



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Biosistemas

**TESIS**

Dinámica de Fluidos Computacional aplicada al estudio 3D de la ventilación y temperatura de un conjunto de invernaderos, Amazcala.

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

M.C. en Ingeniería de Biosistemas

**Presenta:**

Ing. Esp. Irving Cesar Ortiz Vázquez

**Dirigido por:**

M.I. Guillermo Alfonso De la Torre Gea

**SINODALES**

M.I. Guillermo Alfonso De la Torre Gea

Presidente

Dr. Enrique Rico García

Secretario

M.C. Adán Mercado Luna

Vocal 1

Dr. Genaro Martin Soto Zarazúa

suplente

Dra. Rosario Guzmán Cruz

Suplente

Dr. Aurelio Domínguez González

Director de la Facultad

  
Firma  
Firma  
Firma  
Firma  
Firma  
Dr. Irineo Torres Páchecho  
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario

Querétaro, Qro.

Diciembre, 2013

México

## RESUMEN

El estudio de las condiciones climáticas juega un factor muy importante para obtener un buen rendimiento en los cultivos bajo invernadero. Los cambios bruscos de temperatura que presentan algunos invernaderos en su interior afectan de manera importante el desarrollo de las plantas. El objetivo del trabajo fue desarrollar un estudio de Dinámica de Fluidos Computacional de tres dimensiones (CFD 3D) para el estudio de las condiciones actuales de los invernaderos del Campus Amazcala Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Se realizaron evaluaciones numéricas sobre el efecto del clima exterior, principalmente temperatura y velocidades del flujo de aire, distribución de los invernaderos, ventilación pasiva o natural, forzada o mecánica sobre su micro-clima al interior del invernadero. El modelo para la simulación fue refinado y validado de acuerdo a evidencias experimentales mediante mediciones en campo obteniéndose un ajuste de 0.71 %. Una vez validado el modelo fue utilizado como herramienta de diseño, mediante la simulación, se evaluaron once tratamientos combinación de cuatro velocidades de viento entre (1-3m/s) y tres a alturas de aplicación (1-4 metros), donde se observa que el viento a menor altura propicia un ambiente menos cálido situación inversa a cuando se aplica el viento a alturas por encima de tres metros. Los cuatro arreglos topológicos para un cultivo de *Lycopersicum esculentum* a densidad de 3.3 plantas•m<sup>2</sup> a tres diferentes alturas: 0.15m sobre el suelo y altura final de dos metros, 0.45 sobre suelo con altura final de tres metros, 0.15 sobre suelo con altura final de dos metros y 0.15 sobre el suelo y altura final de tres metros. Obteniendo que la altura de la base del cultivo no influye en la velocidad del flujo de aire pero si positivamente en la temperatura, lo cual nos indica que la principal influencia del flujo de aire sobre la temperatura es debida a las zonas superiores por encima del cultivo; la simulación evito realizar pruebas físicas de cada una de las condiciones propuestas evitando costos de trabajo y experimentación, pudiendo probar la factibilidad de cada condición y usar la más adecuada para diferentes regiones.

Palabras clave:(Simulación, distribución, clima. invernadero )

## SUMMARY

The study of weather conditions plays a very important factor for good performance in greenhouse crops. Sudden temperature changes which occur within some greenhouses significantly affect plant development. The objective was to develop a Computational Fluid Dynamics of three-dimensional (3D CFD ) to study the current conditions of the greenhouses Amazcala Campus Faculty of Engineering , University of Queretaro . Numerical evaluations were conducted on the effect of the weather outside, mainly temperature and air flow rates, distribution of greenhouses, passive or natural ventilation , forced or mechanical about their micro -climate inside the greenhouse . The simulation model was refined and validated according to experimental evidence obtained by field measurements and adjustment of 0.71 %. Once validated the model was used as a design tool , the simulation is evaluated eleven treatments combining four wind velocities from (1 -3m / s) and three heights of application (1-4 meters) , which shows the wind at lower altitudes less warm atmosphere conducive reverse situation applies when the wind at heights above three meters. The four topological arrangements for a tomato crop density 3.3 saladette to plants • m<sup>2</sup> at three different heights : 0.15m above the ground and final height of two meters , 0.45 on floor with final height of three meters , 0.15 on floor final height of eight feet above the ground and 0.15 final height of three meters. Obtaining the height of the base of the culture does not affect the speed of the air flow but positively in temperature, which indicates that the main influence on the air flow temperature is due to the upper portions above the crop , the simulation avoid physical testing of each of the proposed conditions avoiding work and experimentation costs , and can test the feasibility of each condition and use the most appropriate for different regions.

Keywords: (Simulation, distribution, climate.green house)

## **DEDICATORIAS**

*Principalmente dedico este trabajo con todo mi cariño y mi amor para las personas que me han dado todo en la vida. Mis padres: Tirso Ortiz Gerónimo y Antonina Vázquez García por su amor, esfuerzo, dedicación, apoyo y motivarme, gracias a lo cual he logrado cumplir con las metas que me he propuesto*

*A Dios por su amor y paciencia, ayudándome en los momentos más difíciles por siempre escuchar mis plegarias, iluminando mi camino y prestarme la salud y capacidad para poder llevar a buen fin el presente*

*A Irene: por sacrificar tu tiempo para ayudarme a la elaboración de este trabajo, Por tu cariño, consejos, bondad y sacrificio gracias por estar siempre a mi lado*

*A Mi familia: Por el cariño y esfuerzo colectivo que me impulsa día con día*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Primordialmente agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro y a la Facultad de ingeniería por los conocimientos brindados así como permitirme hacer uso de sus equipos e instalaciones lo que permitió el desarrollo de esta tesis en especial el campus Amazcala F.I.*

*A mis directores quienes me compartieron sus conocimientos para la elaboración total de nuestro trabajo asiendo así posible el desarrollo totalmente.*

*A mis sinodales: Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa, M.C. Adán Mercado Luna y a la Dra. Rosario Guzmán a todos gracias por su valioso tiempo y apoyo para mejorar el presente documento.*

*A los profesores de los programas de posgrado del campus Amazcala: por brindaron su sabiduría en varios campos del conocimiento, consejos, comprensión, dedicación y compromiso.*

*A mis compañeros de generación y de campus por siempre estar acompañándome y ayudándome en los momentos que requeríamos ayuda, por compartir conocimientos para poder lograr superar los retos que*

*representaron algunas de las materias que cursamos juntos en especial a quienes tanto me apoyaron académicamente Humberto y perla*

*A mis amigos Karla, Areli, Rodrigo y Alejandro por su valioso apoyo, ánimos y toda la ayuda prestada*

*A quienes laboran en el campus Amazcala por su colaboración, apoyo y esfuerzo.*

*Agradezco el apoyo otorgado por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) durante el periodo de dos años que dura el programa de maestría*

*A todos aquellos que no mencioné y que brindaron su apoyo bien intencionado y desinteresado*

|  |     |
|--|-----|
| <b>Resumen</b>   | i   |
| <b>Summary</b>   | ii  |
| <b>Dedicatoria</b>                                       | iii |
| <b>Agradecimiento</b>                                    | iv  |
| <b>Índice</b>  | vi  |
| <b>Índice de figuras</b>                                 | ix  |
| <b>Índice de cuadros</b>                                 | xii |
| <b>I. Introducción</b>                                   | 1   |
| 1.1 Importancia del sistema de invernadero.              | 2   |
| 1.2 Estado actual de los cultivos protegidos en México.  | 2   |
| 1.3 Importancia de los cultivos en invernadero en México | 4   |
| 1.4 Tipos de Ventilación en invernaderos                 | 5   |
| 1.4.1 Ventilación natural o pasiva                       | 5   |
| 1.4.2 Ventilación Mecánica o forzada                     | 5   |
| 1.5 Descripción del problema                             | 6   |
| 1.6 Justificación  | 7   |
| 1.7 Objetivos e hipótesis.                               | 8   |
| 1.7.2 Objetivo general.                                  | 8   |
| 1.7.3 Objetivo particular.                               | 8   |
| <b>II. Revisión bibliográfica</b>                        | 9   |
| 2.1 Invernadero.   | 9   |
| 2.2 Estado actual de los cultivos protegidos en México.  | 12  |
| 2.3 Tendencias en el diseño de invernaderos              | 13  |
| 2.3.1 Extensión común del invernadero Mexicano           | 14  |
| 2.3.2 Tipos de estructuras utilizadas                    | 14  |

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| 2.4         | Problemas climáticos de los invernaderos mexicanos                 | 16        |
| 2.5         | Temperatura.   | 16        |
| 2.6         | La ventilación.  | 18        |
| 2.7         | Humedad Relativa.  | 19        |
| 2.8         | Dióxido de carbono y su concentración (CO <sub>2</sub> ).          | 19        |
| 2.9         | Dinámica de Fluidos Computacional.                                 | 20        |
| 2.9.1       | Ecuación de la temperatura dentro del invernadero                  | 21        |
| 2.9.2       | Ecuación de temperatura del suelo                                  | 22        |
| 2.9.3       | Ecuación concentración de CO <sub>2</sub>                          | 22        |
| 2.9.4       | Ecuación de la humedad   | 22        |
| 2.10        | Desarrollo de la Dinámica de Fluidos Computacional                 | 23        |
| 2.11        | Modelación climática.  | 24        |
| 2.11.1      | Técnicas para el modelamiento.                                     | 25        |
| 2.11.2      | Validación (Simulaciones vs. Experimento)                          | 25        |
| 2.12        | Antecedentes   | 26        |
| 2.12.1      | Trabajos relevantes en la modelación climática.                    | 26        |
| <b>III.</b> | <b>Metodología</b>   | <b>29</b> |
| 3.1         | Ubicación del área de investigación.                               | 29        |
| 3.2         | Infraestructura.   | 30        |
| 3.3         | Principales características de los invernaderos objeto de estudio. | 30        |
| 3.4         | Material biológico.  | 31        |
| 3.5         | VARIABLES de estudio.  | 32        |
| 3.6         | Mediciones de condiciones climáticas                               | 32        |
| 3.6.1       | velocidad y dirección del viento                                   | 32        |
| 3.6.2       | Temperatura  | 34        |



|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 3.6.3      | Concentración de CO <sub>2</sub> y humedad relativa               | 35        |
| 3.6.4      | Medición de las variables al exterior.                            | 35        |
| 3.7        | Definición del dominio o frontera                                 | 36        |
| 3.8        | Dinámica para el análisis   | 36        |
| 3.9        | Espacios de cultivo y su orientación.                             | 38        |
| 3.10       | Desarrollo del modelo CFD   | 40        |
| 3.11       | Solución  | 42        |
| 3.12       | Validación Modelo CFD   | 42        |
| <b>IV.</b> | <b>Resultados y discusión</b>                                     | <b>44</b> |
| 5.1        | Caracterización de las condiciones climáticas                     | 44        |
| 5.2        | Características de las aproximaciones cfd                         | 45        |
| 5.3        | Validación del “modelo” cfd                                       | 47        |
| 5.4        | Comportamiento de velocidad del aire y temperatura en el conjunto | 48        |
| 5.5        | Simulación de diferentes condiciones de cultivo                   | 52        |
| 5.6        | Velocidades de aire a diferentes alturas de cultivo               | 54        |
|            | Conclusiones  | 57        |
|            | Recomendaciones   | 58        |
|            | Fuentes bibliográficas  | 59        |

## Índice de figuras

| Figura | Título  | Página |
|--------|---|--------|
| 1.     | Superficie dedicada a los invernaderos en los últimos nueve años (SAGARPA 2010).  | 3      |
| 2.     | Países con las mayores superficies destinadas a agricultura protegida   | 4      |
| 3.     | Ventilación natural en invernadero  | 5      |
| 4.     | Ventilación mecánica en invernadero   | 6      |
| 5      | Efectos perjudiciales debidos a las condiciones adversas del clima  | 9      |
| 6      | . Invernadero en invierno   | 10     |
| 7      | Control de la temperatura e intercambio de Co <sub>2</sub> por medio de ventanas  | 11     |
| 8      | . Heterogeneidad en la tecnología en invernaderos en México.  | 11     |
| 9      | . Superficie dedicada a los invernaderos en los últimos nueve años (SAGARPA 2010).  | 12     |
| 10     | . Proceso de construcción del modelo computacional. A) Selección del invernadero a modelar. B) Se genera la geometría. C) Se realiza el mallado. D) Modelo por simular. | 13     |
| 11     | Estructuras de invernaderos en México.  | 14     |
| 12     | El acero principal material de un invernadero   | 15     |
| 13     | Ejemplo de aplicaciones del CFD.  | 23     |
| 14     | . Ubicación geográfica del experimento en el estado de  | 29     |

|    |   |    |
|----|---|----|
|    | Querétaro, El Marques, Amazcala   |    |
| 15 | Conjunto de Invernaderos del Campus Amazcala F.I. –<br>U.A.Q  | 30 |
| 16 | Invernadero comercial Amazcala  | 31 |
| 17 | Cultivo de tomate en los invernaderos del campus  | 31 |
| 18 | A) mediciones con cultivo, B) mediciones sin cultivo  | 32 |
| 19 | Mediciones puntos de interes  | 33 |
| 20 | Alturas de cultivo y distribución de los puntos al interior<br>de los invernaderos                  | 34 |
| 21 | . Laser radiación esteren, y Dataloger ALMEMO2590.  | 35 |
| 22 | Estación meteorológica  | 36 |
| 23 | Diagrama de la dinámica de proceso de desarrollo  | 37 |
| 24 | Alturas de cultivo  | 38 |
| 25 | Geometría y mallado(mesh) del conjunto de<br>invernaderos   | 40 |
| 26 | Descomposición por componentes A), Determinación de<br>la zona de dominio B)                        | 41 |
| 27 | Planos de localización punto de interes   | 43 |
| 28 | Correlación temperatura humedad   | 45 |
| 29 | Gradientes de temperatura corte de este a oeste<br>invernaderos experimentales y 2500m <sup>2</sup> | 45 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 30 | Gradientes de temperatura corte de este a oeste<br>invernadero 5600m <sup>2</sup>   | 48 |
| 31 | Solución mallado tetrahedrons   | 49 |
| 32 | Comportamiento del flujo de aire con cultivo  | 49 |
| 33 | Distribucion de temperaturas invernaderos<br>experimentales   | 49 |
| 34 | Distribución de temperaturas invernadero comercial<br>5600m <sup>2</sup>  | 50 |
| 33 | Validación del modelo CFD.  | 46 |
| 34 | Relación entre la velocidad del flujo de aire y la<br>temperatura   | 49 |
| 35 | Movimientos del aire al interior del invernadero en base a la<br>ventilación natural aunada a la ventilación mecánica   | 50 |
| 36 | Temperatura al interior del invernadero con los dos sistemas de<br>ventilación  | 51 |
| 37 | temperatura y velocidad aire Invernaderos experimentales ic   | 51 |
| 38 | Relación entre la velocidad del flujo de aire y la<br>temperatura   | 54 |
| 39 | Análisis de altura y velocidad del viento   | 55 |
| 40 | Comportamiento del aire y temperatura al interior del<br>invernadero a partir de las velocidades propuestas al interior y<br>ventanas del invernadero de 5600 | 56 |
| 41 | Comportamiento del aire al interior del invernadero a partir de<br>las medidas de velocidad del aire al interior con ventiladores y<br>ventanas               | 56 |

## Índice de cuadros

| Tabla | Título  | Página |
|-------|---|--------|
| 1.    | Ventajas del uso de invernaderos sobre el sistema tradicional   | 2      |
| 2.    | Temperaturas a controlar para algunos hortalizas (agricultura chilena2012)                            | 17     |
| 3.    | Distribución de los puntos  | 34     |
| 4.    | Cuatro velocidades de aire a tres alturas   | 38     |
| 5.    | Valores para definir características asignar en setup materials para cada componente                  | 41     |
| 6.    | Condiciones climáticas al interior del invernadero 5600 m <sup>2</sup>                                | 44     |
| 7.    | Características del mallado conjunto Amazcala   | 46     |
| 8.    | Comportamiento del flujo de aire con cultivo Prueba de significancia <i>t</i> de Student para T1 y T2 | 53     |

## INTRODUCCION

El uso de invernaderos en México ha incrementado en un 900% en los últimos nueve años 2001-2010 (SAGARPA-FIRA, 2010) además es uno de los temas más actuales de investigación en la producción de cultivos, el cambio de las condiciones atmosféricas hace necesario proteger a los cultivos con invernaderos que permitan controlar el ambiente, esto hace de los invernaderos uno de los objetos actuales de investigación tanto nacional como internacional en la producción de cultivos. De tal forma que la descripción y control del clima al interior de los invernaderos, así como sus cambios por la interacción de los factores: temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>, humedad relativa, radiación, dirección y velocidad del viento, sean de igual interés ya que repercuten en el ambiente al interior de un invernadero, influyendo fuertemente en el proceso de crecimiento de las plantas y el rendimiento en la producción, Uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura en invernaderos, sobre todo en regiones de clima cálido, es moderar y controlar los problemas derivados del incremento de temperatura que ocurre en marcados periodos del año, ya que reducen la calidad y cantidad de la cosecha. En consecuencia, un buen diseño de invernadero implica a los sistemas de ventilación, cubiertas y las condiciones climáticas (De la Torre-Gea, 2012) en invernaderos sin control climático sus condiciones climáticas internas son totalmente dependientes del clima exterior, por lo que es necesario realizar ajustes internos para controlar el ambiente interior y compensar los efectos ejercidos por el ambiente exterior de la (De la Torre-Gea, 2012). El microclima de un invernadero puede ser estudiado por experimentación o simulación, tomando en cuenta que este último resulta ser un método más rápido, de menor costo, y más flexible (Wang y Boulard, 2000). Se han realizado estudios en dinámica de fluidos computacional acerca de diferentes estructuras de invernadero y el comportamiento de estas variables a su interior. Pero en la actualidad no se ha hecho un estudio en CFD que implique a un conjunto de invernaderos con diferentes geometrías y dimensiones y como estos se benefician o se interponen entre sí. Lo cual resultara muy benéfico para la toma de

decisiones para mejorar las condiciones climáticas de un grupo de invernaderos. El objetivo de este estudio fue conocer la dinámica que existe entre estos invernaderos y sus condiciones climáticas para proponer estrategias de control en base a la información obtenida, y de esta manera optimizar la producción.

### 1.1 Importancia del sistema de invernadero.

El paso de los sistemas agrícolas tradicionales a los modernos permite seguir alimentando a una población en crecimiento. La producción de cultivos en invernadero es la técnica moderna más usada en la producción agrícola, con ventaja sobre el método tradicional a cielo abierto (Tabla 1). Los invernaderos consisten en barreras entre el ambiente externo y el cultivo, que posibilitan la creación de un microclima que protege a los cultivos (Castañeda *et al.*, 2007).

Tabla 1. Ventajas del uso de invernaderos sobre el sistema tradicional

| Sistema       | Requerimiento de agua<br>litro/kg materia solida | Rendimiento<br>Tonelada/hectárea | Ventajas<br>Adicionales        |
|---------------|--|----------------------------------|--------------------------------|
| Campo abierto | 89 L/kg (tomate )                                | 70 ton/ha                        | -----                          |
| Invernadero   | 20 a 48 L/kg                                     | 350ton/ha(tomate)                | Aprovecha suelos<br>degradados |

Fuente :Domínguez et al,1999;SAGARPA,2012

### 1.2 Estado actual de los cultivos protegidos en México.

México se encuentra entre los principales productores y exportadores de hortalizas en el mundo Desde principios de 2000, nuestro país ha Figurado como uno de los principales exportadores de hortalizas, Ocupando el tercer lugar de 2002 hasta 2006 como exportador de hortalizas, después de Países Bajos y España. En los últimos nueve

años, el uso de invernaderos en la producción de hortalizas en México se ha incrementado alrededor de un 900 % como se muestra en la Figura 1. Sin embargo, el 71% son de baja tecnología (AMPH, 2004; SAGARPA, 2010; FIRA, 2010), por lo que es necesario desarrollar tecnologías propias que respondan a las condiciones particulares e nuestra región.

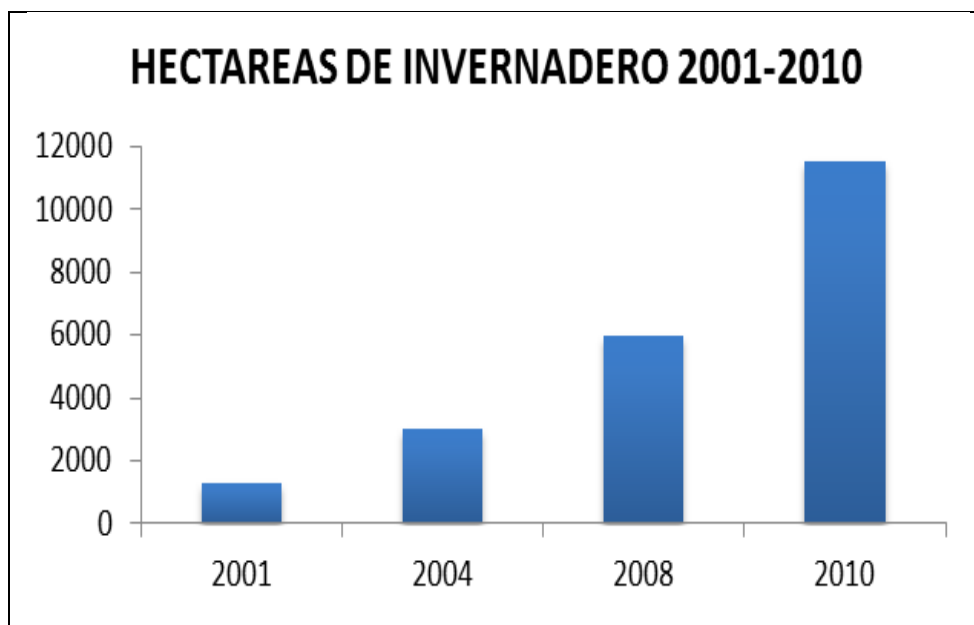


Figura 1. Superficie dedicada a los invernaderos en los últimos nueve años (SAGARPA 2010).

Para el caso del estado de Querétaro es además una excelente alternativa ante el riesgo del cambio climático la superficie dedicada a la agricultura protegida prácticamente se triplicó en los últimos 5 años, si tomamos en consideración que en 2006 ésta era de 82.01352 has., en tanto que para 2011 suma 240.61 has. Asimismo, las unidades de producción se incrementaron en casi tres veces y media en ese período (sede 2011).



### 1.3 Importancia de los cultivos en invernadero en México

México se encuentra entre los 14 países con superficie agrícola bajo invernadero (Figura 2) (Castañeda *et al.*, 2007). Siendo los estados con mayor área de invernadero Sinaloa con el 26.6% seguidos de Baja California y Baja California Sur con el 13.8% respectivamente, Estado de México con el 10.3%, Jalisco con el 6.5%, Morelos con el 5.2%, entre el resto que a un no tienen una relevancia comparativa entre los datos anteriores. Dedicados principalmente al tomate con el 70%, seguido de pimiento morrón con el 16%, pepino con el 10% y el resto de productos con un 4%.

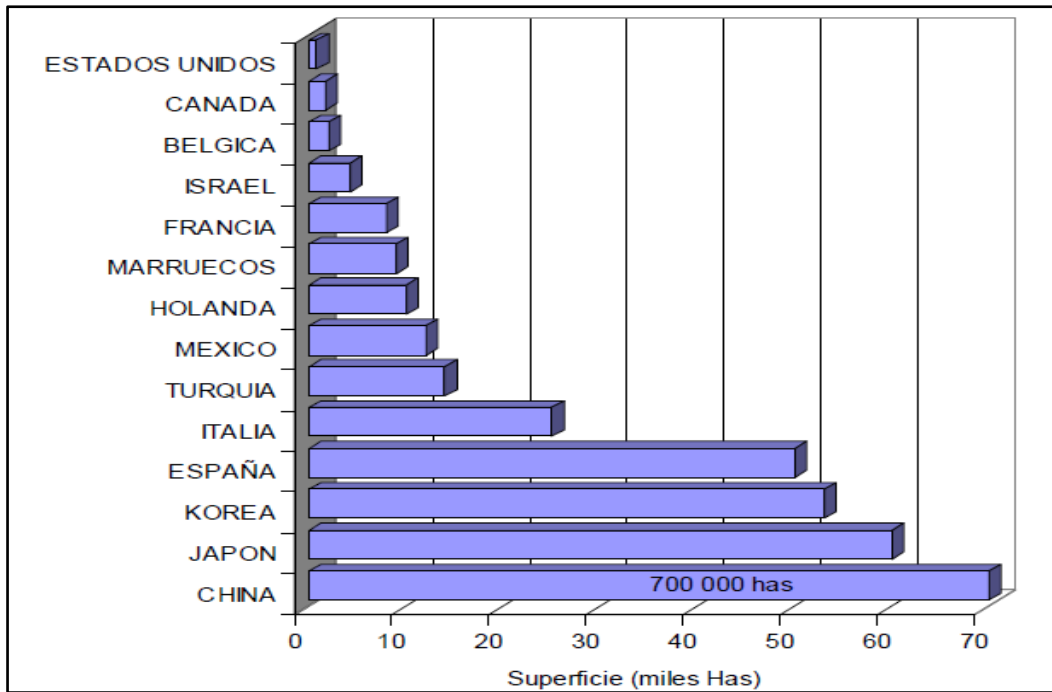


Figura 2. Países con las mayores superficies destinadas a agricultura protegida

## 1.4 Tipos de Ventilación en invernaderos

### 1.4.1 Ventilación natural o pasiva

La ventilación natural se define como el movimiento del viento externo impulsado al interior del recinto sin necesidad de implementos o actuadores mecánicos que ocasiona la diferencia de temperatura entre el invernadero y el aire exterior, como se muestra en la Figura 3. Es uno de los principales procesos para determinar el microclima de un invernadero. La ventilación natural es más usada en México que la ventilación mecánica o forzada por el menor costo de instalación y mantenimiento (Fernández and Bailey, 1992; Boulard and Baille, 1995; Kittas *et al.*, 1997; Bouchet *et al.*, 2003; Teitel *et al.*, 2005).

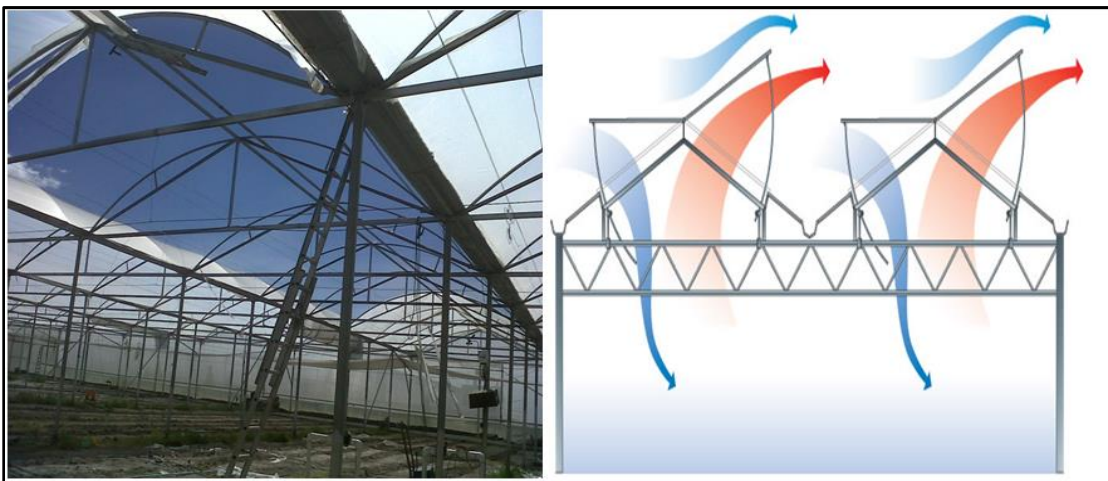


Figura 3. Ventilación natural en invernadero

### 1.4.2 Ventilación Mecánica o forzada

Los sistemas de ventilación forzada consisten en establecer una corriente de aire mediante ventiladores o extractores (Figura 4), en la que se extrae el aire caliente del invernadero, y el volumen extraído es ocupado inmediatamente por aire de la atmósfera exterior. Con este sistema solamente se puede conseguir una temperatura idéntica a la del exterior, pero su control es más preciso que el que se logra con la

ventilación pasiva. (Fernandez and Bailey, 1992; Boulard and Baille, 1995; Kittas *et al.*, 1997; Bouchet *et al.*, 2003; Teitel *et al.*, 2005).



Figura 4. Ventilación mecánica en invernadero

### 1.5 Descripción del problema

En los últimos años se ha incrementado considerablemente el uso de invernaderos en el ámbito agrícola, debido a que los invernaderos ofrecen diversos beneficios como sembrar sus cultivos casi durante todo el año obteniendo una mayor calidad de frutos y rendimiento. Uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura en invernaderos, sobre todo en regiones de clima cálido, es moderar y controlar los problemas derivados del incremento de temperatura que ocurre en marcados periodos del año, ya que reducen la calidad y cantidad de la cosecha. Los cambios bruscos de temperatura que presentan algunos invernaderos en su interior afectan de una manera importante el desarrollo de las plantas, la falta de ventilación incide también negativamente en la composición del aire interior, principalmente al producirse déficits en la concentración de  $\text{CO}_2$  (Hand, 1984; Lorenzo y col., 1990; Lorenzo, 1994). Ello se debe a que la entrada de aire externo es la principal fuente de  $\text{CO}_2$  de los cultivos en aquellos invernaderos que no cuentan con enriquecimiento carbónico, como son la mayoría de los situados en zonas cálidas (Mistriotis y col.,

1997). Estos cambios de temperatura pueden causar daños irreparables tanto en las plantas como en los frutos. Los invernaderos que carecen de control de las variables ambientales o climáticas sufren de innumerables variaciones de temperatura que se dan durante todo el día en su clima interior (esto dependen de la estación del año así como del lugar donde este), lo que crea un ambiente interno inadecuado para el desarrollo y crecimiento de las plantas y afecta directamente a la calidad, productiva y rentabilidad de los invernaderos. En el campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro a últimas fechas se han instalado ventiladores, extractores, humidificadores en algunos de los invernaderos además se han creado nuevos invernaderos, lo que ha generado un desconocimiento de cómo estas nuevas condiciones impactan en el conjunto de invernaderos. Por lo cual es necesario aplicar un análisis mediante un modelo numérico, como lo es el de dinámica de fluido computacional (CFD) para el análisis climático del conjunto de invernaderos, al cual se analizaran las variables escalares de temperatura (suelo, cultivo y aire), ventilación y niveles de CO<sub>2</sub> en condiciones exteriores y sabremos si tenemos una adecuada homogeneidad de las variables.

## 1.6 Justificación

Mantener un clima favorable al interior de un invernadero implica evacuar el exceso de calor producido en los momentos de alta insolación (Montero et al., 2001). En consecuencia, un buen diseño de invernadero implica a los sistemas de ventilación y cubierta que ha de permitir un mejor control del clima, lo que repercute en un mejor desarrollo del cultivo y su rendimiento (Flores-Velázquez).

## 1.7. Objetivos e hipótesis.

### 1.7.1. Hipótesis.

Mediante la Dinámica de Fluidos Computacional es posible obtener una estimación entre las condiciones medidas y estimadas del clima dentro de un invernadero

### 1.7.2 Objetivo general.

Realizar un estudio mediante Dinámica de Fluidos Computacional que nos permita conocer las condiciones actuales del conjunto de invernaderos área de horticultura del campus Amazcala, U.AQ.

### 1.7.3 Objetivo particular.

Analizar y proponer mejoras a las condiciones del conjunto de invernaderos campus Amazcala, UAQ mediante el uso de diferentes condiciones

## II REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Invernadero.

Un problema frecuente entre los cultivadores a cielo abierto es la amenaza constante de las variaciones de condiciones climáticas (Figura 5). Como ejemplo se tienen variaciones atípicas en la temperatura, la falta o exceso de lluvia y los cambios fuertes en la humedad ambiental, entre otras. (Leal-Igaj et al., 2006).



Figura 5. Efectos perjudiciales debidos a las condiciones adversas del clima

Un invernadero es un sistema productivo capaz de proporcionar cosechas fuera de la temporada en la que se producen a cielo abierto; su objetivo es proporcionar protección y condicionar los principales elementos del clima entre límites que estén de acuerdo con las exigencias fisiológicas del cultivo, de forma tal que el sistema resulte económicamente rentable (García *et al.*, 1999). Las ventajas en el uso de invernaderos son proteger el cultivo del viento, lluvia, plagas, enfermedades, hierbas (Figura 6), aumento de la calidad y del rendimiento, producción fuera de época, ahorro de agua y fertilizantes, así como mejorando el control de plaga y enfermedades. La posibilidad de obtener más de un ciclo de cultivo al año, le permite al agricultor controlar la temperatura, la cantidad de luz y aplicar efectivamente el control de plagas y enfermedades para proteger al cultivo (Rico-García, 2008).



Figura 6. Invernadero en invierno

En México los invernaderos que comúnmente se utilizan son de baja tecnología, carecen de climatización controlada, en algunos casos el manejo de temperatura y humedad se realiza mediante la implementación de ventiladores móviles laterales pero en el 71% se realiza controlando la altura de columnas, y el tamaño de apertura de las ventanas cenitales (AMHPAC, 2009).

Otro tipo de invernaderos cuentan con climatización controlada, en donde el manejo de la temperatura y la humedad se realizan por medio de un sistema de calefacción, control de la concentración de CO<sub>2</sub>, aperturas móviles de las ventanas laterales y de la cobertura (Figura 7).



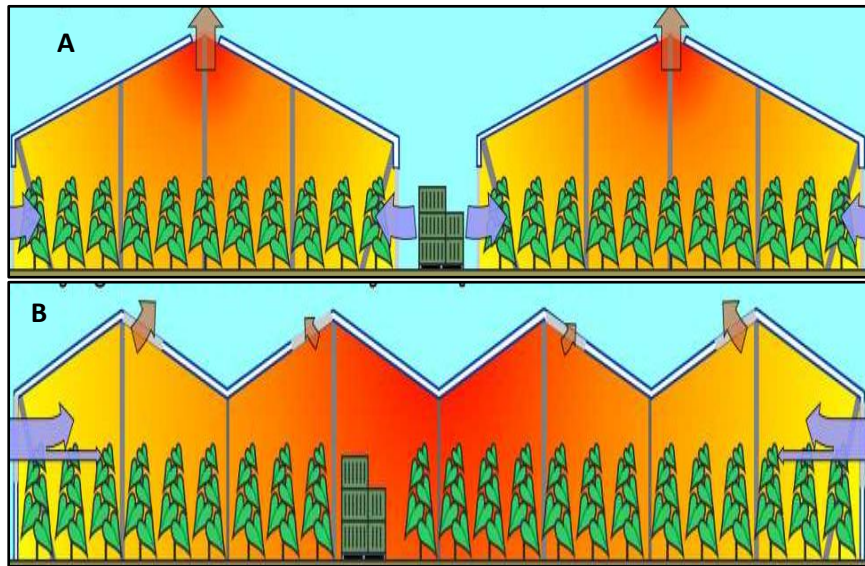


Figura7 Control de la temperatura e intercambio de CO<sub>2</sub> por medio de ventanas  
 A) Apertura para conservación de energía B) Apertura para disipar energía

Existen diferentes tipos de invernaderos con base a su construcción, ya sean invernaderos de madera, estructurales de acero y mixtos (Jácome-Cerda *et al.* 2008); los países que más han adoptado esta tecnología son aquéllos con condiciones climáticas adversas como lo es en Europa, Asia y América del Norte. (Jiménez, 1999).



Figura 8. Heterogeneidad en la tecnología en invernaderos en México.



## 2.2 Condición y distribución a de los cultivos en invernadero en México.

Cuatro estados concentran la mayor superficie de cultivo en invernadero Sinaloa (30%), Baja California (16%), Estado de México (12%) y Jalisco (7%). Estas entidades aportan más del 50% de la producción total de cultivos protegidos. Tomate es el principal cultivo bajo agricultura protegida (70%) en México (roma, bola, cherry), seguido de pimiento (en todos sus colores), pepino (europeo y americano), berenjena y chile picoso. El 60% de la producción en invernadero se exporta y el 70% de dicho volumen de exportación corresponde a tomate. Por otra parte, México no cuenta con suficiente personal técnico capacitado en la producción en invernaderos, y la mayoría de productores con espacio productivo inferior a 5 hectáreas (SAGARPA 2010).

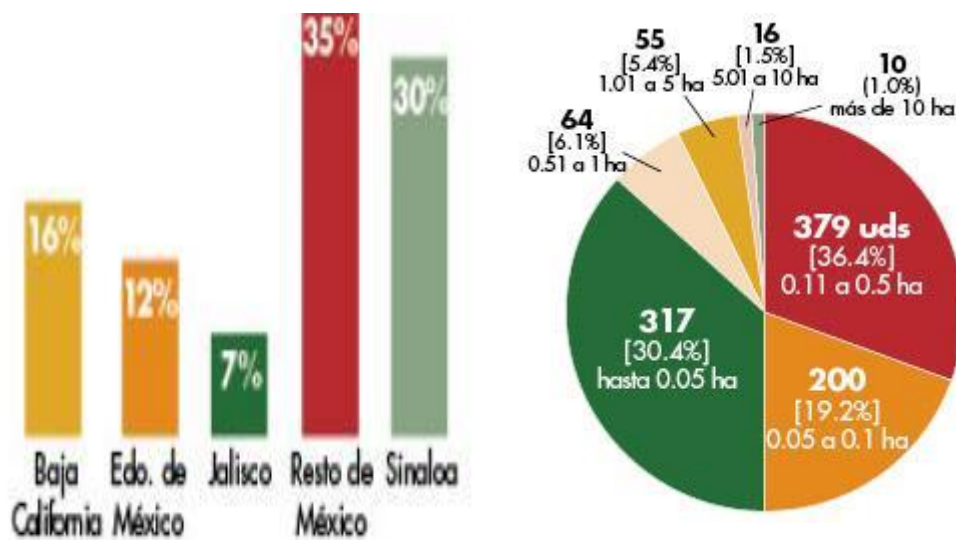


Figura 9. Concentración y amaño de la superficie Protegida en México

### 2.3 Tendencias en el diseño de invernaderos

Estudios sobre la energía de bajo costo han concluido que se ha vuelto imperioso ser más eficiente en su uso, siendo un factor clave en su aplicación. Actualmente, la tendencia en las aplicaciones nos lleva al uso de nuevas tecnologías y herramientas que conduzcan a un adecuado diseño de invernaderos como el CFD (Computacional Fluid Dynamics), las cuales consisten en tecnologías computacionales (Figura 10) que permiten simular el efecto de estructural la interna y su interacción con el ambiente para evaluar los sistemas de ventilación en el microclima del invernadero a la vez se incorporan sistemas fotovoltaicos, sistemas que reutilizan el agua y aumentan la eficiencia del CO<sub>2</sub>. Sin embargo todavía hay mucho espacio para mejorar y optimizar las estructuras actuales de los invernaderos (A.J. Both del Departamento de Ciencias Ambientales de la Universidad de Rutgers, EE.UU.).

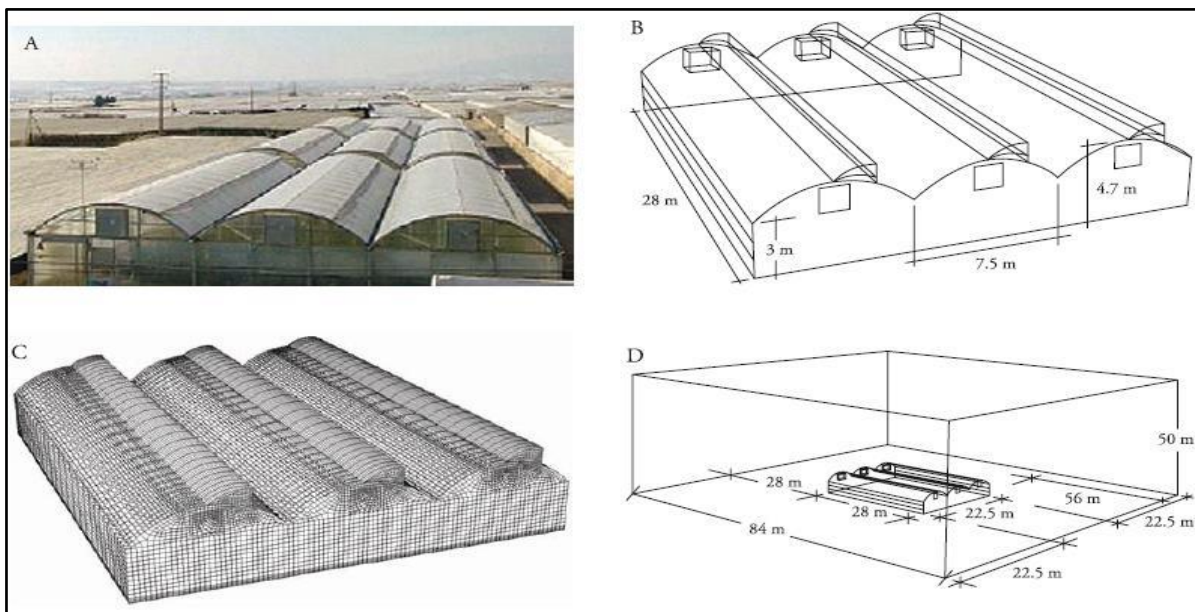


Figura 10. Proceso de construcción del modelo computacional. A) Selección del invernadero a modelar. B) Se genera la geometría. C) Se realiza el mallado. D) Modelo por simular.

### 2.3.1 Extensión común del invernadero Mexicano

En México es posible encontrar una gran heterogeneidad en la distribución de invernaderos, siendo estos distribuidos en prácticamente todo el territorio con superficies que oscilan entre 0.5 hectáreas, hasta los 200 hectáreas, en donde la mayor parte de éstos solo cuentan con ventilación natural, estructuras metálicas, recubrimiento de plástico en techo y laterales y no cuentan con sistemas de control automatizado; la mayoría pertenece a pequeños productores. El 84% de la superficie se concentra en seis estados: Sinaloa, Jalisco, Baja California Sur, Baja California Norte, Sonora y Estado de México (Guantes, 2006).



Figura 11. Estructuras de invernaderos en México.

### 2.3.2 Tipos de estructuras utilizadas

La forma del invernadero influye especialmente en la captación de la energía solar, por lo que su diseño se toma en función de los niveles de radiación solar de la zona en la que se pretende situar el invernadero, observándose una fuerte relación entre

la forma de la cubierta, su geometría y orientación en la captación de radiación solar (Rodríguez-Díaz, 2009).

En México el acero es el material que representa más del 50 % del costo en la construcción de un invernadero (Figura 12), el resto se distribuye en las cubiertas de plástico y las mallas anti-áfidos; esto representa más del 95 % de dichas estructuras de metal, 94% la cubierta de plástico, un 4 % es de vidrio y el resto, otro tipo de material tales como el policarbonato (Flores Velázquez, 2010).



Figura 12. El acero principal material de un invernadero

## 2.4 Problemas climáticos de los invernaderos mexicanos

Uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura en invernaderos es moderar y controlar el incremento de temperatura que ocurre en marcados periodos del año en regiones de clima cálido, ya que reducen la calidad y cantidad de la cosecha. La producción agrícola en México se encuentra estancada debido a una diversidad de factores naturales, económicos sociales y desde luego políticos, destacando el hecho de que la superficie de labor dejó de crecer en los últimos años. Desde el punto de vista de una agricultura convencional, de los 200 millones de hectáreas que tiene el territorio nacional solo 20 millones son susceptibles de cultivar, y de ésta sólo el 10 % está en uso (Flores Velázquez, 2010).

## 2.5 Temperatura.

La temperatura es el parámetro de mayor importancia a controlar dentro del invernadero, ya que es el factor que presenta una mayor influencia sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas. Cada cultivo tiene su temperatura óptima y normalmente se puede hablar de un rango entre 10 y 25°C para su óptimo desarrollo (Garza Arizpe, Mario; Infoagro De aquí la importancia de la temperatura exterior que, además de afectar en gran manera a la temperatura al interior del invernadero, constituye un factor clave para el buen desarrollo de los cultivos.

Para el manejo de la temperatura al interior de los invernaderos, es importante conocer las necesidades y limitaciones de la especie cultivada. Uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura en invernaderos, sobre todo en regiones de clima cálido, es moderar y controlar los problemas derivados del incremento de temperatura que ocurre en marcados periodos del año, ya que reducen la calidad y cantidad de la cosecha. La ventilación afecta en primer lugar a la temperatura interna. Todos los invernaderos necesitan evacuar el exceso de calor que se produce en los momentos de alta insolación. Las plantas necesitan un ambiente favorable en el que sean capaces no

sólo de vivir sino también de producir, La temperatura controlada es importante para el buen desarrollo del cultivo por lo que hay que tener en cuenta los siguientes niveles según la especie que se esté cultivando. En la Tabla 1 se muestran los rangos de temperaturas mínimas, máximas nocturnas y diurnas.

Tabla 2. Temperaturas a controlar para algunas hortalizas.

| Temperatura      | Tomate | Pimiento | Berenjena | Pepino | Melón | sandia |
|------------------|--------|----------|-----------|--------|-------|--------|
| Temp. min. letal | 0-2    | -1       | 0         | -1     | 0-1   | 0      |
| Temp. Optima     | 13-16  | 16-18    | 17-22     | 18-18  | 18-21 | 17-20  |
| Temp. max. Letal | 33-38  | 33-35    | 43-53     | 31-35  | 33-37 | 33-37  |

Agricultura chilena, 2012

La temperatura es un factor importante en el metabolismo de la planta, siendo éste el principal aspecto de crecimiento. Existen dos tipos de temperatura en el sistema de invernadero, la primera es la temperatura externa, la cual indica la cuantificación de calor ambiental exterior del invernadero. La segunda temperatura empleada como factor importante en este sistema es la temperatura interna, pues ésta nos indica la cantidad de calor que existe dentro del invernadero y la cual afecta directamente a la planta y su desarrollo. La radiación solar es otro factor que ayuda a la fotosíntesis de la planta, el rango de la radiación que teóricamente se debe manejar en los invernaderos va de 300 a 2500 nm del espectro, dependiendo de cada especie a cultivar. Otros factores ambientales son la PAR, que se define como el porcentaje de radiación solar absorbido por la planta y la radiación global que es la radiación solar total radiada en todo el invernadero; ambas tienen un efecto directo sobre la temperatura interior. El flujo de aire al interior controla el exceso de temperatura y humedad dentro del invernadero, siendo su dirección un factor importante en la sistematización del invernadero ya que éste regula la ventilación, por lo que este factor indicará que cortinas deben abrirse en un momento determinado.

Lo anterior indica que uno de los principales problemas que enfrenta la agricultura en invernaderos en regiones de clima cálido, es moderar y controlar los problemas derivados del incremento de temperatura que ocurre en marcados periodos del año, ya que reducen la calidad y cantidad de la cosecha. Con el control del clima en el invernadero se trata de dotar a la planta de estas condiciones favorables o, al menos, unas condiciones lo más próximas a las óptimas, de manera que se obtengan buenas cosechas no sólo desde el punto de vista cuantitativo sino también cualitativo (Rodríguez-Díaz,2009).

## 2.6 La ventilación.

Una mala ventilación afecta a la producción debido a que eleva la sensación térmica y la composición del aire, produciendo un déficit en la concentración de CO<sub>2</sub> (Hand, 1984). Esto tiene una relación con la humedad en un sentido inverso, además favorece la condensación de agua y el goteo. Por otra parte, la ventilación natural contribuye a aumentar el confort térmico para los trabajadores (Okushima et al., 2001) y el descenso de concentración de pesticidas fitosanitarios (Egea, 1999). La ventilación dentro de un invernadero es uno de los factores de gran importancia a controlar ya que si existe un correcto movimiento del aire, influirá positivamente en el buen funcionamiento de la planta, de lo contrario se crearán zonas con diferencias de temperatura y humedad que repercuten en un descenso de la producción del cultivo (Pérez-Parra, 2002; Rodríguez-Díaz, 2009). Además de esto, es importante que el aire que rodea a las plantas sea renovado, ya que es el medio en donde las plantas respiran y realizan sus funciones fisiológicas. Por lo anterior se define que el movimiento de aire causado por la ventilación en los invernaderos es un factor importante que afecta la uniformidad de sus condiciones climáticas y consecuentemente la uniformidad y calidad del crecimiento de las plantas (Fernández and Bailey, 1992; Boulard and Baille, 1995; Kittas *et al.*, 1997; Bouchet *et al.*, 2003; Teitel *et al.*, 2005).

## 2.7 Humedad Relativa.

La humedad del aire es la masa de agua por unidad de volumen. La humedad relativa es la cantidad de agua contenida en el aire, en relación con la capacidad máxima que sería capaz de contener. Existe una relación inversa de la temperatura con la humedad, por lo que a elevadas temperaturas, aumenta la capacidad de contener vapor de agua y por tanto disminuye la HR. Y al inverso con las temperaturas bajas. Cada especie tiene una humedad ambiental idónea para desarrollarse en perfectas condiciones: al tomate, al pimiento y berenjena se desarrollan bien a una HR sobre el 50-60%; al melón, entre el 60-70%; la calabaza entre el 65-80% y al pepino entre el 70-90%.(agricultura chilena, 2012; Roy y Boulard, 2005).

La HR tiene un efecto en los cultivos; si es excesiva las plantas reducen su transpiración y disminuyen su crecimiento además de producir abortos florales por apelmazamiento de polen e incrementar el riesgo de incidencia de enfermedades por hongos. Y si es demasiado baja provoca un exceso en la transpiración en las hojas de las plantas que conlleva a la deshidratación (Seginer, 2002).

## 2.8 Dióxido de carbono y su concentración (CO<sub>2</sub>).

La materia prima para que se lleve a cabo el proceso de fotosíntesis en los vegetales es el CO<sub>2</sub>. Su tasa de contenido normal en la atmosfera es de 300 ppm aunque tasas de entre 1000-2000 ppm bajo condiciones de invernadero tiene una influencia directa sobre la tasa fotosintética y de esta manera sobre la producción y rendimiento de los cultivos (Casanova, 2008).

## 2.9 Dinámica de Fluidos Computacional.

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es una rama dentro de la mecánica de fluidos que utiliza los métodos numéricos y algoritmos para analizar



problemas relacionados con el flujo de fluidos. Estudia el movimiento de los fluidos, interacciones entre el fluido y el contorno que lo limita (gases y líquidos) así como las fuerzas que los provocan se basa en la hipótesis del medio continuo. Las ecuaciones que rigen toda la mecánica de fluidos son ecuación de continuidad, la ecuación de la cantidad de movimiento, y la ecuación de la conservación de la energía se obtienen por la aplicación de los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido .

El flujo de aire y su influencia en las variables que conforman el clima crean un fenómeno dinámico en el tiempo y de comportamiento no lineal, que puede ser expresado mediante el empleo de un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden sin resolución por métodos analíticos. En la última década se ha extendido el empleo de los métodos numéricos como la Dinámica de fluidos computacional (CFD) que, basado en las ecuaciones de Navier-Stokes, ha probado ser una buena herramienta para desarrollar modelos que nos permiten comprender las relaciones de las variables que conforman el clima y el comportamiento del flujo de aire en la ventilación natural de los invernaderos. CFD permite la realización de cálculos detallados de cualquier sistema en el cual intervengan fluidos, mediante la resolución de las ecuaciones fundamentales de conservación de materia, energía y cantidad de movimiento para la geometría particular de cada sistema considerado mediante empleo de computadoras que realizan millones de cálculos para simular la interacción de líquidos y gases con superficies definidas por las condiciones de contorno (de la Torre-Gea, 2012).

Para llevar a cabo un estudio detallado del clima dentro de un invernadero, es necesario el uso de modelos basados en la transferencia de energía (Rico-García *et al.*, 2008). Durante la última década, debido al desarrollo de herramientas de simulación por ordenador y el aumento de potencia de procesamiento, es posible realizar mejoras en el diseño del medio ambiente de invernaderos (Norton *et al.*, 2007). La utilización de programas informáticos de dinámica de fluidos computacional (CFD) basados en el cálculo numérico, sirven para obtener la distribución de la temperatura y del flujo de

aire (vectores de velocidad) dentro del invernadero en función de las condiciones climáticas externas. La dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y su conjunto de técnicas que permiten resolver las ecuaciones que se derivan de los tres principios: conservación de masa, conservación de momento y conservación de energía. Mediante las cuales se obtienen los campos de velocidad, temperatura y presión en el fluido estudiado lo que permite un estudio eficiente del clima dentro del invernadero. Las cuatro variables básicas consideradas en el modelo son: La temperatura de aire, la temperatura del suelo, la concentración de CO2 y la humedad. Cada una de estas variables tiene asociada una ecuación diferencial:

### 2.9.1 Ecuación Temperatura dentro del invernadero

La ecuación(4) nos indica que la variación de temperatura dentro del invernadero es proporcional al intercambio de calor por la ventilación (primer término), intercambio debido a las tuberías del sistema de calefacción (segundo término), al intercambio a través de la cubierta y de las paredes (tercer término), al intercambio de calor con el suelo profundo (cuarto término), a la entrada de calor por radiación (quinto término), a la pérdida de calor por evaporación debido a la transpiración (sexto término) así como al intercambio debido a condensación en el techo del invernadero (último término). (Panayotova 1987, Anderson, 1995).

$$C_g \frac{dT_g}{dt} = K_v(T_0 - T_g) + \alpha(T_p - T_g) + K_r(T_0 - T_g) + K_s(T_s - T_g) + Z\eta G - \lambda E + \frac{\lambda}{\varepsilon + 1} M_c \dots\dots\dots (4)$$

### 2.9.2 Ecuación Temperatura del suelo

En esta ecuación 5 se presenta que la temperatura del suelo es proporcional al intercambio de calor entre la capa superficial y la temperatura ambiente (primer

término) y al intercambio de calor entre la capa superficial y el suelo profundo (segundo término).

$$C_s \frac{dT_s}{dt} = -K_s(T_s - T_g) + K_d(T_d - T_s) \dots\dots\dots (5)$$

### 2.9.3 Ecuación Concentración de CO2

Para la ecuación (6) se tiene que el cambio de concentración de CO2 es proporcional al intercambio de CO2 con el exterior (primer término), a la inyección de CO2 (segundo término), al aumento de CO2 por respiración (tercer término) así como a la disminución de CO2 por la fotosíntesis (cuarto término).

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{dC_i}{dt} = \Phi_v(C_0 - C_i) + \varphi_{inj} + R - \mu P \dots\dots\dots (6)$$

### 2.9.4 Ecuación Humedad

Esta ecuación 7 indica que el cambio de humedad dentro del invernadero es proporcional al aumento de humedad por transpiración (primer término), al intercambio de humedad por respiración (segundo término) así como a la pérdida de humedad por condensación en el techo del invernadero (tercer término).

$$\frac{V_g}{A_g} \frac{dV_i}{dt} = E - \Phi_v(V_i - V_0) - M_c \dots\dots\dots (7)$$

Las técnicas de precisión para el control del clima (o microclima) en el invernadero van desde el tipo de sensores, localización de éstos dentro del invernadero, así como su correspondiente calibración cuando éstos la requieran. A éstas técnicas se unen la estructura, posición, orientación y construcción del invernadero.

## 2.10 Desarrollo de la Dinámica de Fluidos Computacional

La dinámica de fluidos es una rama de la física que estudia el movimiento de los fluidos en relación a las fuerzas que actúan sobre ellos, CFD es la utilización de las computadoras como herramientas para resolver las ecuaciones de la dinámica de fluidos con el fin de poder aplicarlas a problemas reales y de utilidad práctica. Como herramienta para modelación climática surgió en la década de los 70's. En los 90s el uso de la CFD se expandió de forma significativa a distintas aplicaciones y procesos industriales en los que interviene transferencia de calor, reacciones químicas (como combustión), flujos bifásicos, cambios de fase, transferencia de masa y esfuerzos al interactuar con sólidos, entre otros. Actualmente el uso de esta herramienta ha cambiado radicalmente. Ha pasado de ser empleado solo a nivel de investigación a ser utilizado como una potente herramienta en problemas aplicados (Figura 13).

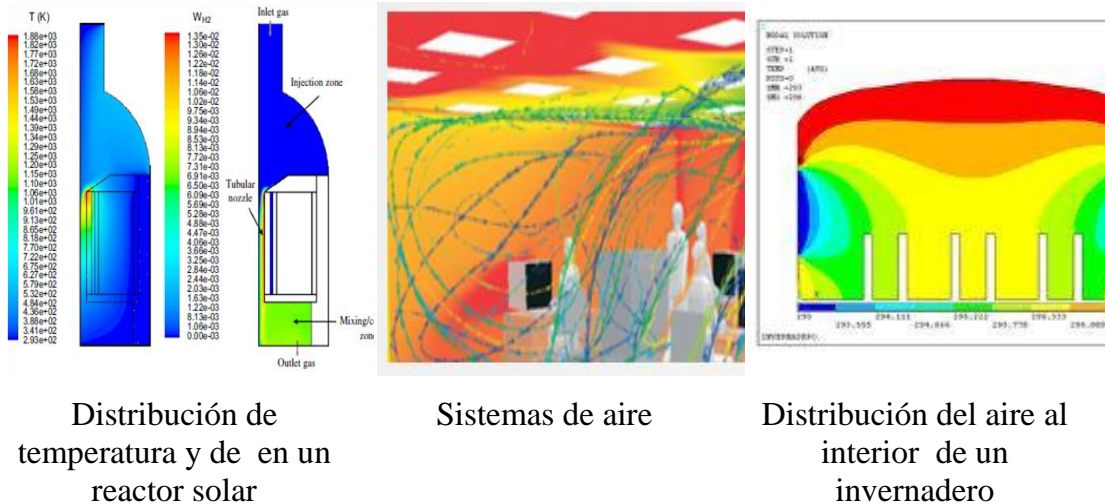


Figura 13. Ejemplo de aplicaciones del CFD.

CFD es ahora una herramienta de diseño de ingeniería maduro y cada vez se utiliza en varios ámbitos. La ventilación es un proceso que define el clima al interior del invernadero, debido al efecto que tiene en el intercambio de masa y energía con el

exterior. Para evaluar si la ventilación es eficiente, es importante tomar en cuenta el comportamiento de las variables del clima y cómo influyen sobre el desarrollo del cultivo.

El uso de CFD para mejorar el sistema invernadero-cultivo está todavía comenzando. Combinado con otras aproximaciones, tales como el uso de soluciones analíticas sencillas para la exploración de los gradientes climáticos en la capa límite de las hojas, llevará a mejoras significativas en el diseño de invernaderos y en las estrategias de control climático (Boulard *et al.*, 2002).

El análisis de las condiciones internas de los invernaderos mediante CFD es utilizado para calcular la temperatura, velocidad y otras propiedades de fluidos a través de una plataforma computacional, permitiendo analizar detalladamente los potenciales de ventilación natural, la estratificación del aire interior, y el confort de los usuarios. CFD es la resolución de las ecuaciones fundamentales de mecánica de fluidos y transferencia de calor, conservación de masa, cantidad de movimiento, energía, en un dominio fluido en el que ha de definirse.

(García Mozos, 2010).

## 2.11 Modelación climática.

La modelación del clima dentro de los invernaderos se da en la década de los ochentas, donde se consideraron ecuaciones para la temperatura como el efecto del calentamiento y la temperatura de ventanas (Bot G., 1983).

### 2.11.1 Técnicas para el modelamiento.

Las técnicas para el modelamiento matemático de procesos reales se clasifican en dos categorías principales: 1) modelamiento físico, basada en leyes físicas,

caracterizando mediante ecuaciones de flujo de energía y masa y 2) sistemas de identificación modelos de sistemas dinámicos a partir de mediciones, y para ajustar los modelos paramétricos se usan técnicas lineales y no lineales como algoritmos de mínimos cuadrados recursivos y redes neuronales (Xu *et al.*, 2007; Ljung, 1987).

El modelaje del microclima de un invernadero requiere un mínimo de cuatro ecuaciones no lineales que relacionen el intercambio de calor entre el aire interior, las plantas, el suelo, la cubierta, ante condiciones climáticas dadas y otros parámetros de diseño como volumen, forma, altura, orientación y lugar (Critten *et al.*, 2002; Sethi y Sharma, 2007).

#### 2.11.2 Validación (Simulaciones vs. Experimento)

Cualquier simulación numérica debe buscar un método de validación experimental y/o analítica para garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos. Existen una multitud de dificultades que se han de afrontar antes de obtener una buena solución. Esta validación debe entenderse como la demostración de que el programa de ordenador representa adecuadamente la realidad física. La comparación con resultados experimentales se presenta como el camino más razonable para esta demostración.

## 2.12 Antecedentes

### 2.12.1 Trabajos relevantes en la modelación climática.

Dentro de los trabajos relevantes que analizan el tema de análisis del clima en invernaderos tenemos a los métodos de predicción y técnicas de control de la condensación en invernaderos (Rodríguez-Díaz, 2009), donde realizaron un análisis para evaluar el efecto que ejercen diferentes estrategias de ventilación y calefacción sobre la aparición de condensación, así como el desarrollo de modelos de predicción de la probabilidad de aparición de dicha condensación, evaluó la influencia del sistema de calefacción sobre la condensación producida, en el mismo periodo obtuvieron modelos de predicción de la condensación en situaciones del invernadero sin calefacción y con calefacción. Para estimar los diferentes modelos se utilizó un análisis de regresión logística. Una vez obtenidos los modelos, se validaron los cuatro mejores sobre otro conjunto distinto de datos climáticos.

Muñoz-Odina (1998), al analizar la ventilación natural de los invernaderos multitúnel con cubierta de plástico y dos tipos de aperturas de ventilación, determinó una expresión empírica para el cálculo de la tasa de ventilación en función de la velocidad del viento exterior, demostrando la nula influencia de la diferencia de temperatura entre el aire interior y exterior sobre la tasa de ventilación para velocidades de viento superiores a  $1 \text{ ms}^{-1}$ .

López-Cruz *et al.* (2008) muestra que Los modelos matemáticos agregados basados en balances de energía y masa, suponen un ambiente homogéneo del invernadero. Estos modelos generan un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden no lineales. Sin embargo, un monitoreo más detallado del ambiente dentro de los invernaderos, refleja una variabilidad bidimensional y tridimensional de las variables climáticas.

Keesung Kim *et al.* (2008), obtuvieron mapas de contorno a partir las simulaciones CFD en 3-D para localizar cualquier falta de uniformidad en la distribución de la humedad. El uso de deshumidificadores redujo la diferencia global de humedad entre el medio y las zonas inferiores de un invernadero, pero la distribución local de la humedad fue desigual, especialmente cerca de los deshumidificadores.

Flores-Velázquez (2010), validó y aplicó un modelo numérico basado en CFD para el análisis climático de un invernadero cenital de tres naves sin cultivo y con ventilación forzada. En este estudio se suministraron las variables de temperaturas de aire y de suelo junto con valores de transferencia de calor y tasas de ventilación bajo distintas condiciones exteriores. Obteniendo como resultado que al funcionar el sistema de ventilación forzada, la tasa de ventilación es estable, independientemente de las condiciones exteriores. Para velocidades de viento menores de 3 m s<sup>-1</sup>, la ventilación mecánica adquiere mayor importancia que el flujo de aire exterior, debido al efecto eólico o térmico. En cuanto a las temperaturas del aire, en invernaderos de 30 m de largo, el sistema de ventilación forzada presenta adecuada uniformidad térmica, cobrando importancia la posición y capacidad o potencia de los ventiladores.

Keesung Kim (2008) sugiere que un modelo CFD en 3-D puede ser una herramienta útil en el diseño y evaluación de los invernaderos con diferentes configuraciones. Sase y Okushima (2000) mostraron una distribución de temperatura afectada por el flujo inverso de aire en el interior. Empleando un modelo de invernadero con ventilación cenital mostraron la presencia de dos remolinos y distribuciones uniformes de temperatura, en donde los resultados obtenidos mediante CFD se presentaron como animaciones para evaluar las distribuciones de flujo de aire y temperatura del aire dentro de los invernaderos.

Rico-García *et al.* (2007), compraron un modelo mecanicista y el generado mediante CFD para determinar su precisión y predecir las temperaturas internas de los invernaderos en las condiciones climáticas mexicanas. Mediante este estudio



demonstraron que el modelo mecanicista tiene un mejor ajuste a las temperaturas internas ( $R^2 = 0.97$ ) que el basado en la dinámica de fluidos computarizada ( $R^2 = 0.94$ ), y ambos modelos pueden ser usados como herramientas ingenieriles para el diseño de invernaderos.

López-Cruz *et al.* (2008) indica que la dinámica de fluidos computacional puede proporcionar simulaciones realísticas, para un rango amplio de condiciones geométricas y de frontera, y puede ayudar a los ingenieros y a las empresas constructoras de invernaderos a mejorar su diseño.

### III METODOLOGÍA

#### 3.1 Ubicación.

El trabajo se realizó en el conjunto de invernaderos del campus Amazcala de la F.I. U.A.Q., (Figura 14). Ubicado en Amazcala, perteneciente al municipio de El Marqués, Qro; el cual se localiza en el sector suroeste del estado, entre los 20° 31' y 20° 58' de latitud norte y entre los 100° 09' y los 100° 24' de longitud Oeste, a 1850 m sobre el nivel del mar. Este municipio colinda al oeste con el municipio de Querétaro, al norte con el estado de Guanajuato, al este con el municipio de Colón y al sur con los municipios de Huimilpan y Pedro Escobedo. La temperatura media anual oscila entre los 18 y los 24 °C, con un clima predominante subtropical, templado-semiseco, subhúmedo con lluvias en verano, y semifrío subhúmedo con lluvias en verano de mayor humedad y una precipitación anual de 400-800 mm (inegi.org.mx, 2011).

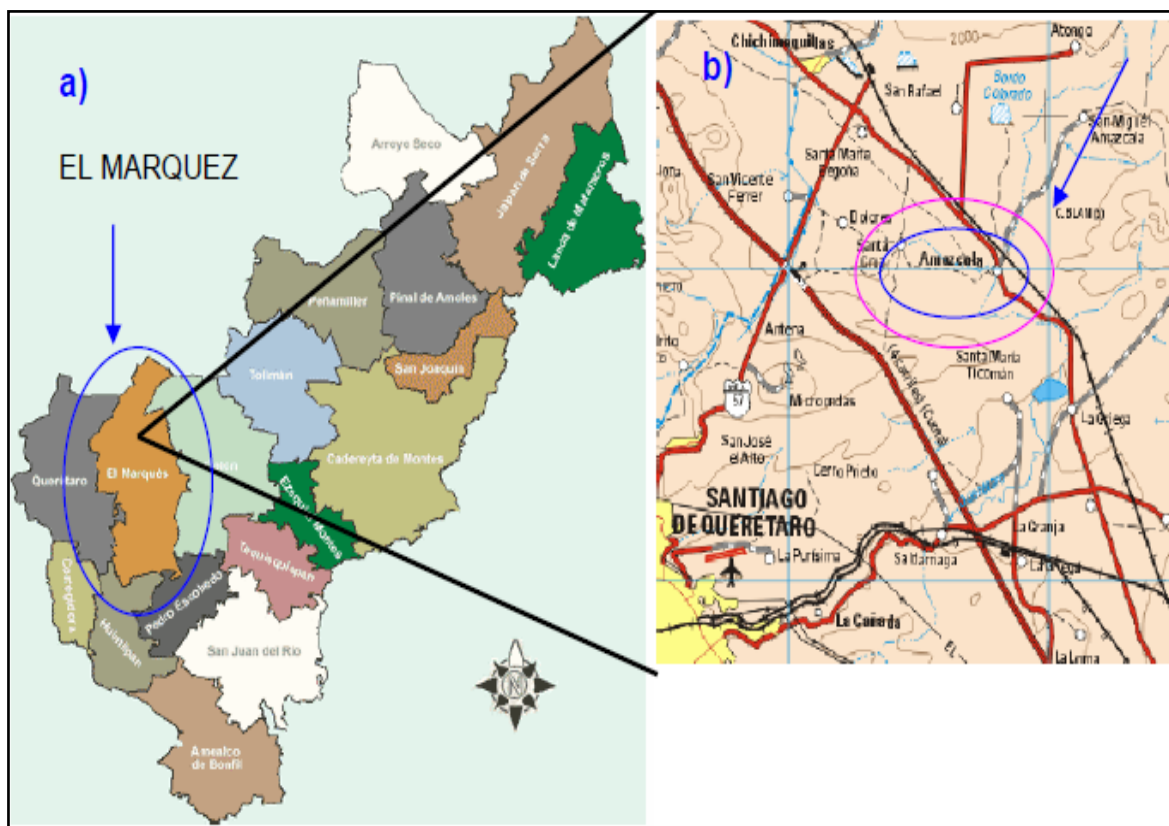


Figura 14. Ubicación geográfica del Campus Amazcala,  
a) Municipio El Marques y b) poblado de Amazcala

### 3.2 Infraestructura.

Para el desarrollo del experimento las mediciones se realizaron en siete invernaderos del campus, los cuales se muestran en la Figura 15 y pertenecen al área de horticultura: dos invernaderos comerciales de 5600 y 2500 m<sup>2</sup> y cinco invernaderos experimentales, dos de ellos de 432 m<sup>2</sup> y tres de 108m<sup>2</sup>.



Figura 15. Conjunto de Invernaderos del Campus Amazcala F.I. –U.A.Q

### 3.3 Principales características de los invernaderos.

Las estructuras de los siete invernaderos consta de tubos galvanizados, cubiertas de plástico de 800 galgas, orientados de norte a sur, tipo gótico (Figura 16), los dos invernaderos comerciales Ic<sup>1</sup> e Ic<sup>2</sup> con ventilación lateral y los cinco invernaderos experimentales Ie<sup>1</sup>-Ie<sup>7</sup> con ventilación lateral variable manualmente y cenital fija.



Figura 16. Invernadero comercial Amazcala

### 3.4 Material biológico.

Se utilizó la especie *Lycopersicon esculentum* Mill., variedad: rafaello tipo Saladette a una densidad promedio de 3.4 plantas/m<sup>2</sup>, bajo un cultivo híbrido de ciclos largos y cobertura foliar de moderada a alta, sobre camas de cultivo de 65 cm y pasillos de 1 metro, en los cuales se encontraran orientados también de norte a sur como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Cultivo de tomate en los invernaderos del campus Amazcala.

### 3.5 Variables de estudio.

Las principales variables de estudio para la generación del modelo CFD al interior fueron: temperatura, velocidad del flujo de aire y alturas al interior del invernadero.

### 3.6 Mediciones de condiciones climáticas

#### 3.6.1 velocidad y dirección del viento

Consistió en la medición dentro y al exterior del conjunto de invernaderos, de la velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y CO<sub>2</sub> en condiciones con y sin cultivo con el fin de caracterizar al conjunto de invernaderos, las mediciones se realizaron mediante equipo digital, la dirección del viento en condiciones de cultivo y sin cultivo fueron realizadas mediante una estación equipada con dos anemómetros omni-direccional mediante los cuales pudimos identificar las velocidades del viento y su ángulo al interior de los invernaderos. Dichas mediciones se realizaron de forma continua durante 24 horas y se fueron registrando en una computadora las lecturas obtenidas e interpretadas, como se muestra en la Figura 18 A. Figura 18. A) mediciones con cultivo, B) mediciones sin cultivo

Mediante una sonda de alambre desplegable testo (Figura 19) se realizaron mediciones puntuales, los resultados se muestran en la Tabla 1. La velocidad del viento en las ventanas, cenitales, cubiertas y diferentes alturas de cultivo de forma equidistante y en proporción al tamaño del invernadero para el caso de cultivo se realizó a cuatro alturas, cubriendo el invernadero a lo largo y ancho (Tabla 3).



Figura 19. Mediciones en los puntos de interés

Además, se realizaron mediciones simultáneas de temperatura, concentración de CO<sub>2</sub>, humedad relativa; en suelo, paredes, techo, follaje y ventanas según la variable medida en el conjunto, quedando de la siguiente forma:

- a) 108 en el invernaderos de 5600,
- b) 68 en el invernadero de 2500 y
- c) 52 en los cinco invernaderos experimentales.

Tabla 3. Distribución de los puntos

|                     | Paredes | Suelo | Techo | Cultivo (0.5, 1, 2,3 m.) |
|---------------------|---------|-------|-------|--------------------------|
| Invernadero<br>5600 | 28      | 20    | 20    | 10*4=40                  |
| Invernadero<br>2500 | 20      | 12    | 12    | 6*4=24                   |
| Experimentales      | 16      | 9     | 9     | 4*4=16                   |

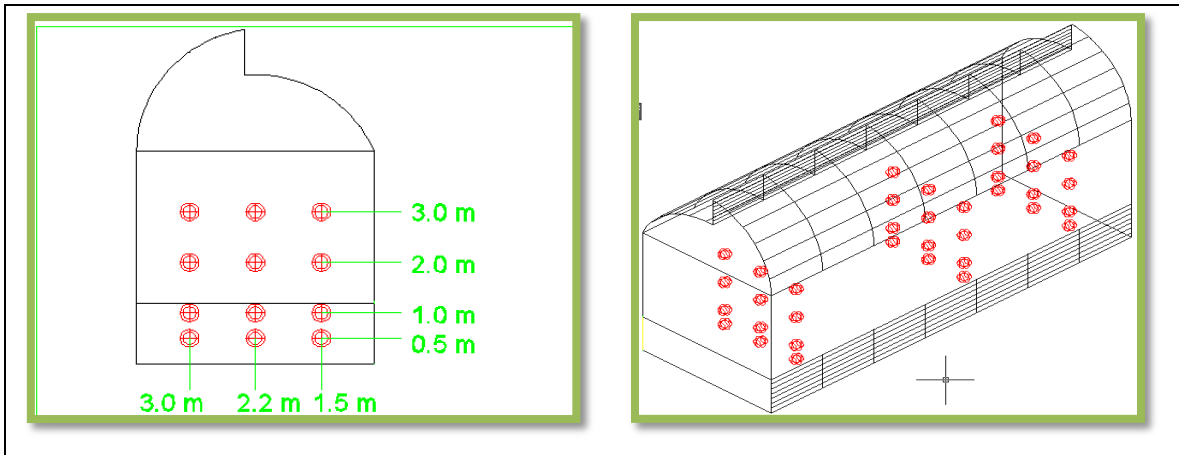


Figura 20. Alturas de cultivo y distribución de los puntos al interior de los invernaderos

### 3.6.2 Temperatura

Mediante una sonda laser de radiación de marca Steren y un Dataloger ALMEMO 2590 (Figura 22), se realizaron mediciones de temperatura en la superficie del invernadero, temperatura del aire a tres alturas; sobre la superficie de cultivo durante la hora de mayor calor (14 horas) en los mismos puntos que se realizó la medición de la velocidad del flujo de aire.





Figura 21. Medidor laser de radiación Steren, y Dataloger ALMEMO2590.

### 3.6.3 Concentración de CO<sub>2</sub> y humedad relativa

La concentración de CO<sub>2</sub> se determinó realizando mediciones a tres alturas sobre cultivo en los mismos puntos que se muestran en la Tabla 1, realizados mediante el equipo ALMEMO 2590 al mismo tiempo que la medición de temperatura, velocidad y dirección del flujo de aire.

### 3.6.4 Medición de las variables al exterior.

Se realizaron mediante la estación meteorológica Ventage pro 2 (Figura 22), y correspondiendo al mismo periodo de tiempo que las realizadas al interior de los invernaderos mediante dicha estación. Se obtuvo el valor de la velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa al exterior de los invernaderos, que corresponde a la zona de dominio.





Figura 22. Estación meteorológica

### 3.7 Definición del dominio o frontera

Para realizar el análisis mediante CFD llevaron a cabo estimaciones para delimitar la frontera o zona de dominio, las cuales caracterizaron el comportamiento de las variables climáticas, como las descritas por Montero y Pérez Muñoz (2005). Se tomaron los valores de las mediciones de temperatura, CO<sub>2</sub>, humedad relativa, zona de entrada, velocidad y dirección del flujo de aire al interior y exterior de los invernaderos.

### 3.8 Dinámica para el análisis

Para proceder al análisis del conjunto de invernaderos se empleó la metodología sugerida por Montero et al. (2005) como se muestra en la Figura 23. Se llevó a cabo la caracterización de los invernaderos, realizando las mediciones antes mencionadas y mediante un proceso de análisis, para conocer la dinámica que guardan entre si las variables al interior de nuestra zona de dominio. Posteriormente, se

desarrolló la aproximación CFD y se validó, ajustándola para posteriormente para realizar diferentes simulaciones correspondientes al espacio de cultivo.

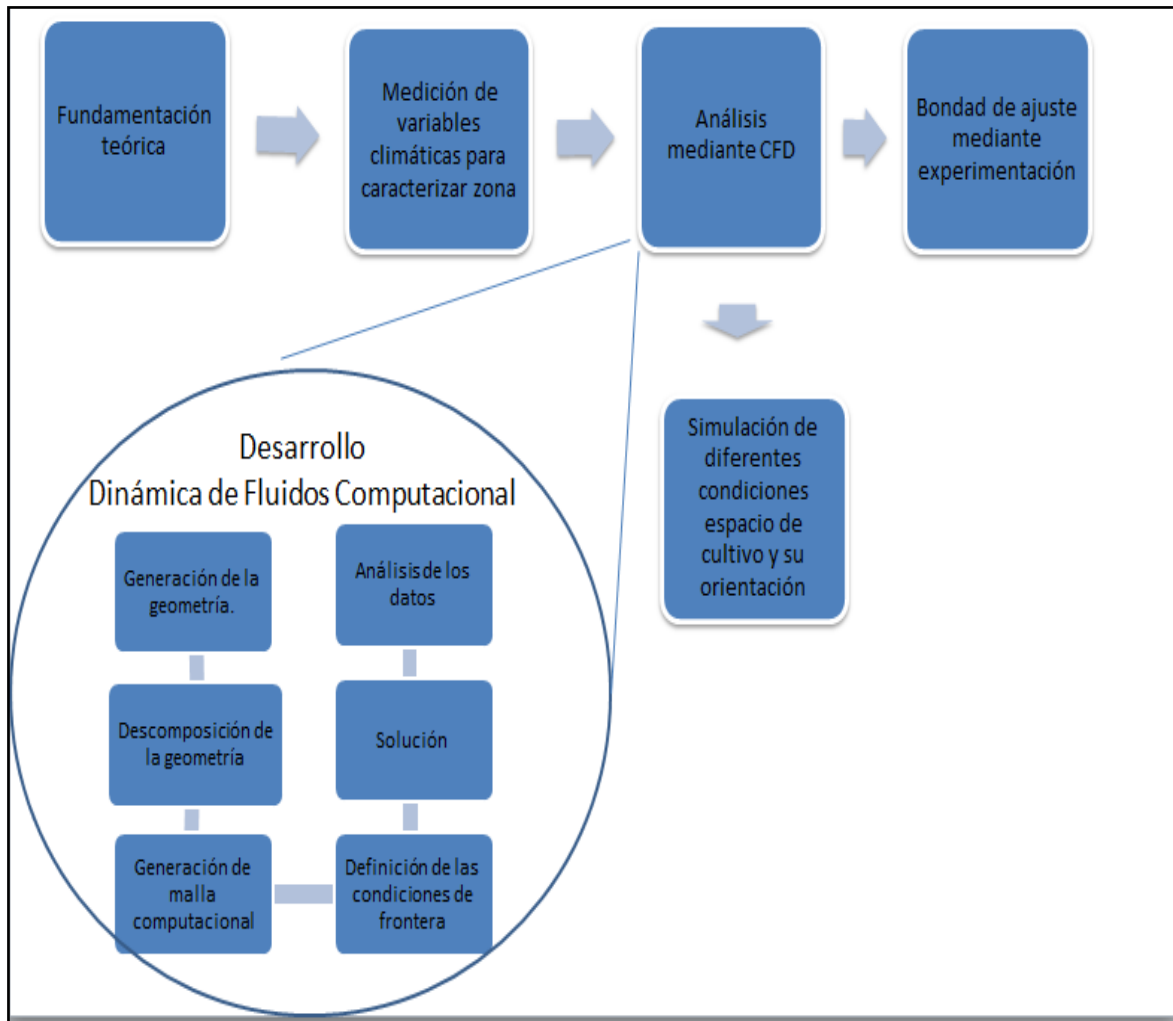


Figura 23. Dinámica del proceso de desarrollo

### 3.9 Espacios del cultivo y su orientación.

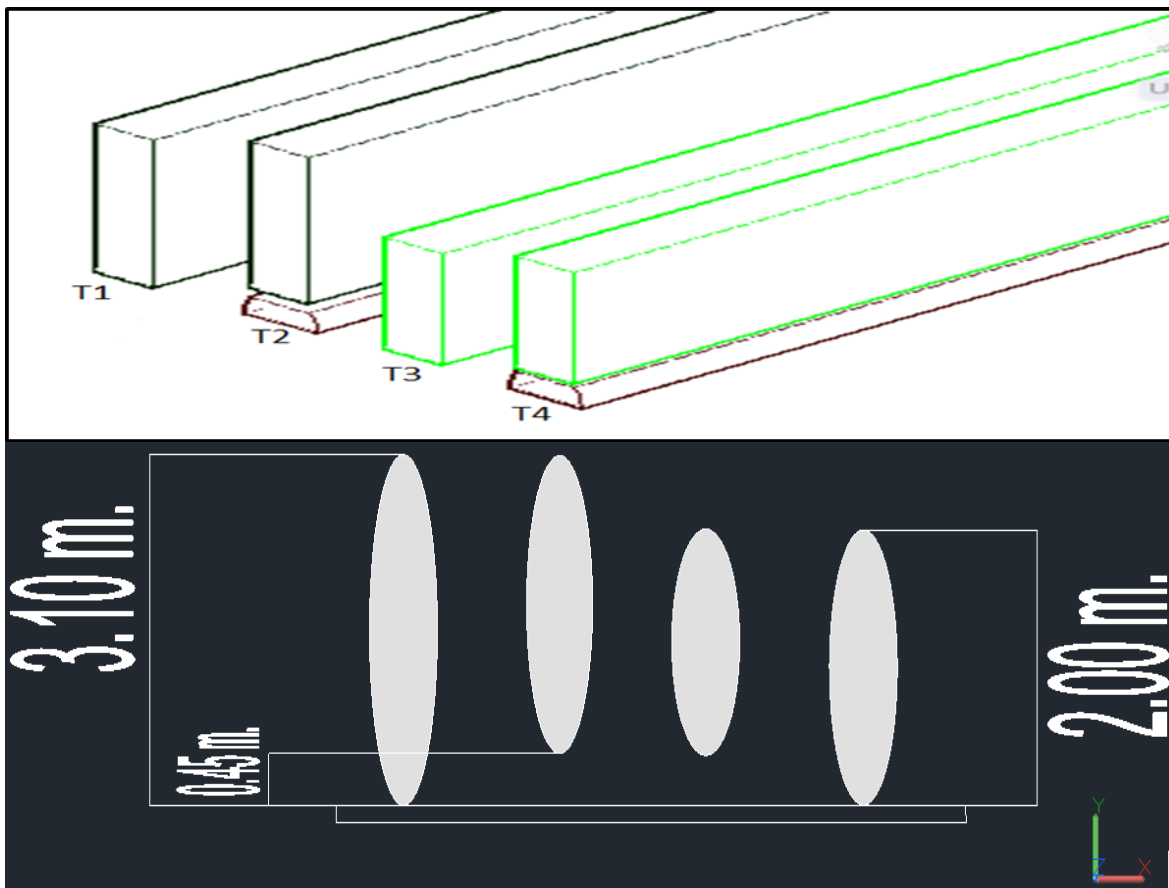


Figura 24. Alturas de cultivo

En esta etapa del trabajo, se realizaron variaciones en el espacio de cultivo, como son la altura de la cama de cultivo y la altura final de las plantas. Las formas de cultivo fueron cama a flor de tierra y a una altura final 3.10 (T2), a una elevación de 0.45 m sobre nivel de suelo y altura final de 3.10 m (T3), a una elevación de 0.45 m de altura y tutoreo a 2 m (T4), a nivel del suelo y altura final de 2 m. todos a una distancia entre plantas de 0.25 m y 1.6 m entre el centro de líneas, como se muestra en la Figura 24.

En cuanto al sistema de ventilación, se simularon 12 tratamientos que consistieron en tres alturas de aplicación y cuatro velocidades del flujo de aire, cuyos valores se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Velocidades de aire y tres alturas de aplicación

| Nombre | Velocidad aire m/s | Altura (M) |
|--------|--------------------|------------|
| T1     | 1 - 1.5            | 1          |
| T2     | 1.5-2              | 1          |
| T3     | 2.0-2.5            | 1          |
| T4     | 2.5-3              | 1          |
| T5     | 1- 1.5             | 2-3        |
| T6     | 1.5-2              | 2-3        |
| T7     | 2-2.5              | 2-3        |
| T8     | 2.5-3              | 2-3        |
| T9     | 1-1.5              | 3-4        |
| T10    | 2-2.5              | 3-4        |
| T11    | 2.5-3              | 3-4        |

### 3.10 Desarrollo del modelo CFD

El modelo se desarrolla mediante el software CFD ANSYS Ver.14.0 en una computadora de 64 bits con procesador Intel de 7 núcleos y 8 GB de RAM, generándose la geometría del conjunto mostrada en la Figura 25 A, de cada uno de los invernaderos, para posteriormente realizar su mallado, el cual se muestra en la Figura 25 B.

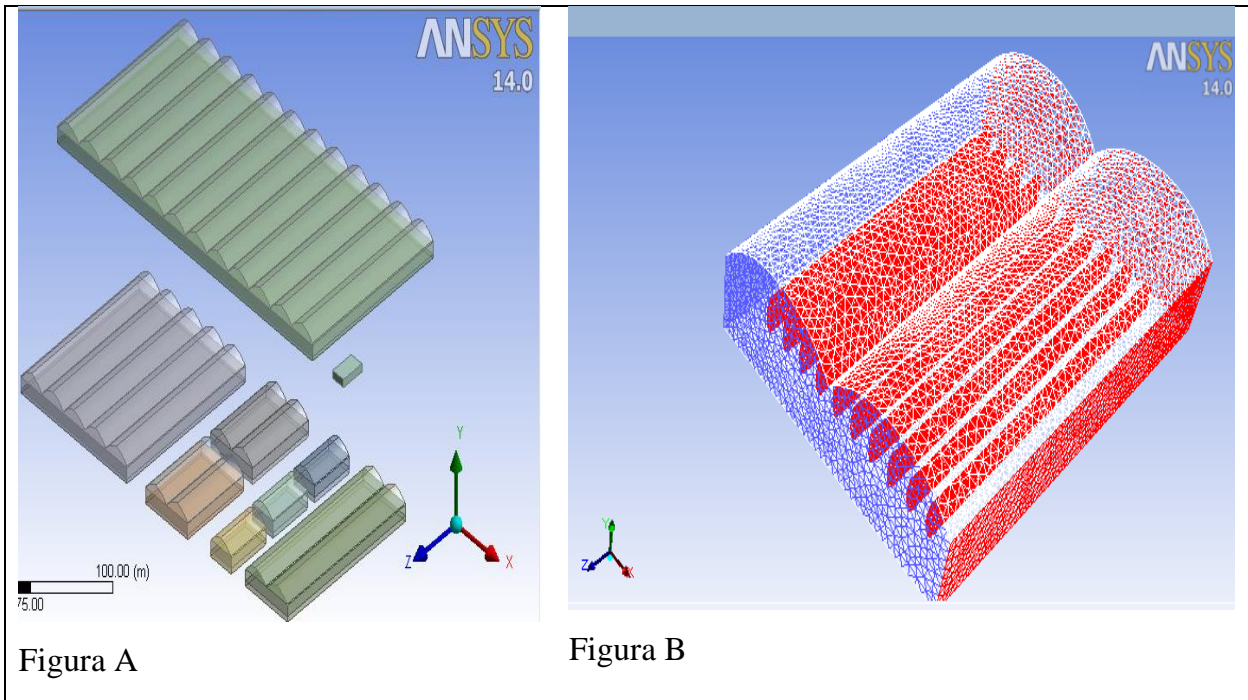


Figura 25. Geometría y mallado(mesh) del conjunto de invernaderos

A todo el conjunto de invernaderos se le indicaron las características de cada componente de su geometría mediante la asignación del material (malla, cubierta, pisos o edificio) como se muestra en la Figura 25. La presencia de la mallas anti-insectos y cultivo se ha tomado en cuenta como medios porosos según Ortiz (2004), según correspondieron de acuerdo a los valores que se definen a cada material (Tabla 5) con la finalidad de que se reconozcan las distintas porosidades de cada material.

Tabla 5. Valores para definir las características para cada componente

| Nombre         | Tipo de material | Densidad $\text{kg/m}^3$ | $C_p$ $\text{j/kg-}^\circ\text{k}$ | Conductividad térmica $\text{w/m-}^\circ\text{k}$ | viscosidad |
|----------------|------------------|--------------------------|------------------------------------|---|------------|
| Suelo          | solido           | 1400                     | 1735                               | 1.5   |            |
| polietileno    | solido           | 900                      | 1900                               | 0.3   |            |
| Metal aluminio | solido           | 2719                     | 871                                | 202.4   |            |
| Aire           | fluido           | 1.22                     | 1006                               | 0.02  | 1.7894e-05 |

Al conjunto se le dejó dentro de una zona de dominio, mostrada en la Figura 26 b y que también fue indicada para los procesos de geometría y mallado, así como las regiones de entrada y los valores de las velocidades del viento dominantes, identificadas en la etapa de medición como condiciones de frontera, mediante la asignación de los comandos *inlet* y *outlet* como se muestra en la Figura 26A.

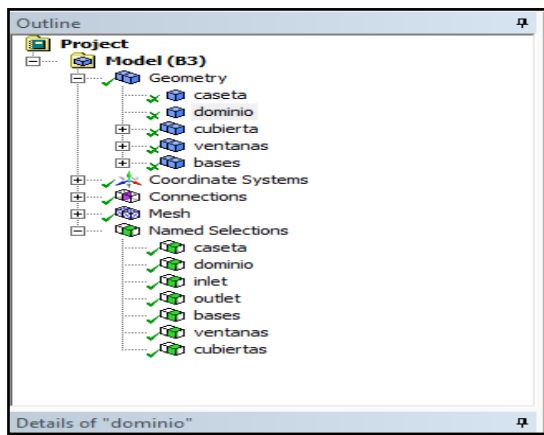


Figura A)

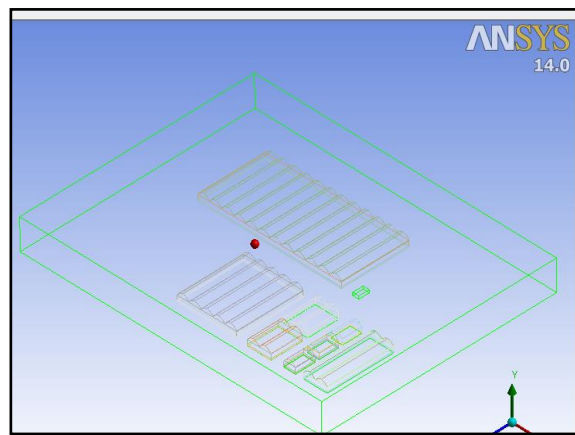


Figura B)

Figura 26. Determinación de la zona de dominio B) descomposición de componentes A)

Después del mallado, se procedió a la fase de configuración y solución para ajustar la el número de iteraciones a 60 y observar si hay convergencia. Este proceso se realizó mediante la asistencia un equipo de mayor capacidad de procesamiento el cual opera con 16 Gb en RAM, dado que el ordenador con el cual se está trabajando no tiene la capacidad para realizar los cálculos debido a la complejidad de los elementos de la geometría en su conjunto. La configuración seleccionada fue: doble precisión, tercera dimensión, cálculo en paralelo mediante 7 procesadores, modelo de energía, material del fluido y la radiación solar mediada para Amazcala  $900 \text{ w/m}^2$ . En esta etapa también se indicó los materiales del espacio del cultivo como mixto (bióxido de carbono, nitrógeno, vapor de agua, aire y oxígeno). Cabe mencionar que el cálculo de la aproximación CFD está precargado y para su análisis utiliza las ecuaciones de expresiones matemáticas de los tres principios físicos de Conservación de la masa, La segunda ley de Newton, Conservación de la energía (continuidad, momento y energía)

### 3.11 Solución

Para el cálculo de las aproximaciones, se realizó la fase de solución (solver) en donde el programa CFD organiza los datos de entrada en arreglos matriciales para resolverlos por métodos iterativos según la cantidad indicada hasta converger para resolver un conjunto de ecuaciones discretizadas.

### 3.12 Validación del modelo CFD.

La validación experimental es necesaria en el proceso de modelado y el indicador del éxito de los resultados se evalúa a través de la correlación entre los resultados numéricos y los experimentales (Rico-García 2008), por lo cual Se decidió validar el modelo sometiendo a un análisis de correlación los datos obtenidos en la etapa de solución (results), donde se realizó un plano el cual se muestra en la Figura 27, sobre las geometrías de interés para localizar los 12 puntos seleccionados (Figura 20) y

los datos resultado de la actividad de campo que corresponden a los puntos de medición de las condiciones climáticas de caracterización de la zona de interés. Se validó solo en estos puntos debido a cuestiones de capacidad y disposición del equipo. Este proceso se realizó para ir ajustando el modelo mediante mejoras a las mediciones de las condiciones de frontera hasta obtener el modelo con una correlación del 70%.

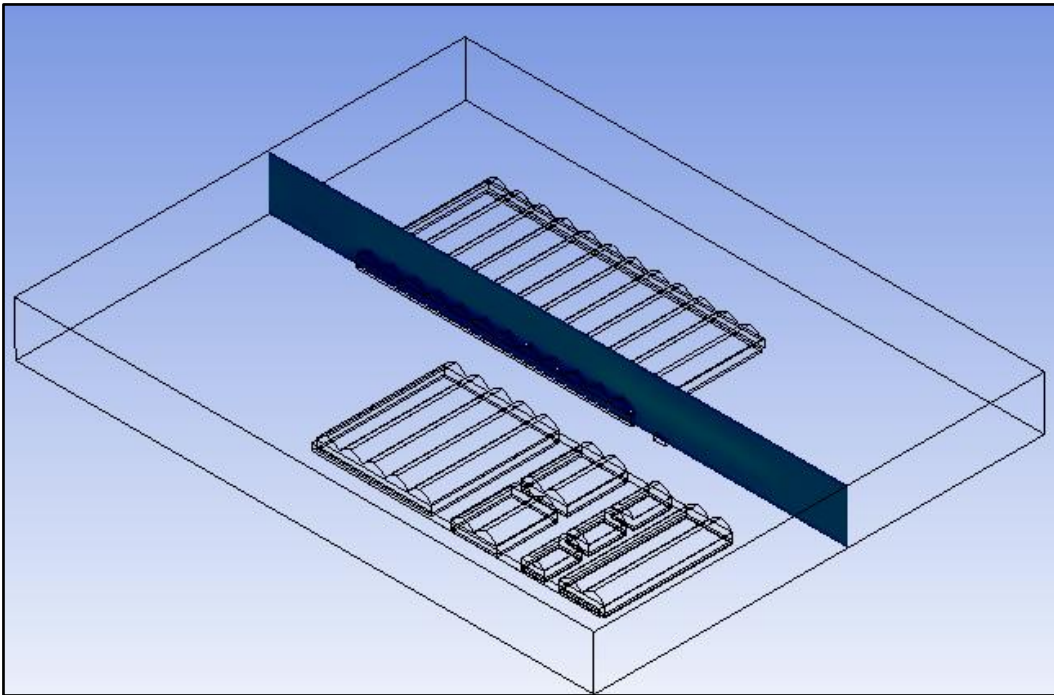


Figura 27. Planos para localizar puntos de interés



## V. RESULTADOS Y DISCUSION

### 5.1.1 Caracterización de las condiciones climáticas

La Caracterización de las condiciones climáticas al interior y exterior del invernadero, las cuales se muestran en la Tabla 5, resultaron importantes para comenzar la alimentación del modelo CFD ya que el trabajo se realizó en un inicio basado con la metodología de Montero *et al.* (2010). Dichas mediciones se realizaron sin cultivo y se dedujo que la relación entre la humedad y la temperatura es inversamente proporcional, como se muestra en la Figura 28. También se pudo apreciar que hay alguna fuente de CO<sub>2</sub> en suelo, sin embargo resulta imperceptible en presencia del cultivo debido a la dinámica intrínseca del mismo. Esto también se observa con las velocidades del flujo de aire.

Tabla 6. Condiciones climáticas al interior del invernadero 5600 m<sup>2</sup>

| Variable  | Valor promedio       |
|---|----------------------|
| Co2   | 307.25 ppm           |
| Temperatura                                       | 30.895°c             |
| Hr  | 26.441               |
| Velocidad interior del aire                       | 0.11 m/s             |
| Velocidad exterior ventanas                       | 0.14 m/s             |
| Dirección predominante del viento de este a oeste | entre 0.5 y 0.6m/s   |
| Radiación solar                                   | 400 a 900 nanometros |

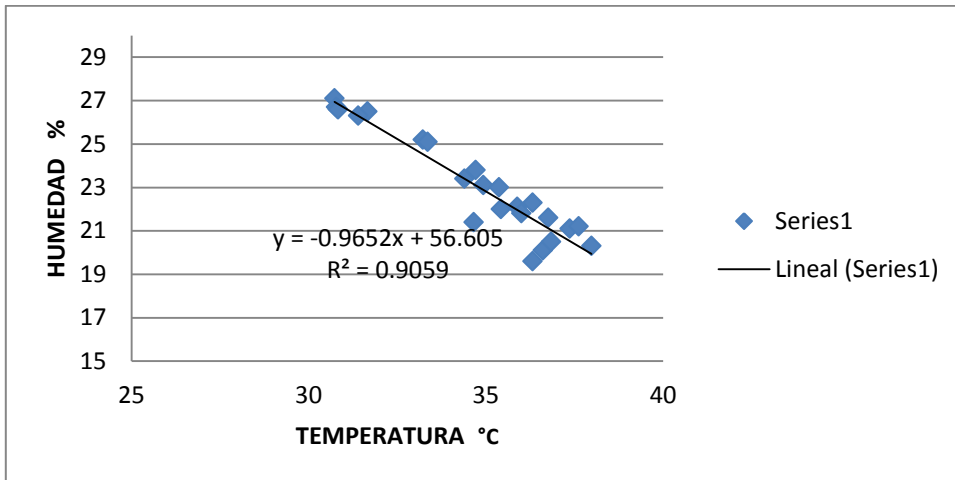


Figura 28. Correlación temperatura humedad

## 5.2 Características de las aproximaciones mediante CFD

La técnica de mallado seleccionada fue la de tetrahedrons dado que esta ajusta de mejor forma con las diferentes geometrías de los invernaderos principalmente en las curvas y segmentos triangulares, por lo cual se obtuvo un mallado con 153,220 nodos y 693,765 elementos, como se muestra en la Figura 29.

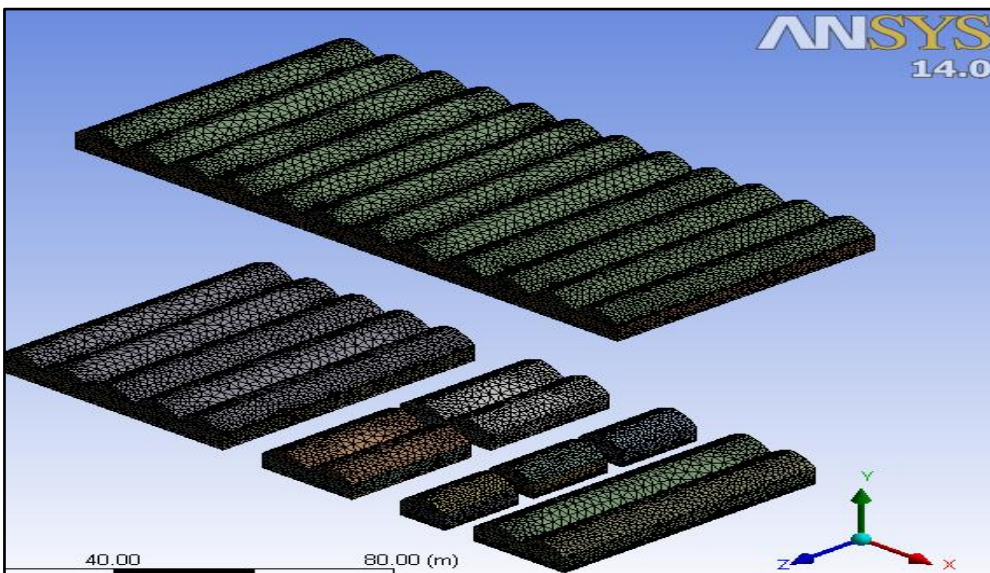


Figura 29. Mallado tetrahedrons

Tabla 7 características del mallado del conjunto Amazcala

| Dominio            | Nodos  | Elementos |
|--------------------|--------|-----------|
| Base               | 5704   | 2598      |
| Caseta             | 30     | 8         |
| Cubiertas          | 9804   | 6431      |
| Dominio            | 135146 | 683616    |
| Ventanas           | 2536   | 1112      |
| Todos los dominios | 153220 | 693765    |

Posteriormente, se llevó a cabo la resolución del modelo CFD mediante la herramienta Fluent, para lo cual se requirió de 60 iteraciones para obtener la convergencia, como se muestra en la Figura 30., utilizando las ecuaciones establecidas k  $\epsilon$ , radiación solar, energía viscosidad laminar

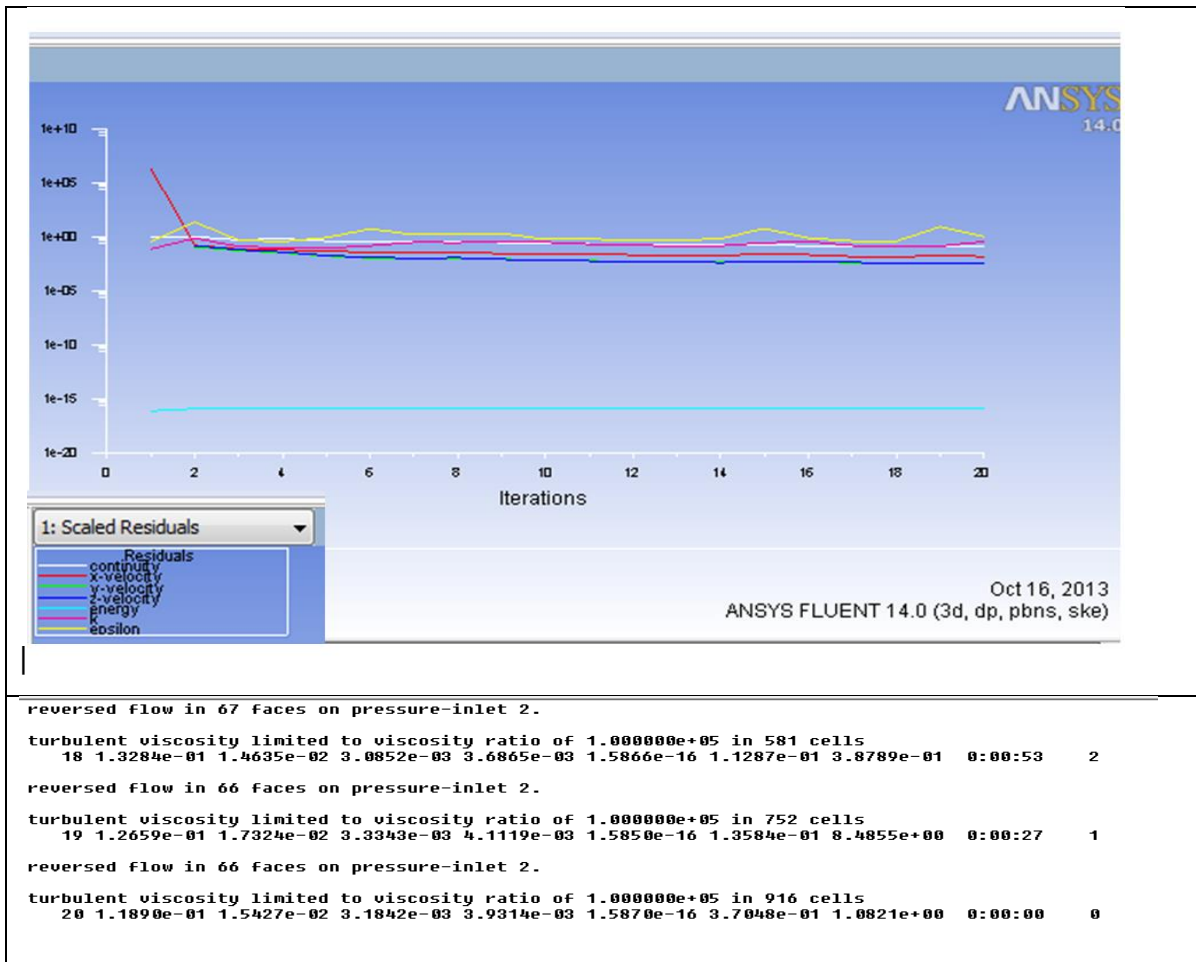


Figura 30. Proceso de iteración de solver

### 5.3 Validación del modelo CFD.

Se validó el modelo CFD en 12 puntos al interior del invernadero. Esto se realizó calculando los valores de temperatura mediante el modelo CFD a velocidades del flujo de aire entre 0 m/s y 1 m/s y comparando con las mediciones de campo bajo las mismas condiciones, muestran un coeficiente de correlación de 0.71, como se muestra en la Figura 32. El ajuste de este modelo indica que la dispersión de los datos es muy alta, sin embargo se debe tomar en cuenta que en este tipo de trabajos suele ser muy común no alcanzar una  $r^2 = 0.9$  valor más comúnmente alcanzado en los análisis 2D. Esto se debe principalmente a que en el análisis 3D en cada cara de los elementos

que conforman la aproximación, se resuelven las ecuaciones de entrada y salida, por lo que la exactitud del modelo depende del número de elementos y, por lo tanto, de la capacidad de procesamiento. En los modelos 3D, las caras se multiplican pasando de dos a seis, por lo que el cálculo se vuelve más complejo, y los requerimientos de capacidad de procesamiento aumentan.

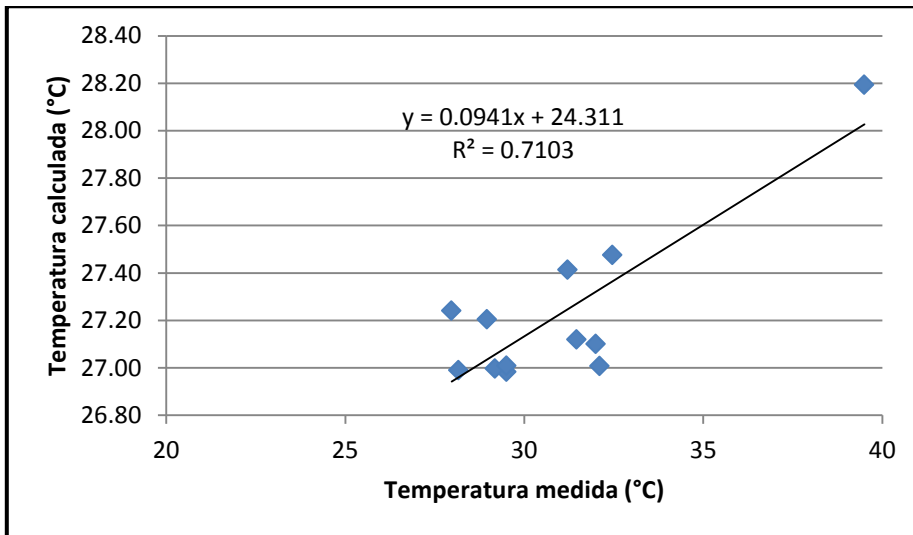


Figura. 31. Validación del modelo CFD.

#### 5.4 Comportamiento de velocidad del aire y temperatura en el conjunto

El comportamiento de la temperatura al centro del invernadero, a lo largo de los 105 m en dirección de este a oeste, los datos obtenidos del modelo se ajustan con los observados en las ventanas y ventiladores confirmando que la entrada lateral derecha de la nave es la principal fuente de aire, como lo muestra la Figura 32.

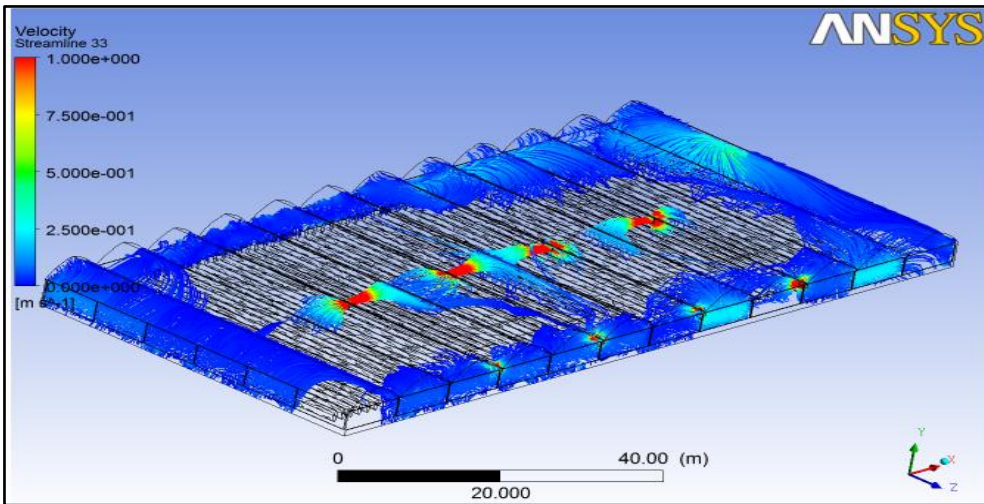


Figura 32. Comportamiento del flujo del aire con cultivo

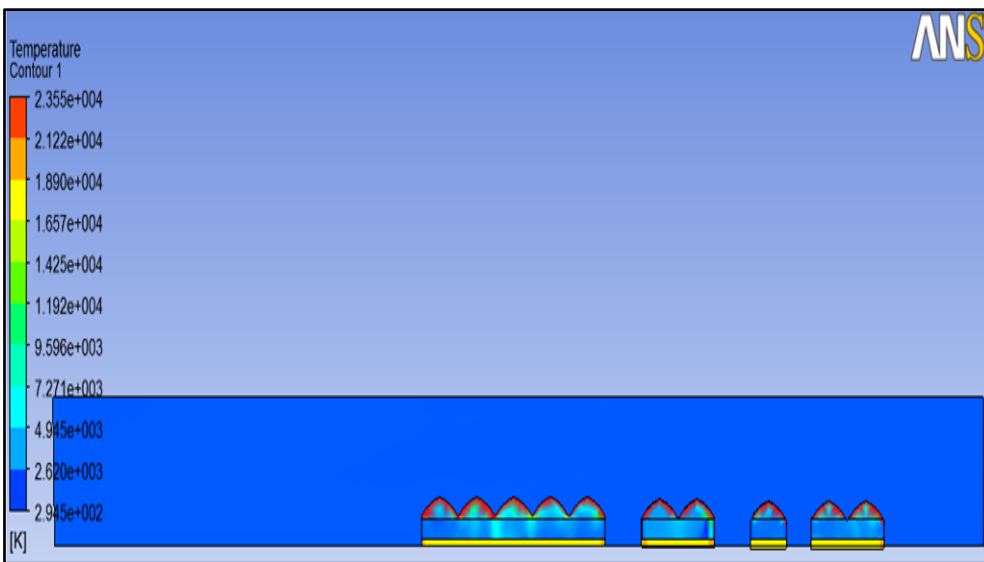


Figura 33. Distribución temperaturas invernaderos experimentales

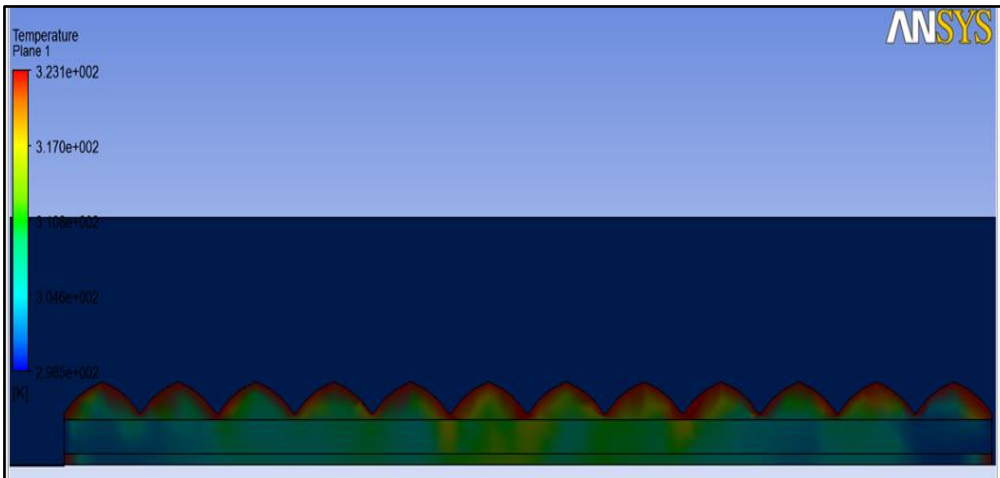


Figura 34. Distribución temperatura invernadero producción 5600

En un análisis para observar los efectos de la ventilación mecánica al interior del invernadero de 5600 m<sup>2</sup>, las Figuras 38 y 39 se pueden observar que el movimiento del aire por efecto del ventilador es insuficiente para mejorar las temperaturas a nivel de cultivo, encontrándose los valores más altos de temperatura en cubiertas y zona de cultivo.

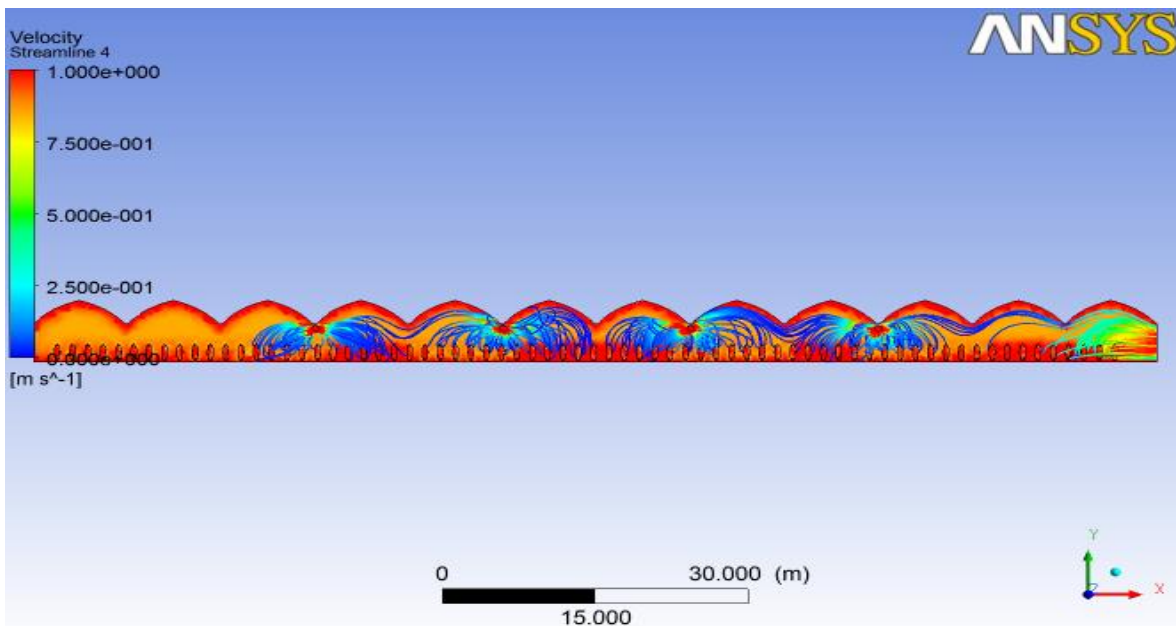


Figura 35. Movimientos del aire al interior del invernadero en base a la ventilación natural aunada a la ventilación mecánica

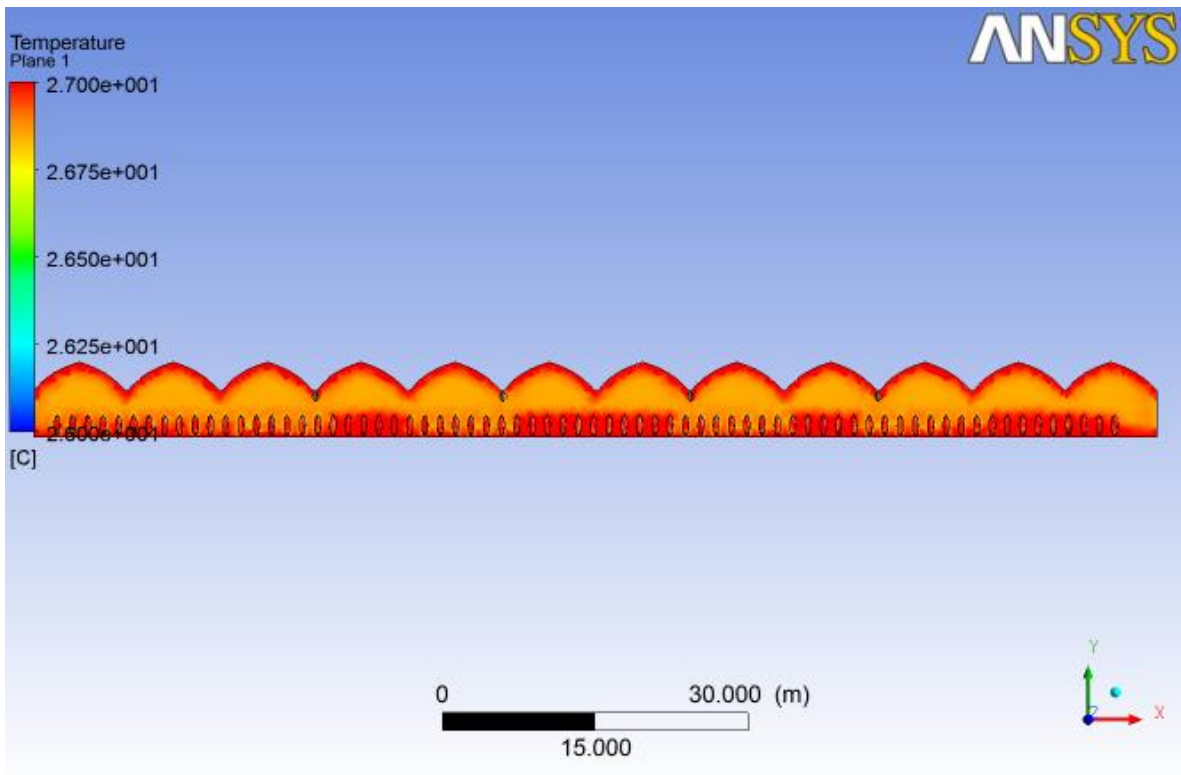


Figura 36. Temperatura al interior del invernadero con los dos sistemas de ventilación

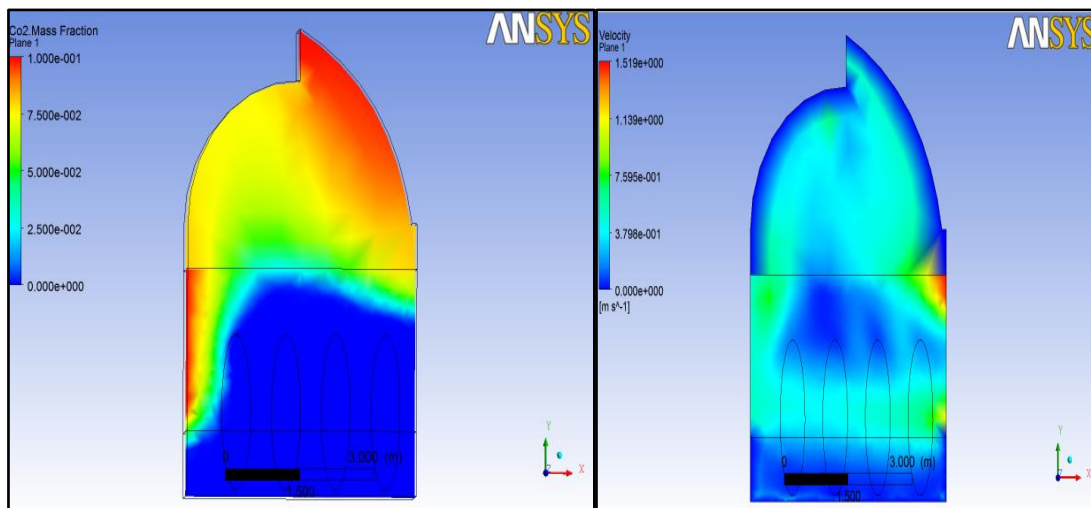


Figura 37. temperatura y velocidad aire Invernaderos experimentales ic



## 5.5 Simulación de diferentes condiciones de cultivo.

Los resultados de los tratamientos mencionados en la metodología fueron calculados mediante el modelo CFD, como se muestran en la Tabla 8, en la cual se observa poca diferencia tanto en temperatura como en la velocidad del flujo de aire. Sin embargo, T2 muestra mejores condiciones de temperatura aun obteniendo el valor más bajo de flujo de aire; lo cual indica que el cultivo, al tener una altura mayor en el tuteo, evita la incidencia de la radiación solar y por lo tanto menor calentamiento. Por otra parte, el tratamiento con mayor valor en la velocidad del flujo de aire (T4) presenta el mayor valor de temperatura, indicando que no es suficiente para obtener una buena ventilación. Lo anterior coincide con estudios realizados por Rico-García *et al.* (2008), Majdoubi *et al.* (2009), Chow y Hold (2010) y De la torre-Gea y Rico-García (2012), sobre el efecto del estancamiento del aire en invernaderos comerciales grandes con ventilación natural.

Tabla 8. Resultados de los tratamientos

| Tratamiento | Temperatura media (°C) | Velocidad del aire (m/s) |
|-------------|------------------------|--------------------------|
| T1          | 28.89                  | 0.21                     |
| T2          | 28.56                  | 0.19                     |
| T3          | 28.77                  | 0.21                     |
| T4          | 29.52                  | 0.22                     |

Se realizó una prueba de significancia entre T1 y T2, esto es entre el testigo y el tratamiento que presentó las mejores condiciones de temperatura, mediante el estadístico *t de Student* con un grado de significancia de 0.01 obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 3. Este análisis indica que existe diferencia significativa entre dichos tratamientos.

Tabla 9 Comportamiento del flujo de aire con cultivo. Prueba de significancia *t* de Student para T1 y T2

|  | <i>T1</i>  | <i>T2</i>  |
|--|------------|------------|
| Media                                  | 28.8924055 | 28.5682452 |
| Varianza                               | 8.251329   | 7.93609301 |
| Observaciones                          | 6242       | 6242       |
| Coefficiente de correlación de Pearson | 0.12941509 |            |
| Diferencia hipotética de las medias    | 0          |            |
| Grados de libertad                     | 6241       |            |
| Estadístico <i>t</i>                   | 6.82214675 |            |
| P(T<=t) una cola                       | 4.9069E-12 |            |
| Valor crítico de <i>t</i> (una cola)   | 2.32694551 |            |
| P(T<=t) dos colas                      | 9.8139E-12 |            |
| Valor crítico de <i>t</i> (dos colas)  | 2.57661727 |            |

La diferencia en la altura de la base del cultivo no influye en la velocidad del flujo de aire, como lo muestra la Tabla 8, pero sí de manera positiva en la temperatura, lo cual nos indica que la principal influencia del flujo de aire sobre la temperatura es debida a las zonas superiores por encima del cultivo.

Se observa que existe una correlación entre la velocidad del aire y al temperatura que indica que por cada 1 m/s de velocidad del aire al interior del invernadero, la temperatura disminuye en .28 °C.

Los resultados calculados muestran que existe una correlación entre la velocidad del aire y la temperatura, la cual nos indica que a partir de los 30 °C por cada 1 ms<sup>-1</sup> de velocidad del flujo de aire, la temperatura disminuye en 3.52° C, como se muestra en la Figura 5. Sin embargo, los valores de velocidad del flujo de aire al interior de la parte central del invernadero están muy por debajo de este valor, aún con un sistema de ventilación forzada (Figura 38).

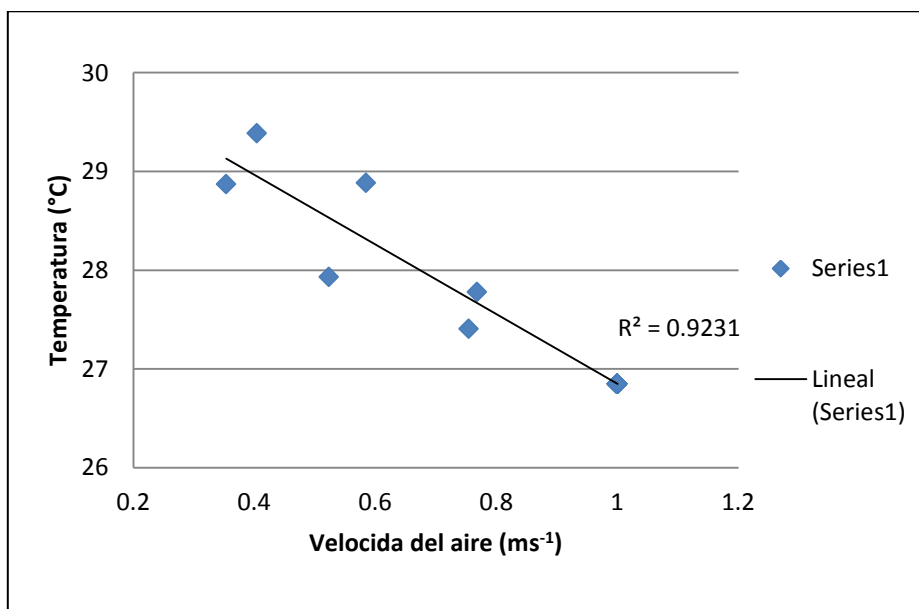


Figura 38. Relación entre la velocidad del flujo de aire y la temperatura

### 5.6 Velocidades del aire a diferentes alturas de aplicación

Los resultados de los tratamientos sobre las velocidades del flujo de aire a diferentes alturas, nos permiten observar que el tratamiento tres resulta ser el mejor de los 11 evaluados con una temperaturas inferiores a los 30 °C, ya que es similar a una configuración para verano, lo que permite estar por debajo de los rangos de temperatura letal para los principales especies cultivadas en el campus; tomate y pimiento (Agricultura chilena, 2012). También se observa que los tratamientos entre los

dos y tres metros son más susceptibles de alcanzar mayores temperaturas y velocidad del flujo de aire. A alturas superiores a los tres metros ocasionaran mayor temperatura al dejar atrapada la energía por debajo de los tres metros esto será un efecto similar a una configuración para un invernadero en invierno como se muestra en la Figura 39.

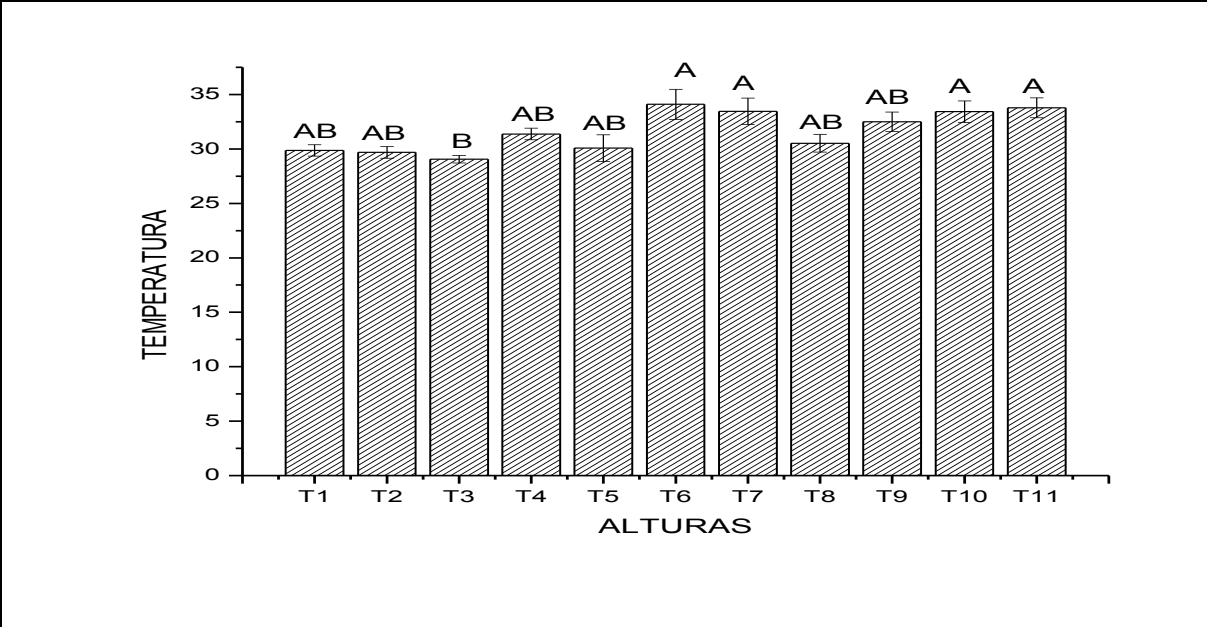


Figura 39. Análisis de altura y velocidad del viento

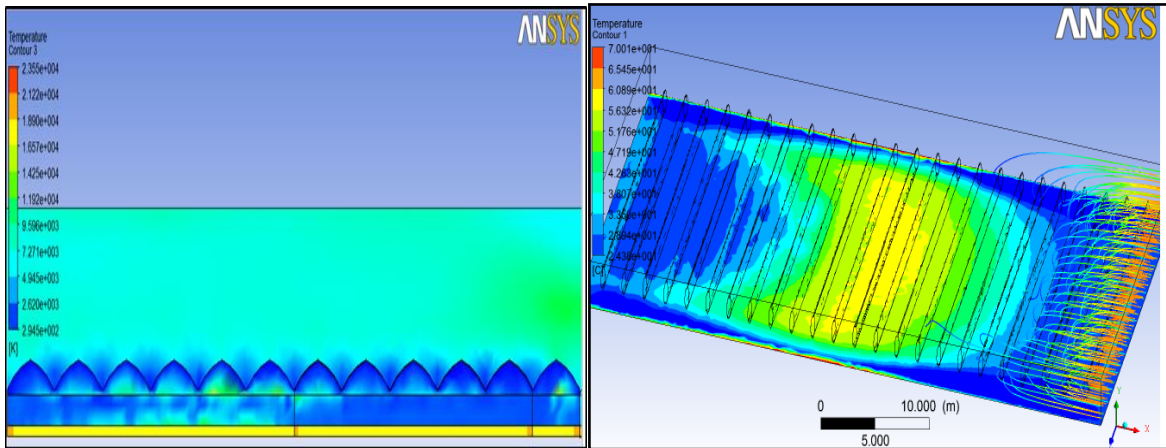


Figura 40. Comportamiento del aire y temperatura al interior del invernadero a partir de las velocidades propuestas al interior y ventanas del invernadero de 5600

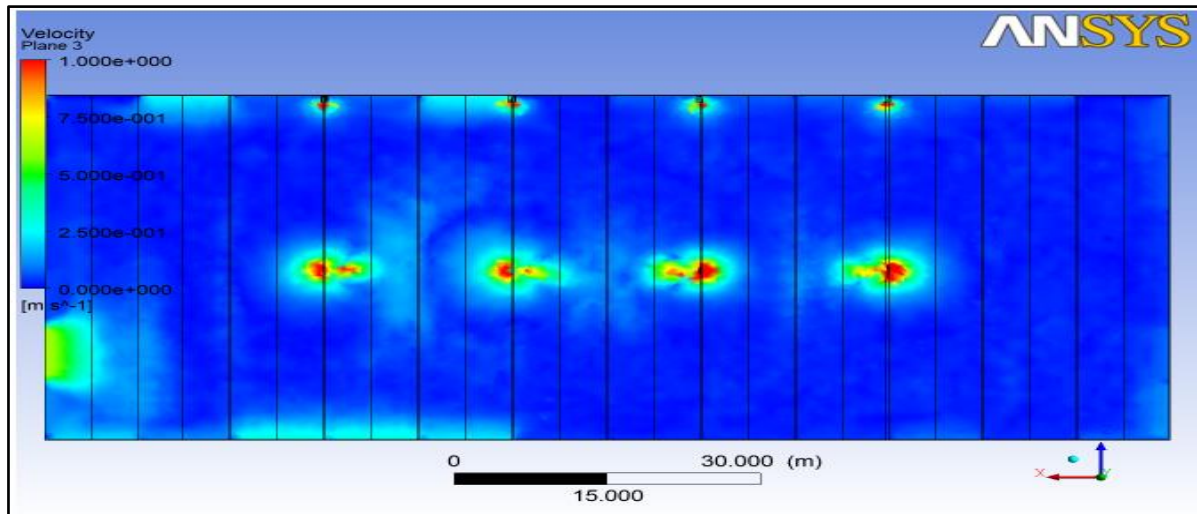


Figura 41. Comportamiento del aire al interior del invernadero a partir de las medidas de velocidad del aire al interior con ventiladores y ventanas

## CONCLUSIONES

Utilizando un modelo CFD 3D es posible determinar las relaciones entre las variables temperatura, humedad y velocidad de flujo de aire. El espacio del cultivo actúa como un subsistema dentro de los invernaderos. La Dinámica de Fluidos Computacional se le puede usar como una valiosa herramienta de diseño, permitiendo evaluar las diferentes condiciones antes de realizarlas.

Las mejores condiciones posibles para nuestro conjunto resultan ser aquellas a una altura de tres metros, estando en un nivel adecuado en su incidencia de la radiación solar y por lo tanto menor calentamiento, con un inicio de cultivo a los .45 metros sobre la cama de cultivo y aplicación de la ventilación mecánica entre uno y tres metros de altura a una velocidad de entre 2-2.5 m/s.

Con base a los resultados obtenidos para las alturas de cultivo y velocidades de aire a diferentes alturas, podemos concluir que mediante los modelos CFD se conocen las condiciones óptima que permita obtener las mejores condiciones ambientales al interior de los invernadero, que a pesar de que los diferentes tratamientos mostraron poca variación tanto en la velocidad del flujo de aire como en la temperatura, dichas diferencias son significativas. Por lo que es posible mejorar las condiciones de temperatura al interior de los invernaderos, conservando la altura del tutoreo a 3 m, así como la altura de la base del cultivo a 0.45 m. Con la ventilación forzada a una altura entre los dos y los tres metros en dirección este a oeste del movimiento del aire.

## **RECOMENDACIONES**

Se recomienda realizar estudios posteriores que permitan establecer los rendimientos obtenidos al realizar modificaciones de la altura de la base de los cultivos, así como los efectos en la concentración de CO<sub>2</sub> y la humedad con ventilaciones por debajo de los 3 metros en cultivos.

## REFERENCIAS

AMHPAC, 2009. Estudio de oportunidades externas para el desarrollo de la inteligencia comercial del mercado de exportación de la horticultura protegida.

Ana Rodríguez Díaz 2009. Métodos de predicción y técnicas de control de la condensación en invernaderos. 98-109/224

Asociación Mexicana de Horticultura Protegida. 2009. Boletín informativo. Octubre 15, Volumen 1, N° 11.

Boulard, T., R. Haxaire, M. A. Lamrani, J. C. Roy, and A. Jaffrin.2002. Characterization and modelling of the air fluxes induced by natural ventilation in a greenhouse. J. Agric. 135-144.

Briceño-Medina, 2011. Modelo de simulación del microclima de un invernadero.

Casanova, V.V. 2008. Modelación De Dióxido De Carbono (CO<sub>2</sub>) En Invernaderos Ventilados Naturalmente. Tesis F.I: UA.Q. 26-27.

Castañeda *et al.*, 2007. Modelo de simulación del microclima de un invernadero.

Costas Pontikakos *et al.*, 2006. Natural ventilation efficiency in a twin-span greenhouse using 3D computational fluid dynamics 26-27.



Chow, K., Hold, A.E., 2010. On the influence of boundary conditions and thermal radiation on predictive accuracy in numerical simulations of indoor ventilation. *Building and Environment* 45, 437-444.

De la Torre-Gea y Rico-García, 2012. Redes bayesianas aplicadas a un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional para las condiciones climáticas al interior de un invernadero. *Research in Computing Science*, 55:249-258.

De la Torre-Gea, 2012. Modelación del flujo de aire mediante Dinámica de Fluidos Computacionales en invernaderos con ventilación natural. 26-51

De la torre-Gea, G., Soto-Zarazúa, G.M., López-Crúz, I., Torres-Pacheco, I., Rico-García, E. 2011b. Computational fluid dynamics in greenhouses: A review. *African Journal of Biotechnology*, 10(77), 17651-17662.

Eduardo García Mozos, Pedro Soria García-Ramos 2013. Aplicación de técnicas "cfd" (computational fluid dynamics) ITSEMAP en proyectos de edificios y entornos singulares. Aplicación al análisis de incendios. 1-13

Fernández, J.E.; Bailey, B. J. 1992. Measurement And Prediction Of Greenhouse Ventilation Rates. *Agricultural And Forest Meteorology* 229-245.

FIRA, 2008. Rentabilidad y costos de cultivos de jitomate.

FIRA. 2007. Agricultura protegida: cultivo de tomate en invernadero

Flores Velázquez J. 2010. Análisis del clima en los principales modelos de invernaderos en México (Malla sombra, Multitúnel y Baticenital) mediante la técnica del CFD (Computational Fluid Dynamics)1-144

Flores-Velázquez, 2010 Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica 8-8

Flores-Velázquez, Enrique Mejía-Sáenz, Juan I. Montero-Camacho, Abraham Rojano 2011.

Flores-Velázquez, *et al.*, 2010. Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica.

HO, L., 1996. Tomato *In*: Zamski, E.; Schaffer, A. eds. Photoassimilate distribution in plant and crops. New York, Marcel Dekker, Inc. 709-728p J. AMER. SOC. HORT. SCI. 134(1):134–140. 2009.

[www.infoagro.com/industria\\_auxiliar/control\\_climatico](http://www.infoagro.com/industria_auxiliar/control_climatico).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI-GEOGRAFIA)

[www.inegi.gob.mx](http://www.inegi.gob.mx)

Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., Bouirden, L., 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare canary type greenhouse: an experimental and CFD assisted study. *Agr. Forest Meteorol.* 149, 1050-1062.

Irineo L. López-Cruz, Leopoldo Hernández-Larragoiti Modelos Neuro-difusos para temperatura y humedad del aire en invernaderos tipo cenital y capilla en el centro de México colpos 1-15

Jorge Flores-Velázquez<sup>1</sup>, Enrique Mejía-Saenz<sup>1</sup>, Juan I. Montero-Camacho, 2011  
Numerical analysis of the inner climate in a mechanically-ventilated greenhouse with  
three spans *Agrociencia* vol.45 no.5

Montero, Pere Muñoz, 2005 Nuevas tendencias en tecnología de invernaderos. 1-8

Molina 2012. Ventilación natural: estudio aerodinámico mediante CFD de extractores  
pasivos y captadores de viento. *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 27 No1,  
Abril de 2012 pag.40-56

Panayotova S. An undergraduate experiment on thermal properties. *Eur. J. Phys.* 8  
(October 1987) pp. 308-309

Ortiz D.M. (2004). Simulación numérica de la ventilación natural en un invernadero  
Colombiano de 10 Plásticos en Agricultura. Bogotá, Colombia 8-10 Nov. p. 99-104.

Muñoz Odina 1998, Ventilación natural de invernaderos multitúnel. 171-178.

Pedro Muñoz Odina 1998. Ventilación natural de invernaderos multitúnel. 4, 5, 32/167

Pérez-Parra, J. (2002) Ventilación natural de invernaderos tipo parral. Tesis  
Universidad de Córdoba. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de  
Montes. Departamento de Agronomía

Rico-García, E., López-Cruz, I.L., Herrera-Ruiz, G., Soto-Zarazúa, G.M., Castañeda  
Miranda, R., 2008. Effect of temperature on greenhouse natural ventilation under hot  
conditions: Computational Fluid Dynamics simulations. *J. App lied Sci.* 8, 4543-4551.

Rico-García, E.; Castañeda-Miranda, R.; García-Escalante, J. J.; Lara-Herrera, A.;

Herrera-Ruiz, G.2007. Accuracy comparison of a mechanistic method and computational fluid dynamics (CFD) for greenhouse inner temperature predictions. Revista Chapingo Serie Horticultura 13(2): 207-212, 2007.

Jorge Flores-Velázquez<sup>1</sup>, Enrique Mejía-Saenz, Juan I. Montero-Camacho , Abraham Rojano, 2011. Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. 1, 545, 547,555/560.

Romero-Gómez *et al*, 2010. Análisis numérico del clima interior en un invernadero.

Roy, J.C., Boulard, T., 2005. CFD prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: influence of wind direction and sensibility to turbulence models. Act Hort. (Ishs) 691:457-464.

SAGARPA; FIRA, 2010. La producción de hortalizas en México.

Sase y Okushima, 2000. Análisis de la distribución de flujo de aire y la temperatura al interior de invernaderos de varios tramos con CFD de animación

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2009. <http://www.sagarpa.gob.mx/>

Secretaria Desarrollo Agropecuario [www2.queretaro.gob.mx/sede/SEDEA.htm](http://www2.queretaro.gob.mx/sede/SEDEA.htm)

Seginer I. 2002. The Penman-Monteith Evapotranspiration Equation As An Element In Greenhouse Ventilation Design. Biosystems Engineering. 423-439.

Wang y Boulard, 2000. Numerical Analysis of the Influence of Soil-Air Convective Heat Transfer Coefficient on the Global Indoor Climate Model of Closed Plastic Tunnel

Greenhouses.

Sase, S., 2006. Air movement and climate uniformity in ventilated greenhouses. Act Hort. (Ishs) 313-324.

Soriano, T.; J I Montero; M C Sánchez-Guerrero; E Medrano; A Antón; J Hernández, 2005. Nuevas tendencias en tecnología de invernaderos. 24-28.

Sánchez, José Manuel Salmerón, Francisco José Sánchez, Servando Álvarez, José Luis Morales; N Castilla, 2004. Characterisation of Direct Radiation transmission in Asymmetrical Multi-span Greenhouses using Scale Models and simulation Models. Journal of Biosystems Engineering 243-253.