



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN BOTÁNICA

**EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA BIOMASA, EL
CONTENIDO DE FENOLES Y LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE
EN CHÍA (*Salvia hispanica* L.)**

ROSA MARIA PAREDES CAMACHO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS**

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2015

La presente tesis titulada: **EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA BIOMASA, CONTENIDO DE FENOLES Y LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE EN CHÍA (*Salvia hispanica* L.)**, realizada por el alumna: **ROSA MARIA PAREDES CAMACHO**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

BOTÁNICA

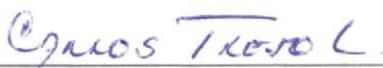
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. Ebandro Uscanga Mortera

ASESOR



Dr. Carlos Trejo López

ASESOR



M.C. Ricardo Martínez Gutiérrez

ASESOR



Dr. David Martínez Moreno

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Octubre de 2015

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante la realización de los estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados y el Postgrado en Botánica por haberme permitido realizar mis estudios de maestría.

A mi Consejo Particular por enriquecer este trabajo con sus sugerencias y apoyo.

Al Dr. Ebandro Uscanga Mortera por su apoyo como consejero, por darme la oportunidad de haber realizado este trabajo.

Al Dr. Carlos Trejo López por su dirección en el presente trabajo, por darme la confianza para realizar este trabajo y por su valioso tiempo.

Al Dr. David Martínez Moreno por sus aportaciones en este trabajo, por haberme alentado a realizar la maestría, por sus consejos y apoyo.

Al M.C. Ricardo Martínez Gutiérrez, por ser mi asesor, mi amigo y por compartir su experiencia conmigo, por su apoyo incondicional en el trabajo de laboratorio y en las revisiones.

Al M.C. Antonio García Esteva, por todo el apoyo brindado durante el desarrollo del experimento, por sus aportaciones que enriquecieron y mejoraron el trabajo final, sobre todo por su amistad y confianza.

Al Dr. José Alfonso Hernández Gómez, por abrirme las puertas de su laboratorio y brindarme la información para conseguir el material vegetal.

Al Dr. Josué Kohashi Shibata por permitirme mi estancia en el cubículo

A todos los trabajadores que de alguna manera contribuyeron a esta investigación y me brindaron su amistad.

DEDICATORIAS

Esta tesis es el resultado de un conjunto de situaciones, lugares, sentimientos, hechos y personas; sin las cuales no hubiera podido ser posible esta investigación, gracias a las personas que creyeron en mí, por mostrarme que los sueños se pueden hacer realidad, gracias a todos.

Con amor y gratitud a mis padres

A mi padre, que aunque ya no está físicamente me sigue acompañando en cada paso de mi vida, me enseñó que la vida no siempre es justa, pero siempre hay que salir adelante, luchar por mis objetivos y no rendirme tan fácil. Tu recuerdo y tus enseñanzas siempre están presentes.

A mi madre, por estar siempre a mi lado, apoyándome en momentos buenos y malos, por tu apoyo en mi trabajo de investigación, por ser mi madre y mi amiga, por darme la vida, cuidarme y guiarme hasta que pude valerme por mi misma, por dedicar tu vida a nosotros, tu familia, porque nunca nos faltara nada, por estar siempre que te necesito.

A mis hermanos

De quienes eh tenido su apoyo incondicional en todo momento y sobretodo en los momentos que más lo necesite, pese a la distancia, por ser mis hermanos y amigos.

A mi hermano Arturo por su apoyo en momentos difíciles.

A mi hermano Ubaldo porque sin su apoyo económico y moral nada de esto sería posible, por su ejemplo, por ser mi hermano, mi amigo y como un padre a la vez y porque eres un ejemplo de que los sueños se pueden alcanzar y de que siempre se puede salir adelante pese a cualquier adversidad.

A mi hermano Ale, en especial porque fuiste la persona que me convenció de realizar la maestría, porque me has enseñado que los sueños, no son solo eso si uno se lo propone, por tu apoyo incondicional en toda situación, por tu apoyo durante esta etapa en las cuestiones académicas, por creer en mí y por ser mi ejemplo a seguir y nunca dejarme caer, pero sobre todo por muy difícil que esto haya sido alentarme a vivir esta experiencia.

A mis hermanas Roma, Isabel y Ale, porque cada una me ayudado en alguna situación durante esta etapa no solo en la vida personal, también en lo académico, por estar siempre pendientes de mí, por compartir muchas experiencias conmigo, por ser no solo mis hermanas, también mis amigas, por levantarme el ánimo muchas veces que quise tirar la toalla, por estar hay en momentos alegres y tristes y sobre todo por quererme con todos mis defectos, por creer en mí y por echarme porras siempre.

A mis sobrinas

Ximena y Vale, que siempre me hacen sonreír.

A mis amigos y compañeros

Lalo, Macri, Etel, Betza, Poncho, Alex, Luis, Mario, Moy, Mine y Gera, por su apoyo en muchos momentos, por compartir experiencias conmigo y porque muchos de ustedes se convirtieron en parte de mi familia durante mi estancia en el colegio, además de que siempre me han brindado su apoyo en momentos difíciles. Además

A mis amigos que aunque no están físicamente, siempre han estado echándome porras Adriel, Sandy, Nidia, Isaías, Martin, Lili y Manuel.

A Las personas que de una u otra formaron parte de esta etapa en algún momento con su amistad, consejos, o como compañeros de clase.

En especial dedico esta tesis a mi hijo que está por nacer, el cual se ha vuelto mi inspiración y mi mayor motivo para seguir adelante y no rendirme, porque aún en el vientre comparte esta experiencia conmigo, la cual será el principio de muchas juntos.

Contenido

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS	vii
RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
I. INTRODUCCIÓN	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. Origen, distribución y taxonomía de chía	5
2.2. Morfología y requerimientos para el crecimiento de chía.....	9
2.3. Importancia del cultivo y composición química de los frutos de chía	12
2.4. Usos antiguos y actuales de la chía	15
2.5. Metabolitos secundarios.....	17
2.5.1. Fenoles	18
2.5.2. Antioxidantes	19
2.6. Déficit hídrico	20
2.7. Respuesta al déficit hídrico	22
2.8. Conductancia estomática.....	23
III. JUSTIFICACIÓN.....	25
IV. OBJETIVOS.....	26
V. HIPÓTESIS.....	27
VI. MATERIALES Y MÉTODOS	28
6.1. Ubicación del experimento	28
6.2. Material vegetal	28
6.3. Germinación de las semillas.....	29
6.4. Establecimiento del experimento	30
6.4.1. Suelo utilizado	30
6.4.2. Preparación de las macetas	30
6.5. Tratamientos y diseño experimental	30
6.6. Trasplante y riego de plantas	33
6.7. Registro de datos y variables de estudio	33
6.7.1. Variables durante el déficit hídrico	33
6.7.1.1. Conductancia estomática.....	33
6.7.2. Variables al final del déficit hídrico	34
6.7.2.1. Potencial hídrico	34

6.7.2.2. Contenido de humedad del suelo	34
6.7.2.3. Fenoles totales en hoja	35
6.7.2.4. Capacidad antioxidante en hoja.....	36
6.7.3. Variables al final del experimento	37
6.7.4. Análisis estadístico.....	37
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
7.1. Variables de estudio durante el déficit hídrico	38
7.1.1. Conductancia estomática	38
7.2. Variables al final del déficit hídrico	40
7.2.1. Potencial hídrico de la hoja y porcentaje de humedad del suelo	40
7.2.1. Fenoles totales y actividad antioxidante en hojas	42
7.3. Resultados de las variables de estudio al final del experimento	45
7.3.1. Altura de la planta	45
7.3.2. Longitud y peso seco de la raíz principal.....	47
7.3.3. Número y peso seco de ramas por planta	48
7.3.4. Peso seco de hojas por planta.....	49
7.3.5. Número de inflorescencias y frutos, peso de frutos por planta y peso de 100 frutos....	51
7.3.6. Peso seco por planta.....	54
7.3.7. Fenoles totales y actividad antioxidante en frutos	56
VIII. CONCLUSIONES	58
IX. LITERATURA CITADA.....	59

ÍNDICE DE CUADROS Y FIGURAS

	Pág.
Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo utilizado.....	30
Figura 1. Estados (color amarillo) donde más se cultiva chía (<i>Salvia hispanica</i> L.). Determinado con base en la cartografía de INEGI (2005), cartas de división política y carta de municipios.....	6
Figura 2. Países (indicados con puntos rojos) productores de chía (<i>Salvia hispanica</i> L.). Tomado de Zúñiga (2013).....	7
Figura 3. Morfología de <i>Salvia hispanica</i> L. A. Hojas; B. Raíz; C. Tallo y ramas; D. Inflorescencia; E. Flor; F. Fruto, ampliación de un fruto color pardo de chía y G. Ampliación de un fruto blanco.....	11
Figura 4. El mapa de color azul muestra al Estado de México, el de color amarillo la ubicación del municipio de Texcoco, Estado de México y el punto hace referencia a la ubicación de Montecillo, zona donde se estableció el experimento. Determinado con base en la cartografía de INEGI (2005), cartas de división política y carta de municipios.....	28
Figura 5. Ubicación del Municipio de San Mateo Coatepec Puebla. El mapa en color verde muestra el estado de Puebla y en color amarillo el municipio de Atzitzihuacan, mientras que el punto hace referencia a San Mateo Coatepec. Determinado con base en la cartografía de INEGI (2005), cartas de división política y carta de municipios.....	29
Figura 6. Etapa de aparición del primordio floral de <i>Salvia hispanica</i> L.....	31
Figura 7. Etapa de floración de <i>Salvia hispanica</i> L.....	32
Figura 8. Etapa de llenado del fruto de <i>Salvia hispanica</i> L.....	32
Figura 9. Conductancia estomática ($\text{mmoles m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en hojas de chía (<i>Salvia hispanica</i> L.) en dos tratamientos de humedad en el suelo (riego y déficit hídrico), A. Aparición del primordio floral, B. Floración y C. Llenado del fruto. Los puntos son el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar.....	40
Figura 10. Potencial de agua en hojas de chía (<i>Salvia hispanica</i> L.) (A) y porcentaje de humedad del suelo (B) registrados en tres etapas fenológicas (aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto) al final de un periodo de déficit hídrico de dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH). Las barras son el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes en las barras indican diferencia significativa entre tratamientos en cada etapa fenológica.....	42

- Figura 11.** Fenoles totales (A) y actividad antioxidante (B) en hojas de chía (*Salvia hispanica* L.) al final de un periodo de déficit hídrico en tres etapas fenológicas (aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH). Las barras indican el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia entre tratamientos.44
- Figura 12.** Altura final de la planta de chía (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.....46
- Figura 13.** Longitud de la raíz (A), peso seco de la raíz (B) de plantas de chía (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.....47
- Figura 14.** Número de ramas por planta (A) y Peso seco de ramas de plantas (B) de chía (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos...49
- Figura 15.** Peso seco de hojas por planta de chía (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.....50

Figura 16. Número de inflorescencias (A), número de frutos por planta (B), peso de frutos por planta (C) y peso de 100 frutos (D) de chía (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.....**53**

Figura 17. Peso seco total por planta (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.....**55**

Figura 18. Fenoles totales (A) y actividad antioxidante (B) en frutos de chía (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.....**56**

EFFECTO DEL ESTRÉS HÍDRICO EN LA BIOMASA, EL CONTENIDO DE FENOLES Y LA ACTIVIDAD ANTIOXIDANTE EN CHÍA (*Salvia hispanica* L.)

RESUMEN

En México los estudios acerca del efecto del estrés hídrico en chía (*Salvia hispanica* L.), son escasos, sin embargo, observaciones empíricas indican que resiste periodos prolongados de déficit hídrico. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue determinar el efecto que tiene el déficit hídrico en la producción de biomasa, contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante en hojas y frutos de chía. La investigación se realizó en condiciones de invernadero. Se empleó un diseño completamente al azar donde se evaluó dos condiciones hídricas: 1) riego (testigo) y 2) déficit hídrico aplicado en tres etapas fenológicas: 1) aparición del primordio floral, 2) floración y 3) llenado del fruto. Durante el déficit hídrico se midió diariamente la conductancia estomática y cuando ésta alcanzó un valor del 50% o menor en comparación con el testigo se regaron las plantas nuevamente hasta la cosecha. Al final del periodo del déficit hídrico en cada etapa se determinó el potencial hídrico de la hoja, el porcentaje de humedad del suelo, la actividad antioxidante y el contenido de fenoles totales en hoja. A la cosecha se midió la altura de la planta, número de ramas e inflorescencias, longitud y peso seco de la raíz, peso de los frutos, peso seco de ramas y hojas, peso seco total por planta, contenido de fenoles totales y actividad antioxidante en frutos. El potencial de agua de las hojas al final del déficit hídrico alcanzó valores cercanos al del punto de marchitez permanente (-1.5 MPa) y el contenido de humedad en el suelo (5.6%) indicó que la humedad aprovechable se había agotado en las tres etapas fenológicas estudiadas comparado al de las plantas con riego. El déficit hídrico disminuyó la altura de la planta, número de ramas e inflorescencias, peso seco de ramas y hojas en la etapa de aparición del primordio floral y floración. En las tres etapas fenológicas el déficit hídrico redujo la longitud de la raíz, número de frutos y peso de los frutos. Se registró un incremento en la acumulación de fenoles totales y actividad antioxidante en hojas por efecto del déficit hídrico sin embargo, no incrementó el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante en frutos.

Palabras clave: *Salvia hispanica* L., actividad antioxidante, estrés hídrico, fenoles.

EFFECT OF WATER STRESS ON BIOMASS, PHENOLS CONTENT AND ANTIOXIDANT ACTIVITY IN CHIA (*Salvia hispanica* L.)

ABSTRACT

In Mexico, the studies about the effect of water stress in chía (*Salvia hispanica* L.) are limited however, empirical observations have shown it is a species that resist long periods of water stress. The aim of this research was to determinate the effect of water deficit at three phenological stages in the biomass production, total phenols content and the antioxidant activity in leaves, and fruits of chia. The research was conducted under greenhouse conditions. A completely randomized design was used and two water conditions were evaluated: 1) well-watered (control) and 2) water deficit applied at three phenological stages: 1) appearance of the floral primordium, 2) flowering and 3) fruit filling. During water deficit, the stomatal conductance was measured daily and when it reached a value of 50% or less compared with the control, the plants were irrigated again until harvest. At the end of the water deficit period, leaf water potential, soil water content, antioxidant activity and the total content of phenols in leaves were determined. At harvest it was measured the height of the plant, number of branches and inflorescences, length and dry weight of the root, weight of the fruits, dry weight of the branch and leaves, total biomass, total content of phenols and antioxidant activity of the fruits. Leaf water potential at the end of water deficit had values closer to the permanent wilting point (-1.5 MPa) and the soil water content (5.6%) showed that the water availability was ran out. The water deficit decreased the height of the plant, number of branches and inflorescences, dry weight of the branches and leaves, at the stage of appearance of floral primordium and flowering. At the three phenological stages, the water deficit decreased the length of the root, weight of the fruits and total biomass. An increase in the content of total phenols and antioxidant activity was observed in leaves because of water deficit however, the total phenolic content and antioxidant activity in fruits did not increased.

Key words: *Salvia hispanica* L., antioxidant activity, water stress, phenols.

I. INTRODUCCIÓN

Las plantas a lo largo de su ciclo biológico se enfrentan a un gran número de condiciones ambientales estresantes, por lo que desarrollaron estrategias que les permiten sobrevivir o responder a éstas (Pérez-Molphe y Ochoa, 1990). El estrés en las plantas es un evento cotidiano, como respuesta a éste, sintetizan compuestos químicos, producto de su metabolismo, conocidos como metabolitos secundarios (Pérez, 2006). Por mucho tiempo se consideró a los metabolitos secundarios como productos de desecho, debido a que se decía que no tenían una función en el crecimiento y desarrollo de las plantas, pero hoy en día se sabe que juegan un papel muy importante y dependiente del medio, como defensa ante patógenos, herbivoría y a factores ambientales, muchos de éstos también sirven como atrayentes de polinizadores (Covarrubias, 2007).

Se ha podido observar que la modificación de las condiciones ambientales o la exposición de algún tipo de estrés biótico o abiótico durante el desarrollo de las plantas, puede incrementar la producción de compuestos antioxidantes. También se puede tener un efecto considerable en la expresión génica, relacionada con la producción de enzimas involucradas en la síntesis de compuestos con actividad antioxidante. El incremento en el contenido de estos compuestos le da un valor agregado a las plantas, debido a que se utilizan en el mercado como fármacos, fragancias, agroquímicos, insecticidas o saborizantes, sin embargo menos del 10% han sido estudiados en su actividad biológica (Piñol y Palazón, 1993). Especies de hierbas aromáticas, culinarias y medicinales, como las pertenecientes a la familia Lamiaceae (salvias, orégano y tomillo) poseen una gran cantidad de metabolitos secundarios con fuerte actividad antioxidante (González, 2013). También se ha

demostrado que una de las fuentes vegetales con mayor contenido de ácidos grasos, omega-3 y Omega-6 son los frutos de chía (*Salvia hispanica* L.), pertenecientes a la familia Lamiaceae (Hernández, 2008). La chía fue un elemento básico en la dieta de los aztecas y mayas, pero con la llegada de los españoles su uso disminuyó y fue hasta finales del siglo pasado que el interés por ésta resurgió (Ayerza, 1995 y 2000). La motivación de la presente investigación debe a que existe poca información relacionada con la alteración de las concentraciones de compuestos antioxidantes como resultado del déficit hídrico en chía, por lo tanto, el objetivo fue determinar el efecto del déficit hídrico aplicado en tres etapas fenológicas, en la producción de biomasa, contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante en hojas y frutos de chía (*Salvia hispanica* L.).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Origen, distribución y taxonomía de chía

El género *Salvia* (Tribu Mentheae, Lamiaceae) comprende casi 1,000 especies (Wester y Claben, 2007). Dichas especies se presentan principalmente en tres regiones del mundo: América Central y del Sur (500 especies); Asia Central (Mediterráneo) (250 especies); y el este de Asia (90 especies) (Walker *et al.*, 2004). En México existe controversia en el número de especies existentes: Domínguez-Vázquez *et al.* (2002) consignaron 312 especies de *Salvia*; mientras que Villaseñor (2004) reportó 292.

Salvia hispanica L. es una especie originaria de Mesoamérica, principalmente de las cadenas montañosas del centro y occidente de México (Miranda, 1978; Beltrán-Orozco y Romero, 2003 y Cahill, 2004). Es conocida como chía, nombre derivado del náhuatl *chia* o *chian* (Watson, 1938) que significa aceitoso. Su cultivo y uso data desde tiempos prehispánicos (Cahill, 2003; Cahill y Ehadai, 2005). Se cree que los usos medicinales dieron pauta inicial para su domesticación de la especie (Cahill, 2003).

Para los mayas y los aztecas la chía fue uno de los cultivos más importantes, probablemente el tercero en importancia económica, superado sólo por el frijol y el maíz y precedido por el amaranto (Cahill, 2003). Este cultivo fue considerado un elemento esencial en la cultura Mesoamericana, lo cual comprendió México, Guatemala, El Salvador, Honduras y regiones de Nicaragua en la época de la conquista española (Hernández, 2008).

Los aztecas imponían a sus pueblos tributarios una contribución de hasta 15,000 toneladas anuales (Cahill, 2003). Sin embargo, diferentes autores señalan que el

cultivo de la chía fue desplazado por los cereales aportados por los españoles cuando ocurrió la conquista, y sobrevivió sólo en áreas aisladas o montañosas de México. La mayor diversidad genética de *Salvia hispanica* L. se encuentra en México, fue hasta el siglo pasado que el cultivo de chía volvió a recobrar fuerza debido a sus propiedades nutracéuticas que han despertado un gran interés medicinal, comercial e industrial (Ayerza, 1995).

En México actualmente hay tres regiones principales productoras de chía: Temalacanczingo, Olinala, en Guerrero; San Mateo Coatepec, Atzitzihuacan, en Puebla y Acatic, en Jalisco, también se produce en menor proporción en regiones de Colima, Michoacán y Morelos (Beltrán-Orozco *et al.*, 2003 y 2005) (Figura 1). El mayor centro productor está en Acatic, Jalisco, de donde se exporta cantidades crecientes a Japón, Estados Unidos y Europa (Hernández, 2008).



Figura 1. Principales estados (color amarillo) productores de chía (*Salvia hispanica* L.) en la República Mexicana (determinado con base en la cartografía de INEGI (2005), cartas de división política y carta de municipios).

Las variedades que actualmente se cultivan en México fueron liberadas en Argentina. En algún momento se llevó semilla para ser cultivada y mejorada en Argentina, y posteriormente fue introducida nuevamente a México para su cultivo (Hernández, 2008). Estos materiales tienen mayor rendimiento, no presenta dehiscencia de frutos como los silvestres y su coloración es blanca y negra a diferencia de la silvestre que es negra (Cahill, 2003, Hernández, 2008). La blanca se presenta como un carácter recesivo de la especie (Hernández, 2008). Actualmente, Puebla es el único estado que produce semilla negra originaria de México, por lo que SAGARPA apoya este cultivo en Puebla, con el fin de conservar el germoplasma (Hernández, 2008).

A nivel mundial, la chía se cultiva en Argentina, Guatemala, Nicaragua, Ecuador y Bolivia en el ciclo verano-otoño, en el cual obtiene hasta 3000 kg de semilla por hectárea (Ayerza y Coates, 2005; Dubois *et al.*, 2007). También se cultiva en países como Gran Bretaña, Perú, Australia, Estados Unidos, Colombia, Belice, Costa Rica, Brasil, Panamá, República Dominicana, Kenia, Angola, India, Tailandia, Filipinas, Vietnam, Malasia, Indonesia y Paraguay (Benavides *et al.*, 2010; Pozo-Pozo, 2010; Lobo *et al.*, 2011; Jamboonsri *et al.*, 2012). A pesar de las características de la semilla de chía, son pocos los estudios que ofrecen información actualizada de su producción y distribución en el mundo (Benavides *et al.*, 2010) (Figura 2).

Algunos nombres comunes que se le ha dado, son: Salvia española, artemisa española, chía mexicana, chía negra, chía blanca, chía pinta o simplemente chía (Ixtaina *et al.*, 2007, Zúñiga, 2013).

En la Nueva España se aprovechaba, por lo menos, dos tipos de chía, una de semillas pequeñas y otra de semillas como lentejas, algunos autores aseguran que existían más variedades, pero se fueron perdiendo al disminuir el cultivo. Se dice que antiguamente se conocían dos variedades: la chianpitzahuac, negra y la chiapatlahuac, blanca, de mayor tamaño. Relatos alrededor del cultivo de chía señalan que en algún tiempo la chía fue llamada “Salvia chian” y que algunos la quisieron llamar “Salvia nezahualia”, porque Nezahualcóyotl evadió a sus perseguidores al esconderse entre una gavilla de chía, pero este nombre no se aceptó debido a que desde antes Lineo ya la había clasificado como *Salvia hispanica* (Cahill, 2003).

2.2. Morfología y requerimientos para el crecimiento de chía

Es una planta herbácea, anual, mide un metro o más de altura. Presenta raíz pivotante (Figura 3B). Los tallos son ramificados y cuadrangulares, con caras acanaladas y pubescentes; en plantas silvestres el tallo presenta estrías verticales de pigmentación (Figura 3C). Las hojas son simples, pecioladas, aserradas, pubescentes y decusadas; de 4 a 8 cm de largo y 3 a 5 cm de ancho (Figura 3A) (Hernández, 2008; Sandoval-Oliveros, 2012).

Las plantas de chía florecen entre julio y agosto en el hemisferio norte. Presenta inflorescencias en forma de verticilastro axilar o terminal. Las flores son hermafroditas, pediceladas, se encuentran reunidas de seis o más en verticilos

sobre la inflorescencia. Las flores de cada grupo se desarrollan en forma de una cima dicotómica compuesta y en su base hay una bráctea. El cáliz es persistente, bilabiado, pubescente y estriado, al madurar puede ser abierto y expulsar la semilla (dehiscente) o cerrado y retener la semilla (indehiscente) (Figura 3D). La corola es de color morado, azul o blanco, es monopétala y bilabiada; aunque no existe información sobre la herencia del color de la flor en esta especie; en otras especies vegetales se señala que el color de la flor se debe a la acción de un par de genes alelomórficos (Hernández-Gómez *et al.*, 2008; Di Sapio *et al.*, 2012), el color morado a púrpura es completamente dominante sobre el blanco, por lo que en la mayor parte de las variedades las flores son azules (Figura 3E). En la chíá blanca, las flores así como las semillas son blancas (Figura 3G). En las flores, el labio superior es arqueado en forma de casco o gálea, el inferior se expande hacia afuera y abajo. Tiene dos estambres fértiles y se encuentran unidos por un conectivo, el cual se articula a filamentos que se insertan en el tubo de la corola. El ovario es súpero bicarpelar y tetralocular, sobre un disco nectarífero; el estilo ginobásico es glabro, glanduloso en la base y bífido. El fruto es un esquizocarpo y al madurar, se separa en cuatro frutos individuales o mericarpios. Cada fruto es oval, la parte redondeada está opuesta al hilio; sus caras son lisas, brillantes de color blanco o moreno-grisáceo, con manchas irregulares, cuyo tamaño oscila entre 2 mm de longitud y 1.4 mm de ancho, con un espesor de 0.8 mm (Figura 3F) (Hernández, 2008; Sandoval-Oliveros, 2012).



Figura 3. Morfología de *Salvia hispanica* L. **A.** Hojas; **B.** Raíz; **C.** Tallo y ramas; **D.** Inflorescencia; **E.** Flor; **F.** Ampliación de un fruto color pardo de chía y **G.** Ampliación de un fruto blanco de chía.

La chía está ampliamente distribuida en regiones cálidas y templadas. Crece en áreas de bosque de encino o de pino-encino, en ambientes tropicales y subtropicales (Ayerza y Coates, 2004). No tolera heladas, es resistente a sequías, plagas y enfermedades (Hernández, 2008). La planta se adapta a suelos arcillosos y arenosos, pero crece mejor en los suelos areno-limosos que estén bien drenados, no demasiado húmedos, sin embargo niveles bajos de nitrógeno puede constituir una barrera significativa para lograr buenos rendimientos. Requiere pH neutro, aproximado de 6.5 a 7.5. Es una planta que su periodo de crecimiento dependerá de la latitud donde se cultive (Hernández, 2008; Ixtaina *et al.*, 2008).

2.3. Importancia del cultivo y composición química de los frutos de chía

Aunque la chía no es un alimento muy conocido, la producción mundial está aumentando debido a las propiedades que se le atribuyen, se le conoce como alimento exótico y se reconocen cualidades nutricionales y terapéuticas excepcionales (Ayerza y Coates, 2001).

Otra de las razones por lo que es importante el cultivo de chía, es porque sus frutos ofrecen hoy en día una nueva oportunidad para mejorar la nutrición humana, proporcionando una fuente natural de ácidos grasos omega-3, antioxidantes y fibra dietética, que obtenerla de otras fuentes naturales resulta más difícil y caro (Hernández, 2008).

La tendencia actual de los consumidores al elegir productos alimenticios está más asociada a la salud y al bienestar. Esta situación puede verse claramente en el supermercado con el suministro de productos que se distinguen por el contenido alto de ácidos grasos omega-3, antioxidantes, fibra dietética, proteína y otros

componentes que los consumidores reconocen como benéficos para la salud. Las características mencionadas han incrementado el interés comercial por *Salvia hispanica*, y se ha introducido a varios países como cultivo promisorio, actualmente en Latinoamérica, Estados Unidos y Australia se han industrializado diferentes productos alimenticios y medicinales preparados con semillas de chía como barras energéticas incluso de marcas ya muy conocidas, cereales para desayuno, yogurt y galletas (Martínez *et al.*, 2012; Muñoz *et al.*, 2012).

Los antioxidantes naturales que contiene el aceite de chía, el cual era llamado por los aztecas “chiamatl” evitan los procesos oxidativos en alimentos (Taga *et al.*, 1984). Los frutos de chía contienen entre 32 y 39 % de aceite; el cual contiene ácido α -linolénico omega 3 (60 a 63 %), ácido linoleico (20 %) y ácido erúcico.

El α -linolénico tiene importancia nutricional porque participa como precursor de otros ácidos grasos esenciales y además da origen a ciertas prostaglandinas, leucotrienos y tromboxano con actividad inflamatoria y anticoagulante. También, el precursor del DHA (Ácido docosahexaenoico) y EPA (Ácido eicosapentanoico) (Silveira *et al.*, 2003, Jaramillo, 2013).

Las fuentes vegetales con mayor contenido de omega-3, son el aceite de chía (<60 %), seguido por la linaza (57 %); mientras que la fuente animal es el salmón. Además, la chía tiene otros ácidos grasos como: palmítico 16 %, esteárico 18 %, oleico 18 % y bencénico 18 % (Ixtaina *et al.*, 2008 y 2011).

La chía contiene de 20-23 % de proteínas, porcentaje más alto que el que tienen algunos cereales tradicionales como el trigo (13.7 %), el maíz (9.4 %), el arroz (6.5 %), la avena (16-9 %) y la cebada (12.5 %). Además es rica en fécula y no contiene gluten (Weber *et al.*, 1991; Ayerza y Coates, 2006).

En comparación con otras semillas de oleaginosas, la chía contiene un porcentaje alto de lisina, cisteína y metionina. También contiene aminoácidos como ácido aspártico, glutámico, treonina, serina, , glicina, alanina, valina, metionina, isoleucina, leucina, triptófano, tirosina, fenilalanina, histidina, arginina y prolina (Ayerza y Coates, 2001).

Los frutos de chía se han caracterizado por ser una buena fuente de vitaminas y minerales como complejo B, niacina, tiamina, ácido fólico y vitamina A. Además, contiene minerales como calcio, fósforo, magnesio, potasio, hierro, zinc, cobre, boro, manganeso, molibdeno y un contenido bajo en sodio (Sandoval-Oliveros, 2012).

Contiene un polisacárido con contenido alto de ácido uránico, con una estructura química conformada por una cadena principal de unidades β -xilopiranosil y α -D-glucopiranosil con ramificaciones de ácido 4-O- metil glucopiranosilurónico, el cual se comporta como mucílago con una capacidad alta de retención de agua, útil como fibra soluble y dietética (Lin *et al.*, 1994).

Contiene antioxidantes naturales como mircentina, quercentina, kaemperol, ácido clorogénico y ácido cafeico, lo que sustituye el uso de estabilizadores artificiales. Sin embargo, los ácidos clorogénico y cafeico son los antioxidantes más importantes en los frutos de chía (Brown y Coates, 2001).

La semilla y el aislado proteico tienen buena capacidad de retención de agua y una excelente capacidad de retención de aceite, razón por la cual se usan como aditivo funcional en la industria de la panificación y en la producción de emulsiones estables. El mucílago presente en la semilla le confiere la capacidad de formar

hidrocoloides, utilizados en la industria alimentaria como agentes espesantes y gelificantes (Phillips y Williams, 2000).

Las hojas también contienen metabolitos secundarios que pueden tener una actividad insecticida. Los monoterpenos y sesquiterpenos que contiene, podrían ser usados como saborizantes, fragancias y medicina (Pascual *et al.*, 1997; Guiannouli y Kintzios, 2010).

2.4. Usos antiguos y actuales de la chía

Los frutos de chía comúnmente llamados semillas empezaron a ser usados para la alimentación humana en la época precolombina, alrededor del año 3500 a.C. y tomó importancia por ser uno de los cultivos básicos en el centro de México entre los años 1500 y 900 a.C. Se tiene registro que los aztecas y mayas ofrecían chía a los dioses como parte de las ofrendas en las ceremonias religiosas, la chía se ofrendaba a la diosa del maíz Chicomecoalt, durante sus fiestas de veintena de Hueytozoztl. También, lo utilizaban como alimento, medicina y materia prima para producir un aceite que era empleado como base en pinturas decorativas, ungüentos, cosméticos y barnices (Hernández, 2008).

Los principales usos de la chía en la época prehispánica fueron: culturales, medicinales, alimenticios y artísticos (Cahill, 2003), pero sobretodo su uso era por el mucilago de sus frutos que suelta al estar en contacto con el agua, éstos se hinchan rápidamente y se rodean de una capa mucilaginoso, la cual se forman del rompimiento de las células epiteliales, siendo capaces de absorber agua equivalente a 5 ó 6 veces su peso, por lo que al consumir los frutos con mucílago

aportan agua y ayudan a tener una sensación de saciedad, además de que ayudan a la digestión (Ayerza y Coates, 2001).

También, se utilizaba para inducir el parto a las mujeres que estaban por dar a luz, bebían una mezcla de agua de chía y carne de cola de tlacuache. La semilla o la harina tomada en agua o en atole eran eficaz contra la fiebre, diarrea, estreñimiento y regulación de la secreción biliar (Ayerza y Coates, 2005). En el Salvador se emplea como tratamiento de enfermedades del hígado (Calderón, 1941).

Actualmente la semilla de chía se usa en la preparación de bebidas nutritivas y refrescantes. Con el aceite se elaboran lacas artesanales. La semilla de chía reduce el tamaño de tumores como el de mama y el de colon y ayuda en enfermedades del sistema cardiovascular (Poudyal *et al.*, 2012). Además, disminuye el colesterol, los triglicéridos, la glucosa en la sangre y mejora el funcionamiento de las articulaciones (Dubois *et al.*, 2007; Singh *et al.*, 2008; Vázquez-Ovando *et al.*, 2009; Ixtaina *et al.*, 2011).

La chía aporta omega-3 y 6 que son esenciales para el desarrollo del cerebro durante la gestación y lactancia, además de aportar nutrientes (Auestad *et al.*, 2003).

En la alimentación de gallinas reduce los ácidos grasos saturados y el colesterol en el huevo sin afectar el sabor del producto (Ayerza y Coates, 2001).

El aceite obtenido de la semilla de chía no contiene ni produce olor desagradable, como ocurre en forma convencional cuando se aumenta el contenido de ácidos grasos con dos o tres insaturaciones (Ayerza y Coates, 2001), por lo que los productos obtenidos con la semilla de chía no necesitan empaque, ni condiciones de almacenamiento especiales para prevenir cambios ocasionados por el ambiente.

Los antioxidantes naturales sustituyen el uso de estabilizadores artificiales, los cuales además de proteger al consumidor de afecciones cardiovasculares y algunos tipos de cáncer, se ha demostrado que no contiene compuestos que puedan tener efectos adversos o causar algún tipo de alergia (EFSA, 2005, 2009).

Debido a su contenido alto de fibra, es una buena alternativa para el tratamiento de colon irritable y el mejoramiento del tránsito intestinal (Singh *et al.*, 2008; Vázquez-Ovando *et al.*, 2009).

2.5. Metabolitos secundarios

Existen dos tipos fundamentales de metabolitos: los metabolitos primarios y los secundarios. Los metabolitos primarios son compuestos indispensables para el desarrollo fisiológico de la planta, se encuentran presentes en grandes cantidades, son de fácil extracción y su explotación es relativamente barata y conducen a la síntesis de los metabolitos secundarios. Entre ellos se encuentran aminoácidos proteicos, proteínas, carbohidratos, lípidos, entre otros (Salisbury y Ross 1994).

Los metabolitos secundarios son aquellos compuestos orgánicos sintetizados por el organismo que no tiene una función directa en el crecimiento o reproducción del mismo. El metabolismo secundario se puede definir como la biosíntesis, transformación y degradación de compuestos endógenos mediante proteínas de especialización. Es decir son compuestos de distribución restringida en grupos taxonómicos con un papel importante en la interacción del organismo con su ambiente, asegurando su sobrevivencia en su ecosistema. Dentro de éstos podemos encontrar terpenos, fenoles, glicósidos y alcaloides. Ejemplo de ello son los pigmentos de las flores que atraen a los insectos polinizadores y los compuestos

que inhiben el crecimiento de otros organismos (sustancias alelopáticas) o que protegen a la planta de infecciones o depredadores (Piñol y Palazón, 1993).

Numerosos factores físicos, químicos y biológicos, externos e internos, pueden afectar su producción, tanto en calidad como en cantidad. Algunos de los factores más importantes son: la radiación, edad cronológica, estado fenológico y órgano de la planta, deficiencias de minerales, temperatura, estrés hídrico entre otros. Las presiones que estos factores ejercen sobre las plantas, se modifican en el tiempo y en el espacio, creando condiciones complejas y heterogéneas, ocasionando que las plantas pongan en juego diversos mecanismos de adaptación en la lucha por la sobrevivencia. El efecto del estrés hídrico sobre la concentración de metabolitos es en ocasiones dependiente del grado de estrés y del tiempo durante el cual actúa. Los periodos cortos aumentan la producción de metabolitos, mientras que en los periodos largos hay un efecto contrario (Anaya, 2003).

Actualmente se conocen cientos de miles de metabolitos secundarios o tal vez existen millones, pero es importante recalcar que se siguen biosintetizando más, gracias a las interacciones bióticas, dentro y entre especies, además de la continua evolución de los organismos (Anaya, 2003). Existen compuestos secundarios esenciales para las plantas, como los esteroides, la lignina, el triptófano y las auxinas. Los metabolitos secundarios son una fuente importante de principios activos de medicamentos y de otros valiosos productos químicos (Piñol y Palazón, 1993).

2.5.1. Fenoles

La utilización de sustancias fenólicas se remonta a tiempos muy antiguos, algunas de ellas se usaron por primera vez en procesos industriales, como los taninos, los

cuales se usaron en el curtido de pieles, elaboración de tinta y refinado de vinos. Estas prácticas industriales, eran enteramente empíricas, debido a que se desconocía la verdadera naturaleza de los compuestos utilizados y consecuentemente el fundamento de sus propiedades (Vitores, 2001).

Los compuestos fenólicos constituyen el grupo de productos naturales más importantes y ampliamente distribuidos en el reino vegetal. Muchos de ellos, son de gran importancia fisiológica y ecológica para las plantas que los producen. Los fenoles poseen, un anillo bencénico, con uno o más grupos hidroxilo, libres o sustituidos. La biosíntesis del anillo bencénico es uno de los procesos fundamentales de la biología, de especial importancia fisiológica, genética, fitoquímica y ecológica para la planta, y también quimio-taxonomía por la variedad de compuestos específicos que producen frecuentemente (Orozco *et al.*, 2002).

Dentro de los fenoles podemos encontrar a los diterpenos, triterpenos, derivados policétidos, derivados del ácido shiquímico y flavonoides. En los derivados del ácido shiquímico se encuentran los ácidos fenólicos (Orozco *et al.*, 2002).

2.5.2. Antioxidantes

Los antioxidantes se encuentran naturalmente en el organismo y en ciertos alimentos, su función es estabilizar o reducir los niveles de radicales libres. Los antioxidantes se pueden definir como cualquier molécula capaz de prevenir o retardar la oxidación (pérdida de uno o más electrones) de otras moléculas; estos pueden ser enzimáticos (ácido ascórbico, fenoles, tocoferoles, etc.). Los antioxidantes pueden actuar a nivel intracelular y otros a nivel de membrana, siempre en conjunto para evitar la degradación de proteínas, ADN, RNA y oxidación

celular. Un radical libre es una molécula, átomo o ion inestable y muy reactivo, contiene al menos un electrón desapareado en su orbital más externo y a su vez es capaz de existir en forma independiente (Orozco *et al.*, 2002; González, 2013).

Una sustancia o un compuesto tienen propiedades antioxidantes cuando son capaces de neutralizar la acción oxidante de la molécula inestable de un radical libre sin perder su propia estabilidad electroquímica. El antioxidante al reaccionar con el radical libre le cede un electrón oxidándose a su vez y transformándose en un radical libre débil, con escasos o nulos efectos (Azcón-Bieto y Talón, 1993).

Los antioxidantes tienen diferentes mecanismos de acción; unos impiden la formación de los radicales libres y/o compuestos reactivos, otros inhiben la acción de los radicales libres y otros favorecen la reparación y la reconstitución de las estructuras biológicas dañadas. Cada antioxidante posee una afinidad hacia un determinado radical libre o hacia varios, puede actuar en los diferentes procesos de la secuencia oxidativa y tener más de un mecanismo de acción (González-Jiménez 2010).

En la naturaleza existen muchos compuestos con actividad antioxidante, los cuales están siendo valorados debido a su uso en la industria farmacéutica y alimentaria, tal es el caso de la chía.

2.6. Déficit hídrico

El déficit hídrico en las plantas se puede definir como el estado en el cual, la demanda de agua es mayor que la cantidad disponible durante un periodo determinado o cuando su uso se ve restringido, es decir el déficit hídrico es la falta o escasez de agua. Dicho concepto está muy relacionado con sequía, ambos

términos se relacionan con lo que se denomina disponibilidad hídrica, es decir el equilibrio entre la oferta y la demanda de agua en el medio (Kramer, 1989).

Se dice que una planta está sometida a estrés cuando algún factor ambiental impide su crecimiento óptimo. El estrés hídrico en las plantas es cuando se ve afectada por la falta de agua y, debido a que la demanda de agua en la planta es mayor a la disponible y el funcionamiento normal de ésta se ve afectado negativamente (Kramer, 1989).

El déficit de agua en las plantas, no resulta una limitante para su distribución en las diferentes condiciones climáticas de la superficie terrestre. Esta amplia distribución se debe a que las plantas cuentan con mecanismos muy eficientes para hacer frente a los factores ambientales adversos (Pérez-Molphe y Ochoa, 1990).

El déficit hídrico en las plantas, indica situaciones en que las células y tejidos no están plenamente turgentes, acompañado del cierre de los estomas. El déficit hídrico puede variar desde un pequeño descenso del potencial osmótico y del potencial hídrico, que solo puede percibirse si se mide con instrumentos, pasando por el marchitamiento transitorio a medio día, hasta el marchitamiento permanente y la muerte por desecación. Es decir, el déficit hídrico se produce siempre que la pérdida por transpiración es mayor que el coeficiente de absorción (Garau *et al.*, 2009).

Cuando el déficit hídrico es severo tiene por resultado una reducción drástica de la fotosíntesis y la perturbación de muchos otros procesos fisiológicos, reducción de la producción total y finalmente la muerte por desecación. El daño por este estrés en la planta va a depender de la etapa de crecimiento, así como del tiempo de duración de las condiciones de déficit hídrico (Kramer, 1989).

Las plantas durante su fase inicial (plántula) al estar en estrés hídrico sufren mayores alteraciones en el desarrollo de sus órganos, debido a que éstos aún están por formarse o están en formación en comparación con una planta adulta, en la cual la mayoría de sus órganos ya están formados (Piñol y Palazón, 1993).

El tiempo requerido para causar daños o alteraciones en una planta a causa del estrés hídrico depende de la especie, se dice que una especie es resistente a la sequía cuando tiene la capacidad de enfrentar con éxito la exposición a la falta de agua (Benavides-Mendoza *et al.*, 2009).

2.7. Respuesta al déficit hídrico

Las estrategias que han desarrollado las plantas durante su evolución como respuesta a la falta de agua, es uno de los mecanismos adaptativos más importantes. El estrés por falta de agua provoca cambios en la fisiología y metabolismo de la planta. Se ha observado que un estrés hídrico moderado incrementa la elongación de la raíz y la relación raíz-tallo. Cuando la falta de agua es severa, el crecimiento de la raíz también se inhibe, provoca el cierre de los estomas y por lo tanto la conductancia disminuye (Benavides-Mendoza *et al.*, 2009).

Las plantas también responden al estrés por déficit hídrico a nivel celular y molecular (Shinozaki y Yamaguchi-Shinozaki, 1996 y 2007). Una de las principales respuestas es la expresión génica, relacionada con la producción de enzimas clave en la vía de síntesis de azúcares, proteínas con función protectora, enzimas antioxidantes (producción de metabolitos secundarios) y factores de transcripción (Bray, 1991 y 1993; Xiong *et al.*, 2002). La señal primaria en respuesta a un tipo de estrés es

seguida por mensajeros secundarios y una cadena de señalización que induce la expresión de genes, la transcripción de enzimas, formación y almacenamiento de metabolitos (González, 2013).

Generalmente las plantas desarrollan mecanismos para poder sobrevivir o reproducirse. Dentro de estos mecanismos está la generación de sustancias producto del metabolismo, las cuales en los últimos años son de interés en la industria farmacéutica, alimenticia, cosmetológica, entre otros (Pérez, 2006).

2.8. Conductancia estomática

Los estomas proporcionan a las plantas un mecanismo fundamental para adaptarse a un ambiente continuamente cambiante, permitiendo el intercambio físico y activo entre las partes aéreas de la planta y la atmósfera. La función más notable de los estomas es la regulación de la pérdida de agua (transpiración) y absorción del CO₂ (asimilación fotosintética del carbono) (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 1993). El cierre estomático y la inhibición del crecimiento foliar son las primeras respuestas de la planta a la sequía y son los efectos más estudiados. El cierre estomático está vinculado al aumento del ácido abscísico en el apoplasto. Además, la disminución de agua en el suelo influye notablemente en el crecimiento, desarrollo y funcionamiento general de las plantas (Wilkinson y Davies, 2002; Wilkinson, 2004). Agbicodo *et al.* (2009) señalaron que algunas plantas en etapas tempranas, cierran sus estomas y detienen el crecimiento, otras además de que cierran parcialmente sus estomas, continúan su crecimiento lentamente, por lo que se pueden ver las diferencias en cuanto a crecimiento en plantas que estuvieron en estrés hídrico en comparación con las plantas que no estuvieron. Ellos también reportaron que las

plantas se marchitan rápido cuando están en estrés hídrico, debido a que mantienen sus estomas abiertos durante la fase inicial de la falta de agua mientras que las plantas que se mantienen turgentes es porque cierran sus estomas rápidamente. Cuando el potencial hídrico disminuye los estomas se cierran. En condiciones naturales ello coincide, normalmente, con los bajos niveles de CO₂ y luz brillante. Su valor protector contra la sequía es evidente. Los potenciales críticos suelen oscilar entre -5 y -20 bares. Un descenso leve de potencial no tiende a modificar el grado de la apertura pero, por debajo del umbral, el efecto es muy intenso (Gil-Pelegrin, 1993).

III. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad existe interés por rescatar y evaluar las especies de origen mexicano. La chía (*Salvia hispanica* L.) es de origen mexicano e importante en épocas prehispánicas por sus usos. Su cultivo y sus usos disminuyeron con la llegada de los españoles. Además, su mejoramiento genético se realizó fuera de México, originando una pérdida del germoplasma. Actualmente se cree que Puebla es el único estado de la República Mexicana que cultiva la especie original, así mismo la región donde se cultiva es cálida-subhúmeda. Hoy en día ha surgido el interés por la chía debido a la actividad antioxidante de sus compuestos en la industria farmacéutica y nutracéutica. Razón por la cual se realizó esta investigación. Además de que no existen estudios acerca del efecto del déficit hídrico en esta especie.

IV. OBJETIVOS

Determinar el efecto que tiene el déficit hídrico en chía durante la etapa de aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto en la producción de biomasa y variables fisiológicas.

Determinar el efecto que tiene el déficit hídrico durante la etapa de aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto en la concentración de fenoles y actividad antioxidante en hojas y frutos de *Salvia hispanica* L.

V. HIPÓTESIS

El estrés hídrico durante la etapa de aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto afecta la producción de biomasa, y variables fisiológicas de chía (*Salvia hispanica* L.).

El estrés hídrico durante la etapa de aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto afecta la concentración de fenoles y actividad antioxidante en hojas y frutos de chía (*Salvia hispanica* L.).

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1. Ubicación del experimento

La investigación se realizó durante los meses de junio de 2014 a febrero de 2015 en un invernadero del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México ($19^{\circ} 28' 4.26''$ Norte y $98^{\circ} 53' 42.18''$ Oeste, y 2250 msnm) (Figura 4). El invernadero fue de tipo cenital, sin control de temperatura y humedad.

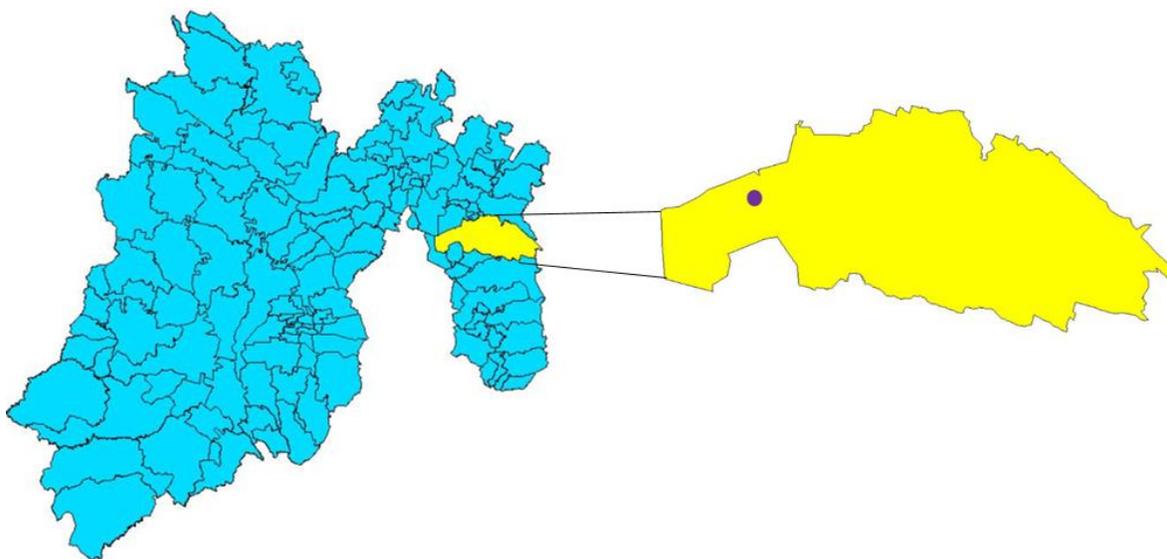


Figura 4. El mapa de color azul muestra al Estado de México, el de color amarillo la ubicación del municipio de Texcoco, Estado de México y el punto morado hace referencia a la ubicación de Montecillo, zona donde se estableció el experimento. Determinado con base en la cartografía de INEGI (2005), cartas de división política y carta de municipios.

6.2. Material vegetal

Se utilizó semilla de chía (*Salvia hispanica* L.), proporcionada por productores de la comunidad de San Mateo Coatepec, Municipio de Atzitzihuacan ($18^{\circ} 46' 00''$ Norte y $98^{\circ} 28' 54''$ Oeste y 2040 msnm) en Puebla (Figura 5). En esta localidad conocen a la chía con el nombre de “chía negra”.

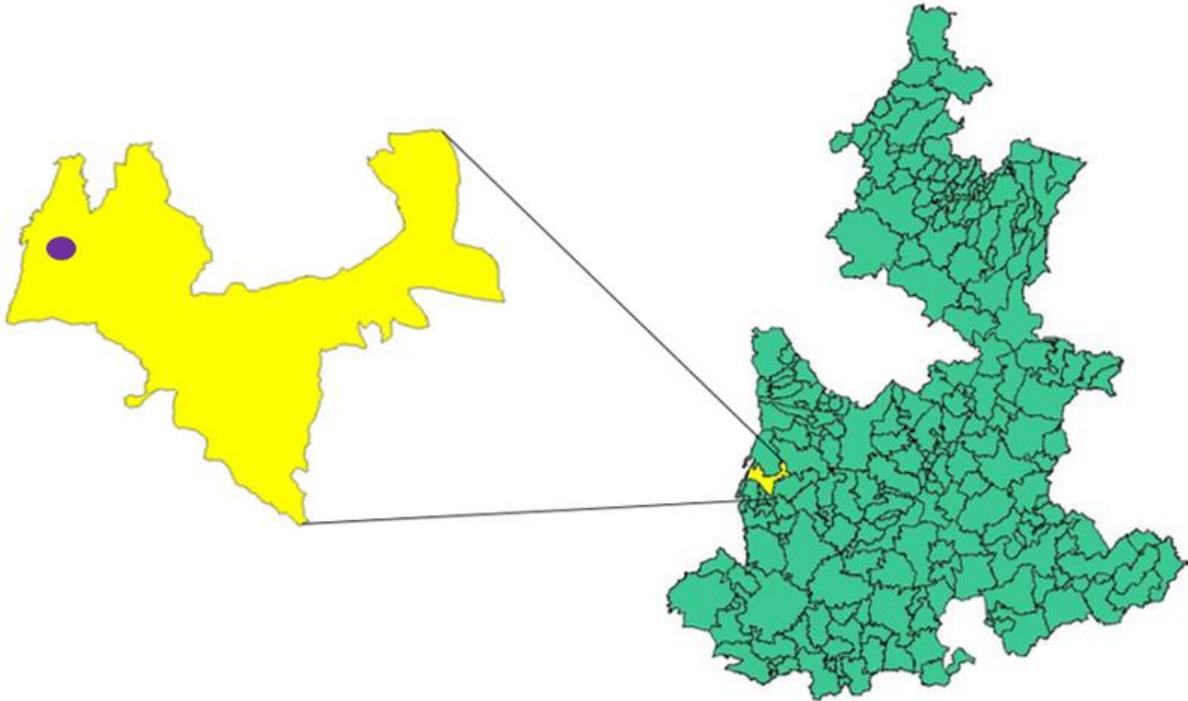


Figura 5. Ubicación del Municipio de San Mateo Coatepec Puebla. El mapa en color verde muestra el estado de Puebla y en color amarillo el municipio de Atzitzihuacan, mientras que el punto morado hace referencia a San Mateo Coatepec. Determinado con base en la cartografía de INEGI (2005), cartas de división política y carta de municipios.

6.3. Germinación de las semillas

Las semillas se germinaron en charolas de 200 cavidades, se colocaron 2 semillas por cada cavidad. Las charolas se colocaron en una cámara de ambiente controlado con una temperatura promedio de 26 °C, un fotoperiodo de 16 h y humedad cercana a capacidad de campo.

6.4. Establecimiento del experimento

6.4.1. Suelo utilizado

El suelo empleado se obtuvo de una parcela de cultivo en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo cuyas características físico-químicas se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo utilizado.

pH	Conductividad eléctrica dS m ⁻¹	% Humedad		%		Fosforo mg Kg ⁻¹	Potasio cmol kg ⁻¹
		Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente	Materia orgánica	Nitrógeno total		
7.3	0.49	11.9	6.47	1.52	0.08	20.6	1.09

6.4.2. Preparación de las macetas

Se utilizaron macetas de plástico de una capacidad de 25 kg, a las cuales en la parte lateral media se les hizo un orificio de 2 cm de diámetro, por donde se tomó una muestra de suelo para determinar el porcentaje de humedad del mismo al final del déficit hídrico.

6.5. Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos fueron 2 condiciones hídricas: 1) Riego (testigo) y 2) déficit hídrico aplicado en las etapas fenológicas de aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto. En la condición de riego, el suelo donde crecieron las plantas se mantuvo cerca de capacidad de campo durante todo el ciclo del cultivo. En las plantas en condiciones de déficit hídrico, el riego se suspendió cuando comenzaron aparecer los primordios florales (Figura 6), al inicio de la floración (Figura 7) y cuando comenzó el llenado de los frutos (Figura 8). El riego de las plantas en las

tres etapas fenológicas se reanudó cuando éstas presentaron el 50 % o menos de la conductancia estomática registrada con respecto al testigo. Los tratamientos se distribuyeron en un diseño experimental completamente al azar con 10 repeticiones.



Figura 6. Etapa de aparición del primordio floral de *Salvia hispanica* L.



Figura 7. Etapa de floración de *Salvia hispanica* L.



Figura 8. Etapa de llenado del fruto de *Salvia hispanica* L.

6.6. Trasplante y riego de plantas

A los 15 días de la emergencia de las plántulas, fueron trasplantadas a las macetas de plástico, las cuales se llenaron con un peso constante de suelo (20 kg), completamente seco, posteriormente se regaron a capacidad de campo.

Durante el desarrollo de las plantas se les regó diariamente con 2 L de agua, mientras que cada tercer día se les aplicó 2 L de solución Steiner (Steiner, 1984) al 75 %. Cada ocho días se regaron con agua acidulada, para eliminar el exceso de sales. Cuando las plantas alcanzaron el estadio fenológico (aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto) fueron sometidas a déficit hídrico, mientras que las plantas testigo permanecieron en riego constante y aplicación de solución nutritiva como se mencionó anteriormente. Cuando las plantas alcanzaron la condición de déficit hídrico deseado se aplicó riego de recuperación y permanecieron en las mismas condiciones que las plantas testigo hasta la cosecha.

6.7. Registro de datos y variables de estudio

6.7.1. Variables durante el déficit hídrico

6.7.1.1. Conductancia estomática

La conductancia estomática se midió en la cuarta hoja partiendo del ápice a la base de cada planta en las horas de mayor radiación (12:00-14:00 h) durante el periodo de suspensión de riego en los dos tratamientos (riego y déficit hídrico) en las tres etapas fenológicas con un porómetro (Leaf Porometer SC-1 Decagon DEVICES, Inc. U.S.A).

6.7.2. Variables al final del déficit hídrico

6.7.2.1. Potencial hídrico

El potencial hídrico se determinó al final del periodo de déficit hídrico (cuando la conductancia estomática disminuyó aproximadamente el 50 % o más en comparación con la conductancia estomática de las plantas testigo), en las hojas jóvenes completamente desarrolladas usando una bomba de presión tipo Scholander (Soil moisture, Santa Barbara, California, USA). Se cortó la quinta hoja (plantas bajo riego y déficit hídrico) desde la base del peciolo en forma tangencial con una navaja de un solo filo, se colocó el peciolo y la lámina de la hoja dentro de la cámara y se selló herméticamente, la cámara se presurizó lentamente con gas nitrógeno hasta que la presión aplicada generó pequeñas gotas de savia en la superficie del peciolo cortado, momento en el cual se tomó la lectura equivalente al potencial de agua de la planta en bares y después se transformó a megapascales. Posteriormente se despresurizó la cámara y se continuó con la siguiente medición (Scholander *et al.*, 1965).

6.7.2.2. Contenido de humedad del suelo

El contenido de humedad en el suelo se determinó una vez que la conductancia estomática del tratamiento de déficit hídrico había disminuido el 50 % o más en comparación con el tratamiento testigo, se tomaron muestras de suelo de cada uno de los tratamientos (riego y déficit hídrico) en cada etapa fenológica. El porcentaje de humedad en el suelo se determinó mediante el método gravimétrico (Ortiz-Villanueva y Ortiz Solorio, 1990) con la fórmula siguiente:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{\text{Peso suelo húmedo} - \text{Peso suelo seco}}{\text{Peso suelo seco}} \times 100$$

6.7.2.3. Fenoles totales en hoja

La determinación de fenoles totales en hojas se realizó al final del déficit hídrico en plantas en riego y déficit hídrico en las tres etapas fenológicas. Las cuantificaciones se hicieron en la tercera hoja a partir del ápice de cada planta.

Para la cuantificación de fenoles totales se utilizó el método de Folin-Ciocalteu® (Sigma-Aldrich, USA) descrito por Waterman y Mole (1994). El método cuantifica la concentración total de grupos hidroxílicos fenólicos presentes en la muestra que se está analizando; así como en la capacidad de los fenoles para reaccionar con agentes oxidantes (Julkunen-Tito, 1985). Se utilizaron 200 mg de tejido vegetal que se maceró en un mortero con 5 mL de metanol al 80 %. Los extractos fueron filtrados para eliminar los residuos de tejido y colocados en baño maría a 50 °C por una hora. Se tomaron alícuotas de 0.4 mL del extracto por triplicado y se les agregó 0.10 mL de reactivo de Folin-Ciocalteu, 3.6 mL de agua destilada y 0.5 mL de solución de carbonato de sodio al 20 %. Las muestras se dejaron incubar por 30 minutos en obscuridad. Se registró la absorbancia a 760 nm de cada muestra en el espectrofotómetro (Thermo Scientific UV-Vis Genesys). La concentración de fenoles totales fue expresada como miligramo de ácido tánico (AT) por gramo de peso fresco (mg AT/g).

Se realizó una curva patrón utilizando ácido tánico, en concentraciones de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 µg/mL.

6.7.2.4. Capacidad antioxidante en hoja

La determinación de actividad antioxidante en hojas, se realizó al final del déficit hídrico en los dos tratamientos en las tres etapas fenológicas y se evaluó en la cuarta hoja a partir del ápice de las plantas.

Para evaluar la actividad antioxidante se usó el método del radical libre descrito por Soler-Rivas *et al.* (2000), que consiste en hacer reaccionar una cantidad conocida de DPPH® (2,2-difenil-1-picrilhidrazil) (Sigma-Aldrich, USA) a una concentración de 3.9432 mg/1mM en 10 ml de etanol al 95 %. Se usaron 600 mg de muestras de tejido vegetal, el cual se maceró en 15 ml de metanol al 95 %. Los extractos se dejaron reposar a 4 °C durante 4 horas y fueron filtrados para eliminar los residuos de tejido. Posteriormente, se tomaron alícuotas de 4.75 ml del extracto, mismo que se hizo reaccionar con 158 µl de reactivo de DPPH previamente preparado. Para el blanco de la muestra se tomaron alícuotas de 4.75 ml del extracto en 250 µl de metanol. Mientras que el blanco o patrón de referencia fue 250 µl de DPPH y 4.75 ml de metanol. Se registró la absorbancia de cada muestra a una longitud de onda de 517 nm en el espectrofotómetro (Thermo Scientific UV-Vis Genesys). Con los datos obtenidos de cada absorbancia se determinó el porcentaje de actividad antioxidante mediante la fórmula propuesta por Soler-Rivas *et al.* (2000):

$$[1-(A2-A3)/A1] \times 100$$

Donde:

A1 = Absorbancia del patrón de referencia

A2 = Absorbancia de la muestra

A3 = Absorbancia del blanco de la muestra

6.7.3. Variables al final del experimento

A la cosecha de las plantas se registró la altura de las mismas, desde la base hasta el ápice del tallo principal. Posteriormente, las plantas se disectaron en cada uno de sus órganos y se registró la longitud de la raíz, número de ramas e inflorescencias, número de frutos por planta, peso de 100 frutos, peso de frutos por planta (humedad de 12%, secados a temperatura ambiente) y peso seco por planta. Los órganos se colocaron en bolsas de papel para su secado en una estufa a 70 °C por 72 h para obtener el peso seco. Asimismo, se determinó el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante en los frutos.

6.7.4. Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó en el paquete estadístico SAS 9.0 (Statistical Analysis System, 2012), se realizó un ANOVA y una prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha=0.05$). Las gráficas se realizaron en programa SigmaPlot 12.3.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Variables de estudio durante el déficit hídrico

7.1.1. Conductancia estomática

El déficit hídrico aplicado en las plantas de chíá tuvo un efecto gradual en la reducción de la conductancia estomática. Se observó que, cuando se aplicó el déficit hídrico durante la aparición del primordio floral, los primeros cuatro días después de haber suspendido el riego, la conductancia estomática fue muy similar entre los dos tratamientos (riego y déficit hídrico). A partir de este momento, la conductancia estomática se redujo progresivamente en el tratamiento de déficit hídrico hasta alcanzar valores cercanos a los $200 \text{ mmoles m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ en el día siete de la suspensión de riego, lo cual significó una reducción aproximada del 75 % en comparación con el testigo (Figura 9A). Durante la etapa de floración, el efecto que tuvo la suspensión del riego en la conductancia estomática fue más lento y solo se pudieron observar diferencias entre los dos tratamientos (riego y déficit hídrico) hasta el día 11 después de la suspensión de riego con una reducción del 30 % en comparación con el testigo. Para el día 12 después de la suspensión de riego una reducción mayor de la conductancia fue observada (50 %) en comparación con el testigo (Figura 9B). El efecto de suspensión de riego durante la etapa de llenado de fruto en la conductancia estomática, fue donde se observó el efecto más rápido, desde el día tres de suspensión de riego se observaron diferencias significativas en esta variable entre los dos tratamientos (riego y déficit hídrico); interesantemente para el día cuatro se observó una reducción en la conductancia estomática del 90 % en comparación con el testigo (Figura 9C). El cierre de los estomas y por lo tanto la reducción en la conductancia estomática es una de las primeras defensas de las

plantas cuando se presenta déficit hídrico o condiciones ambientales con limitaciones hídricas (Wilkinson, 2004). En esta investigación el efecto de suspensión de riego en la conductancia estomática fue asociado al estado fenológico y a las condiciones ambientales en el invernadero. Durante la etapa de aparición del primordio floral, el tamaño de las plantas fue menor y por lo tanto la demanda de agua debió estar directamente correlacionada con el área foliar. Se esperaba que tanto en la etapa de floración como en la de llenado de fruto, la disminución en la conductancia estomática fuera más rápido una vez que se suspendió el riego (esto debido a que las plantas habían alcanzado su máximo desarrollo y el máximo índice de área foliar (Wilkinson y Davies, 2002). Sin embargo, esto solo ocurrió en la etapa de llenado de fruto, en donde solo tomo tres días después de haber suspendido el riego para alcanzar una reducción del 50 % en esta variable en comparación con el testigo. La explicación a estas diferencias se debió principalmente a que durante el periodo de suspensión de riego durante la etapa de floración, se presentaron días nublados y lluviosos, lo cual redujo la incidencia solar (390 W m^{-2}) y una reducción en la temperatura del aire, lo cual disminuyó en gran medida la demanda evapotranspiratoria, en comparación a lo que se presentó en las etapas de aparición del primordio floral y llenado del fruto, donde se presentaron días con mayor radiación (561 y 724 W m^{-2}), lo cual propició que la demanda evapotranspiratoria fuera mayor y por lo tanto, el nivel del déficit hídrico se alcanzara en menor tiempo.

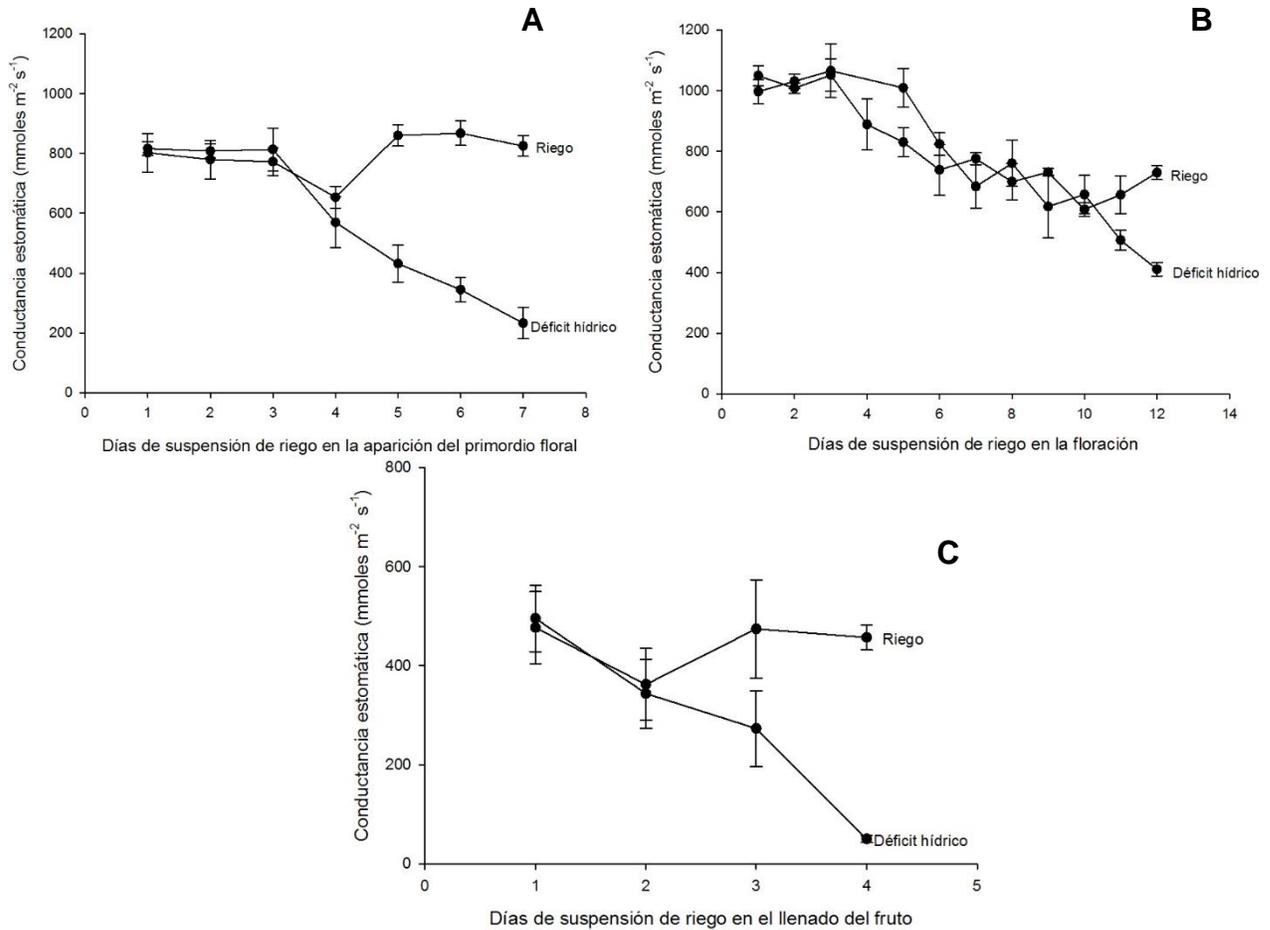


Figura 9. Conductancia estomática (mmoles m⁻² s⁻¹) en hojas de chíá (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos de humedad en el suelo (riego y déficit hídrico), **A.** Aparición del primordio floral, **B.** Floración y **C.** Llenado del fruto. Los puntos son el promedio de 10 repeticiones ± el error estándar.

7.2. Variables al final del déficit hídrico

7.2.1. Potencial hídrico de la hoja y porcentaje de humedad del suelo

El potencial de agua (Ψ_A) en las hojas por efecto del déficit hídrico fue menor en las 3 etapas fenológicas en comparación con el testigo (riego) (Figura 10A). En promedio el Ψ_A en el tratamiento testigo tuvo valores entre -0.12 y -0.40 MPa, mientras que el tratamiento de déficit hídrico alcanzó valores menores del punto de marchitez permanente (-1.5 MPa). Los valores alcanzados en el tratamiento de

déficit hídrico claramente indican condición de estrés, además de que visualmente las plantas mostraban una pérdida de turgencia, lo cual se debió a una excesiva pérdida de agua por transpiración (Kramer, 1989). Las plantas en déficit hídrico presentaron un potencial hídrico de -1.57, -1.34 y -1.37 MPa en la aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto, respectivamente.

Los resultados del contenido de humedad en el suelo al final del periodo de déficit hídrico en las tres etapas fenológicas, mostraron que el porcentaje de humedad aprovechable en el suelo se había agotado (Figura 10A). Los porcentajes de humedad fueron en promedio más bajos (6.12 %) al del punto de marchitez permanente (6.47 %). Por el contrario, la humedad aprovechable en el testigo siempre estuvo en promedio por arriba (15.9 %) del valor de capacidad de campo (11.9 %) (Figura 10B). En la literatura se ha documentado ampliamente el efecto que tiene la disminución del contenido de humedad en el suelo en el desarrollo de los cultivos, por ejemplo un valor de 4.9 % de humedad en el suelo provocó una reducción general de todos los componentes de rendimiento en plantas de frijol (Galván-Tovar, 2005). Si bien los valores de contenido de humedad como resultado de la suspensión de riego pueden ser muy similares, hay que tomar en cuenta el tipo de suelo, el cultivo y condiciones ambientales, lo cual hacen difícil muchas veces su comparación.

El déficit hídrico en la planta se produce cuando la pérdida de agua por transpiración es mayor que la absorción (Kramer 1989), caracterizado por una reducción en el Ψ_A en el suelo repercutiendo en una reducción del Ψ_A en la planta (Figuras 10A y B).

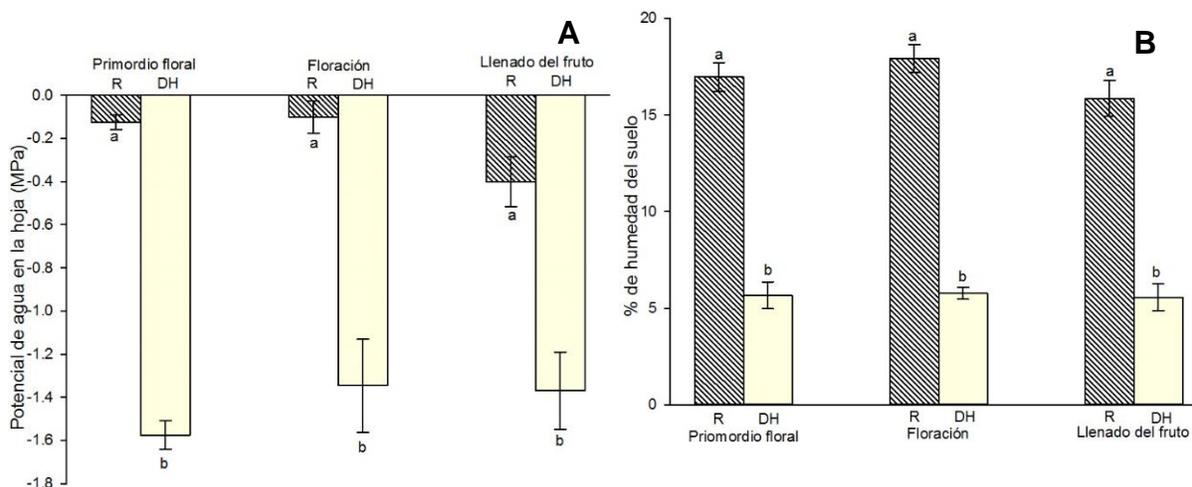


Figura 10. Potencial de agua en hojas de chíá (*Salvia hispanica* L.) (**A**) y porcentaje de humedad del suelo (**B**) registrados en tres etapas fenológicas (aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto) al final de un periodo de déficit hídrico de dos tratamientos, riego (**R**) y déficit hídrico (**DH**). Las barras son el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes en las barras indican diferencia significativa entre tratamientos en cada etapa fenológica.

7.2.1. Fenoles totales y actividad antioxidante en hojas

La acumulación de fenoles totales en hojas de chíá al final del periodo de déficit hídrico se incrementó en las tres etapas fenológicas en comparación con el testigo. Hubo un incremento del 59 % en la etapa de aparición de primordio floral, 72 y 71 % en la etapa de floración y llenado del fruto, respectivamente (Figura 11A). Sin embargo, no se encontraron diferencias significativas en la acumulación de fenoles entre etapas fenológicas en condiciones de déficit hídrico (Figura 11A).

El incremento de fenoles totales por efecto del déficit hídrico en las hojas, se podría asociar a la expresión génica, relacionada con una mayor producción de enzimas antioxidantes, como lo reportado por Xiong *et al.* (2002). Durante la sequía se producen señales bioquímicas primarias en las plantas seguidas por segundos mensajeros promoviendo una cadena de señal activa que induce la expresión de

genes, así como, la formación y almacenamiento de metabolitos secundarios o enzimas antioxidantes (González, 2013).

Otra posible explicación de la acumulación de fenoles totales en hojas de plantas en déficit hídrico, podría ser como mecanismo de respuesta a la sobrevivencia o reproducción, generando sustancias producto del metabolismo, como los fenoles. Plantas bajo riego continuo no presentaron cambios significativos en la cantidad de fenoles (Pérez, 2006).

Se observaron diferencias significativas en la actividad antioxidante entre los dos tratamientos (riego y déficit hídrico). El tratamiento de déficit hídrico promovió un porcentaje mayor de actividad antioxidante en las hojas en comparación con el testigo (Figura 11B). El análisis estadístico de la comparación de medias (Tukey $\alpha=0.05$) mostró diferencias significativas entre ambos tratamientos en las tres etapas fenológicas. Se observó un incremento por efecto del déficit hídrico de 18, 36 y 17 % respectivamente en comparación a la condición de riego (Figura 11B). La actividad antioxidante en hojas por efecto del déficit hídrico fue diferente en la etapa de floración en comparación con la aparición del primordio floral y llenado de grano, con una diferencia promedio del 18.5 % (Figura 11B).

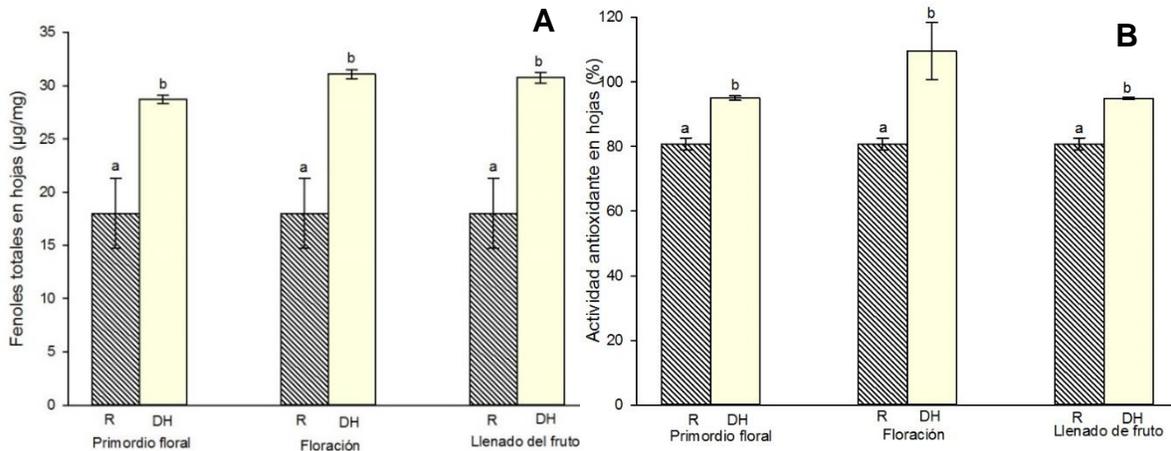


Figura 11. Fenoles totales (A) y actividad antioxidante (B) en hojas de chíá (*Salvia hispanica* L.) al final de un periodo de déficit hídrico en tres etapas fenológicas (aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH). Las barras indican el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes en las barras indican diferencia significativa entre tratamientos en cada etapa fenológica.

Martínez-Cruz y Paredes-López (2014) encontraron que el contenido de fenoles totales en un estudio que realizaron en frutos de chíá fue mayor comparado a lo reportado en otros trabajos y la actividad antioxidante fue de 68.83 %, valor que también es más alto en comparación al de otras especies del genero *Salvia*. Sin embargo, la actividad antioxidante en extractos de hoja de esta investigación fue mayor al 100 %, la cual es mayor a lo reportado en otros estudios (Figura 11B).

El efecto del estrés hídrico en plantas muestra diferencias considerables en la producción de enzimas involucradas en la síntesis de compuestos fenólicos, los cuales poseen una fuerte actividad antioxidante, por lo que una respuesta en el incremento de la actividad antioxidante en las plantas de este estudio se puede deber a una mayor acumulación de compuestos fenólicos asociados con la actividad antioxidante en comparación a las plantas en riego. González (2013) encontró que

cuando el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante se mide inmediatamente después de que termina el déficit hídrico, el efecto de acumulación es más fácil de observar a diferencia de cuando estos parámetros se miden tiempo después de que déficit hídrico terminó. En este estudio se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante debido a que se midió al finalizar el déficit hídrico.

González (2013) reporta valores de 29.19 % de actividad antioxidante en infusiones de hierbabuena, lo cual es un valor menor a lo encontrado en los extractos de las hojas de chía. Sin embargo, reporta una cantidad más alta de fenoles totales en sus infusiones de hierbabuena de plantas que estuvieron en estrés, que lo obtenido en este trabajo. La actividad antioxidante en hojas de chía encontrada en este estudio fue significativamente más alta a la reportada por González (2013), a pesar de que hay menor contenido de fenoles totales que en las infusiones de hierbabuena, probablemente porque los compuestos que le están otorgando la actividad antioxidante a la chía tienen mayor potencial antioxidante en comparación a los que contiene la hierbabuena.

7.3. Resultados de las variables de estudio al final del experimento

7.3.1. Altura de la planta

El déficit hídrico afectó únicamente la etapa de desarrollo de primordio floral con una reducción promedio del 16 % en comparación con el testigo (Figura 12). Estos resultados se debieron probablemente a que en la etapa de aparición del primordio floral la planta aún no alcanzaba su máximo desarrollo y el efecto primario del déficit hídrico se ve reflejado en el crecimiento (Kramer, 1989). El efecto del déficit hídrico

en crecimiento de las plantas se conoce desde hace muchos años y el impacto en éste puede estar dado por la duración y la etapa fenológica en donde se presente este tipo de estrés (Kramer, 1989). En esta investigación, el efecto del déficit hídrico se reflejó por la duración y la etapa fenológica en la que se aplicó, siendo la etapa de aparición del primordio floral la más sensible (Figura 12).

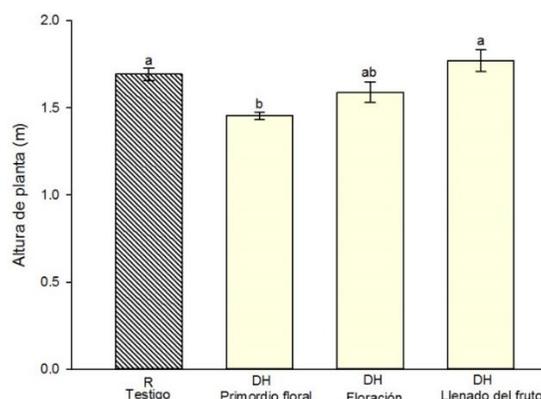


Figura 12. Altura final de la planta de chíá (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.

Hay numerosos estudios en donde se muestra la reducción del crecimiento o altura de planta por efecto de un estrés hídrico (Garau *et al.*, 2009). Benavides (2002) menciona que el tiempo requerido para causar daños o alteraciones en una planta a causa del déficit hídrico depende de la especie; también menciona que una especie es resistente a la sequía cuando tiene atributos que le permiten enfrentar con éxito la falta de agua. Hernández (2008) menciona que la chíá es resistente a periodos prolongados de sequía. En este estudio se observó que aun cuando visualmente las plantas presentaron pérdida de turgencia, al haber una

rehidratación al final del déficit hídrico éstas se recuperaron, sin embargo su crecimiento final fue menor en comparación al testigo.

7.3.2. Longitud y peso seco de la raíz principal

El tratamiento de déficit hídrico disminuyó significativamente la longitud de la raíz en las tres etapas fenológicas. La reducción fue en promedio de 20, 19 y 16 % en aparición de primordio floral, floración y llenado del fruto, respectivamente (Figura 17A). Sin embargo a pesar de las diferencias significativas en la longitud de la raíz entre tratamientos, el peso seco de este órgano no presentó ninguna diferencia significativa como resultado del déficit hídrico en ninguna de las etapas fenológicas en comparación con el testigo, en promedio la raíz tuvo un peso seco de 72 g (Figura 13B).

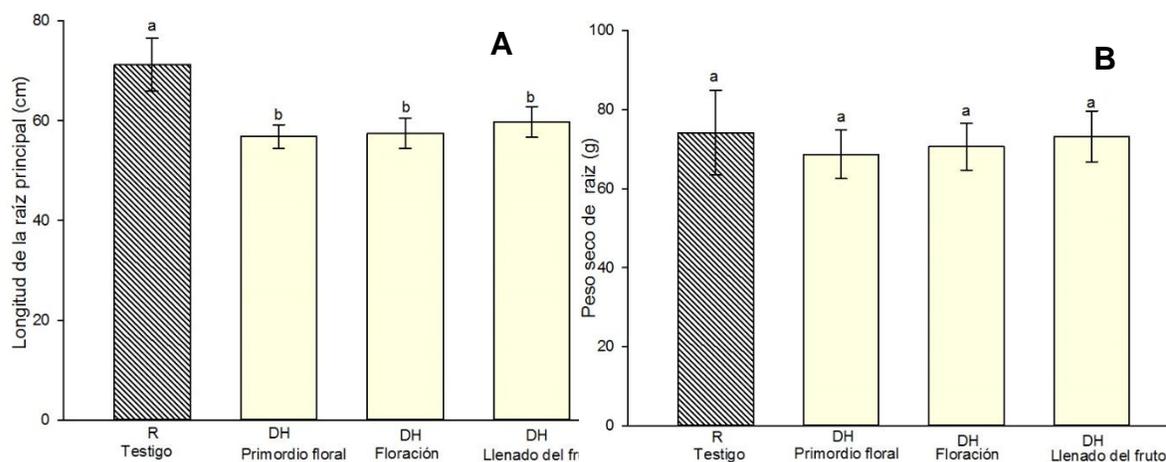


Figura 13. Longitud de la raíz (**A**), peso seco de la raíz (**B**) de plantas de chía (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (**R**) y déficit hídrico (**DH**) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.

En la literatura se encuentran muchas investigaciones relacionadas con el efecto del déficit hídrico en el crecimiento de la raíz. Los resultados son diversos y aunque predomina el efecto promotor del crecimiento de la raíz como resultado de una exposición al déficit hídrico moderado, también se ha encontrado efectos inhibitorios. Se ha podido observar que la duración del estrés así como la etapa de desarrollo en que se presenta en las plantas son determinantes en la respuesta (Sharp *et al.*, 1988; Piñol y Palazón, 1993). Es muy probable que la raíz de chíá en nuestro experimento y durante las etapas de desarrollo que se aplicó el estrés hídrico no haya alcanzado aún su máximo desarrollo y por esa razón se observaron diferencias significativas en su longitud en comparación con las plantas en riego (Figura 13A). Además, el confinamiento de la raíz en los contenedores usados pudo haber sido un factor determinante en los resultados obtenidos. Si la sequía es severa, el crecimiento de la raíz se inhibe (Basurto *et al.*, 2008). Por lo mencionado anteriormente se puede asociar que, la raíz de las plantas que estuvieron en déficit hídrico en las tres etapas fenológicas fueron más pequeñas que las de las plantas que estaban en riego, debido a que aún se encontraban en crecimiento, sin embargo es probable que el déficit de agua pudo haber generar como respuesta mayor número de raíces secundarias para explorar un mayor volumen de suelo (Basurto *et al.*, 2008), y aun cuando el tamaño fue menor, esto no se reflejó en el peso seco de las mismas (Figura 13B).

7.3.3. Número y peso seco de ramas por planta

El número de ramas se vio afectado por el defici hidrico en la etapa de aparición del primordio floral hasta en un 9 % en comparacion con las de riego, asociandose con

la altura de la planta (Figura 14A). El peso seco de las ramas fue 35 % menor en las plantas que fueron sometidas a déficit hídrico durante la aparición del primordio floral en comparación a la condición de riego (Figura 14B).

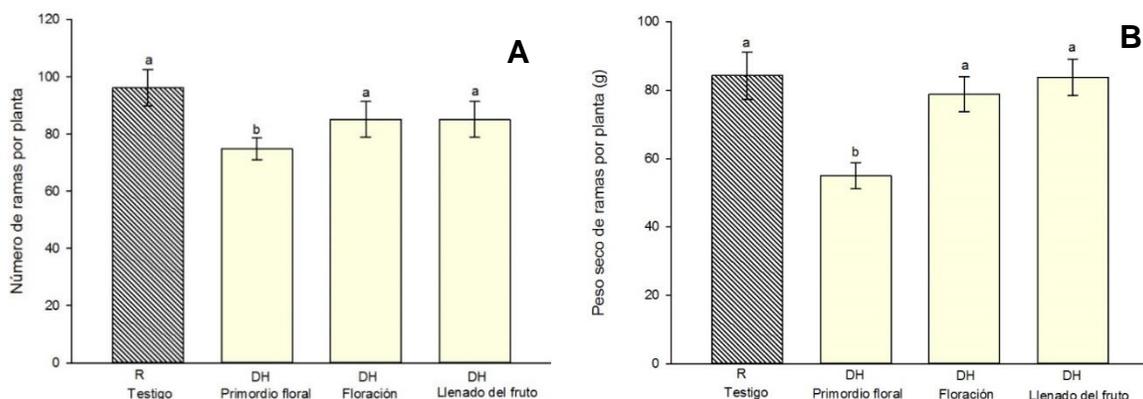


Figura 14. Número de ramas por planta (A) y peso seco de ramas de plantas (B) de chíá (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.

7.3.4. Peso seco de hojas por planta

Los resultados en esta variable nuevamente mostraron una diferencia significativa (Tukey $\alpha=0.05$) en el peso seco de hojas cuando el déficit hídrico se aplicó durante la aparición del primordio floral, hubo una reducción del peso de las hojas del 32 % en comparación con el peso seco de las hojas de las plantas en riego, mientras que en la etapa de floración y llenado del fruto no se observaron diferencias significativas (Figura 15).

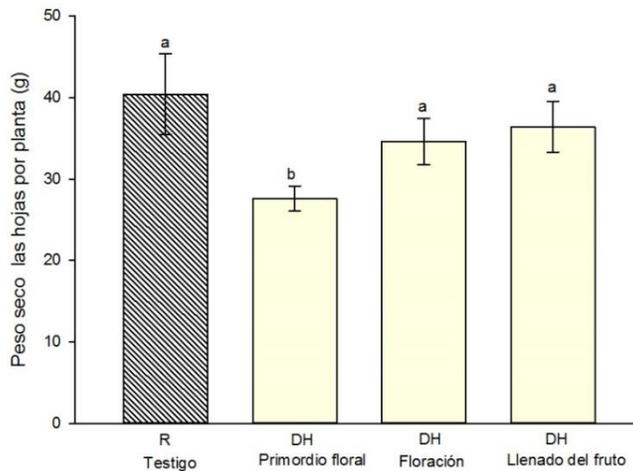


Figura 15. Peso seco de hojas por planta de chí (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (**R**) y déficit hídrico (**DH**) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.

Garau *et al.* (2009) mencionan que el efecto del estrés por sequía generalmente se refleja en una disminución de la producción y la altura de la planta, otro efecto es la reducción en el crecimiento de tallo, raíces, área foliar, peso foliar específico y biomasa de la planta, por lo que el estrés hídrico pudo afectar la producción de hojas o la senescencia de éstas al ser más severo en las plantas. Otra causa asociada al menor peso de las hojas en la etapa de aparición del primordio floral, fue el tamaño de las plantas y al número de ramas por efecto del déficit hídrico, al haber menor número de ramas, hubo menor número de hojas y por lo tanto el peso seco de éstas fue menor (Figura 15). Kramer (1989) menciona que una respuesta al déficit hídrico es la senescencia prematura de las hojas, como una forma para ahorrar energía, dando prioridad al desarrollo de órganos reproductivos que aseguren su descendencia ante una posible muerte por sequía. Lo anterior puede ser una posible

explicación a lo ocurrido en las plantas que fueron sometidas a déficit hídrico en la etapa de aparición del primordio floral. En la literatura también existen numerosos reportes en diferentes plantas, donde se menciona que una de las respuestas al déficit hídrico es la reducción del crecimiento de hojas, sobre todo si éste se presenta en una etapa cuando aún se están desarrollando hojas nuevas. En esta investigación cuando se aplicó el déficit hídrico a la aparición del primordio floral aún había desarrollo de hojas, esto pudo haber afectado su número y peso. En comparación con el déficit en las otras dos etapas fenológicas, donde ya no había desarrollo de hojas y por lo tanto, el peso de éstas no se vio afectado (Figura 15).

7.3.5. Número de inflorescencias y frutos, peso de frutos por planta y peso de 100 frutos

El número de inflorescencias por planta disminuyó significativamente por efecto del déficit hídrico en la etapa de aparición del primordio floral y floración, debido a que se presentó un menor número de ramas y cada rama genera una inflorescencia. Además, las inflorescencias que estaban en formación no completaron su crecimiento y quedaron como rudimentos y por lo tanto afectó su número. El análisis estadístico mostro diferencias significativas ($p < 0.05$) en estas dos etapas con 37 y 32 % en comparación con las plantas testigo. (Figura 16A).

El número de frutos por planta también se vio afectado significativamente por efecto del déficit hídrico en las tres etapas fenológicas. En promedio la reducción de esta variable fue de 38 % en comparación con el testigo.

El peso de frutos por planta se vio afectado significativamente por el déficit hídrico en las tres etapas fenológicas. En promedio se registró una disminución del 39, 42

y 34 % respectivamente en la aparición del primordio floral, floración y llenado del fruto en comparación con el testigo. La reducción de esta variable en la etapa de aparición del primordio floral se pudo deber a que las plantas mostraron un número menor de inflorescencias, y también como se observa en la Figura 16C en esta etapa hubo menor número de frutos, por lo tanto el peso fue menor. En la etapa de floración es probable que al haber menor número de inflorescencias, hubo menor número de frutos y por lo tanto el peso se vio disminuido. Otra posibilidad es que el déficit hídrico ocasionó aborto de flores, o hubo un efecto directo en la polinización y fecundación de los óvulos, lo cual también redujo el número de frutos y por lo tanto, su peso.

El déficit hídrico durante el llenado del grano pudo reducir el peso de frutos debido a que en esta etapa los frutos no habían completado aun su desarrollo, algunas plantas durante esta etapa mostraron frutos no maduros y vanos. El estrés hídrico pudo estar relacionado directamente con la alteración de la fuente y demanda y translocación de fotosintatos hacia los frutos, por lo tanto, el número y peso de frutos fue afectado (Dorji *et al.*, 2005) (Figura 16C).

El déficit hídrico no tuvo ningún efecto significativo en el peso de 100 frutos, en comparación con el testigo (Figura 16D).

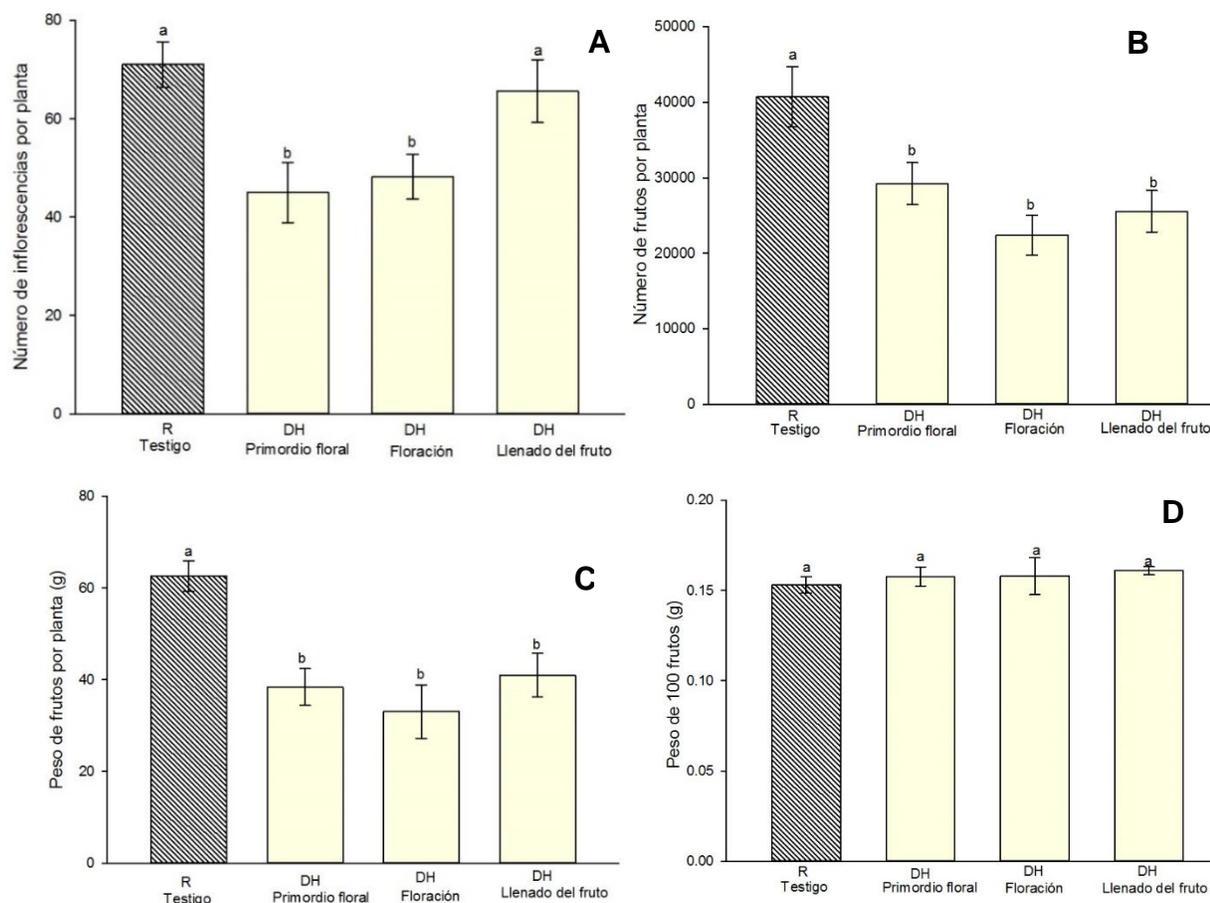


Figura 16. Número de inflorescencias (A), número de frutos por planta (B), peso de frutos por planta (C) y peso de 100 frutos (D) de chíá (*Salvia hispanica* L) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.

Los resultados que se observan en la Figura 16A, B, C y D se pueden deber a que los componentes de rendimiento se definen de forma secuenciada y no simultánea, el déficit hídrico se aplicó en etapas de desarrollo de órganos y etapas reproductivas donde se definió el número de ramas que a su vez dieron origen al número de inflorescencias y éstas a su vez originaron los frutos. El efecto del déficit hídrico puede atribuirse a un incremento en el aborto de botones, flores y frutos.

Es difícil comparar estos resultados con otros reportados en la literatura, debido a la especie, la intensidad, duración y época en que se aplicó el estrés. Sin embargo, si se puede comparar con los de Acosta-Díaz *et al.* (1994), quienes observaron que al aplicar sequía en la fase reproductiva en frijol, los componentes de rendimiento disminuyeron. En la Figura 16C se observa que el déficit hídrico en la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto disminuyó 38, 42 y 34 % el peso de fruto, respectivamente, en comparación con el testigo.

7.3.6. Peso seco por planta

En la Figura 17 se observa que el déficit hídrico afectó significativamente la acumulación del peso seco de la planta en la etapa de aparición del primordio floral y floración, 27 y 16 %, respectivamente, en comparación con el testigo. Garau *et al.* (2009) mencionan que la sequía impacta directamente en la biomasa total de las plantas, debido a que hay una reducción en el desarrollo de órganos. En esta investigación se observó que la etapa con mayor afectación fue la de aparición del primordio floral, esto se puede deber a que hubo menor desarrollo de ramas, por lo cual hubo menor peso de ramas, hojas y de frutos.

Acosta y Kohashi-Shibata (1989) observaron en plantas de frijol que la biomasa total se redujo por la sequía en un 22, 25 y 35 % en diferentes etapas fenológicas. Lo anterior coincide con los resultados obtenidos en este trabajo, donde se presentó una reducción de la biomasa total cuando las plantas fueron sometidas a déficit hídrico en etapas tempranas como en la aparición del primordio floral y el inicio de la floración. Se observó que cuando la floración estaba terminando y las plantas se

sometieron a déficit hídrico no hubo una disminución significativa de la biomasa como en el caso de la etapa del llenado del fruto.

Avendaño-Arrazate *et al.* (2008) en su estudio en maíz observó que la biomasa total se redujo gradualmente con el aumento de la intensidad de la sequía. Ellos observaron que el aumento en la altura y en el número de hojas en las plantas trajo consigo un aumento en la biomasa, aun cuando estas estuvieron en sequía extrema, explican que esto se debe a que las plantas durante el proceso de selección han adoptado diferentes mecanismos de sobrevivencia como el denominado latencia, mediante el cual las plantas detienen su crecimiento en condiciones extremas de sequía, y en el momento en que hay nuevamente humedad en el suelo, reinician su desarrollo hasta completarlo. Sin embargo, esto no sucedió en las plantas que se sometieron a déficit hídrico en la aparición del primordio floral, aun cuando posterior al déficit hídrico hubo una rehidratación, las plantas ya no generaron ramas ni hojas y por lo tanto la biomasa no aumentó.

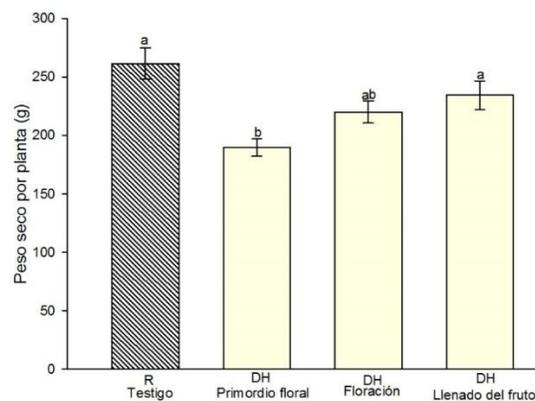


Figura 17. Peso seco total por planta (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.

7.3.7. Fenoles totales y actividad antioxidante en frutos

El contenido de fenoles totales y la actividad antioxidante en los frutos no presentó alteración por efecto del déficit hídrico en las tres etapas fenológicas en comparación con el testigo (Figura 18A).

Los valores obtenidos fueron muy cercanos al 100% de actividad antioxidante independientemente de la condición hídrica a la cual estuvieron expuestas las plantas.

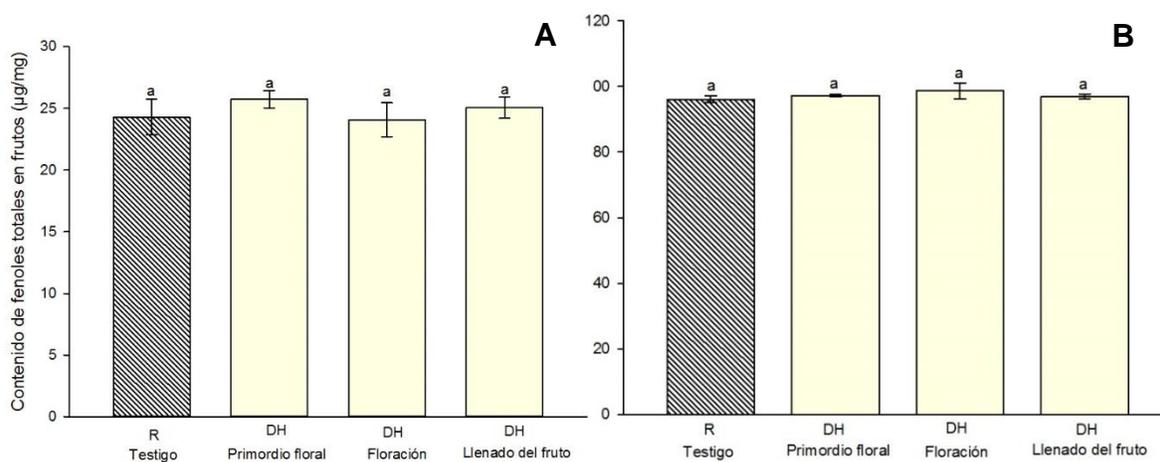


Figura 18. Fenoles totales (A) y actividad antioxidante (B) en frutos de chíá (*Salvia hispanica* L.) en dos tratamientos, riego (R) y déficit hídrico (DH) (aplicado a la aparición del primordio floral, floración y llenado de fruto). El déficit hídrico se suspendió cuando el suelo alcanzó un potencial hídrico cercano al de marchitez permanente, manteniéndose posteriormente cercano a capacidad de campo. Cada barra representa el promedio de 10 repeticiones \pm el error estándar. Letras diferentes sobre las barras indican diferencia significativa entre los tratamientos.

Es difícil dar una explicación del por qué no se encontró un incremento en el contenido de fenoles totales o actividad antioxidante en los frutos de chíá en esta investigación. Si bien el déficit hídrico impuesto en las tres etapas fenológicas estudiadas fue bastante severo (igual o menor al punto de marchitez permanente),

las condiciones óptimas de humedad se reestablecieron y se mantuvieron hasta el final del ciclo de la planta. Nuestra hipótesis era que al experimentar la planta una situación de estrés severo, mantendría esta información; sin embargo, después de la rehidratación y a la madurez fisiológica de los frutos no se observó efecto en éstos, lo cual es una indicación que las plantas no traslocan estos metabolitos a los frutos, utilizándolos como un mecanismo de tolerancia al estrés que experimentaron en su momento. Se ha mencionado en la revisión bibliográfica que los frutos de chía son uno de los frutos con mayor contenido de compuestos antioxidantes, inclusive mayor a lo que se encuentra en productos animales como el salmón. Por lo tanto, se pensó durante el planteamiento de esta investigación que el déficit hídrico podría incrementar aún más esta característica nutracéutica de los frutos. Los resultados obtenidos en esta investigación en comparación con lo reportado por Vázquez-Ovando *et al.* (2007) y Reyes-Caudillo *et al.* (2008) se observó que la actividad antioxidante en los frutos de chía analizados fue mayor (arriba del 90 %) a lo reportado por ellos (80 %).

A pesar de que el déficit hídrico no incrementó la actividad antioxidante en ninguna de las tres etapas fenológicas estudiadas, es claro que la actividad antioxidante de los frutos de chía, es mayor que lo reportado para otros frutos conocidos con actividad antioxidante alta como la manzana y la frambuesa, a los cuales se les ha reportado una actividad antioxidante del 84 % (González *et al.*, 2010).

VIII. CONCLUSIONES

El déficit hídrico disminuyó la altura de la planta, el número de ramas, peso seco de las ramas y hojas en la etapa de aparición de primordio floral, mientras que en las tres etapas fenológicas se redujo la longitud de la raíz, el número de frutos por planta y el peso de los frutos. Finalmente en la etapa de aparición del primordio floral y floración por efecto del déficit hídrico el número de inflorescencias y el peso seco por planta se redujo.

El déficit hídrico incrementó el contenido de fenoles totales y actividad antioxidante en hojas de chíá, sin embargo no se observó ningún efecto residual de ésta condición en el contenido de fenoles totales y actividad antioxidante en los frutos.

IX. LITERATURA CITADA

- Acosta-Díaz, E., N. T. Sánchez, J. Kohashi-Shibata, J. A. Escalante-Estrada, y J. A. Acosta Gallegos. 1994. Efecto de la sequía en el rendimiento y en la asignación de materia seca en frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agrociencia serie Fitotecnia* 5(1):53-66.
- Acosta Gallegos, J. A., and J. Kohashi-Shibata. 1989. Effect of water stress on drought and yield of indeterminate dry-bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Field Crops Research* 20:81-93.
- Agbicodo, E. M., C. A. Fatokun, S. Muranaka, R. G. F. Visser, and A. Linden-Vander. 2009. Breeding drought tolerant cowpea: Constraints, accomplishments, and future prospects. *Euphytica* 167:353-370.
- Anaya, L. A. L. 2003. *Ecología Química*. Instituto de Ecología. Editorial Plaza y Valdez. México, D.F. 39 p.
- Auestad, N., D. T. Scott, J. S. Janowsky, C. Jacobsen, R. E. Carrol, M. B. Montalto, R. Halter, W. Qui, J. R. Jacobs, W. E. Connor, S. L. Connor, J. A. Taylor, M. Neuringer, K. M. Fitzgerald, and R. T. Hall. 2003. Visual, cognitive and language assessments at 39 months: a follow-up study of children fed formulas containing long-chain polyunsaturated fatty acids to 1 year of age. *Pediatrics* 112(3):177-83.
- Avendaño-Arrazate, C. H., J. D. Molina-Galán, C. Trejo-López, C. López-Castañeda, y J. Cadena-Iñiguez. 2008. Respuesta a altos niveles de estrés hídrico en maíz. *Agronomía Mesoamericana* 19(1):27-32.

- Ayerza, R. 1995. Oil content and fatty acid composition of oil of chia (*Salvia hispanica* L.) from five locations in Northwestern Argentina. *Journal of American Oil Chemist's Society* 72:1079-1081.
- Ayerza, R. 2000. Dietary levels of chia: Influence in yolk cholesterol, lipid content and fatty acid composition for two strains of hens. *Poultry Science* 79:724-739.
- Ayerza, R., and W. Coates. 2001. The omega-3 enriched eggs: the influence of dietary linolenic fatty acid source combination on egg production and composition. *Journal of Animal Science* 81:355-362.
- Ayerza, R., and W. Coates. 2004. Protein and oil content, peroxide index and fatty acid composition of chia (*Salvia hispanica* L.) grown in six tropical and sub-tropical ecosystems of South America. *Tropical Science* 3(44):131-135.
- Ayerza, R., and W. Coates. 2005. Ground chia seed and chia oil effects plasma lipids and fatty acids in the rat. *Nutrition Research* 25:995-1003.
- Ayerza, R., y C. Wayne. 2006. Chía, redescubriendo un olvidado alimento de los aztecas (1 ed.). Buenos Aires. 205 p
- Azcón-Bieto, J., y M. Talón. 1993. *Fisiología y Bioquímica Vegetal. Fisiología Vegetal*. Universidad de Barcelona. Departamento de Citricultura. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. Moncada, Valencia, España. Editorial McGraw-Hill- Interamericana. pp: 237-284.
- Basurto, S. M. B.A. Núñez, R. R. Pérez-Leal, y O. A. Hernández-Rodríguez. 2008. *Fisiología del estrés ambiental en plantas*. Facultad de ciencias Agrotecnológicas. Universidad Autónoma de Chihuahua, México. 45:1-5.

- Beltrán-Orozco, M. C., y M. R. Romero. 2003. Chía, alimento milenario. Revista Industria Alimentaria Septiembre/Octubre. pp: 20-29.
- Beltrán-Orozco, M. C., M. P. Salgado-Cruz, y D. Cedillo-López. 2005. Estudio de las propiedades funcionales de la semilla de chía (*Salvia hispanica* L.) y de la fibra dietaría de la misma. Memorias del VII Congreso Nacional de Ciencia de los Alimentos y III Foro de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Guanajuato, Gto. pp. 358-366.
- Benavides, M. A. 2002. "Ecofisiología y química del estrés en plantas", Departamento de agricultura/UAAAN. pp: 26-70.
- Benavides-Mendoza, A., H. Ramírez, V. Robledo-Torres, y L. O. Fuentes-Lara. 2009. Antioxidantes en las plantas: algunos factores edáficos y ambientales que los modifican. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. pp: 13-26.
- Benavides, A., R. Hernández, H. Ramírez, y A. Sandoval. 2010. Plantas útiles sin fines alimentarios: plantas utilizadas como especias y sustancias aromáticas. Tratado de botánica económica moderna. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buena Vista, México. 332 p.
- Bray, E. A. 1991. Regulation of gene expression by endogenous ABA during drought stress. In W.J. Davies and Jones H.G. Eds, Abscisic acid physiology and biochemistry. Oxford Bios Scientific Publishers. pp: 81-89.
- Bray, E. A. 1993. Molecular responses to water deficit. Plant Physiology 103:1035-1040.
- Brown, G., and W. Coates. 2001. Simvastatin and niacin, antioxidant vitamins, or the combination for the prevention of coronary disease. Journal of Medicine 345(22):1584-1592.

- Cahill, J. P. 2003. Etnobotany of chia (*Salvia hispanica* L.). *Economic Botany* 57:04-618.
- Cahill, J. P. 2004. Genetic diversity among varieties of chia (*Salvia hispanica* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution* 51:773-781.
- Cahill, J. P., and B. Ehadaie. 2005. Variation and heritability of seed mass in chia (*Salvia hispanica* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution* 52:201-207.
- Calderón, S. 1941. Flora Salvadoreña. Lista preliminar de plantas de El Salvador. 442 p.
- Covarrubias, R. A. 2007. Sobrevivir al estrés: cómo responden las plantas a la falta de agua. *Biotecnología* 14(3):253-262.
- Di Sapio, O., M. Bueno, H. Busilacchi, M. Quiroga, y S. Severin. 2012. Caracterización morfo-anatómica de hoja, tallo, fruto y semilla de *Salvia hispanica* L. (Lamiaceae). *Boletín Latinoamericano y del Caribe de plantas Medicinales y Aromáticas* 11(3):249-268.
- Dorji, K., M. H. Behboudian, and A. Zegbe-Dominguez. 2005. Water relations, growth, yield and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial root zone drying. *Scientia Horticulturae* 104:137-149.
- Dubois, V., S. Brenton, M. Linder, J. Fanni, and M. Parmentier. 2007. Fatty acid profiles of 80 vegetable oils with regard to their nutritional potential. *European Journal of Lipid Science and Technology* 109:710-732.
- EFSA. 2005. Opinion of the scientific panel on dietetic products, nutrition and allergies on a request from the commission related to the safety of chia (*Salvia hispanica* L.) seed and group whole chia seed as a novel food ingredient intended for use in bread. *The EFSA Journal* 278:1-12.

- EFSA. 2009. Scientific opinion of the panel on dietetic products nutrition and allergies on a request from the European commission on the safety of chia seed (*Salvia hispanica* L.) and ground whole chia seed as a food ingredient. The EFSA Journal 996:1-2.
- Galván-Tovar, M. 2005. Dinámica del potencial hídrico de las hojas de frijol común durante el periodo diurno y nocturno bajo estrés hídrico. Tesis de Doctorado en Ciencias. Botánica. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Texcoco, Estado de México. 78 p.
- Garau, A., F. D. Caccia, A. Guarnaschelli, C. Tato, S. Korec, S. Cortizo, y V. Mema. 2009. Respuesta de crecimiento y partición de la biomasa aérea en plantas de sauce de 2 años con distintos métodos de control de malezas. En CD de Actas Jornadas de Salicáceas. Mendoza, Argentina. 380 p.
- Gil-Pelegrín, E., 1993. Estudios ecofisiológicos sobre *Pinus uncinata* Mill. En el límite superior de la especie. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. 110 p.
- González-Jiménez, F. E. 2010. Caracterización de compuestos fenólicos presentes en la semilla y aceite de chía (*Salvia hispanica* L.), mediante electroforesis capilar. Tesis de maestría en alimentos. Departamento de graduados e investigación en alimentos. Sección de estudios de posgrado en investigación. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. 480 p.
- González, F., R. Beltrán-Orozco, and M. Vargas. 2010. The antioxidant capacity and phenolic content of chia (*Salvia hispanica* L.). Integral Seed and Oil. Journal of Biotechnology (Special Abstracts) 150:315.

- González M., M. E. 2013. Efecto del estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha piperita*) sobre polifenoles y capacidad antioxidante de polifenoles. Tesis de título de Ingeniería Química en Alimentos. Facultad de Química. Universidad Autónoma de Querétaro. Santiago de Querétaro, Querétaro. 79 p.
- Giannouli, A., and J. Kintzios. 2010. Chemical constituent: essential oils of *Salvia* sp: examples of intraspecific and seasonal variation. Harwood Academic Publisher 14:299.
- Hernández G., J. A. 2008. Caracterización Morfológica, contenido de ADN nuclear y cruzamiento natural en la chía (*Salvia hispanica* L.) Tesis de Doctorado en Ciencias. Posgrado de Recursos Genéticos y Productividad. Genética. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 134 p.
- Hernández-Gómez, J. A., S. Miranda-Colín, y A. Peña-Lomelí. 2008. Cruzamiento natural de chía (*Salvia hispanica* L.). Revista Chapingo Serie Horticultura 14(3):331-337.
- INEGI. 2005. Continuo nacional del conjunto de datos geográficos de las cartas de estados y Municipios de la división política de México. <http://www.inegi.org.mx/>
- Ixtaina, V., S. Nolasco, y M. Tomás. 2007. La chía y su calidad alimenticia, II Ateneo Fanus: Empleo de semillas en la alimentación humana. Sésamo, lino, girasol y chía. Buenos Aires. 203 p.
- Ixtaina, V. Y., S. M. Nolasco, and M. C. Tomas. 2008. Physical properties of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. Industrial Crops and Products 28(3):86-293.

- Ixtaina, V.Y., M. Martínez, V. Sportorno, M. Mateo, D. Maestri, B. Diehl, S. Nolasco, and M. Tomas. 2011. Characterization of chia seed oils by pressing and solvent extraction. *Journal of Food Composition and Analysis* 24:166-174.
- Jamboonsri, W., T. Phillips, R. Geneve., J. Cahill, and D. Hildebrand. 2012. Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L. *Genetic Resources and Crop Evolution* 59(2):171-178.
- Jaramillo, G. G. 2013. La chia (*Salvia hispanica* L.), una fuente de nutrientes para el desarrollo de alimentos saludables. Facultad de ingenierías. Especialización en Alimentación y Nutrición. Caldas-Antiquia. 43 p.
- Julkunen-Titto, R. 1985. Phenolic constituents in the leaves of Northern willows: Methods for the analysis of certain phenolics, *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 33(2):210-217.
- Kramer, P. J. 1989. Relaciones Hídricas de Suelos y Plantas. (Trad. Leonor Tejada de la versión en inglés) HARLA. México. 538 p.
- Lobo, R., G. Alcocer, J. Fuentes, W. Rodríguez, M. Morandini, y M. Devani. 2011. Desarrollo del cultivo de chía en Tucumán. *Avance Agroindustrial*. República de Argentina 32(4):27-30.
- Lin, K., J. Daniel, and R. Whistler. 1994. Structure of chia seed polysaccharide exudates. *Carbohydrate Polymers* 23:13-18.
- Martínez, L., M. Marin, C. Salgado, J. Revol, M. Penci, and P. Ribotta. 2012. Chia (*Salvia hispanica* L.) oil extraction: Study of processing parameters. *Food Science and Technology* 47:78-82.

- Martínez-Cruz, O., and O. Paredes-López. 2014. Phytochemical profile and nutraceutical potential of chia seeds (*Salvia hispanica* L.) by ultra high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A* 1346:43-48.
- Miranda, C. S. 1978. Evolución de cultivares nativos de México. *Ciencia y Desarrollo* 3:130-131.
- Muñoz, L. A., A. Cobos, O. Díaz, and J. M. Aguilera. 2012. Chia seeds: Microstructure, mucilage extraction and hydration. *Journal of Food Engineering* 108:216-224.
- Orozco, S. F., R. S. Hoyos, y Z. M. E. Arias. 2002. Cultivo de células vegetales en biorreactores: un sistema potencial para la producción de metabolitos secundarios. *Rev. Fac. Nat. Agr. Medellín* 55(1):1473-1495.
- Ortiz-Villanueva, B. y C. A. Ortiz Solorio. 1990. *Edafología*. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. 394 p.
- Pascual, M., E. Correal, E. Molina, J. Martínez, E. López, y F. Aguirre. 1997. Evaluación y selección de especies vegetales productoras de compuestos naturales con actividad insecticida. Centro de Investigación y Desarrollo Agroalimentario (CIDA). Murcia. pp: 1-6.
- Pérez-Molphe, B. E. y A. N. Ochoa. 1990. Respuesta de las plantas al déficit hídrico. *Ciencia (Universidad Autónoma de Aguascalientes)* 50:333-334.
- Pérez, P. I. 2006. Metabolitos secundarios aislados de las raíces y las hojas de *Stevia jorullensis* H.B.K. Instituto de ciencias básicas e ingenierías. Centro de investigaciones químicas. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Pachuca de Soto, Hidalgo. pp. 1-90.

- Piñol, M. T. y J. Palazón. 1993. Metabolismo secundario. En: Azcón-Bieto, J. y Talón, M. Fisiología y Bioquímica Vegetal. Madrid Iberoamericana McGraw Hill. pp. 237-283.
- Poudyal, H., S. Panchal, J. Waanders, L. Ward, and L. Brown. 2012. Lipid redistribution by α -linolenic acid-rich chia seed inhibits stearoyl-CoA desaturase-1 and induces cardiac and hepatic protection in diet induced obese rats. *Journal of Nutrition Biochemistry* 23: 153-162.
- Pozo-Pozo, S. A. 2010. Alternativas para el control químico de malezas anuales en el cultivo de la chía (*Salvia hispanica* L.) en la granja de ECAA provincia de Imbabura. Tesis de ingeniería agropecuaria. Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales E.C.A.A. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Ibarra Ecuador. pp. 113.
- Phillips, G. O., and P. A. Williams. 2000. Introduction to food Hydrocolloids. En: Phillips, G.O., Williams, P.A (Eds.) Handbook of Hydrocolloids. Woodhead Publishing Limited. Cambridge. England. 573 p.
- Reyes-Caudillo, E., A. Tecante and M. A. Valdivia-López. 2008. Dietary fibre content and antioxidant activity of phenolic compounds present in Mexican chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Food Chemistry* 107(2):656-663.
- Salisbury, F. y C. Ross. 1994. Fisiología Vegetal. Grupo Editorial Iberoamericana. México. 759 p.

- Sandoval-Oliveros, M. R. 2012. Aislamiento y caracterización de las proteínas de reserva de chía (*Salvia hispanica* L.). Tesis de Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Facultad de Química. Posgrado en Alimentos del Centro de la República (PROPAC). Universidad Autónoma de Querétaro. Santiago de Querétaro, Qro. 113 p.
- Sánchez-Díaz, M. y J. Aguirreolea. 1993. Relaciones hídricas. Departamento de Fisiología Vegetal. Universidad de Navarra. Pamplona España. 62 p.
- SAS Institute, Inc. 2012. SAS 9.0 for Windows. SAS Institute Inc. Cary, N.C., USA.
- Silveira R., M. B., M. S. Moreno, y B. B. Molina. 2003. Alimentos funcionales y nutrición óptima. *Revista Española de Salud Pública* 77:317-331.
- Singh, N., G. Makharia, and K. Joshi. 2008. Dietary survey and total dietary fiber intake in patients with irritable bowel syndrome attending a tertiary referral hospital. *Indian Journal of Gastroenterology* 27:66-70.
- Soler-Rivas, C., J. Carlos-Espin, and H. J. Wichers. 2000. An easy and fast test to compare total free radical scavenger capacity of food stuff. *Photochemistry* 11:330-338.
- Scholander, P. F., E. D. Bradstreet, E. A. Hemmingsen, and H. T. Hammel. 1965. Sap pressure in vascular plants. Negative pressure can be measured in plants. *Science* 148(3668):339-346.
- Sharp, E. R., S. W. Kuhn, and T. Hsiao. 1988. Growth of the Maize Primary Root at Low Water Potentials. Spatial Distribution of Expansive Growth. *Plant Physiology* 87:50-57.
- Shinozaki, K., and Y. Yamaguchi-Shinozaki. 1996. Molecular responses to drought and cold stress. *Biotechnology* 7:161-167.

- Shinozaki, K., and Y. Yamaguchi-Shinosaki. 2007. Gene networks involved in drought stress response and tolerance. *Journal of Experimental Botany* 58(2):221-227.
- Steiner, A. A. 1984. The universal Nutrient Solution. *In: Proceedings 6th International Congress on Soilles Culture*. Wageningen, The Netherlands. pp: 633-650.
- Taga, M. S., E. E. Miller, y D. E. Pratt. 1984. Chia seed as a source of natural lipid antioxidants. *Journal of the American Oil Chemistry Society* 61:928-931.
- Vázquez-Ovando, A., G. Rosado-Rubio, L. Chel-Guerrero, and D. Bentacur-Ancona. 2009. Physicochemical properties of a fibrous fraction from chia (*Salvia hispanica* L.). *Food Science and Technology* 42(1):168-173.
- Vitores, J. T. 2001. Fenoles. Centro Canario del agua. España. 59 p.
- Waterman, P. G. and S. Mole. 1994. Analysis of Phenolic Metabolites. *Ecological Methods and Concepts*. 248 p.
- Weber, C. W., H. S. Gentry, E. A. Kohlpepp, and P. R. Mc Crohan. 1991. The nutritional and chemical evaluation of chia seeds. *Ecology of Food and Nutrition* 26:119-125.
- Wester, P. and A. Claben-Bockhoff. 2001. Floral diversity and pollen transfer mechanisms in bir-pollinates *Salvia* species. *Annals of Botany* 100:1-21.
- Wilkinson, S. and W. J. Davies. 2002. ABA-based chemical signalling: the cordination of responses to stress in plants. *Plant Cell and Environment* 25:195-210.
- Wilkinson, S. 2004. Water use efficiency and chemical signalling. *In: Water use Efficiency in Plant Biology* (Ed. Mark A. Bacon). Blackwell Publishing Ltd. London, UK. pp. 75-112.

Xiong, L., K. S. Schumaker, and J. K. Zhu. 2002. Cell signalling during cold, drought, and salt stress. *Plant Cell* 14:S165-S183.

Zuñiga, S. H. J. 2013. MONOGRAFÍA: BIOLOGÍA DE *Salvia hispanica* L. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. 51 p.