



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CONKAL**

**VARIACIÓN MORFOLÓGICA Y ANATÓMICA EN FLORES DE  
*Solanum lycopersicum* EN ESCENARIOS DE CAMBIO  
CLIMÁTICO**

**TESIS**

Que presenta:

**Mauricio Alberto Castillo Colli**

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**Maestro en Ciencias en Horticultura Tropical**

Director de tesis:

**Dr. René Garruña Hernández**

Conkal, Yucatán, México

Junio, 2021



**TecNM**

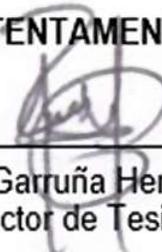
Conkal, Yucatán, México a 28 de junio de 2021.

El comité de tesis del candidato a grado: Mauricio Alberto Castillo Colli, constituido por los CC. Dr. René Garruña Hernández, Dra. Ivón Ramírez Morillo, Dra. Laura Yáñez Espinosa, Dr. Eduardo Villanueva Couch habiéndose reunido con el fin de evaluar el contenido teórico-metodológico y de verificar la estructura y formato de la tesis titulada: **Variación morfológica y anatómica en flores de *Solanum lycopersicum* en escenarios de cambio climático**, que presenta como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Horticultura Tropical, según lo establece el Capítulo 2, inciso 2.13.3, de los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Sistema Nacional de Institutos Tecnológicos, dictaminaron su aprobación para que pueda ser presentada en el examen de grado correspondiente.

**ATENTAMENTE**



Dra. Ivón Ramírez Morillo  
Asesor de Tesis



---

Dr. René Garruña Hernández  
Director de Tesis



---

Dra. Laura Yáñez  
Espinosa Asesor de  
tesis



---

Dr. Eduardo Villanueva Couch  
Asesor de tesis



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Conkal

Conkal, Yucatán, México a 28 de Junio de 2021

### DECLARATORIA DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de materiales y métodos, resultados y discusión de este documento, es producto del trabajo de investigación realizado durante mi estudio de posgrado y con base en los términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial le pertenece patrimonialmente al Instituto Tecnológico de Conkal. En virtud de lo manifestado reconozco que los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que se deriven de lo correspondiente a dicha información son propiedad de la citada institución educativa.

---

Mauricio Alberto Castillo Colli

## **Agradecimientos**

*Al Instituto Tecnológico de Conkal, Yucatán, por otorgarme los conocimientos necesarios para mi formación profesional.*

*Al CICY por prestarme sus instalaciones para realizar parte de la metodología de la tesis.*

*Al Instituto de Investigación de Zonas Desérticas de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí por permitirme realizar una estancia profesional en sus instalaciones.*

*A la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI) por darme la oportunidad de cursar mis estudios de maestría.*

*Se agradece al CONACYT por la beca No. 992683 otorgada a Mauricio Alberto Castillo Colli para realizar estudios de posgrado.*

*Se agradece al CONACYT por financiar el proyecto No. 286756 del Fondo Sectorial de Investigación para la Educación SEP-CONACYT, Investigación Científica Básica 2016.*

*Al Dr. René Garruña Hernández director de esta tesis, por su tiempo, paciencia, motivación conocimientos, disponibilidad, confianza y dedicación.*

*A la Dra. Ivón Ramírez Morillo asesora de esta tesis, por las sugerencias, apoyo y opiniones para mejorar este trabajo.*

*A la Dra. Laura Yáñez Espinosa asesora de esta tesis, por su paciencia, sugerencias y por compartir sus conocimientos.*

*Al técnico de la Unidad de Recursos Naturales (CICY) Néstor Raigoza por sus consejos técnicos en el proceso de la tesis.*

*A la M.C. Jade Pereyda González por su apoyo durante la maestría.*

*A mis amigos y compañeros de la maestría por todos los momentos compartidos.*

*A los profesores que contribuyeron en mi formación profesional durante la Maestría.*

## **Dedicatoria**

*A mi madre María de los Ángeles Colli Mukúl por su amor, apoyo, confianza y por motivarme a seguir adelante con mis metas.*

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL.....</b>	<b>12</b>
1.1 Introducción.....	12
1.1.1 El cambio climático .....	12
1.1.2 Afectación del cambio climático en las plantas .....	12
1.1.3 Efectos de la temperatura y el CO <sub>2</sub> en las flores.....	13
1.2 Antecedentes .....	14
1.2.1 Generalidades de las plantas de tomate ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.); efectos producidos por la temperatura y el CO <sub>2</sub> .....	14
1.3 Hipótesis .....	15
1.4 Objetivos .....	15
1.4.1 Objetivo general.....	15
1.4.2 Objetivos específicos .....	16
1.5 Procedimiento experimental.....	17
1.6 Literatura citada.....	18
<b>CAPÍTULO 2 VARIACIÓN MORFOLÓGICA Y ANATÓMICA DE FLORES DE <i>Solanum lycopersicum</i> L. (SOLANACEAE) EN ATMÓSFERAS CON TEMPERATURA ALTA Y CO<sub>2</sub> ENRIQUECIDO.....</b>	<b>22</b>
2.1 Resumen .....	22
2.1 Abstract .....	23
2.2 Introducción.....	24
2.3 Material y Métodos .....	25
2.3.1 Material vegetal y cámaras de crecimiento.....	25
2.3.2 Variables evaluadas .....	26
2.3.2.1 Fenología de la floración y evaluación morfológica de la flor .....	26
2.3.2.2 Viabilidad del polen .....	26
2.3.2.3 Cuantificación del número de granos de polen.....	27
2.3.2.4 Cuantificación de óvulos.....	28
2.3.2.5 Análisis histológico y cristales de oxalato .....	28
2.3.2.5 Análisis estadístico.....	29
2.4 Resultados y discusión .....	29
2.4.1 Efecto de la temperatura y CO <sub>2</sub> en las características de las flores .....	29
2.4.1.1 Días de desarrollo floral (DDF) .....	30
2.4.1.2 Longitud de la flor.....	30
2.4.1.3 Color de la flor .....	31

2.4.1.4	Área de cáliz y corola.....	33
2.4.1.5	Longitud del estilo .....	34
2.4.1.5	Longitud y diámetro del ovario.....	35
2.4.1.7	Cantidad de óvulos por ovario .....	36
2.4.1.8	Longitud y diámetro de las anteras .....	36
2.4.1.9	Cantidad y germinación del polen.....	37
2.5	Cortes histológicos en flores de tomate.....	39
2.5.1	Área de las células epidérmicas y parenquimáticas.....	40
2.5.1.1	Área de las células epidérmicas y parenquimáticas de los sépalos.....	40
2.5.1.2	Área de las células epidérmicas y parenquimáticas de los pétalos .....	41
2.5.1.3	Área de las células epidérmicas de las anteras.....	43
2.5.1.4	Área del haz vascular de las anteras.....	44
2.5.1.5	Área de las células epidérmicas y parenquimáticas del ovario .....	47
2.5.1.6	Longitud y diámetro de la placenta.....	48
2.5.1.7	Área del óvulo .....	48
2.6	Cristales de oxalato en las flores .....	49
2.6.1	Cristales de oxalato en los sépalos, pétalos y ovario .....	49
2.7	Conclusiones .....	53
2.8	Literatura citada.....	54

## ÍNDICE DE FÍGURAS

Pág.

Figura 1. Estructuras morfológicas que conforman la flor y fruto del tomate (Dibujo de Guillermo Colli Canché).....	29
Figura 3. Corte transversal de tomate Sépalos (S), anteras (A), ovario (OV) y óvulos (O4). Imagen con la resolución de 4X.....	40
Figura 3. Células epidérmicas y parenquimáticas en los sépalos de dos genotipos criollos (Cr2 y Cr3) y un híbrido (PE) de tomate, cultivados en diferentes concentraciones de temperatura y CO <sub>2</sub> . C1: 30 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C2: 40 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C3: 30 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> y C4: 40 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> . Los datos son $\bar{x} \pm EE$ . $n = 15$ (Cáliz, corola, estilo, ovario) y $n = 10$ (óvulos). Literales diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Duncan, $p \leq 0.05$ ).....	42
Figura 4. Células epidérmicas (E) y parenquimáticas (P) en pétalos de tres genotipos de tomate (A: Criollo 2, B: Criollo 3 y V: Pony Express) cultivados en cámaras con diferentes temperatura y CO <sub>2</sub> (C1: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol mol <sup>-1</sup> de, C2: 40 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C3: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de y C4: 40 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> . Imágenes tomadas a 40X. ....	43
Figura 6. Comparación de las células epidérmicas (E) en las tecas, de tres genotipos de tomate (A: Criollo 2, B: Criollo 3 y V: Pony Express) cultivados en cámaras con diferentes temperatura y CO <sub>2</sub> (C1: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol mol <sup>-1</sup> de, C2: 40 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C3: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de y C4: 40 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> . Imágenes tomadas a 40X. ....	46
Figura 6. Comparación de las anteras, de tres genotipos de tomate (A: Criollo 2, B: Criollo 3 y V: Pony Express) cultivados en cámaras con diferentes temperatura y CO <sub>2</sub> (C1: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol mol <sup>-1</sup> de, C2: 40 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C3: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de y C4: 40 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> . Imágenes tomadas a 40X.....	47
Figura 1. Corte transversal y longitudinal del ovario. En la cámara dos (C2: 40 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol <sup>-1</sup> ) y tres (C3: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol <sup>-1</sup> ), se puede observar el desarrollo anormal de los lóculos carpelares al incrementar la temperatura y la falta de desarrollo en los óvulos. Lóculo carpelar (LC), Pared carpelar (PC), ovario (O), placenta (P). A (Criollo 2), B (Criollo 3), C (Pony Express). C1: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol <sup>-1</sup> , C4: 40 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol <sup>-1</sup> . 40X.....	50

## ÍNDICE DE CUADROS

Pág.

Cuadro 1. Longitud de flor durante los días de desarrollo floral (DDF) de dos genotipos criollos (Cr2 y Cr3) y un híbrido (PE) de tomate, cultivados en diferentes concentraciones de temperatura y CO <sub>2</sub> .....	32
C1: 30 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C2: 40 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C3: 30 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> y C4: 40 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> . Los datos son $\chi \pm EE$ . $n = 15$ . Literales diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Duncan, $p \leq 0.05$ ). .....	32
Cuadro 2. Variables morfométricas de dos genotipos criollos (Cr2 y Cr3) y un híbrido (PE) de tomate, cultivados en diferentes concentraciones de temperatura y CO <sub>2</sub> .....	37
C1: 30 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C2: 40 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C3: 30 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> y C4: 40 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> . Los datos son $\chi \pm EE$ . $n = 15$ (Cáliz, corola, estilo, ovario) y $n = 10$ (óvulos). Literales diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Duncan, $p \leq 0.05$ ). .....	37
Cuadro 3. Variables morfométricas del órgano sexual masculino de dos genotipos criollos (Cr2 y Cr3) y un híbrido (PE) de tomate, cultivados en diferentes concentraciones de temperatura y CO <sub>2</sub> .....	38
C1: 30 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C2: 40 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> , C3: 30 °C y 1200 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> y C4: 40 °C y 400 μmol mol <sup>-1</sup> de CO <sub>2</sub> . Los datos son $\chi \pm EE$ . $n = 15$ (Cáliz, corola, estilo, ovario) y $n = 10$ (óvulos). Literales diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Duncan, $p \leq 0.05$ ). .....	38
Cuadro 4. Variables morfométricas de las células epidérmicas y parenquimatosas de las estructuras florales de dos genotipos criollos (Cr2 y Cr3) y un híbrido (PE) de tomate, cultivados en diferentes concentraciones de temperatura y CO <sub>2</sub> . T (Tratamientos). C1: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol <sup>-1</sup> , C2: 40 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol <sup>-1</sup> , C3: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol <sup>-1</sup> y C4: 40 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol <sup>-1</sup> . Criollo 2 (Cr2). Los datos son $\chi \pm EE$ . $n = 15$ . Literales diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Duncan, $p \leq 0.05$ ). .....	45
Cuadro 5. Variables morfométricas de los cortes histológicos del ovario T (Tratamientos). C1: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol <sup>-1</sup> , C2: 40 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol <sup>-1</sup> , C3: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol <sup>-1</sup> y C4: 40 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol <sup>-1</sup> . Criollo 2 (Cr2). Criollo 3 (Cr3) y Pony Express (PE). (Duncan, $p \leq 0.05$ . Los datos son $\chi \pm EE$ . $n = 15$ . Literales diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Duncan, $p \leq 0.05$ ). .....	49
Cuadro 6. Área y cantidad de los cristales de oxalato T (CaOx). (Tratamientos). C1: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol <sup>-1</sup> , C2: 40 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol <sup>-1</sup> , C3: 30 °C y CO <sub>2</sub> de 1200 μmol <sup>-1</sup> y C4: 40 °C y CO <sub>2</sub> de 400 μmol <sup>-1</sup> . Criollo 2 (Cr2). Criollo 3 (Cr3) y Pony Express (PE). (Duncan, $p \leq 0.05$ . Los datos son $\chi \pm EE$ . $n = 15$ . Literales diferentes en la misma columna indican diferencias estadísticas entre tratamientos (Duncan, $p \leq 0.05$ ). .....	51

## Resumen

La agricultura es una de las actividades que depende directamente de los cambios que se producen en el medio ambiente. Se espera que el cambio climático impacte severamente estas actividades, afectando cultivos de amplia importancia como el tomate. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la fenología, morfología y anatomía floral en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en futuros escenarios de cambio climático. Se utilizaron cuatro cámaras de crecimiento con diferente temperatura y CO<sub>2</sub>. C1: 30 °C y 400 μmol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>; C2: 40 °C y 1200 μmol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>; C3: 30 °C y 1200 μmol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>; y C4: 40 °C y 400 μmol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>. Los resultados demostraron que el incremento de la temperatura a 40 °C y las variaciones del CO<sub>2</sub> afectaron negativamente las estructuras protectoras y reproductoras de las flores, retrasaron de dos a ocho días la antesis floral, afectaron la viabilidad polínica en un 100%, inhibieron la formación del tubo polínico y por consecuencia el transporte de los gametos masculinos a los óvulos. A nivel celular, el incremento de la temperatura deformó y disminuyó en un 100% el área de las células epidérmicas y parénquimas de las estructuras florales. Pero al incrementar el CO<sub>2</sub> 1200 μmol<sup>-1</sup> a 30 °C de temperatura, aumentó el área de las células epidérmicas y parenquimáticas, la viabilidad y la cantidad del polen. Además, independientemente de la temperatura, al aumentar el CO<sub>2</sub>, se incrementó el área de los cristales de oxalato de calcio (CaOx), los cuales se almacenan como depósitos de carbono y cuando la planta se encuentra en estrés térmico, cierra los estomas para evitar la pérdida de agua, y degrada los CaOx para realizar la fotosíntesis, también llamada “fotosíntesis de alarma”.

Palabras clave: anatomía, dióxido de carbono, morfología, *Solanum*, temperatura.

## Abstract

Agriculture is one of the activities that depends directly on the changes that occur in the environment. Climate change is expected to severely impact these activities, affecting crops of great importance such as tomatoes. Therefore, the objective of this research was to evaluate the phenology, morphology and floral anatomy in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) in future climate change scenarios. Four growth chambers with different temperatures and CO<sub>2</sub> were used. C1: 30 °C and 400 μmol<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>; C2: 40 °C and 1200 μmol<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>; C3: 30 °C and 1200 μmol<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>; and C4: 40 °C and 400 μmol<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>. The results showed that the increase in temperature to 40 °C negatively affected the protective and reproductive structures of the flowers, delayed floral anthesis by two to four days, affected pollen viability by 100%, inhibiting the formation of the pollen tube and consequently the transport of the male gametes to the ovules. At the cellular level, the increase in temperature deformed and decreased by 100% the area of the epidermal cells and parenchyma of the floral structures. But increasing the 1200 μmol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> at 30 °C increased the area of the cells, the viability and the amount of pollen. In addition, regardless of the temperature, when the CO<sub>2</sub> increased, the area of the calcium oxalate crystals (CaOx) increased, which are stored as carbon deposits and when the plant is under thermal stress, it closes the stomata to avoid the loss of water, and degrades CaOx to carry out photosynthesis, which is also called “alarm photosynthesis”.

Keywords: anatomy, carbon dioxide, morphology, *Solanum*, temperature.

# CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

## 1.1 Introducción

### 1.1.1 El cambio climático

El sector agrícola es una de las actividades mayores afectadas por el cambio climático, este sector depende del comportamiento del clima resultando vulnerable a los cambios bruscos del ambiente (Hernández-Ramírez *et al.*, 2014; López y Hernández, 2016). Pero ¿qué es el cambio climático? es el calentamiento del planeta causado por el efecto invernadero, debido al acumulamiento excesivo del calor en la atmósfera, por la acumulación de gases (Valtueña, 2004; Vallejo *et al.*, 2011; López y Hernández, 2016; Villanueva *et al.*, 2019), como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), cuyo incremento se aceleró con el inicio de la era industrial (Valtueña, 2004; Yopez y Silveira, 2011), según los datos recabados por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de Estados Unidos, en el período preindustrial las concentraciones de CO<sub>2</sub> en la atmósfera era de 280 partes por millón (ppm) y en la actualidad supera los 400 ppm (Villanueva *et al.*, 2019), por este aumento en las concentraciones de CO<sub>2</sub> se estima que a finales del siglo XXI la temperatura del planeta incrementará entre 2 a 5 °C (Granados y Sarabia, 2013).

### 1.1.2 Afectación del cambio climático en las plantas

El cambio climático es un factor que interviene y delimita la distribución de las plantas, cada especie necesita una temperatura mínima, máxima y óptima para realizar sus procesos biológicos (Gutiérrez *et al.*, 2013) y la exposición a altas temperaturas, afecta los procesos fisiológicos, anatómicos y funcionales como: la respiración mitocondrial, la estabilidad de las membranas, la reducción de la conductancia estomática, el incremento en la densidad de los estomas, tricomas y aumento de tamaño de los vasos del xilema, ocasiona quemaduras y abscisión en las hojas o frutos, inhibe la germinación de semillas, así como el crecimiento del tallo y de la raíz (Bita y Gerats, 2013; Chaves y Gutiérrez, 2017).

### 1.1.3 Efectos de la temperatura y el CO<sub>2</sub> en las flores

Algunas consecuencias del cambio climático serán el incremento de la temperatura promedio del aire y en las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico. Las temperaturas elevadas de forma constante son perjudiciales para las plantas, porque afecta el crecimiento, desarrollo y reproducción, inhiben la germinación de semillas, afecta la fotosíntesis, la estabilidad de las membranas, los niveles de hormonas y los metabolitos secundarios. (Jarma-Orozco *et al.*, 2012).

La etapa de crecimiento de las plantas más afectadas es la fenología reproductiva (Garruña-Hernández *et al.*, 2012), alterando la morfología de los órganos protectores y reproductores de las flores (Polowick *et al.*, 1985), retrasa o adelanta la floración respecto a los factores bióticos y abióticos, reduce la viabilidad polínica y por consecuencia induce al aborto floral (Jagadish *et al.*, 2016).

En especies de cultivo como los garbanzos (*Cicer arietinum*) se observó que el incremento de la temperatura afecta el desarrollo pre-antesis, post-antesis y la polinización, porque los órganos masculinos y femeninos son muy sensibles al estrés por la temperatura, en otras especies de cultivo donde se reportó estos efectos son: *Vigna unguiculata* L., *Phaseolus vulgaris* L., *Zea mays* L., *Mangifera indica* L. (Sukhvibul *et al.*, 1999; Devasirvatham *et al.*, 2012; Jagadish *et al.*, 2016).

En diversos estudios se demostró que el incremento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera tiene un efecto fertilizante en las plantas, pues aumentó la fotosíntesis y la biomasa (Garruña *et al.*, 2012), redujo la conductancia estomática, la transpiración (Reardon y Qaderi, 2017) y estimuló la producción floral, las flores producidas fueron de mayor tamaño e incrementó la producción del néctar haciéndolas más llamativas para los polinizadores (Osborne, 1997).

En un estudio realizado por Koti *et al.* (2005) donde examinaron los efectos en la morfología floral en plantas de soja (*Glycine max*) al exponerlas en distintas concentraciones de CO<sub>2</sub> (360 a 720  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) y temperaturas de 30 a 38 °C, observaron que las plantas cultivadas en altas temperaturas y bajas concentraciones de CO<sub>2</sub> produjeron menos flores, de apariencia marchita, con pétalos más pequeños, se redujo la cantidad, la viabilidad del polen y la longitud del tubo polínico. Por su parte Osborne *et al.* (1997) evaluaron la producción de néctar en flores de *Vicia faba* L. en condiciones de CO<sub>2</sub> enriquecido y observaron que las

plantas producían más néctar y mayor número de flores al incrementar las concentraciones de CO<sub>2</sub>.

Se espera que el cambio climático impacte severamente a nivel global, sus efectos perturbarán todos los ecosistemas, incluso los manipulados por el hombre. En este sentido, la evaluación del impacto del cambio climático en los cultivos es muy importante (Loreto y Barradas, 2017), porque está en riesgo la seguridad alimentaria (Altieri y Nocholls, 2008; Sifuentes-Ibarra, 2012). Por consiguiente, este trabajo tiene como objetivo: evaluar la fenología, morfología y anatomía floral de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en ambientes simulados, para conocer los efectos ocasionados por las altas temperaturas y el incremento de CO<sub>2</sub> atmosférico en los órganos reproductivos.

## 1.2 Antecedentes

### 1.2.1 Generalidades de las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.); efectos producidos por la temperatura y el CO<sub>2</sub>

Varias plantas de la familia Solanaceae Juss. son utilizadas como fuente de alimento por los humanos, entre esta numerosa familia se encuentra el tomate (*S. lycopersicum*) (Escalera *et al.*, 2019). Las plantas de *S. lycopersicum* tienen un crecimiento simpodial, con hojas compuestas, sus flores por lo general tienen cinco sépalos, cinco pétalos de color amarillo o blancas, cinco estambres que forman un cono estaminal alrededor del pistilo (Brukhin *et al.*, 2003) y con frutos tipo baya, de colores variantes entre verdes, amarillos a naranjas y rojos (Kimura y Sinha, 2008).

Las plantas de tomate son cultivadas en todo el mundo (Ud *et al.*, 2015; Escalera *et al.*, 2019), habitan en entornos cálidos, requieren de condiciones óptimas en humedad, luz y temperatura (18 a 30 °C) para su adecuado crecimiento y desarrollo (Allende *et al.*, 2017), si uno de estos factores climáticos excede el grado de tolerancia generará problemas en su metabolismo (Gutiérrez y Trejo, 2013).

Varios estudios se han realizado en ambientes simulados que sustentan los efectos derivados por el incremento de la temperatura en plantas de tomate, donde se observó que las plantas cultivadas a temperaturas óptimas (28 a 30 °C) producen mayor número de flores,

aumentan la cantidad de pétalos y el tamaño del ovario. En alta temperatura (mayor a 33 °C) se adelantó la floración y aumentó el aborto floral, sin embargo, en las plantas que lograron concluir con la floración el ovario tenía menos cantidad de lóculos y la viabilidad polínica se vio reducida (Levy, 1978); Sawhney, 1983 y Lozano *et al.*, 1998).

A nivel celular los efectos provocados por la temperatura pueden darse por dos aspectos; por división, alargamiento o por ambos (McCree y Davis, 1974). En plantas de tomate el rango de temperatura para un buen crecimiento es de 18 a 30 °C, fuera de este rango se producen lesiones y una pérdida irreversible de la actividad metabólica celular, dependiendo del tiempo y de la exposición a la temperatura (Hansel *et al.*, 1994).

Referente al efecto del CO<sub>2</sub> en rangos de 380 a 700 μmol mol<sup>-1</sup>, se ha observado que en plantas de tomates ha inducido al aumento en la cantidad de flores y en el tamaño de los órganos florales (Sung y Chen, 1990; Garruña *et al.*, 2012; Mamantha *et al.*, 2014).

### **1.3 Hipótesis**

La temperatura a 40 °C y la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférica a 400 μmol mol<sup>-1</sup>, retrasarán la floración, reducirán el área de la corola, el cáliz, el tamaño del ovario, la longitud del estilo, de las anteras, la cantidad de polen y óvulos en comparación a los tratamientos con temperatura de 30 °C y 1200 μmol mol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>. Además, ante el incremento de la temperatura las anteras presentarán deformaciones, producirán granos inmaduros de polen poco viable. A nivel histológico independiente de las concentraciones de CO<sub>2</sub>, el incremento de la temperatura reducirá el tamaño de las células epidérmicas y parenquimáticas que conforman la flor.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general**

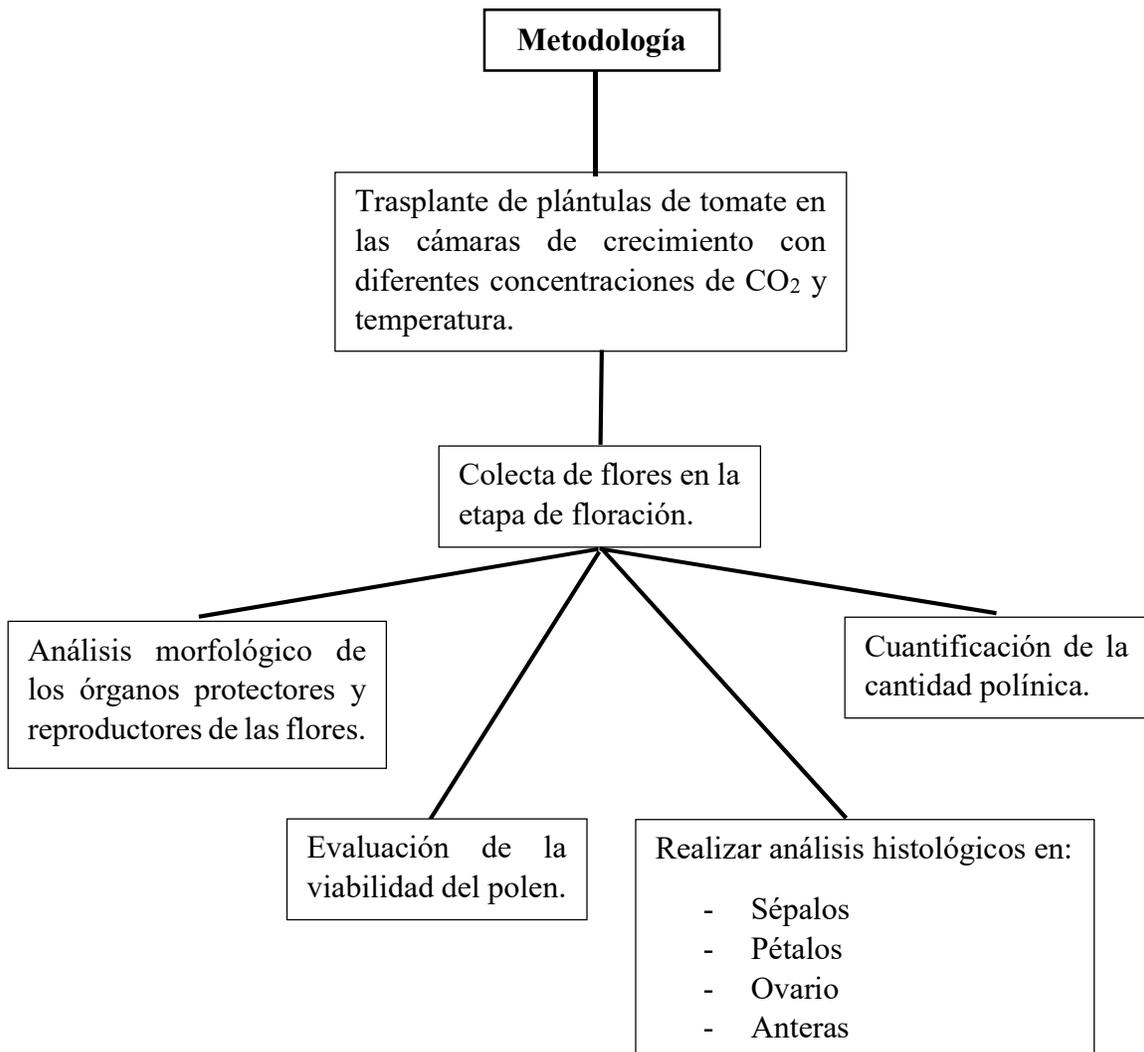
Evaluar los cambios en la fenología, morfología y la anatomía floral de plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en atmósferas con temperatura alta y CO<sub>2</sub> elevado.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

Evaluar el tiempo del desarrollo floral hasta la etapa de antesis y el comportamiento a nivel celular en flores de tomate, en plantas establecidas en atmósferas con temperatura alta y CO<sub>2</sub> elevado.

Evaluar la morfología de los órganos florales (sépalos, pétalos, filamentos, anteras, polen, ovario, óvulos y estilo), la cantidad de óvulos y polen así como su viabilidad, en plantas establecidas en atmósferas con temperatura y CO<sub>2</sub> elevado.

## 1.5 Procedimiento experimental



## 1.6 Literatura citada

- Allende, M., Salinas, L., Rodríguez, F., Olivares, N., Riquelme, J., Antúnez, A., Martínez, J., Corradini, F., Sepúlveda, P., Abarca, P., Guzmán, A., y Felmer, S. 2017. Manual del cultivo de tomate bajo invernadero. 377, Instituto de investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago, Chile.
- Aloni, B., Pressman, E., and Karni, L. 1999. The Effect of Fruit Load, Defoliation and Night Temperature on the Morphology of Pepper Flowers and on Fruit Shape. *Annals of Botany*, 83, 529-534.
- Altieri, M., and Nicholls, C. 2008. Los impactos del cambio climático sobre las comunidades campesinas y de agricultores tradicionales y sus respuestas adaptativas. *Agroecología*, 3, 7-24.
- Bitá, C., and Gerats, T. 2013. Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Frontiers in plant science*, 4, 273.
- Brukhin, V., Hernould, M., González, N., Chevalier, C., and Mouras, A. 2003. Flower development schedule in tomato *Lycopersicon esculentum* cv. sweet cherry. *Sex Plant Reprod*, 15, 311-320.
- Chaves-Barrantes, N., and Gutiérrez-Soto, M. 2017. Crop physiological responses to high temperature stress. II. Tolerance and agronomic treatment. *Agronomía Mesoamericana*, 28(1): 255-271.
- Cohen, B., and Schwartz, P. 2012. CaJOINTLESS is a MADS-box gene involved in suppression of vegetative growth in all shoot meristems in pepper. *J. Exp. Bot.*, 63 (13), 4947-4957.
- Devasirvatham, V., Gaur, P., Mallikarjuna, N., Tokachichu, R., Trethowa, R., and Tan, D. 2012. Effect of high temperature on the reproductive development of chickpea genotypes under controlled environments. *Functional Plant Biology*. 39 (12), 1009.

- Erickson, A., and Markhart, A. 2002. Flower developmental stage and organ sensitivity of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) to elevated temperature. *Plant, Cell and Environment*, 25, 123-150.
- Escalera-Ordaz, A., Guillén, H., Lara, M., Lemus, C., Rodríguez, J., and Valdivia, R. 2019. Characterization of cultivated varieties of *Capsicum pubescens* in Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, esp. pub. núm. 23.
- Garruña-Hernández, R., Canto, A., Mijangos-Cortés, J., Islas, I., Pinzón, L., and Orellana, R. 2012. Changes in flowering and fruiting of Habanero pepper in response to higher temperature and CO<sub>2</sub>. *Journal of Food, agriculture & Environment*, 10 (3-4): 802-808.
- Granados-Ramírez, R., y Sarabia-Rodríguez, A. 2013. Cambio climático y efectos en la fenología del maíz en el DDR-Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4 (3), 435-446.
- Gutiérrez, E., and Trejo, I. 2013. Effect of climatic change on the potential distribution of five species of temperate forest trees in Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 179-188.
- Hansen, L., Afzal, M., Breidenbach, R., and Criddle, R. (1994). High-and low-temperature limits to growth of tomato cells. *Planta*, 195(1), 1-9.
- Hernández-Ramírez, C., Bonales, J., Ortiz, C. 2014. Models of Agricultural Vulnerability to the effects of climate change. *Cimexus*, 2, 31-48.
- Sifuentes-Ibarra, E., and Ojeda, W. 2012. La adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. Impacto del Cambio climático en los recursos hídricos, 1(4), 65-113.
- Jagadish, S. V., Bahuguna, R. N., Djanaguiraman, M., Gamuyao, R., Prasad, P. V., and Craufurd, P. Q. (2016). Implications of High Temperature and Elevated CO<sub>2</sub> on Flowering Time in Plants. *Frontiers in plant science*, 7, 913.
- Jarma-Orozco, A., Cardona, C., and Araméndiz, H. 2012. Effect of climate change on the physiology of crop plants: a review. *U.D.C.A actualidad and divulgación científica*, 15 (1), 63.76.

- Kimura, S., and Sinha, N. 2008. Tomato (*Solanum lycopersicum*): A Model Fruit-Bearing Crop. *Cold Spring Harbor Protocols*. 3 (11).
- Koti, S., Reddy, R., reddy, V., Kakani, V. and Zhao, D. 2005. Interactive effects of carbon dioxide, temperature, and ultraviolet-B radiation on soybean (*Glycine max* L.) flower and pollen morphology, pollen production, germination, and tube lengths. *Journal of Experimental Botany*, 56 (412), 725–736.
- Levy, A., Rabinowitch, H., and Kedar, N. 1978. Morphological and physiological characters affecting flower drop and fruit set of tomatoes at high temperatures. *Euphytica*. 27, 211-218.
- López-Feldman, A., y Hernández-Cortés, D. 2016. Cambio climático y agricultura: una revisión de la literatura con énfasis en América Latina. *El trimestre económico*, 83(332), 459-496.
- Loreto, D., Esperón, M., and Barradas, V. 2017. The climatic-environmental significance, status and socio-economic perspective of the grown-shade coffee agroecosystems in the central mountain region of Veracruz, Mexico. *Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía. UNAM*. 92.
- Lozano, R., Angosto, T., Gómez, P., Payán, C., Capel, J., Salinas, J., and Martínez, J. 1998. Tomato flower abnormalities induced by low temperatures are associated with changes of expression of MADS-Box Genes1. *Plant Physiol*. 117, 91-100.
- Mamatha, H., Srinivasa, N., Laxman, R., Shivashankara, K., Bhatt, R., and Pavithra, K. 2014. Impact of elevated CO<sub>2</sub> on growth, physiology, yield, and quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) cv. Arka Ashish. *Photosynthetica*. 52 (4): 519-528.
- McCree K. and Davis, S. 1974. Effect of Water Stress and Temperature on Leaf Size and on Size 1 and Number of Epidermal Cells in Grain Sorghum. *Crop Science*, 14, 751-755.
- Osborne, J., Awmack, C., Clark, S., Williams, I. and Mills, V. 1997. Nectar and flower production in *Vicia faba* L (field bean) at ambient and elevated carbon dioxide. *Apidologie*, 28, 43-55.
- Polowick, P. and Sawhney, V. 1985. Temperature effects on male fertility and flower and fruit development in *Capsicum annuum* L. *Scientia Hortic.*, 25: 117-127.

- Reardon, M., and Qaderi, M. 2017. Individual and interactive effects of temperature, carbon dioxide and abscisic acid on mung bean (*Vigna radiata*) plants. *Journal of plants interactions*, 12(1), 295-303.
- Sawhney, K. 1983. The role of temperature and its relationship with gibberellic acid in the development of floral organs of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Can. J. Bot.* 61, 1258-1265.
- Skhvibul, N., Whiley, A., Smith, M., Hetherington, E. and Vithanage, V. 1999. Effect of temperature on inflorescence and floral development in four mango (*Mangifera indica* L.) cultivars. *Scientia Horticulturae*. 82, 67-84.
- Sung, F. and Che, J. 1990. Cotyledon Cells and Seed Growth Relationships In CO<sub>2</sub>-enriched Peanut. *Peanut Science*, 17. 4-6.
- Vallejo-Nieto, M., Gurri-García, F., y Molina-Rosales, D. 2011. Agricultura comercial, tradicional y vulnerabilidad en campesinos. *Política y cultura*, 36, 71-98.
- Valtueña, J. 2004. Cambio climático, repercusiones sobre la salud humana. *Offarm: Farmacia y sociedad*. 23(10), 64 -67.
- Villanueva, B., Beltrán, M., y Gómez, R. 2019. Cambio climático y salud. *Revista Clínica Española*. 219 (5), 260-265.
- Yepes, A., y Silveira B. 2011. Respuestas de las plantas ante los factores ambientales del cambio climático global (revisión). *Colombia Forestal*, 14 (2), 213-232.

## CAPÍTULO 2 VARIACIÓN MORFOLÓGICA Y ANATÓMICA DE FLORES DE *Solanum lycopersicum* L. (SOLANACEAE) EN ATMÓSFERAS CON TEMPERATURA ALTA Y CO<sub>2</sub> ENRIQUECIDO

Mauricio Alberto **Castillo-Colli**<sup>1</sup>, Ivón **Ramírez-Morillo**<sup>2</sup>, Laura **Yañez-Espinosa**<sup>3</sup>, René **Garruña**<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Conkal. Av. Tecnológico, 97345, Conkal, Yucatán, México. <sup>2</sup>Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Calle 43 x 32 y 34, No. 130, Chuburná de Hidalgo, 97205, Mérida, Yucatán, México. <sup>3</sup>Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Calle Altair No. 200, Col. del Llano, 78377, San Luis Potosí, SLP., México. <sup>4</sup>CONACYT-Instituto Tecnológico de Conkal. Av. Tecnológico, 97305, Conkal, Yucatán, México.

[mauricio.castillo@itconkal.edu.mx](mailto:mauricio.castillo@itconkal.edu.mx)

[rene.garruna@itconkal.edu.mx](mailto:rene.garruna@itconkal.edu.mx)

### 2.1 Resumen

La agricultura es una de las actividades que depende directamente de los cambios que se producen en el medio ambiente. Se espera que el cambio climático impacte severamente estas actividades, afectando cultivos de amplia importancia como el tomate. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar la fenología, morfología y anatomía floral en plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en futuros escenarios de cambio climático. Se utilizaron cuatro cámaras de crecimiento con diferente temperatura y CO<sub>2</sub>. C1: 30 °C y 400 μmol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>; C2: 40 °C y 1200 μmol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>; C3: 30 °C y 1200 μmol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>; y C4: 40 °C y 400 μmol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub>. Los resultados demostraron que el incremento de la temperatura a 40 °C y las variaciones del CO<sub>2</sub> afectaron negativamente las estructuras protectoras y reproductoras de las flores, retrasaron de dos a ocho días la antesis floral, afectaron la viabilidad polínica en un 100%, inhibieron la formación del tubo polínico y por consecuencia el transporte de los gametos masculinos a los óvulos. A nivel celular, el incremento de la temperatura deformó y disminuyó en un 100% el área de las células epidérmicas y parénquimas de las estructuras florales. Pero al incrementar el CO<sub>2</sub> 1200 μmol<sup>-1</sup> a 30 °C de

temperatura, aumentó el área de las células epidérmicas y parenquimáticas, la viabilidad y la cantidad del polen. Además, independientemente de la temperatura, al aumentar el CO<sub>2</sub>, se incrementó el área de los cristales de oxalato de calcio (CaOx), los cuales se almacenan como depósitos de carbono y cuando la planta se encuentra en estrés térmico, cierra los estomas para evitar la pérdida de agua, y degrada los CaOx para realizar la fotosíntesis, también llamada “fotosíntesis de alarma”.

Palabras clave: anatomía, dióxido de carbono, morfología, *Solanum*, temperatura

## 2.1 Abstract

Agriculture is one of the activities that depends directly on the changes that occur in the environment. Climate change is expected to severely impact these activities, affecting crops of great importance such as tomatoes. Therefore, the objective of this research was to evaluate the phenology, morphology and floral anatomy in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) in future climate change scenarios. Four growth chambers with different temperatures and CO<sub>2</sub> were used. C1: 30 °C and 400 μmol<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>; C2: 40 °C and 1200 μmol<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>; C3: 30 °C and 1200 μmol<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>; and C4: 40 °C and 400 μmol<sup>-1</sup> of CO<sub>2</sub>. The results showed that the increase in temperature to 40 °C negatively affected the protective and reproductive structures of the flowers, delayed floral anthesis by two to four days, affected pollen viability by 100%, inhibiting the formation of the pollen tube and consequently the transport of the male gametes to the ovules. At the cellular level, the increase in temperature deformed and decreased by 100% the area of the epidermal cells and parenchyma of the floral structures. But increasing the 1200 μmol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> at 30 °C increased the area of the cells, the viability and the amount of pollen. In addition, regardless of the temperature, when the CO<sub>2</sub> increased, the area of the calcium oxalate crystals (CaOx) increased, which are stored as carbon deposits and when the plant is under thermal stress, it closes the stomata to avoid the loss of water, and degrades CaOx to carry out photosynthesis, which is also called “alarm photosynthesis”.

Keywords: anatomy, carbon dioxide, morphology, *Solanum*, temperatura.