

# Simulación numérica del comportamiento térmico de un macro túnel utilizado para la producción de hongos comestibles bajo condiciones de clima tropical

## Numeric simulation of macrotunnel greenhouse thermic behavior used for edible mushrooms under tropical weather conditions

Sebastian Montaña-Rodríguez<sup>1</sup>, Edwin Andrés Villagrán-Munar<sup>2</sup>,  
David Felipe Osorio-Fiaga<sup>3</sup>, Carlos Ricardo Bojacá-Aldana<sup>4</sup>,  
Wilmer Leonardo Velásquez-Vargas<sup>5</sup>

Montaña-Rodríguez, S; Villagrán-Munar, E; Osorio-Fiaga, D; Bojacá-Aldana, C; Velásquez-Vargas, W. Simulación numérica del comportamiento térmico de un macro túnel utilizado para la producción de hongos comestibles bajo condiciones de clima tropical. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32, Especial. XIII CLIA. Abril 2019. Pág 78-85.

DOI: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4263>

- 1 Estudiante de Ingeniería Agrícola, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Colombia. Correo electrónico: smontanor@unal.edu.co
- 2 Ingeniero Agrícola, Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria Minuto de Dios, Sede Cundinamarca, Colombia. Doctorado en Ciencias Ambientales y Sostenibilidad, Departamento de Ciencias Biológicas y Ambientales, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: evillagranm@uniminuto.edu.co
- 3 Estudiante de Ingeniería Agrícola, Fundación Universitaria de San Gil (Unisangil) Sede Yopal, Colombia. Correo electrónico: davidfelipeosorio@unisangil.edu.co
- 4 Ingeniero Agrónomo, Departamento de Ciencias Básicas y Modelado, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Universidad Jorge Tadeo Lozano, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: carlos.bojaca@utadeo.edu.co
- 5 Ingeniero Agrícola, Fundación Universitaria de San Gil (Unisangil) Sede Yopal, Colombia. Correo electrónico: wvelasquez@unisangil.edu.co



## Palabras clave

Dinámica de fluidos computacional; método de volúmenes finitos; ventilación natural, comportamiento térmico.

## Resumen

El estudio del comportamiento térmico de las estructuras de agricultura protegida de tipo pasivo establecidas en condiciones de clima tropical sigue siendo un aspecto relevante, esto con el fin de garantizar las condiciones micro climáticas adecuadas para el crecimiento y desarrollo de las plantas. En Colombia este comportamiento al igual que el del fenómeno de ventilación natural es aun poco estudiado para condiciones de clima cálido. El objetivo de este trabajo fue determinar el comportamiento térmico y los índices de renovación de una estructura de macro túnel usada para la producción de hongos comestibles, este comportamiento se determinó a través de modelaciones numéricas CFD 3D. los resultados obtenidos mostraron un comportamiento térmico adecuado del macro túnel para las condiciones meteorológicas predominantes de la zona de estudio. Los índices de renovación obtenidos oscilaron entre 22.5 y 45.6 renovaciones hora para los casos simulados. El modelo CFD fue validado a través de registro del valor de la variable temperatura en la estructura construida a escala real y los resultados obtenidos mostraron un ajuste adecuado entre los datos simulados y los registrados.

## Keywords

Computational fluid dynamics; finite volumes method.; natural ventilation, thermic behavior.

## Abstract

The study of the thermic behavior of protected agriculture structures passive type established on tropical weather conditions still being relevant when adequate micro climate conditions are guaranteed for growth and development of the plants. In Colombia that behavior and the natural ventilation phenomenon has not been studied for warm weather conditions. The goal of this study is to determine the thermic behavior and the macro tunnel structure renovation for edible fungus index, which was determined through numeric models CFD 3D. The results obtained gave an adequate thermic behavior on the macro tunnel for the predominant meteorological conditions on site. The obtained renovation index oscillates between 22.5 and 45.6 renovations/hour for simulated cases. The CFD model was validated registering the temperature values in the structure built at full scale, the results obtained shown an adequate adjustment between simulated data and registered data.

## Introducción

A nivel mundial en las últimas cuatro décadas la agricultura protegida (AP) se ha expandido y masificado llegando a ocupar superficies aproximadas a las 4.900.000 hectáreas en donde se encuentran construidas estructuras con una amplia gama de materiales y diferentes niveles tecnológicos [1]. Donde se establecen cultivos de diversas especies hortícolas y ornamentales. Estas estructuras permite tener control parcial o total de las principales variables ambientales (luz, temperatura, humedad, nivel de CO<sub>2</sub>), variables que interactúan con la planta durante su ciclo de crecimiento e inciden en su rendimiento final [2]. En general existen dos métodos de control de clima, activo y pasivo, las estructuras de control activo cuentan con sistemas asociados (calefactores, refrigeradores, ventiladores, humidificadores, sistemas de iluminación

e inyección de CO<sub>2</sub>, pantallas de sombreado y térmicas). Esta serie de elementos permiten controlar las variables ambientales de interés, generando un microclima adecuado para las plantas sin importar las condiciones meteorológicas externas.

En el grupo de estructuras pasivas, predominantes en las zonas tropicales. El control de clima se realiza por medio del fenómeno de ventilación natural [3]. Este fenómeno depende de dos fuerzas impulsoras: la convección forzada o ventilación dinámica causada por la acción del viento exterior y la convección libre o ventilación térmica vía flotabilidad causada por la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior del invernadero [4]. La ventilación afecta la temperatura interna del invernadero de forma tal que en horas de alta radiación se hace necesario circular aire del exterior hacia el interior del invernadero en forma homogénea con el fin de controlar los excesos de temperatura. Este movimiento del flujo de aire debe permitir además el intercambio de masa y de calor entre las plantas del cultivo y el aire circulante en el invernadero [5]. Adicionalmente la ventilación natural es la encargada de controlar excesos de humedad y mantener los niveles de CO<sub>2</sub> en rangos cercanos al nivel presente en la atmosfera.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento térmico de un macro túnel usado para la producción de Orellana (*Pleurotus ostreatus*) a pequeña escala, en condiciones de clima tropical cálido. Esta evaluación se desarrolló mediante modelos numéricos de simulación CFD 3D, modelo posteriormente validado con la recopilación de información experimental en la estructura real.

## Materiales y métodos

### Descripción del invernadero y la zona de estudio

Para el desarrollo de este estudio se utilizó un macro túnel de 6.6 m<sup>2</sup> de superficie cubierta, ubicado en zona rural del municipio de Yopal-Casanare (45°20'51.8" N, 72°22'22.1"O). Las dimensiones generales fueron de 3, 2.2 y 2.07 m para el ancho, largo y alto respectivamente. El material de cubierta utilizado fue polietileno y el macro túnel contaba con una ventilación lateral de dimensión de 0.4 m de ancho en el costado de sotavento. Yopal está clasificada como una región cálida, con temperatura media anual superior de 24°C y humedad relativa media superior al 70%, características propias de los climas tropicales húmedos. El valor multianual de las principales variables meteorológicas se presenta en el cuadro 1.

**Cuadro 1.** Valores multianuales de (P: precipitación, T<sub>max<sub>a</sub></sub>: temperatura máxima absoluta, T<sub>min<sub>a</sub></sub>: temperatura mínima absoluta, T<sub>max</sub>: temperaturas máximas promedio, T<sub>min</sub>: temperaturas mínimas promedio, T<sub>med</sub>: temperaturas promedias, BS: brillo solar y HR: humedad relativa).

MEDIOS	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P Re(mm)	8.5	60.4	79.3	279	333.7	298	312.3	255.4	275.9	255	131.8	20.2
T <sub>max<sub>a</sub></sub> (°C)	36.6	36.2	37.2	35.4	35.4	33.2	34.4	34.2	34.4	34	34.6	34
T <sub>min<sub>a</sub></sub> (°C)	17.2	18.5	20	19	19	19	17.8	18	17	16.4	16.8	17.8
T <sub>max</sub> (°C)	32.5	33.2	33.2	31.5	30.8	29.7	29.9	30.5	30.7	30.8	31.1	31.7
T <sub>min</sub> (°C)	22.5	22.9	23.7	22.6	22.3	21.7	21.5	21.4	21.5	21.6	21.9	22.1
T <sub>med</sub> (°C)	28.15	28.75	28.47	26.65	25.75	25.1	24.9	25.43	25.97	26.24	26.72	27.24
BS (Horas/día)	8.1	6.9	5.0	4.2	4.5	4.1	4.4	4.7	5.5	5.7	6.3	7.7
HR (%)	60.24	60.71	63.95	77.74	82.40	83.95	82.74	80.85	79.79	78.45	75.71	69.35

## Arreglo numérico

La simulación numérica por la técnica CFD, permite resolver las ecuaciones gobernantes del flujo de fluidos utilizando el método de volumen finito para convertir las ecuaciones diferenciales parciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas [6]. Estas ecuaciones pueden ser representadas como ecuaciones de convección-difusión de un fluido para tres leyes de conservación, que incluyen las ecuaciones de momento, energía y transporte de un fluido compresible y en un campo tridimensional (3D) y se expresan así:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla(\rho \phi \vec{v}) = \nabla(\Gamma \nabla \phi) + S \quad (1)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $\nabla$  es el operador nabla,  $\phi$  representa la variable de concentración,  $\vec{v}$  es el vector de velocidad ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $\Gamma$  es el coeficiente de difusión ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) y  $S$  representa el término fuente (Piscia et al., 2012). Es una ecuación de continuidad cuando  $\phi$  es 1, una ecuación de energía cuando  $\phi$  es  $T$  ( $^{\circ}\text{K}$ ) y una ecuación de momento cuando  $\phi$  es  $u$ ,  $v$ ,  $w$  las velocidades en las direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $z$  en ( $\text{m s}^{-1}$ ).

Estos conjuntos de ecuaciones fueron resueltos mediante la utilización del Software comercial ANSYS Fluent (v. 17.0). La naturaleza turbulenta del flujo de aire se simuló utilizando el modelo de turbulencia estándar  $k$ - $\epsilon$ . Este modelo ha sido el más utilizado y validado en estudios enfocados a invernaderos demostrando una precisión adecuada (Fatnassi et al., 2006; Katsoulas et al., 2006). Adicionalmente se consideraron la ecuación de energía y la aproximación de Boussinesq con el fin de evaluar el efecto térmico de la ventilación natural.

## Generación de malla

El paso inicial para el desarrollo de este trabajo consistió en la creación de dominio computacional tridimensional (3D) de gran tamaño que incluía el macro túnel evaluado, las dimensiones del dominio fueron de 102, 102 y 20 m para los ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  respectivamente. El dominio computacional estuvo compuesto por una malla no estructurada de elementos cúbicos dividido en 6.780.412 volúmenes discretizados en el espacio, este número de elementos se obtuvo luego de verificar la independencia de las soluciones numéricas del flujo de aire a tamaños de malla con un número superior e inferior de elementos de acuerdo al procedimiento reportado por [10]. Esta malla se construyó empleando el paquete de cómputo ANSYS (v. 17.0). Un criterio fundamental para establecer la precisión de las soluciones obtenidas mediante CFD consiste en evaluar la calidad de la malla. Los parámetros de calidad evaluados fueron el tamaño de las celdas y la variación del tamaño de celda a celda encontrando que un 98.3% de las celdas de la malla estaban dentro del intervalo de calidad alta.

## Condiciones de frontera

El límite superior del dominio y las superficies paralelas al flujo fueron fijadas con condiciones de frontera de propiedades simétricas para no generar pérdidas de fricción del flujo de aire en contacto con estas superficies. Las simulaciones consideraron las características atmosféricas del municipio de Yopal en Casanare (350 msnm) tales como presión atmosférica de 97716 Pa y gravedad de  $9.81 \text{ ms}^{-2}$ . El límite inferior y las paredes del macro túnel se les fijó una condición de frontera de pared antideslizante, las propiedades de los materiales usados para estos límites se mencionan en el cuadro 2. El límite izquierdo y derecho del invernadero se establecieron como límites de entrada de aire o salida de presión al dominio computacional según el caso evaluar, se consideró un perfil uniforme de velocidad del viento evaluando velocidades por debajo de valores de  $0.2 \text{ m s}^{-1}$  y valores de temperatura para S1, S2 y S3 de 21.4, 28.7 y 37.2  $^{\circ}\text{C}$  respectivamente. Dichos valores fueron establecidos a partir de la información climática

recopilada de datos históricos registrados por la red meteorológica nacional. El modelo numérico no incluyó la presencia de cultivo alguno y adicionalmente, se asumió una hermeticidad máxima del macro túnel.

**Cuadro 2.** Propiedades de los materiales incluidos en el dominio computacional.

Material	Densidad (kg m <sup>-3</sup> )	Conductividad térmica (W m-K <sup>-1</sup> )	Calor específico (J kg-K <sup>-1</sup> )
Polietileno	971	0.31	1900
Suelo	1300	1.0	800

### Validación del modelo desarrollado

La validación del modelo CFD se realizó a través de la comparación entre los resultados de las simulaciones del comportamiento térmico del macro túnel y el registro experimental de la temperatura dentro del macro túnel, donde fueron monitoreados cuatro puntos en el eje transversal a 0.5 metros y un punto a 1.6 metros de la altura del suelo. Las estaciones de registro tanto en el exterior como en el interior del macro túnel registraron datos cada 10 minutos. El periodo de registro de datos en campo empleado para la validación fue del 01 al 05 de febrero de 2018.

## Resultados y discusión

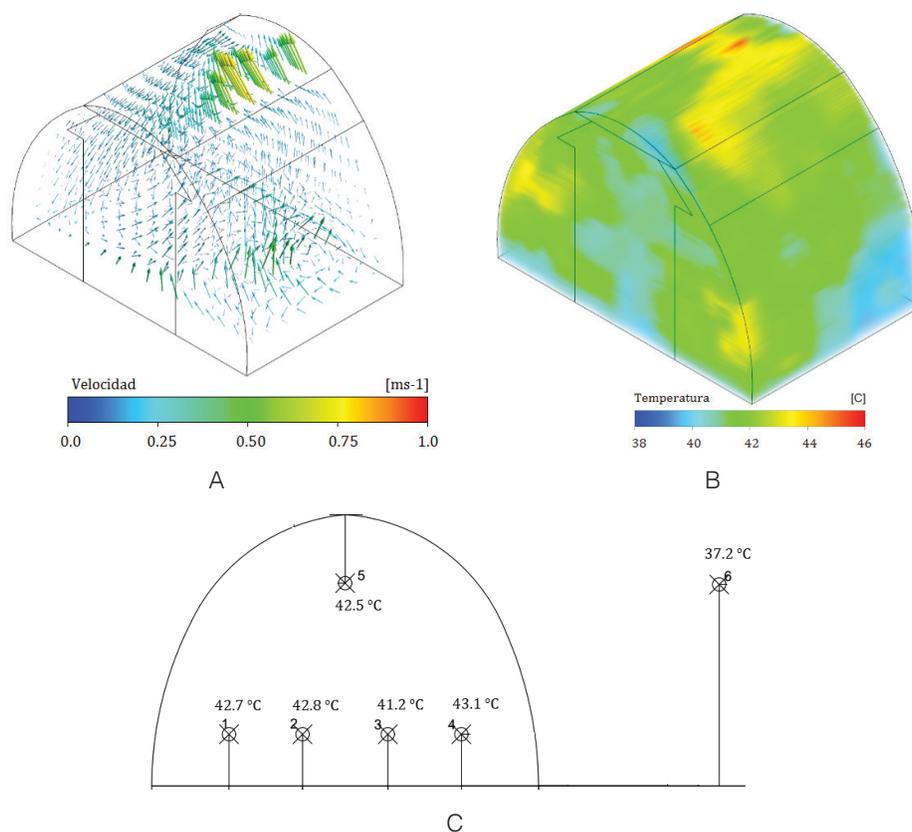
### Validación del modelo CFD

Para la validación se consideró una configuración de ventilación totalmente cerrada, junto con las condiciones meteorológicas medias del sitio de estudio, velocidad de aire exterior de 0.2 ms<sup>-1</sup> y una temperatura de 37.2°C presentadas para la hora 12. El movimiento de aire para la configuración evaluada muestra un movimiento convectivo desde la zona del suelo hacia la zona cubierta con valores medios de velocidad del aire de 0.43 ms<sup>-1</sup>, este movimiento es generado específicamente por el efecto térmico o de convección libre de la ventilación natural [9]A). Este movimiento se genera a partir de un cambio de densidad en el aire en función de la temperatura lo cual genera un movimiento vertical hacia la zona de la cumbre del macro túnel conocido como efecto chimenea [11]. El comportamiento térmico del macro túnel bajo esta configuración de ventilación muestra un diferencial térmico que aumenta en magnitud hacia la zona central del mismo, el valor medio de la temperatura interior obtenida fue de 42.08°C B). Al analizar los datos experimentales recopilados en campo bajo esta condición se encontró que el valor de la temperatura media del invernadero registrada en las estaciones de medición fue de 42.46°C, con lo cual se concluye que existe una ligera desviación de los valores experimentales y los simulados, aunque sus tendencias son similares. Bajo esta premisa podemos definir que el modelo CFD es válido para describir el comportamiento del macro túnel bajo las condiciones climáticas locales de Yopal.

### Escenarios evaluados

En las figura 2 A,C,E se presentan los comportamientos del movimiento del aire en el interior del macro túnel para las simulaciones de temperatura mínima media histórica (S1), temperatura media (S2) y temperatura máxima absoluta (S3) respectivamente. Las condiciones de velocidad

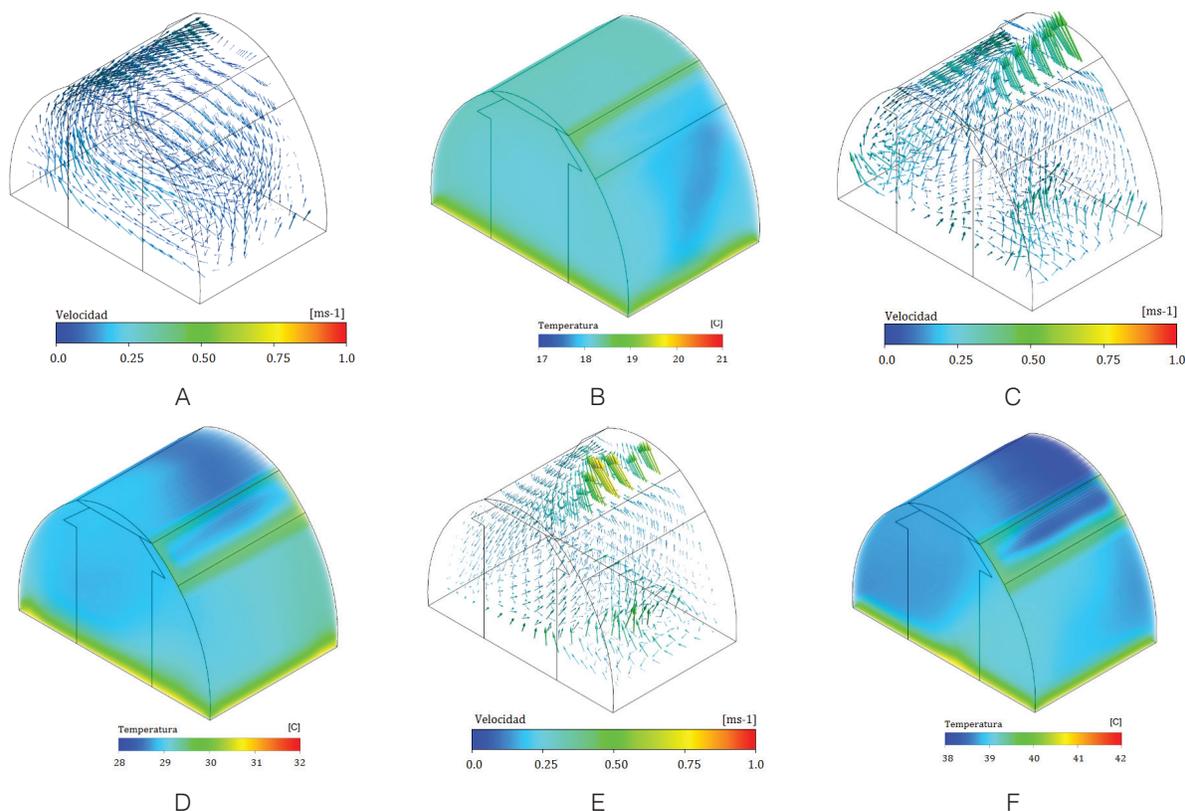
de viento exterior establecidas fueron  $0.2 \text{ ms}^{-1}$  y se simuló bajo una configuración de ventilación lateral abierta en el costado de sotavento. Los resultados generales muestran que existe un movimiento convectivo de los flujos de aire con direcciones predominantes desde el suelo a la zona de cubierta, flujo predominante cuando los valores de viento exterior son bajos y predomina el efecto térmico de la ventilación natural. Los valores medios de velocidad de aire fueron  $0.18$ ,  $0.25$  y  $0.39 \text{ ms}^{-1}$  para las simulaciones S1, S2 y S3 respectivamente generando índices de renovación de 22.5, 30.9 y 45.6 renovaciones/hora para cada caso evaluado. Valores que están dentro de los rangos de renovación adecuados para el cultivo de Orellana (*Pleurotus ostreatus*), donde se requiere tener de cuatro a ocho renovaciones por hora en zonas frías y valores superiores en zonas cálidas [12].



**Figura 1.** A) Vectores de velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ ), B) distribución de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) para la simulación usada como validación del modelo CFD 3D y C) distribución de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) obtenida experimentalmente.

En las figura 2 B,D,F se observan los comportamientos térmicos generados para S1, S2 y S3, se puede mencionar que cualitativamente se observa una heterogeneidad de la variable temperatura en el interior de la estructura, comparando los valores de paredes laterales y el centro del invernadero, aunque se debe resaltar que la magnitud de estas diferencias oscila entre  $1$  y  $1.4^{\circ}\text{C}$ , valor que se puede considerar bajo, al extraer los datos de temperatura se calculó que el valor medio de esta variable fue de  $23.5$ ,  $29.7$  y  $38.3^{\circ}\text{C}$  para S1, S2 y S3 respectivamente, esto valores de temperatura generan diferenciales térmicos entre el interior y el exterior del invernadero ( $\Delta T = T_{\text{media interior}} - T_{\text{exterior}}$ ) con valores de  $2.1$ ,  $1$  y  $1.1^{\circ}\text{C}$  para cada simulación. Estos resultados demuestran que el macro túnel tiene un comportamiento térmico adecuado y garantiza valores de temperatura interior ligeramente superiores al valor de la

temperatura ambiental, esto es un factor relevante a tener en cuenta en estructuras de AP construidas en climas cálidos. También se observa como el  $\Delta T$  varía en función de la eficiencia de la ventilación natural y es inversamente proporcional al valor del índice de renovación factor previamente demostrado en estudios similares para invernaderos pasivos [13].



**Figura 2.** Vectores de velocidad del viento (m s<sup>-1</sup>), A) S1, C) S2 Y E) S3, distribución de temperatura (°C), B) S1, D) S2 Y F) S3.

## Conclusiones

De acuerdo con los resultados observados, se reafirma la potencialidad de las simulaciones numéricas mediante CFD, como herramienta de evaluación climática en estructuras de agricultura protegida. Específicamente en este estudio se obtuvo un modelo CFD que representa adecuadamente las condiciones y el comportamiento de la estructura real evaluada, encontrando que los índices de renovación para las condiciones meteorológicas predominantes de la zona de estudio son adecuados y garantizan la generación de diferenciales térmicos de magnitud baja en comparación con el ambiente exterior.

## Referencias

- [1] D. R. Nair and D. S. Barche, "Protected Cultivation of Vegetables – Present Status and Future Prospects in India," *Indian J. Appl. Res.*, vol. 4, no. 6, pp. 245–247, Oct. 2011.
- [2] G. P. Mishra, N. Singh, H. Kumar, and S. B. Singh, "Protected cultivation for food and nutritional security at Ladakh," *Defence Science Journal*, vol. 60, no. 2, pp. 219–225, 2010.

- [3] E. J. Baeza, J. J. Pérez-Parra, J. I. Montero, B. J. Bailey, J. C. López, and J. C. Gázquez, "Analysis of the role of sidewall vents on buoyancy-driven natural ventilation in parral-type greenhouses with and without insect screens using computational fluid dynamics," *Biosyst. Eng.*, vol. 104, no. 1, pp. 86–96, 2009.
- [4] T. Bartzanas, T. Boulard, and C. Kittas, "Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse," *Biosyst. Eng.*, vol. 88, no. 4, pp. 479–490, 2004.
- [5] J. I. Montero and A. Antón, "BUOYANCY DRIVEN VENTILATION IN TROPICAL GREENHOUSES," *Acta Hortic.*, no. 534, pp. 41–48, Aug. 2000.
- [6] F. D. Molina-Aiz, D. L. Valera, A. A. Peña, J. A. Gil, and A. López, "A study of natural ventilation in an Almería-type greenhouse with insect screens by means of tri-sonic anemometry," *Biosyst. Eng.*, vol. 104, no. 2, pp. 224–242, Oct. 2009.
- [7] D. Piscia, J. I. Montero, E. Baeza, and B. J. Bailey, "A CFD greenhouse night-time condensation model," *Biosyst. Eng.*, vol. 111, no. 2, pp. 141–154, Feb. 2012.
- [8] M. C. H. Fatnassi, T. Boulard, C. Poncet, "Optimisation of Greenhouse Insect Screening with Computational Fluid Dynamics," *Biosyst. Eng.*, vol. 93, no. 3, pp. 301–312, Mar. 2006.
- [9] N. Katsoulas, T. Bartzanas, T. Boulard, M. Mermier, and C. Kittas, "Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation," *Biosyst. Eng.*, vol. 93, no. 4, pp. 427–436, Apr. 2006.
- [10] X. He *et al.*, "Ventilation optimization of solar greenhouse with removable back walls based on CFD," *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017.
- [11] N. Katsoulas, T. Bartzanas, T. Boulard, M. Mermier, and C. Kittas, "Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation," *Biosyst. Eng.*, vol. 93, no. 4, pp. 427–436, Apr. 2006.
- [12] J.L. Cuervo y J.L. Rodríguez, *Cultivo del hongo comestible (pleurotus ostreatus Jacq. Kumm) Sobre residuos agroforestales*, Produmedio. Bogota, 2013.
- [13] E. A. Villagrán, R. Gil, J. F. Acuña, and C. R. Bojacá, "Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of a colombian multispans greenhouse," *Agron. Colomb.*, vol. 30, no. 2, 2012.