$ ,  $r=0.77$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.4e). Así mismo, el ajuste osmótico tuvo una relación positiva y significativa con la biomasa aérea final en Celaya en seco ( $BAF = 264(AO) - 10.5$ ,  $r=0.71$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.4c), Montecillo en seco ( $BAF = 484(AO) + 44$ ,  $r=0.71$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.4d) y en promedio ( $BAF = 455(AO) + 251$ ,  $r=0.74$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.4f). Los cultivares con mayor capacidad de ajuste osmótico (FM Noura, FM M38 y FM Anita) produjeron mayor

rendimiento de semilla y biomasa aérea final. Otros estudios en cebada mostraron una relación negativa entre el porcentaje de reducción del crecimiento o acumulación de biomasa en la planta y el ajuste osmótico, y que esta reducción en el crecimiento disminuyó hasta que el ajuste osmótico alcanzó un valor de 0.2 MPa o más en la planta (Blum, 1989). Morgan *et al.* (1991) determinaron en garbanzo (*Cicer arietinum* L.) que el ajuste osmótico en condiciones controladas estuvo asociado con la osmoregulación en campo en Nueva Gales del Sur, Australia, en varios experimentos y que los incrementos en rendimiento variaron desde cero en ambientes con bajo déficit hídrico, a 20 % en ambientes con alto déficit hídrico. Nikman y Turner (2000) también observaron que un grupo de cultivares de *Brassica napus* y *B. juncea* con alta capacidad de ajuste osmótico, redujeron menos su rendimiento de semilla (0 a 12 %) que un grupo de cultivares sin capacidad de ajuste osmótico (15 a 40 %) al ser sometidos a condiciones de sequía en campo. En trigo se ha determinado que cultivares seleccionados por su alta capacidad de ajuste osmótico y reducción del  $\psi$ , produjeron alto rendimiento de grano y acumulación de biomasa aérea en condiciones de déficit hídrico edáfico en campo e invernadero (Morgan, 1995) y que los efectos del mantenimiento de la turgencia o ajuste osmótico en el rendimiento de grano dependieron, principalmente de una mayor evapotranspiración (p.ej., la cantidad de agua transpirada por el cultivo + la cantidad de humedad perdida por la evaporación directa del suelo), que a su vez fue resultado de una mayor extracción de humedad del suelo en las profundidades entre 25 y 150 cm (Morgan y Condon, 1986).

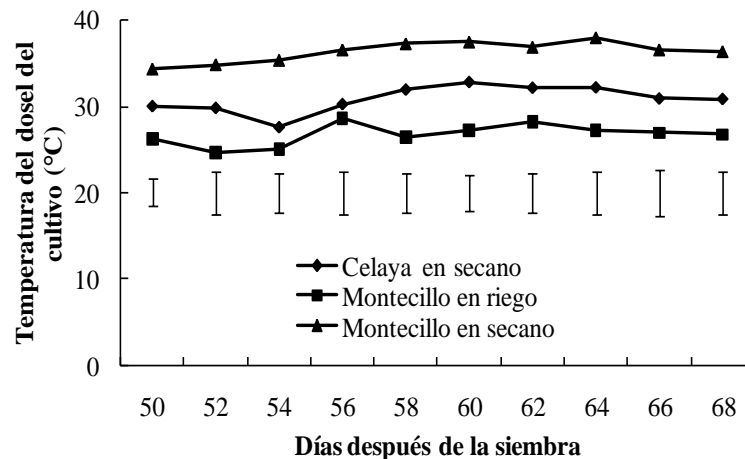


**Figura 3.4** Relación entre el ajuste osmótico y el rendimiento de semilla (a), y la biomasa aérea final (b) en Celaya en seco y Montecillo en seco (c y d), y en promedio de los dos ambientes (e y f). 2007.

### 3.4.4 Temperatura del aire y del dosel del cultivo

La temperatura del dosel del cultivo ( $T_c$ , °C) determinada entre las etapas de inicio de floración (R4, 50 dds) e inicio del crecimiento de las vainas (R5, 68 dds) (CIAT, 1982), presentó diferencias ( $p \leq 0.01$ ) entre los tres ambientes de humedad edáfica (Figura 3.5). Las plantas en Montecillo en seco presentaron mayor  $T_c$  (34 a 38 °C) que las plantas en Montecillo en riego (25 a 28 °) y Celaya en seco (27 a 33°C), excepto, en el lapso entre los 54 y los 56 dds, periodo en el que no se aplicó agua en Montecillo en riego y la  $T_c$  igualó a la temperatura de las plantas registrada en Celaya en seco (Figura 3.5). La mayor  $T_c$  observada en Montecillo en seco se debió al mayor grado de deficiencias hídricas edáficas a que estuvieron sometidas las plantas (el contenido hídrico del suelo disminuyó por abajo del PMP en las profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm al inicio de la floración); éstas deficiencias

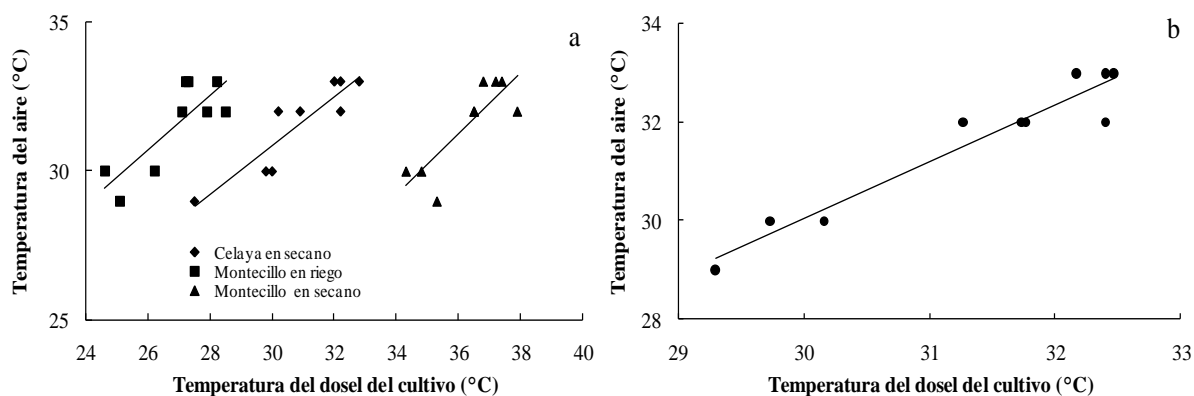
hídricas edáficas y los bajos potenciales hídricos de la planta observados en el presente estudio, disminuyeron la conductancia estomática y la transpiración, reflejándose en altos valores de  $T_c$  (Walker y Hatfield, 1979; Hatfield, 1990; Reynolds *et al.*, 2001; Balota *et al.*, 2007).



**Figura 3.5** Temperatura del dosel del cultivo en Celaya en seco y Montecillo en riego y seco, respectivamente. 2007. Las barras verticales indican la diferencia mínima significativa de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) en cada fecha de medición.

La temperatura del aire ( $T_a$ , °C) se relacionó positiva y significativamente con la  $T_c$  en cada experimento individual (Montecillo en riego,  $T_a = 0.92(T_c) + 6.8$ ,  $r^2=0.68$ ; Celaya en seco,  $T_a = 0.82(T_c) + 6.2$ ,  $r^2=0.82$ ) y Montecillo en seco ( $T_a = 1.03(T_c) - 5.8$ ,  $r^2=0.71$ , Figura 3.6a), y en promedio de los tres ambientes de humedad edáfica ( $T_a = 1.16(T_c) - 4.8$ ,  $r^2=0.93$ , Figura 3.6b); la  $T_c$  aumentó a medida que la  $T_a$  se incrementó durante el periodo de medición entre las etapas R5 (50 dds) y R6 (70 dds). Se observó también que Celaya en seco y Montecillo en seco presentaron mayores  $T_a$  y  $T_c$  que Montecillo en riego, lo que indica que las plantas en estos ambientes con limitaciones de humedad edáfica, además de estar sujetas a estrés hídrico y desarrollar bajos potenciales hídricos, también estuvieron sujetas a estrés por alta temperatura (Figura 3.5). La relación entre  $T_a$  y  $T_c$  indica que a medida que aumenta la radiación solar sobre el dosel del cultivo y con esto, la temperatura del aire que circunda a los órganos aéreos, las plantas aumentan su temperatura a cierto valor, experimentando estrés por calor con el consecuente efecto negativo en los procesos fisiológicos relacionados con el crecimiento y desarrollo de las plantas. Otros estudios han

mostrado la estrecha relación entre la  $T_a$  circundante de los órganos aéreos de las plantas y la  $T_c$ ; Harris *et al.* (1984) observaron coeficientes de correlación entre la  $T_a$  y la  $T_c$  de 0.84 y 0.87 en soya en Manhattan, Kansas en 1980 y 1981; estos autores determinaron que la  $T_c$  en 1980 fue más alta que en 1981, lo que permitió que las plantas tuvieran una mayor demanda evaporativa, lo cual se reflejó en un dosel más frío, presumiblemente debido a un aumento del enfriamiento causado por la transpiración.



**Figura 3.6 Relación entre la temperatura del dosel del cultivo y la temperatura promedio del aire entre las etapas R5 (50 dds) y R6 (70 dds) en Celaya en seco, Montecillo en riego y en seco (Figura 3.6a) y en promedio de los tres ambientes (Figura 3.6b). 2007.**

### 3.4.5 Desviación de la temperatura del dosel del cultivo

La desviación media ( $T_d = T_c - T_a$ ) de la temperatura calculada al substrar la  $T_a$  de la  $T_c$  durante el periodo de medición, presentó valores positivos y negativos (Cuadro 3.3). Los valores positivos de la  $T_d$  en Montecillo en seco, indican que el dosel del cultivo en este ambiente tuvo mayor temperatura que en Montecillo en riego y Celaya en seco. El aumento en la temperatura de los órganos aéreos de la planta obedece a los mecanismos de apertura y cierre de los estomas, influenciados por las deficiencias hídricas que se generan al disminuir el contenido de humedad en el suelo y los cambios en la temperatura del aire y del dosel del cultivo; las temperaturas de las hojas de las plantas en seco fueron *ca.* 5 °C mayores que las plantas en riego (Cuadro 3.3), lo que se reflejó en una disminución considerable de la tasa evaporativa debido al cierre de los estomas (Harris *et al.*, 1984). Los mecanismos de apertura y cierre estomal determinan las tasa de intercambio gaseoso de moléculas de  $H_2O$  por moléculas de  $CO_2$  y este proceso fisiológico es afectado por los cambios en el estado hídrico

de la planta y los cambios en la temperatura del dosel del cultivo; Stalfelt (1962) determinó la tasa de apertura estomatal a temperaturas de 5, 10, 15, 25, 30, 35, 40 y 45 °C, y las comparó con la tasa de apertura estomatal a 20 °C en plantas de haba (*Vicia faba*), observando que a 5 °C, la apertura de los estomas fue muy baja y que la tasa de apertura estomatal se incrementó al aumentar la temperatura con movimientos óptimos de las células estomáticas entre 35 y 40 °C; estas observaciones apoyan la conclusión de que un dosel del cultivo más frío resulta de un mayor enfriamiento transpiracional debido a una alta tasa de apertura estomatal con una mayor temperatura del aire (Harris *et al.*, 1984).

**Cuadro 3.3 Desviación media de la temperatura del dosel del cultivo ( $T_d$ ), para nueve cultivares de frijol en tres ambientes de humedad edáfica y en promedio de los tres ambientes.**

Ambiente	$T_d$
Celaya en seco	-0.76
Montecillo en riego	- 4.72
Montecillo en seco	4.70
Promedio de los tres ambientes	- 0.30

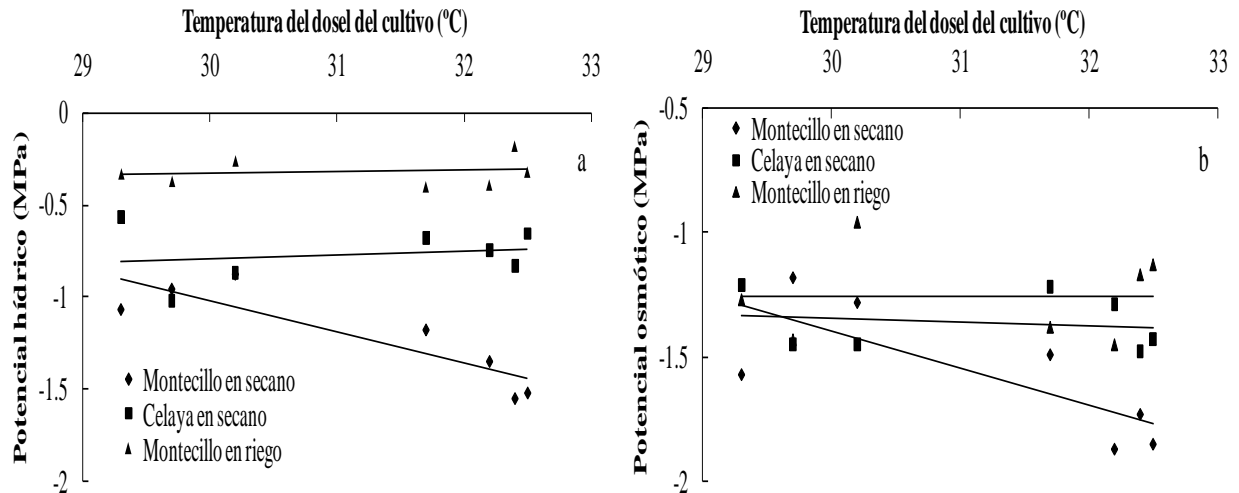
### 3.4.6 Temperatura del cultivo, relaciones hídricas y rendimiento, y sus componentes

Las altas temperaturas (> 30°C en el día o >20°C en la noche) en la etapa de antesis y establecimiento del número de semillas limitan la producción de frijol cuando la humedad relativa es baja, siendo que las altas temperaturas nocturnas tienen efectos más adversos que las altas temperaturas en el día (Singh, 2005); las altas temperaturas reducen la viabilidad del polen y el crecimiento del tubo polínico (Weaver *et al.*, 1985), causan excesivo aborto de flores y vainas jóvenes, y reducen el número de semillas por vaina, el tamaño de semilla y el rendimiento de semilla (Dickson y Petzoldt, 1989; Shonnard y Gepts, 1994).

El incremento en la  $T_a$ , particularmente en la temperatura mínima, observado en Celaya y Montecillo después de la floración, se reflejó en un aumento en la  $T_c$  en los tres ambientes de humedad edáfica, causando estrés por calor; éstas condiciones de estrés se agudizaron con el descenso en el contenido hídrico de las plantas en el ambiente más seco (Montecillo en seco); la  $T_c$  se relacionó negativa y significativa con el  $\psi$  y el  $\pi$  en Montecillo en seco ( $\psi = - 0.17(T_c) + 4.1$ ,  $r=0.88$ ,  $P\leq 0.01$  (Figura 3.7a) y  $\pi = - 0.15(T_c) + 3.1$ ,  $r=0.76$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.7b); el  $\psi$  y el  $\pi$  no estuvieron relacionados significativamente con la  $T_c$  en



Montecillo en riego y Celaya en secano. Los cultivares con  $\psi$  más altos mantuvieron el dosel del cultivo más fresco y presumiblemente, la apertura de los estomas y la tasa transpiratoria a pesar del déficit hídrico del suelo; resultados similares han sido observados en trigo en donde  $\psi$  más altos contribuyeron a mantener una menor temperatura del dosel del cultivo (Ehrler *et al.*, 1978).

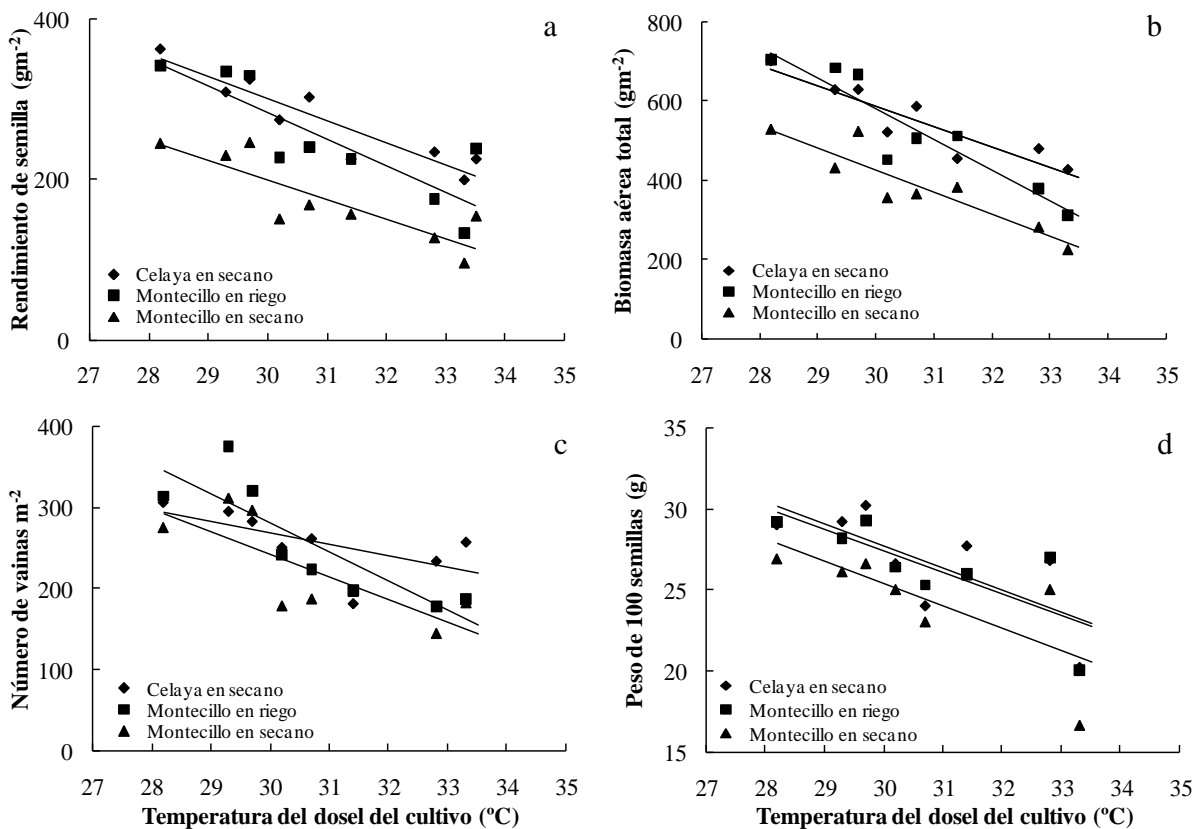


**Figura 3.7 Relación entre el promedio de la temperatura del dosel del cultivo y potencial hídrico (a), y potencial osmótico (b) en Montecillo en riego, Celaya en secano y Montecillo en secano. 2007.**

La alta  $T_c$  también tuvo un efecto significativo en la producción de biomasa aérea final y el rendimiento de semilla y sus componentes; la  $T_c$  estuvo asociada negativa y significativamente con el rendimiento de semilla en Montecillo en riego ( $RS = -27.4(T_c) + 1123$ ,  $r=0.93$ ,  $P \leq 0.01$ ), Celaya en secano ( $RS = -33.2(T_c) + 1280$ ,  $r=0.85$ ,  $P \leq 0.01$ ) y Montecillo en secano ( $RS = -24.6(T_c) + 937$ ,  $r=0.86$ ) (Figura 3.8a); biomasa aérea final en Montecillo en riego ( $BAF = -51.4(T_c) + 2131$ ,  $r=0.92$ ,  $P \leq 0.01$ ), Celaya en secano ( $BAF = -77.8(T_c) + 2919$ ,  $r=0.92$ ,  $P \leq 0.01$ ) y Montecillo en secano ( $BAF = -55.7(T_c) + 2099$ ,  $r=0.91$ ,  $P \leq 0.01$ ) (Figura 3.8b); número de vainas  $m^{-2}$  en Montecillo en riego ( $V m^{-2} = -14.2(T_c) + 695$ ,  $r=0.63$ ,  $P \leq 0.05$ ), Celaya en secano ( $V m^{-2} = -28(T_c) + 1083$ ,  $r=0.78$ ,  $P \leq 0.01$ ) y Montecillo en secano ( $V m^{-2} = -35.7(T_c) + 1351$ ,  $r=0.85$ ,  $P \leq 0.01$ ) (Figura 3.8c); peso de 100 semillas en Montecillo en riego ( $P100S = -1.4(T_c) + 68.4$ ,  $r=0.72$ ,  $P \leq 0.01$ ), en Celaya en secano ( $P100S =$

-1.4(Tc) + 66.7,  $r=0.71$ ,  $P\leq 0.01$ ) y Montecillo en seco (P100S = -1.3(Tc) + 67.2,  $r=0.77$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.8d).

En general los cultivares con mayor rendimiento de semilla también produjeron alta BAF,  $V\ m^{-2}$  y P100S en los tres ambientes de humedad edáfica (Figuras 3.8a a 3.8d). No obstante, al examinar la relación entre la Tc y el RS, BAF,  $V\ m^{-2}$  y P100S en los tres ambientes, se observó que la alta temperatura tuvo un efecto más severo en el RS y la BAF en Celaya en seco que en Montecillo en riego y seco, mientras que en Montecillo en seco el número  $V\ m^{-2}$  fue más afectado por la alta temperatura que en Montecillo en riego y Celaya en seco; el P100S presentó un efecto similar de la Tc en los tres ambientes de humedad edáfica (Figuras 3.8a a 3.8d). La alta temperatura redujo el RS, BAF,  $V\ m^{-2}$  y P100S en 12.5, 10.7, 10.2 y 3.4 % por cada  $^{\circ}C$  ( $^{-1^{\circ}C}$ ) de aumento en la temperatura del dosel del cultivo, respectivamente (Cuadro 3.4); Gibson y Paulsen (1999) determinaron que un incremento en la temperatura desde 22.5 a los 27.5  $^{\circ}C$  desde 10 días después de la antesis hasta la madurez en trigo, causó fuertes reducciones en el número de granos que se tradujeron en una reducción del 16 % el rendimiento de grano  $^{-1^{\circ}C}$  de aumento en la temperatura; las reducciones en el número de granos se debieron a un menor número de espiguillas por planta y granos por espiguilla, siendo este carácter muy sensitivo al estrés por calor (Shpiler y Blum, 1986), dado que las etapas finales de división y alargamiento celular del grano ocurren entre los 10 y 14 días después de la antesis (Jennings y Morton, 1963). Otros trabajos de investigación indican que cuando el trigo fue sometido a regímenes de temperatura de 35  $^{\circ}C$ , día/20  $^{\circ}C$ , noche desde 20 días después de la antesis hasta la madurez, se disminuyó el rendimiento de grano, número de granos y el peso del grano en 78, 63 y 29 %, respectivamente, siendo el número de granos por espiga el componente más afectado por la alta temperatura (Gibson y Paulsen, 1999).



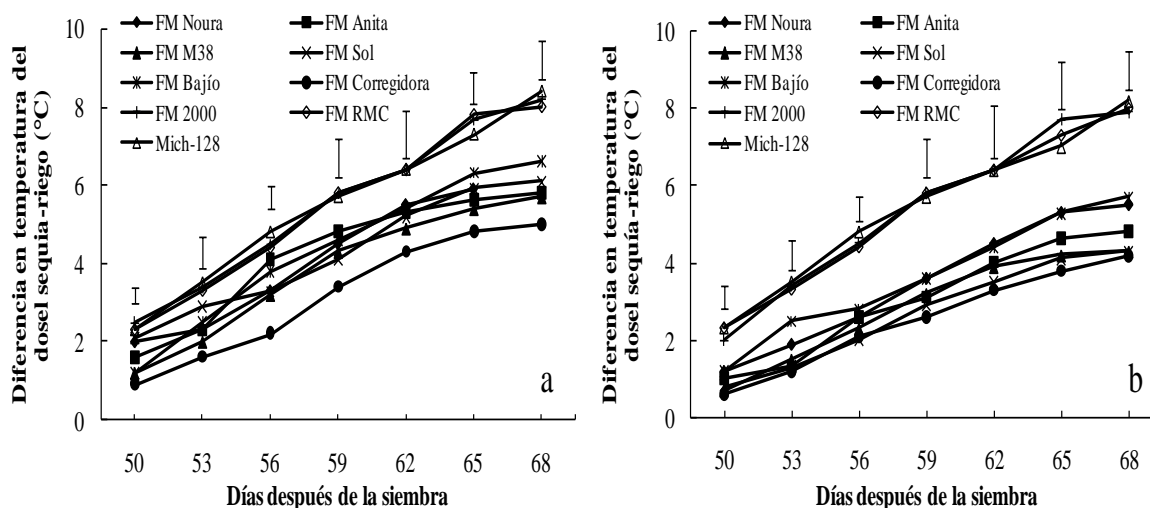
**Figura 3.8** Relación entre el promedio de la temperatura del dosel del cultivo y rendimiento de semilla (a), biomasa aérea final (b), número de vainas m<sup>-2</sup> (c) y peso de 100 semillas (d). 2007.

**Cuadro 3.4** Rendimiento de semilla (RS), biomasa aérea final (BAF), número de vainas m<sup>-2</sup> (V m<sup>-2</sup>) y peso de 100 semillas (P100S) promediados en los tres ambientes de humedad edáfica. El valor para cada cultivar se calculó del % de la media de cada ambiente y después se promedió entre los tres ambientes. 2007.

Cultivar	RS	BF	NV	P100S
	(%)			
FM Noura	136.4	133.8	124.9	109.1
FM Anita	130.4	126.5	126.1	110.3
FM M38	126.1	119.7	137.4	107.0
FM Sol	100.6	100.1	93.3	92.7
FM Bajío	92.1	91.8	93.1	100.1
FM Corregidora	87.6	90.0	80.4	105.0
FM 2000	91.1	94.0	80.9	102.1
FM RMC	75.8	78.3	77.0	101.1
Michoacán 128	59.8	65.8	87.1	72.7
<b>Media general</b>	<b>234.0</b>	<b>485.2</b>	<b>239.7</b>	<b>26.0</b>
	(g m <sup>-2</sup> )	(g m <sup>-2</sup> )	vainas m <sup>-2</sup>	(g)

### 3.4.7 Diferencia secano-riego, relaciones hídricas y rendimiento, y sus componentes

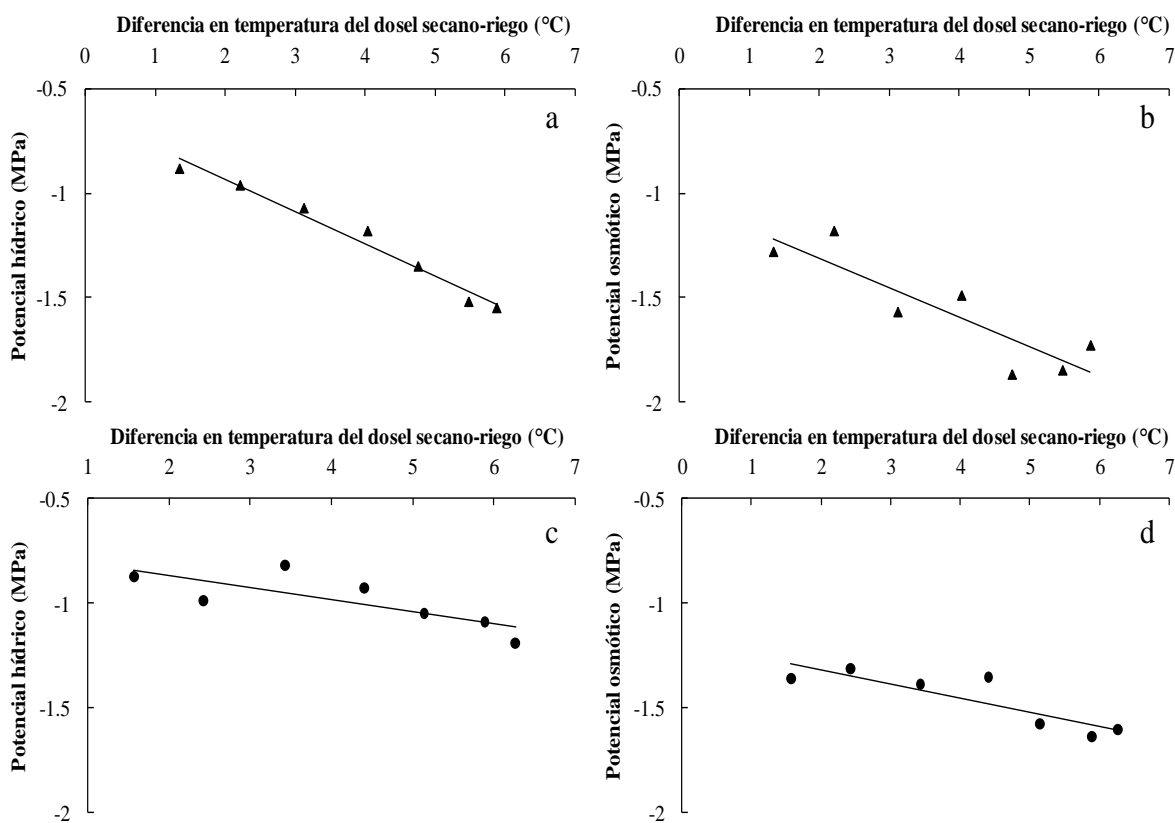
La diferencia en Tc secano-riego (Dsr) se incrementó conforme aumentó el déficit hídrico edáfico para todos los cultivares entre las etapas de inicio de floración (R4, 50 dds) e inicio del crecimiento de las vainas (R5, 68 dds) en Celaya en secano (Figura 3.9a) y Montecillo en secano (Figura 3.9b); los cultivares FM Noura, FM Bajío, FM M38, FM Anita, FM Sol y FM Corregidora presentaron menor Dsr que los cultivares FM 2000, FM RMC y Michoacán 128 en Celaya en secano (Figura 3.9a) y en Montecillo en secano (Figura 3.9b) en todas las mediciones realizadas en los dos ambientes de humedad edáfica. La menor Dsr es un indicativo de que estos cultivares pudieron mantener las tasas de transpiración bajo condiciones hídricas edáficas limitantes, al extraer agua a mayor profundidad en el perfil del suelo (Sponchiado *et al.*, 1989).



**Figura 3.9 Diferencia secano-riego para la temperatura del dosel del cultivo en Celaya en secano (a) y Montecillo en secano (b). 2007. Las barras verticales indican la diferencia mínima significativa de Tukey ( $P \leq 0.05$ ) en cada fecha de medición.**

Al determinar la relación entre la diferencia en la temperatura del dosel del cultivo secano-riego (Dsr) y los potenciales hídrico y osmótico, se observó que ésta relación sólo fue significativa en Montecillo en secano, debido a que en este ambiente, las plantas estuvieron sujetas a un estrés hídrico edáfico más severo que en Celaya en secano; la Dsr se relacionó negativa y significativamente con el  $\psi$  ( $\psi = -0.16(\text{Dsr}) - 0.62$ ,  $r = -0.99$ ,  $P \leq 0.01$ ) (Figura 3.10a) y el  $\pi$  ( $\pi = -0.14(\text{Dsr}) - 1.03$ ,  $r = -0.88$ ,  $P \leq 0.01$ ) (Figura 3.10b). Se determinó también, que la Dsr se asoció negativa y significativamente con el  $\psi$  ( $\psi = -0.57(\text{Dsr}) - 0.76$ ,  $r = -0.78$ ,

$P \leq 0.01$ ) (Figura 3.10c) y el  $\pi$  ( $\pi = -0.07(D_{sr}) - 1.2$ ,  $r = -0.86$ ,  $P \leq 0.01$ ) (Figura 3.10d), al promediar la diferencia de la temperatura del dosel del cultivo y los potenciales hídrico y osmótico en los dos ambientes de secano, respectivamente. La significancia de ésta relación en el ambiente más seco y en promedio de los dos ambientes indica que cuando las plantas están sujetas a mayor grado de estrés hídrico y alta temperatura, desarrollan una mayor capacidad de ajustarse al ambiente de estrés y los cultivares con menor diferencia de temperatura del dosel secano-riego son los que mantienen los más altos potenciales hídricos y la tasa de transpiración (Ehrlér *et al.*, 1978). Estos resultados también son confirmados, con el hecho de que las altas temperaturas disminuyen la evapotranspiración o utilización de la humedad por el cultivo, al aumentar la resistencia estomatal del dosel del cultivo y el cierre de estomas, por efecto de un incremento en el grado del estrés por calor en frijol (Walker y Hatfield, 1979).



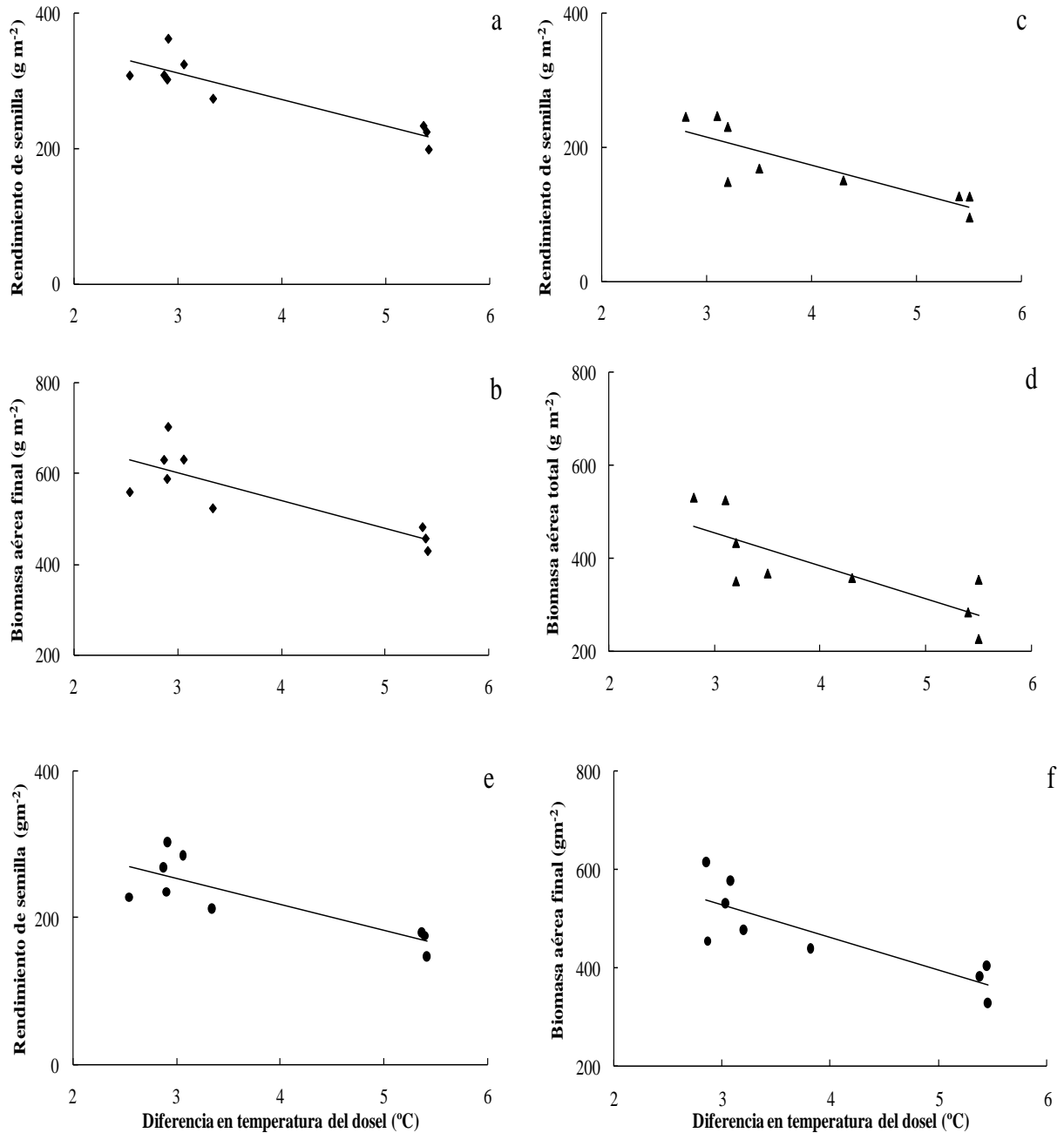
**Figura 3.10** Relación entre la diferencia de la temperatura del dosel del cultivo secano-riego y el potencial hídrico (a) y osmótico (b) en Montecillo en secano, y en promedio de la diferencia de la temperatura del dosel del cultivo secano-riego y promedio del potencial hídrico (c) y el potencial osmótico (d) en los dos ambientes. 2007.

Por otra parte, la Dsr también se relacionó negativa y significativamente con el rendimiento de semilla ( $RS = -39(Dsr) + 427$ ,  $r=0.90$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.11a) y la biomasa aérea final en Celaya en secano ( $BAF = -61(Dsr) + 783$ ,  $r=0.83$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.11b), Montecillo en secano ( $RS = -42(Dsr) + 341$ ,  $r=0.85$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.11c) y ( $BAF = -71(Dsr) + 668$ ,  $r=0.80$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.11d), y en promedio de los dos ambientes de secano ( $RS = -35(Dsr) + 359$ ,  $r=0.83$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.11e) y ( $BAF = -66(Dsr) + 726$ ,  $r=0.83$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.11f). Los cultivares con menor Dsr produjeron mayor rendimiento de semilla y biomasa aérea final; Blum *et al.* (1989) al estudiar el comportamiento de algunos cultivares de trigo bajo estrés hídrico y alta temperatura, observaron que los cultivares de trigo con susceptibilidad a sequía sufrieron mayor reducción del rendimiento bajo estrés hídrico y tendieron a estar bajo mayor estrés, además de tener doseles del cultivo más calientes al medio día. Otros estudios en trigo mostraron que el estrés por alta temperatura redujo la duración de todas las etapas fenológicas de la planta y el rendimiento de grano, debido a una fuerte disminución en el número de granos por espiguilla al reducirse la duración de la etapa de llenado del grano (Shpiler y Blum, 1986).

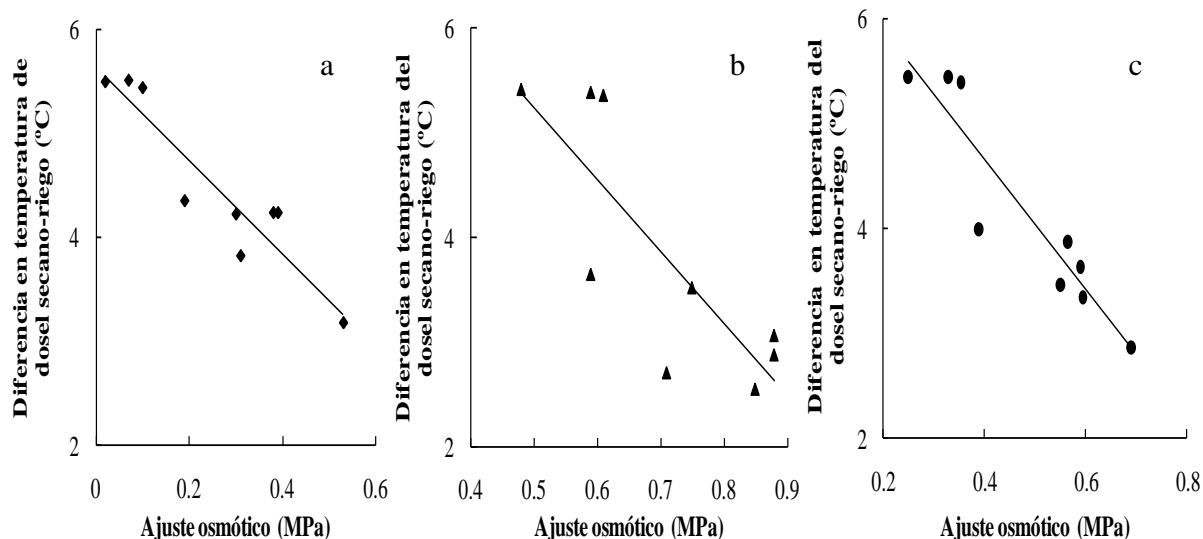
### 3.4.8 Diferencia en temperatura secano-riego y ajuste osmótico

El ajuste osmótico determinado durante el periodo de sequía se relacionó negativa y significativamente con la diferencia en temperatura del dosel del cultivo secano-riego en Celaya en secano ( $AO = -4.5(Dsr) + 5.6$ ,  $r=0.93$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.12a), Montecillo en secano ( $AO = -6.8(Dsr) + 8.7$ ,  $r=0.82$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.12b) y en promedio de los dos ambientes ( $AO = -6.2(Dsr) + 7.1$ ,  $r=0.93$ ,  $P\leq 0.01$ ) (Figura 3.12c). Los cultivares con mayor capacidad de ajuste osmótico tuvieron menor diferencia de la temperatura del dosel del cultivo secano-riego; el ajuste osmótico involucra la acumulación activa de solutos dentro de la planta en respuesta a una disminución en el potencial hídrico del suelo, reduciendo los efectos negativos del déficit hídrico (Morgan, 1984) y como consecuencia de la acumulación de solutos, el potencial osmótico de la célula disminuye y atrae agua al interior de las células, manteniendo la turgencia y el contenido hídrico de la planta, para continuar realizando los procesos fisiológicos de intercambio gaseoso (fotosíntesis/transpiración), que finalmente se reflejan en el rendimiento de semilla y sus componentes; en garbanzo se ha observado que un ajuste osmótico de 0.28 a 0.48 MPa en condiciones moderadas de sequía, puede contribuir hasta en

26 % del rendimiento final y un ajuste osmótico de 0.37 a 0.71 MPa en condiciones severas de sequía, puede beneficiar al rendimiento de semilla en 48 % (Moinuddin y Khanna-Chopra, 2004).



**Figura 3.11** Relación entre el promedio de la diferencia en la temperatura del dosel del cultivo secano-riego y el rendimiento de semilla (a) y la biomasa aérea final (b) en Celaya en secano, Montecillo en secano (c y d) y en promedio de los dos ambientes. 2007.



**Figura 3.12 Relación entre el ajuste osmótico y la diferencia de temperatura del dosel del cultivo secano-riego en Celaya en secano (a), Montecillo en secano (b) y en promedio de los dos ambientes (c). 2007.**

### 3.5. CONCLUSIONES

El déficit hídrico edáfico impuesto a las plantas durante la floración (entre las etapas R4 y R6) fue más severo en Montecillo en secano que en Celaya en secano y Montecillo en riego; ésta deficiencia hídrica disminuyó el potencial hídrico, osmótico y de turgencia. La mayor disminución en el potencial osmótico se observó en Montecillo en secano, donde las plantas mostraron su mayor capacidad de ajuste osmótico; los cultivares con mayor capacidad de ajuste osmótico produjeron mayor rendimiento de semilla y biomasa aérea final en los dos ambientes de secano.

La temperatura del aire y del dosel del cultivo estuvieron íntimamente relacionadas entre sí y aumentaron al disminuir el contenido hídrico edáfico y el potencial hídrico de las plantas durante la floración; la temperatura del aire y del dosel del cultivo aumentaron conforme se impusieron condiciones de déficit hídrico edáfico más severo; la temperatura del dosel del cultivo fue mayor en secano (*ca.* 5 °C) que en riego; la temperatura del cultivo se relacionó negativamente con el potencial hídrico y osmótico, sobre todo en el ambiente más seco (Montecillo en secano); los cultivares que mantuvieron más alto potencial hídrico y osmótico conservaron su follaje más fresco. La alta temperatura de la planta redujo el rendimiento de semilla, la biomasa aérea final, el número de vainas  $m^{-2}$  y el peso de 100 semillas en 12.5,



10.7, 10.2 y 3.4 % por cada °C ( $^{-1}$ °C) de aumento en la temperatura del dosel del cultivo en promedio de los tres ambientes.

La diferencia en temperatura del dosel del cultivo secano-riego se incrementó al aumentar el déficit hídrico edáfico para todos los cultivares en Celaya en secano y Montecillo en secano; los cultivares con menor diferencia de temperatura presentaron una mayor capacidad de ajustarse al ambiente de estrés hídrico y térmico, desarrollando mayores niveles de ajuste osmótico, lo que les permitió producir mayor rendimiento de semilla y biomasa aérea final.

### 3.6 REFERENCIAS

- Acosta-Gallegos J. A., R. Rosales-Serna, R. Navarrete-Maya y E. López-Salinas. 2000. Desarrollo de variedades mejoradas de frijol para condiciones de riego y temporal en México. *Agricultura Técnica en México* 26 (1): 79-98.
- Agtunong T. P., R. Redden, M. A. Mengge-Nang, C. Searle and S. Fukai. 1992. Genotypic variation in response to high temperature at flowering in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Australian Journal of Experimental Agriculture* 32: 1135-1140.
- Al-Dakheel A. J. 1989. Osmotic adjustment: a selection criterion for drought tolerance. *In*: E. Acevedo, A. P. Conesa, P. Monneveux and J.P. Srivastava (eds.). *Physiology-breeding of winter cereals for stressed Mediterranean environments*. Les Colleques No. 55, INRA, Paris, France. Pp. 337-368.
- Amede T. and S. Schubert. 2003. Mechanisms of drought resistance in grain legumes. I. Osmotic adjustment. *Ethiopian Journal of Science* 26 (1): 37-46.
- Babu R. C., M. S. Patham, A. Blum, and H. T. Nguyen. 1999. Comparison of measurement methods of osmotic adjustment in rice cultivars. *Crop Science* 39: 150-158.
- Balota M., W. A. Payne, S. E. Evett and M. D. Lazar. 2007. Canopy temperature depression sampling to assess grain yield and genotypic differentiation in winter wheat. *Crop Science* 47: 1518-1529.
- Barrios-Gómez E. J. y C. López-Castañeda. 2009. Temperatura base y tasa de extensión foliar en frijol. *Agrociencia* 43: 29-35.
- Begg J. E. and N. C. Turner, 1976. Crop water deficits. *Advances in Agronomy* 28: 161-217.

- Basnayake J. A., M. Cooper, R. G. Henzell and M. M. Ludlow. 1996. Influence of the rate of development of water deficit on the expression of maximum osmotic adjustment and desiccation tolerance in three grain sorghum lines. *Field Crops Research* 49: 65-76.
- Blum A, L. Shpiler, G. Golan and J. Mayer. 1989. Yield stability and canopy temperature of wheat genotypes under drought stress. *Field Crops Research* 22: 289-296.
- Blum A. 1989. Osmotic adjustment and growth of barley genotypes under drought stress. *Crop Science* 29:230-233.
- Blum A., J. Zhang and H. T. Nguyen. 1999. Consistent differences among wheat cultivars in osmotic adjustment and their relationship to plant production. *Field Crops Research* 64: 287-291.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). 1982. Etapas de desarrollo de la planta de frijol común. Cali, Colombia. 26 p.
- Chimenti C. A., M. Marcantonio and A. J. Hall. 2006. Divergent selection for osmotic adjustment results in improved drought tolerance in maize (*Zea mays* L.) in both early growth and flowering phases. *Field Crops Research* 95: 305-315.
- Dickson M. H. and R. Petzoldt. 1989. Heat tolerance and pod set in green beans. *Journal of the American Society of Horticultural Science* 114: 833-
- Ehrler W. L., S. B. Idso, R. D. Jackson and R. J. Reginato. 1978. Wheat canopy temperature: relation to plant water potential. *Agronomy Journal* 70: 251-256.
- Fischer R. A. and R. Maurer. 1978. Drought resistance in spring wheat cultivars. I. Grain yield responses. *Australian Journal of Agricultural Research* 29: 897-912.
- García E. 1988. Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F. 246 p.
- Gibson L. R. and G. M. Paulsen. 1999. Yield components of wheat grown under high temperature stress during reproductive growth. *Crop Science* 39: 1841-1846.
- Gross Y. and J. Kigel. 1994. Differential sensitivity to high temperature of stages in the reproductive development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crops Research* 36: 201-212.
- Halterlein A. J. 1983. Bean. *In*: I. D. Teare, M. M. Peet (eds.). *Crop-Water Relations*. John Wiley Publications. New York. Pp. 157-186.

- Harris D. S., W. T. Schapaugh Jr. and E. T. Kanemasu. 1984. Genetic diversity in soybeans for leaf canopy temperature and the association of leaf canopy temperature and yield. *Crop Science* 24: 839-842.
- Hatfield J. L. 1990. Measuring plant stress with an infrared thermometer. *HortScience* 25 (12): 1535-1538.
- Jennings A. C. and R. K. Morton. 1963. Changes in the nucleic acids and other phosphorus-containing compounds of developing wheat grains. *Australian Journal of Biological Sciences* 16: 332-341.
- Jones M. and H. Rawson. 1979. Influence of rate of development on leaf water deficits upon photosynthesis, leaf conductance, water use efficiency, and osmotic potential in sorghum. *Physiologia Plantarum* 45 (1):103-111.
- Laing D. R., P. G. Jones and T. H. C. Davis. 1984. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). In: P.R. Goldsworthy and N.M. Fisher (eds.). *The physiology of tropical field crops*. John Wiley and Sons, New York. Pp. 305-351.
- Martínez J. P., H. Silva, J. F. Ledent and M. Pinto. 2007. Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 26: 30-38.
- Matyssek R., S. Maruyama and S. Boyer. 1991. Growth-induced water potentials may mobilize internal water for growth. *Plant, Cell and Environment* 14: 917-923.
- Moinuddin J. and R. Khanna-Chopra. 2004. Osmotic adjustment in chickpea in relation to seed yield and yield parameters. *Crop Science* 44: 449-455.
- Molz F. J. and J. S. Boyer. 1978. Growth-induced water potentials in plant cells and tissues. *Plant Physiology* 62: 423-429.
- Monterroso V. A. and H. C. Wien. 1990. Flower and pod abscission due to heat stress in beans. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 115: 631-634.
- Morgan J. M. 1983. Osmoregulation as selection criterion for drought tolerance in wheat. *Australian Journal of Agricultural Research* 34 (6): 607-614.
- Morgan J. M. 1984. Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology* 35: 299-319.
- Morgan J. M. 1991. Adaptation to water-deficit in chickpea breeding lines by osmoregulation: relationship to grain yields in the field. *Field Crops research* 27: 61-70.

- Morgan J. M. 1992. Osmotic components and properties associated with genotypic differences in osmoregulation in wheat. *Australian Journal of Plant physiology* 19 (1): 67-76.
- Morgan J. M. and A. G. Condon. 1986. Water use, grain yield, and osmoregulation in wheat. *Australian Journal Plant Physiology* 13 (4): 523-532.
- Morgan J. M. 1995. Growth and grain yield of wheat lines with differing osmoregulative capacity at high soil water deficit in seasons of varying evaporative demand. *Field Crops Research* 40: 143-152.
- Nikman S. R. and D. W. Turner. 2000. Crop updates – Physiological aspects of drought tolerance in *Brassica napus* and *B. juncea*. Crop updates by year, Department of Agriculture and Food, Western Australia, Australia ([http://www.agric.wa.gov.au/PC\\_91135.html](http://www.agric.wa.gov.au/PC_91135.html); consulted July 1, 2009).
- Nonami H. and J. S. Boyer. 1993. Direct demonstration of a growth-induced water potential gradient. *Plant Physiology* 102: 13-29.
- Ofir M., Y. Groos, F. Bangerth and J. Kigel. 1993. High temperature effects on pod and seed production as related to hormone levels and abscission of reproductive structures in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientia Horticulturae* 55: 201-211.
- Parsons L. R. and T. K. Howe. 1984. Effects of water stress on the water relations of *Phaseolus vulgaris* and the drought resistant *Phaseolus acutifolius*. *Physiologia Plantarum* 60(2): 197-202.
- Rainey K. M. and P. D. Griffiths. 2005. Differential response of common bean genotypes to high temperature. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 130 (1): 18-23.
- Reynolds M. P., S. Nagarajan, M. A. Razzaque and O. A. A. Ageeb. 2001. Heat tolerance. *In*: M. P. Reynolds, J. I. Ortíz-Monasterio, A. McNab (eds.). Application of physiology in wheat breeding. México, D. F. CIMMYT. Pp 124-135.
- Rosales S. R., J. A. Acosta G., J. S. Muruaga M., J. M. Hernández C., G. Esquivel E. y P. Pérez H. 2004. Variedades mejoradas de frijol del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (Libro Técnico No. 6). SAGARPA, INIFAP, CIRCE, Campo Experimental Valle de México. Chapingo. México. México. 148 p.
- SAS (Statistical Analysis System), Versión 8 para Windows. 2006. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

- Shpiler L. and A. Blum. 1986. Differential reaction of wheat cultivars to hot environments. *Euphytica* 35: 483-492.
- Silva-Robledo H., M. Ortiz-Lizana y E. Acevedo-Hinojosa. 2007. Relaciones hídricas y ajuste osmótico en trigo. *Agrociencia* 41:23-34.
- Singh S. P. 2005. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *In*: R. J. Singh and P. P. Jauhar (eds.), Genetic resources, chromosome engineering, and crop improvement. Volumen 1, Grain Legumes. Taylor and Francis Group, Boca Raton, Florida, U.S.A. Pp. 11-48.
- Shonnard G. C. and P. Gepts. 1994. Genetics of heat tolerance during reproductive development in common bean. *Crop Science* 34: 1168-1175.
- Smith J. R. 2004. Selection protocols for increased yield and stress tolerance in common bean. *The Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico* 88: 27-43.
- Sponchiado B. N., J. W. White, J. A. Castillo and P. G. Jones. 1989. Root growth of four common bean cultivars in relation to drought tolerance in environments whit contrasting soil types. *Experimental Agriculture* 25: 249-257.
- Stalfelt M. G. 1962. The effect of temperature on opening of the stomatal cells. *Physiologia Plantarum* 15: 772-779.
- Subbarao G. V., N. H. Nam, Y. S. Chauhan and C. Johansen. 2000. Osmotic adjustment, water relations and carbohydrate remobilization in pigeonpea under water deficits. *Journal of Plant Physiology* 157: 651-659.
- Turner N. C. 1979. Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants. *In*: H. Mussell, R.C. Staples (eds.), *Stress physiology in crop plants*. Wiley InterScience, New York. Pp. 343-372.
- Turner N. C. 1986. Crop water deficits: A decade of progress. *Advances in Agronomy* 39: 1-51.
- Walker G. K. and J. L. Hatfield. 1979. Test of the stress-degree concept using multiple planting dates of red kidney beans. *Agronomy Journal* 71: 967-971.
- Wang J., Y. T Gan, F. Clarke, and C. L. McDonald. 2006. Response of chickpea yield to high temperature stress during reproductive development. *Crop Science* 46: 2171-2178.
- Watanabe H. 1953. Studies on the unfruitfulness of the beans. 3. Influences of temperature on blooming, and of temperature and relative humidity on the pollen activity of the beans. *Japanese Society for Horticultural Science* 22 (3): 172-176.

- Weaver M. L., H. Timm and D. W. Burke. 1985. Pollen staining and high temperature-tolerance of bean. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 110: 797-799.
- White J. W. and J. Izquierdo. 1991. Physiology of yield potential and stress tolerance. *In: A. van Schoonhoven, O. Voysest (eds.), Common beans: Research for crop improvement.* C.A.B. International, U.K. and CIAT, Cali, Colombia. Pp. 287-382.

## CAPITULO IV. DISCUSIÓN GENERAL

### 4.1 INTRODUCCIÓN

El mejoramiento genético del rendimiento en frijol bajo condiciones de secano es una tarea compleja, al considerar las muchas interacciones que la planta tiene en las áreas de cultivo, no sólo con factores abióticos como la sequía, alta o baja temperatura, salinidad, baja fertilidad edáfica, etc., sino, también con factores bióticos como las plagas y enfermedades del vástago y raíces. La interacción entre el cultivo y estos factores desfavorables, depende en mayor o menor grado del hábito de crecimiento, la etapa fenológica de la planta en la que se presentan los diferentes estreses ambientales y/o bióticos y la intensidad, y duración del estrés durante la estación de crecimiento.

En los sistemas agrícolas de producción de frijol en secano se estima que la sequía entre los factores bióticos y abióticos, es el factor ambiental que contribuye en mayor medida a la disminución del rendimiento, al pasar de un rendimiento promedio nacional en riego de 1636 kg ha<sup>-1</sup> a uno en secano de 690 kg ha<sup>-1</sup>. Esto significa una reducción en el rendimiento promedio nacional de 58 % (SAGARPA, 2009). Estos datos revelan el tremendo impacto que las deficiencias hídricas edáficas tienen en el rendimiento de frijol en las diversas regiones de cultivo a nivel nacional; la comparación del rendimiento promedio entre los municipios con el más alto (Tecuala, Nayarit= 1850 kg ha<sup>-1</sup>, con una precipitación de 1118 mm al año) y el más bajo rendimiento (Ensenada, B.C. = 240 kg ha<sup>-1</sup>, lluvia anual de 172 mm al año), pone de manifiesto diferencias aún mayores que son del orden de 87 % a nivel nacional (SAGARPA, 2009).

La alta temperatura particularmente durante la floración e inicio de crecimiento de las vainas es el segundo factor ambiental más desfavorable para el rendimiento del frijol, en los sistemas de producción de secano en México, después de la sequía. No fue posible encontrar información que nos permita evaluar el daño que las altas temperaturas causan en el frijol en campo. Sin embargo, se ha observado que en ambientes controlados con tratamientos de temperatura (día/noche) de 24 °C/21 °C; 27 °C/24 °C; 30 °C/27 °C y 33 °C/30 °C, durante las etapas reproductoras, ocasionan reducciones en el número de semillas, vainas y semillas/vaina, y peso promedio de semilla, del orden de 83, 63, 73 y 47 %, respectivamente. La respuesta diferencial a las altas temperaturas observada entre todos los cultivares

estudiados, sugiere que la selección de nuevos cultivares debe hacerse, al incluir genes no alélicos de la tolerancia al calor (Rainey y Griffiths, 2005).

En general, los cambios en la cantidad y distribución de la lluvia, y el aumento en la temperatura atmosférica, debidos al calentamiento global, inevitablemente afectarán negativamente el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos en la agricultura, ocasionando altos niveles de estrés. Probablemente, estos cambios tengan efectos más severos en los sistemas agrícolas de secano. Por lo tanto, los programas de fitomejoramiento deberán incluir, no solamente las estrategias tradicionales de selección por rendimiento, sino deberán considerar también, la identificación y selección por caracteres relacionados positivamente con el rendimiento, y caracteres involucrados con la resistencia a sequía así como tolerancia a calor, que tengan estrecha relación con el rendimiento.

El objetivo general de la presente tesis fue estudiar la respuesta de un grupo de cultivares de frijol tipo Flor de Mayo, unas resistentes y otras susceptibles a sequía en: rendimiento y sus componentes, relaciones hídricas, y tolerancia a altas temperaturas en condiciones de riego y secano.

## **4.2 EXPERIMENTAL**

Se utilizaron diferentes cultivares de frijol tipo Flor de Mayo que son ampliamente utilizados para la siembra en el ciclo de primavera-verano, bajo condiciones de secano en la región central de México, donde también se tiene preferencia de este tipo de cultivares para la alimentación. Los cultivares se sembraron en Celaya, Gto., México, en condiciones de secano con dos riegos de auxilio antes de la floración debido a la falta de lluvia, y en Montecillo en condiciones de riego y secano. Se hicieron mediciones periódicas del potencial hídrico foliar ( $\psi$ ), potencial osmótico ( $\pi$ ) y potencial de turgencia ( $P$ ) durante la floración (entre 50 y 70 dds) y se determinó el grado de ajuste osmótico (AO) para cada cultivar. En este mismo periodo también se midió la temperatura del aire ( $T_a$ , °C) circundante al dosel del cultivo y la de el dosel del cultivo ( $T_c$ , °C) y se determinó el efecto de la alta temperatura en las relaciones hídricas y el grado de ajuste osmótico de los cultivares en condiciones de secano. También se determinó el efecto de las altas temperaturas en el rendimiento de semilla y sus componentes tanto en riego como en secano.



### 4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cultivares FM Noura, FM Anita y FM M38 produjeron mayor rendimiento de semilla que los demás cultivares; el alto rendimiento en estos cultivares estuvo acompañado por los más altos promedios de biomasa aérea final, número de vainas  $m^{-2}$ , semillas normales  $m^{-2}$  y semillas vaina $^{-1}$ , y mayor peso de 100 de semillas. La biomasa aérea final fue el componente del rendimiento relacionado más estrechamente con el rendimiento de semilla. La biomasa aérea final refleja la capacidad de asimilación de fotoasimilados de la planta durante su ciclo biológico (Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998) y su medición en condiciones de campo es relativamente fácil, por lo que éste componente del rendimiento, podría utilizarse como criterio de selección para mejorar el rendimiento exitosamente (Rosales-Serna *et al.*, 2004). Lo anterior, siempre y cuando la asignación de materia seca a la semilla con respecto a la biomasa aérea final (p. ej., índice de cosecha = Rendimiento de semilla/Biomasa aérea final), sea favorable a la semilla a través de sus componentes número vainas  $m^{-2}$  y semillas normales  $m^{-2}$ , y peso de 100 semillas.

Los cultivares FM Noura, FM Anita y FM M38 produjeron mayor rendimiento de semilla y biomasa aérea final en mayor número de días a floración y madurez fisiológica, que los otros cultivares en promedio de los dos ambientes de secano (con sequía intermitente y lluvias durante la formación de la semilla) y riego. Otros trabajos de investigación en cebada y trigo, en secano (Montecillo y Tecámac, México y Salinas, San Luís Potosí) con sequía intermitente y lluvias durante la etapa de llenado del grano, mostraron una estrecha relación positiva y significativa entre el rendimiento de grano y el número de días a antesis. Los cultivares con mayor número de días a antesis aumentaron su rendimiento de grano en 3.4 % por cada día que la antesis se retrasó con respecto al promedio de todos los cultivares evaluados (López-Castañeda y Muñoz-Orozco, 1994). Esta respuesta fenológica asociada con el rendimiento de grano, posiblemente también esté relacionada con los mecanismos de recuperación de la planta a la sequía, uno de los cuales es la plasticidad en el número final de espiguillas y florecillas, que producen grano durante el desarrollo floral en trigo (Turner, 1979). En el presente estudio es notorio que los cultivares sobresalientes FM Noura, FM Anita y FM M38, además de producir alta biomasa aérea final, también produjeron más vainas $^{-2}$  y semillas normales  $m^{-2}$  que los otros cultivares, indicando un comportamiento similar al descrito para trigo.

Los resultados que aquí se discuten, sugieren que el mejoramiento genético del rendimiento de frijol, bajo condiciones de secano con sequía intermitente y lluvia durante la formación de la semilla, puede llevarse a cabo con la selección de cultivares con mayor biomasa aérea final y altos promedios de los componentes vainas  $m^{-2}$  y semillas normales  $m^{-2}$ . Es claro que este criterio de selección también tiene que considerar la selección de cultivares más tardíos que el promedio y alta capacidad de recuperación a la sequía en órganos reproductores directamente involucrados en el rendimiento de semilla.

Los cultivares FM Noura, FM Anita y FM M38 disminuyeron su  $\pi$  en mayor grado que los demás cultivares, sobre todo en Montecillo en secano (ambiente con mayor deficiencia hídrica edáfica); al disminuir más su  $\pi$  estos cultivares lograron un mayor nivel de ajuste osmótico. El ajuste osmótico es un mecanismo de tolerancia a bajos potenciales hídricos y se ha observado que en trigo estimula el crecimiento de la raíz y contribuye a una mayor extracción de humedad edáfica (Morgan y Condon, 1986) y en chícharo, el ajuste osmótico favorece la removilización de reservas acumuladas en la planta antes de la floración, a la semilla durante el periodo de llenado del grano (Subbarao *et al.*, 2000). La alta capacidad de ajuste osmótico de los cultivares FM Noura, FM Anita y FM M38, les permitió una mejor adaptación a las deficiencias hídricas edáficas que se reflejó en mayor rendimiento de semilla, biomasa aérea final, número de vainas  $m^{-2}$ , semillas normales  $m^{-2}$  y semillas vaina<sup>-1</sup>, y peso de 100 semillas.

Los cultivares con mayor capacidad de ajuste osmótico (FM Noura, FM Anita y FM M38) exhibieron menor diferencia secano-riego, de la temperatura del dosel del cultivo o menor estrés por temperatura. El ajuste osmótico involucra la acumulación activa de solutos, atrayendo agua al interior de la célula, manteniendo la turgencia y el contenido hídrico de la planta y el intercambio gaseoso (moléculas de  $CO_2$ /moléculas de  $H_2O$ ), proceso que finalmente se refleja en mayor rendimiento de semilla, biomasa aérea final, número de vainas  $m^{-2}$ , semillas normales  $m^{-2}$  y semillas vaina<sup>-1</sup>, y peso de 100 semillas. Un ajuste osmótico de 0.28 a 0.48 MPa en garbanzo en condiciones moderadas de sequía puede contribuir en 26 % al rendimiento final y un ajuste osmótico de 0.37 a 0.71 MPa en condiciones severas de sequía, puede beneficiar al rendimiento de semilla en 48 % (Moinuddin y Khanna-Chopra, 2004).

Los atributos agronómicos y fisiológicos que los cultivares sobresalientes sugieren en el presente estudio, pueden ser útiles en la selección de nuevos cultivares para sistemas de

producción de frijol bajo condiciones de sequía intermitente. Un incremento significativo en el rendimiento de semilla podrá lograrse al identificar y caracterizar cultivares con alto rendimiento bajo sequía, alta capacidad de ajuste osmótico y tolerancia al calor, para su utilización como progenitores en un programa de mejoramiento genético con fines de selección. Es importante también, determinar la existencia de variabilidad genética para estos caracteres en las poblaciones actuales de frijol y su heredabilidad, para lograr mayor eficacia en la selección bajo sequía.

Se considera que las diferencias en características morfológicas de las raíces entre las gramíneas de grano pequeño y las leguminosas como el frijol, sugieren que los resultados del presente trabajo de investigación tendrán que ser ampliados y profundizados en frijol, para tener mayor certidumbre.

#### **4.4 CONCLUSIONES**

El alto rendimiento de semilla en los cultivares sobresalientes (FM Noura, FM Anita y FM M38) tolerantes a sequía, estuvo determinado por una mayor biomasa aérea final y mayor número de vainas  $m^{-2}$ , semillas normales  $m^{-2}$  y semillas vaina<sup>-1</sup>, y peso de 100 semillas. Estos cultivares también, tuvieron mayor capacidad de ajuste osmótico y tolerancia a altas temperaturas, lo que contribuyó a su mayor rendimiento de semilla.

#### **4.5 REFERENCIAS**

- López-Castañeda C. y A. Muñoz-Orozco. 1994. Strategies for crop improvement in arid and semiarid environments. *In*: M. Anaya-Garduño, M. A. Pascal-Moncayo y R. Zárate-Zárate (eds.). Proceedings of the IV International Conference on Desert Development. Mexico City, Mexico. July 25-30, 1993. Pp. 418-431.
- Moinuddin J. and R. Khanna-Chopra. 2004. Osmotic adjustment in chickpea in relation to seed yield and yield parameters. *Crop Science* 44: 449-455.
- Morgan J. M. and A. G. Condon. 1986. Water use, grain yield and osmoregulation in wheat. *Australian Journal Plant Physiology* 13 (4):523-532.
- Rainey K. M. and P. D. Griffiths. 2005. Differential response of common bean genotypes to high temperatura. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 130: 18-23.

- Ramírez-Vallejo P. and J. D. Kelly. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99: 127-136.
- Rosales-Serna R., J. Kohashi-Shibata, J. A. Acosta-Gallegos, C. Trejo-López, J. Ortiz-Cereceres, and J. D. Kelly. 2004. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed bean cultivars. *Field Crops Research* 85: 203-211.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2009. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (<http://www.siap.gob.mx>). (Consultado en Julio, 2010).
- Subbarao G. V., N. H. Nam, Y. S. Chauhan and C. Johansen. 2000. Osmotic adjustment, water relations and carbohydrate remobilization in pigeon pea under water deficits. *Journal of Plant Physiology* 157:651-659.
- Turner N. C. 1979. Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants. *In*: H. Mussell and R.C. Staples (eds.), stress physiology in crop plants. John Wiley & Sons. New York, U.S.A. Pp. 344-372.