



Artículo: COMEII-17008

III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

INNOVACIÓN TECNOLÓGICA BASADA EN DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL PARA EL DESARROLLO DE LA AGRICULTURA PROTEGIDA

**Cruz Ernesto Aguilar Rodríguez^{1*}; Jorge Flores Velázquez²; Waldo Ojeda
Bustamante²; Abraham Jesús Arzeta²**

¹Posgrado IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

ernesto.8702@hotmail.com - telf.: 354 101 3901 (*Autor de correspondencia)

²Riego y Drenaje. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos, C.P. 62550. México.

Resumen

Actualmente, el uso de invernaderos para el cultivo de hortalizas en México ha ido en incremento, siendo los invernaderos de baja y media tecnología los más utilizados, debido a su relación costo-producción. En la actualidad, existen diferentes equipos utilizados en los invernaderos que permiten tener un mejor control del clima dentro de los mismos, sin embargo, debido a su elevado costo, siguen siendo poco utilizados; por lo que un óptimo diseño de invernadero puede mejorar considerablemente la eficiencia energética, reduciendo su costo e incrementando la producción. Una herramienta utilizada para el análisis del clima del invernadero que apoya el diseño de los mismos es Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que mediante la solución de las ecuaciones Navier Stokes, basadas en la ecuación de momento, masa y energía; se puede determinar los gradientes de temperatura, presión, velocidad del viento dentro del invernadero, siendo estos factores los principales para tener un mejor control de clima dentro de ellos. En este trabajo se simula el ambiente de un invernadero típico cenital de tres naves en una región semiárida. Los resultados indican temperaturas por arriba de la basal de cultivos, por lo que se plantea una opción mecánica para el manejo de las altas temperaturas.

Palabras clave adicionales: agricultura protegida, cultivo en invernaderos, CFD, simulación, dinámica de fluidos computacional.



Introducción

La agricultura protegida consiste en el uso de estructuras y plásticos para tener un mayor control del clima. La temperatura interior depende tanto de la temperatura exterior, así como del diseño del invernadero, el tipo de cultivo, la configuración y operación de los sistemas de control. Un buen ajuste en la ubicación de las ventanas del invernadero y los extractores puede mejorar considerablemente la renovación del aire que consecuentemente producen menores gradientes de temperatura dentro del invernadero (Flores *et al.*, 2015). También se ha observado que un ajuste en las ventanas cenitales fijas puede incrementar el flujo de aire en el invernadero, incrementando la renovación del aire y por consiguiente homogenizando la temperatura dentro del invernadero, como lo demostró Villagrán *et al.* (2012). Mediante simulación matemática y tres diseños diferentes en la ventilación cenital de los invernaderos, los resultados obtenidos mediante la simulación demuestran que un buen diseño de un invernadero, acorde a las condiciones de cada región pueden ser de gran utilidad para la agricultura protegida, evitando gastos innecesarios en la implantación de equipos para el control del clima, por su parte un buen diseño, además de mejorar las condiciones en el interior del invernadero, mejorará la producción.

Actualmente el uso de CFD para el diseño de invernaderos ha ido en incremento, debido a los grandes beneficios obtenidos al disminuir los gastos innecesarios en su diseño y control. CFD es una herramienta que consiste en la solución de las ecuaciones de Navier Stokes. La aplicación de este software en la agricultura protegida, permitirá al agricultor conocer cómo será el comportamiento de las temperaturas al interior del invernadero antes de construirlo, lo que a su vez servirá para rediseñar el invernadero y buscar el diseño más viable, permitiendo al agricultor obtener los mejores resultados desde el inicio (Flores *et al.*, 2010; Villagrán *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2008; Majdoubi *et al.*, 2009; Flores *et al.*, 2011; Bournet 2014; Flores *et al.*, 2014), para comprobar los resultados de la simulación matemática se procede a realizar una validación física con la finalidad de demostrar que los resultados obtenidos son estadísticamente significativos con los resultados obtenidos en la simulación como lo demuestra López (2012) al realizar una validación de un modelo matemático para predecir las condiciones climáticas en un invernadero.

El objetivo de este trabajo es demostrar que mediante el estudio de dinámica de fluidos computacionales, es posible diseñar, rediseñar, modificar, corregir y mejorar la eficiencia costo-producción, esto es posible gracias a que el estudio te permite conocer cómo será el comportamiento al interior del invernadero, permitiendo una mejor tecnología para el control del clima al interior del mismo.



Materiales y métodos

Invernadero

La investigación se llevó a cabo en un invernadero tipo capilla, tomando en cuenta las condiciones y el promedio anual de la temperatura de la ciudad de Los Reyes, Michoacán. Se realizó la simulación matemática de dicho invernadero bajo diferentes condiciones de operación, con la finalidad de observar el impacto que tendrá el uso de extractores en la renovación de flujo dentro del invernadero y así considerar la dinámica de fluidos computacional como una herramienta para la solución, diseño y rediseño de invernaderos.

Para la simulación matemática, se utilizó un equipo de cómputo con el software ANSYS FLUENT y se aplicó el procedimiento general para los modelos de CFD (Norton *et al.*, 2007). Primero se procedió a realizar el diseño del invernadero en un software CAD, dicho diseño incluyó la zona de cultivo del jitomate, como se puede mostrar en la figura 1.

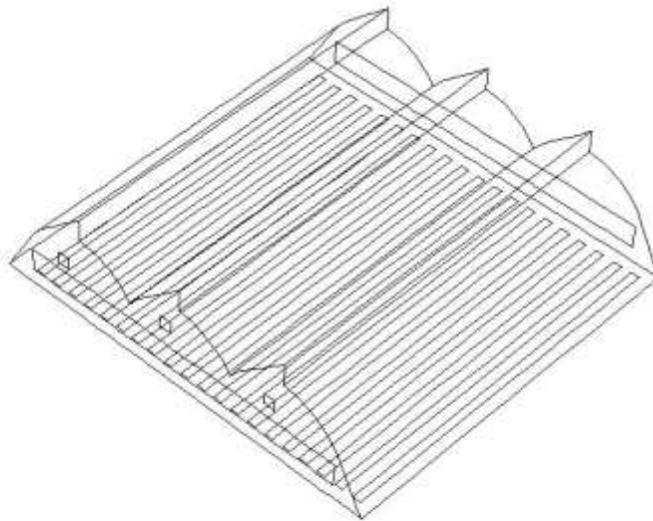


Figura 1. Diseño del invernadero.

Posteriormente se procedió a la realización del **Preproceso**:

- Descomposición de la geometría.
- Mallado.
- Definiciones de las condiciones de frontera.
- Exportación de la malla.



Y por último se realizó el **Proceso**:

Consiste en la solución de las ecuaciones de transporte, mediante un proceso iterativo se resuelven las ecuaciones, arrojándonos resultados de gradientes de temperatura, vectores de velocidad, presión y otras variables físicas que intervienen en el proceso.

Las ecuaciones de transporte que gobiernan el flujo tridimensional de un fluido viscoso, compresible en estado no estacionario, en coordenadas cartesianas son:

- Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0 \quad (1)$$

- Ecuaciones de momento:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u V) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v V) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w V) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (4)$$

- Ecuaciones de energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} = \rho q + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial(u\rho)}{\partial x} - \frac{\partial(v\rho)}{\partial y} - \frac{\partial(w\rho)}{\partial z} \\ + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} \\ + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{zx})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{zy})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f \cdot \nabla \end{aligned} \quad (5)$$

Donde:

x = coordenada eje de abscisas

y = coordenada eje de ordenadas

z = coordenada eje de cotas

∂ = derivada parcial

∇ = operador nabla



ρ = densidad (kg m^3)

u = velocidad en la direccion x (m s^{-1})

v = velocidad en la direccion y (m s^{-1})

w = velocidad en la direccion z (m s^{-1})

V = vector de velocidad (m s^{-1})

t = tiempo (s)

f = vector de fuerza de cuerpo (N)

K = conductividad termica del fluido ($\text{W m}^{-1}\text{k}^{-1}$)

e = energia interna ($\frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{k}}$)

τ = esfuerzo cortante ($\frac{\text{N} * \text{s}}{\text{m}^2}$)

T = temperatura ($^{\circ}\text{k}$)

P = presion (pa)

Tabla 1. Escenarios de la simulación matemática.

ESCENARIO	CONDICIONES DE FRONTERA		TIPO DE MALLA	NÚMERO DE ELEMENTOS	VELOCIDAD DEL VIENTO	TEMPERATURA
1	cortinas cenitales cerradas	con extractores	Orthogonal Quality	467 624	3 m/s	293.65 °k
2		sin extractores	Orthogonal Quality	467 624	3 m/s	293.65 °k
3	cortinas cenitales abiertas	con extractores	Orthogonal Quality	467 624	3 m/s	293.65 °k
4		sin extractores	Orthogonal Quality	467 624	3 m/s	293.65 °k

Análisis y discusión de resultados

Distribuciones de temperatura en el invernadero

Se llevaron a cabo cuatro simulaciones con ventilación mecánica y con ventilación forzada, los ventiladores se situaron en la parte posterior de la zona de ingreso del aire al invernadero.

Parte de los resultados de la simulación indican el comportamiento térmico en el interior de los invernaderos de diferentes escenarios (tabla 1). La figura 2 muestra los gradientes térmicos, bajo diferentes condiciones de operación. Como es posible observar, el uso de mecánica de fluidos computaciones como herramienta de diseño y de análisis, puede llegar a ser de gran ayuda; la construcción de un modelo numérico, permite al agricultor conocer el comportamiento al interior del



invernadero bajo diferentes condiciones climáticas, tomando en cuenta el tipo de cultivo y bajo diferentes condiciones de operación, etc. permitiéndole tener un mayor control del clima al interior del invernadero. En la figura 2 se observa dos escenarios con una mayor homogenización de temperatura, escenario 3 y 4, analizando dichos escenarios se llega a la conclusión que un buen diseño del invernadero puede llegar a generar un adecuado control del clima dentro del invernadero, siendo innecesario implementar algún equipo o aparato.

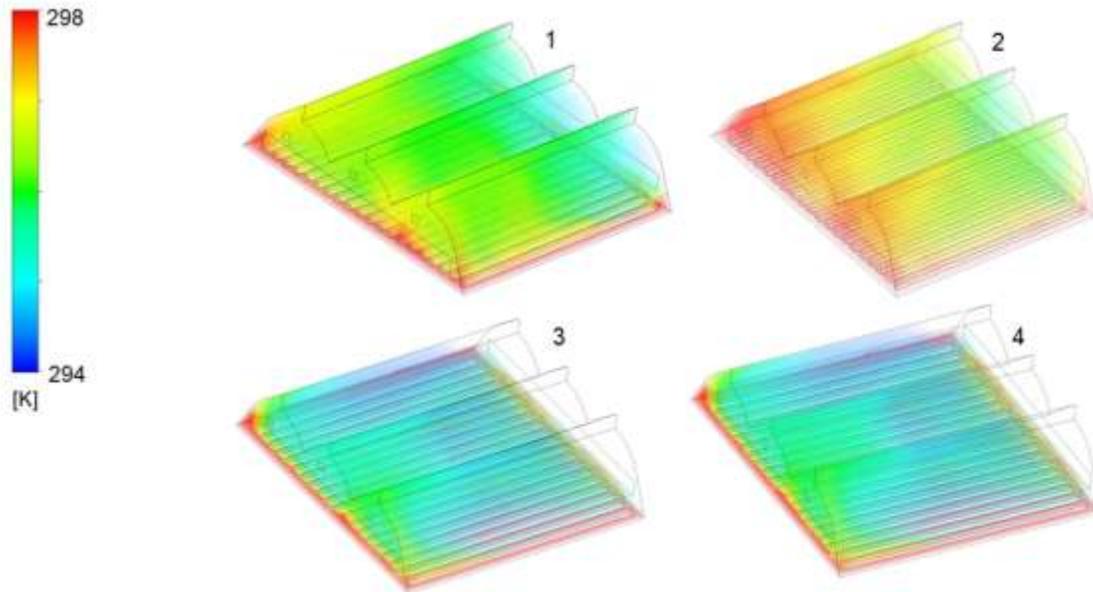


Figura 2. Gradientes de temperatura en los diferentes escenarios.

Se midió la distribución de temperatura en el interior del invernadero, para lo cual se procedió a generar tres planos en el invernadero como se observa en la figura 3 y posteriormente se realizó un análisis de los gradientes de temperatura en dicho plano como se muestra en la figura 4, 5 y 6.

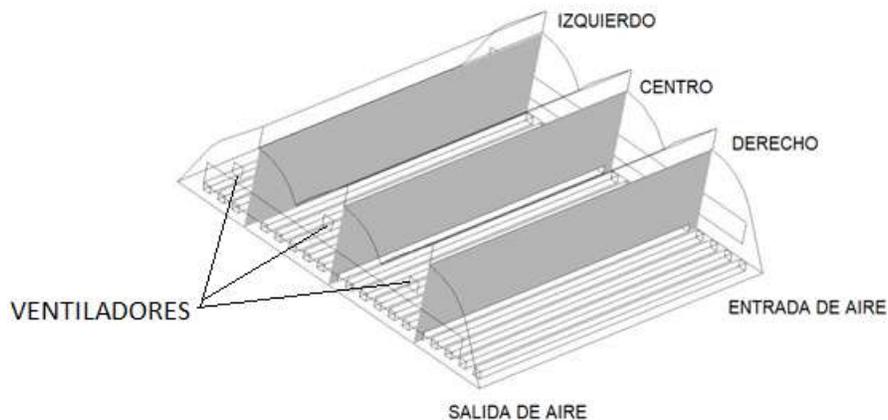


Figura 3. Planos al interior del invernadero.

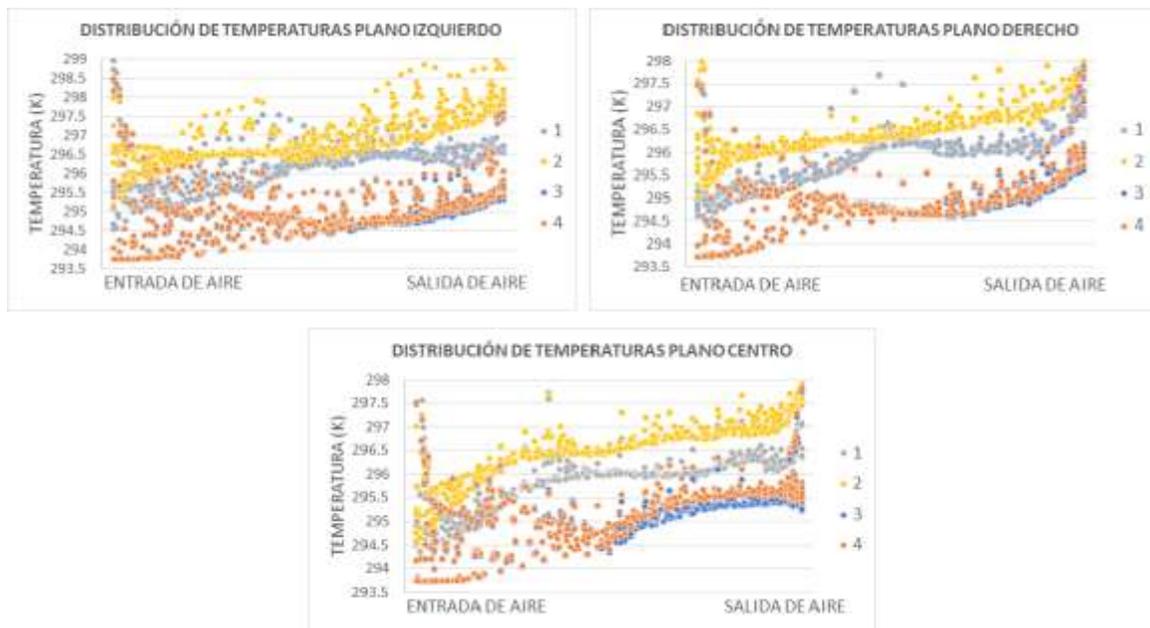


Figura 4. Gráficos de temperaturas en los planos al interior del invernadero.

En la figura 4, se observa el comportamiento que tiene el clima al interior del invernadero debido a diferentes factores y métodos de operación. Como se aprecia la temperatura al inicio del invernadero sigue siendo la temperatura más baja en cada uno de los escenarios, en los escenarios 1 y 2 se observa una diferencia en la disminución de los gradientes de temperatura a la salida del aire del invernadero, debido al uso de extractores, que incrementan la renovación de aire al interior del invernadero, mientras en los casos 3 y 4 se visualiza un comportamiento muy similar en la distribución de temperaturas, para estos casos es comprobable que mediante un óptimo diseño y un correcto control de operación del invernadero, se obtienen grandes tasas de renovación de aire dentro del invernadero, homogenizando temperatura, reduciendo gradientes y a su vez permitiendo un incremento de dióxido de carbono al interior del invernadero. Cabe mencionar que para tener un excelente control del clima al interior del invernadero es necesario tener un óptimo diseño del mismo, el cual dependerá tanto del clima, cultivo, suelo, velocidad del viento, material de construcción, ubicación geográfica, por mencionar algunos. Por tal motivo, es necesario que antes de construir un invernadero, se realice la construcción de un modelo numérico, incluyendo las principales variables, que le permitan establecer relaciones con una correlación superior al 95% para dar certeza en el manejo y gestión del invernadero.

Conclusiones

El uso e implementación de equipos, que ayuden a la renovación de aire al interior del invernadero en la agricultura protegida, genera un mayor control del clima al interior del mismo. Por su parte el uso de nuevas herramientas para el diseño de invernaderos ha ido en incremento, tal es el caso de la Dinámica de Fluidos



Computacional, que mediante la solución de las ecuaciones de transporte, se obtienen resultados favorables al momento de construir un invernadero, permitiendo el diseño de ellos de acorde a su ubicación (tomando en cuenta las principales variables de la región) para su óptimo desempeño. Una de las grandes ventajas del uso de Dinámica de Fluidos Computacional, es la correlación de los resultados obtenidos a los reales, además de que desde el punto de vista operativo, es más fácil de manipular un diseño en la computadora, disminuyendo los gastos de fabricación y obteniendo resultados más rápidos, que al instalar, modificar y medir las variables que afectan al cultivo en la vida real.

Dado que la velocidad del viento de la zona de estudio de este trabajo es grande, no es necesario la implementación de extractores para un buen funcionamiento del invernadero, las altas velocidades permite que exista dentro del invernadero una mejor renovación del flujo de aire; en zonas donde la temperatura sea mayor y exista menor velocidad del viento, será necesario el uso de ventiladores, para mantener un mayor control del clima, teniendo en cuenta que un buen diseño permitirá reducir el uso de los ventiladores, logrando reducir el costo de producción.

Referencias Bibliográficas

- Bournet, P. E. (2014). Assessing Greenhouse Climate Using CFD: a Focus on Air Humidity Issues. *Acta Horticulturae*, 1037, 971–986.
- Flores-Velazquez, J. 2010. Climate analysis in the main models of greenhouse in Mexico (mesh shade and Baticenital multitunnel) using CFD. PhD Tesis, Almeria University, Spain.
- Flores, J., Mejía, E., Montero, J. y Rojano, A. (2011). Análisis numérico del clima interior en un invernadero de tres naves con ventilación mecánica. *Agrociencia*, 45, 545–560.
- Flores, J., Lorenzo, I., Mejía, E. y Montero, I. (2014). Evaluación del desempeño climático de un invernadero baticenital de centro de México mediante dinámica de fluidos computacional (CFD). *Agrociencia*, 48, 131–146.
- Flores-Velázquez. J. y Villarreal-Guerrero, F. 2015. Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol.6 Núm.2. p. 303-316
- Kim K., Yoona J.Y., Kwonb H.J., Hana J.H., Sonc J.E., Namd S.W., Giacomelli G.A., Lee I.B., (2008). 3-d CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Eng.* 100: 245-255.



- Lopez, A. (2012). Validación de un modelo matemático para predecir las condiciones climáticas interna en un invernadero localizado en la zona norte de Cartago, Costa Rica (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica.
- 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.
- Norton T, Sun DW, Grant J, Fallon R, Dodd V. 2007. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: a review. *Bioresour Technol* 98(12): 2386-414.
- Villagrán Munar, E. A. 2016. Diseño y evaluación climática de un invernadero para condiciones de clima intertropical de montaña. MSc tesis, Universidad Nacional de Colombia.
- Villagrán Munar, E. A.; Gil, Rodrigo; Acuña, J.F.; Bojaca, C.R. 2012. Optimización de la ventilación y su efecto en el microclima de un invernadero multitunnel colombiano. *Agronomía Colombiana*. Vol. 30, Núm. 2.