
Deducción y control de las condiciones climatológicas al interior de una casa sombra mediante simulaciones térmicas en Loma Bonita, Oaxaca

Deduction and control of climatological conditions inside a greenhouse by means of thermal simulation in Loma Bonita, Oaxaca

GABRIELA DÍAZ FÉLIX^A, JOSÉ ANTONIO YAMTZECA^A, CÉSAR GARCÍA-ARELLANO^{A*}

^A*Instituto de Agroingeniería, Universidad del Papaloapan, campus Loma Bonita
Av. Ferrocarril s/n, CD. Universitaria, Loma Bonita, Oaxaca, México. C.P. 68400*

^{*}*Corresponding author: rasecgarella@hotmail.com*

RESUMEN

En este trabajo se realizaron simulaciones mediante Trnsys para determinar las condiciones climatológicas durante diferentes estaciones del año al interior de una casa sombra en la localidad de Loma Bonita, Oaxaca, México, con la finalidad de que el análisis del efecto de renovación de aire ofrezca información que permita optimizar su manejo. Las simulaciones muestran que las renovaciones de aire adecuadas para mantener las condiciones climatológicas de la casa sombra son 30 r/h, 40% menos que las mencionadas por diversa literatura. Se obtiene además la cantidad de energía requerida y el monto de inversión para dos configuraciones mecánicas de ventilación.

INTRODUCCIÓN

La baja cuenca del Papaloapan, ofrece un suelo rico y fértil para el cultivo de diferentes especies. La región de Loma Bonita se caracteriza por ser el municipio a nivel nacional con mayor producción de piña (Hernández et al., 2015), además se cultivan grandes extensiones de pastos, caña de azúcar, maíz y limón agrio (INEGI, 2005). Las condiciones climatológicas de la región son propicias para extender una variedad de cultivos que fomenten el desarrollo agrícola de la zona.

Los principales problemas a los que se enfrentan los productores y agricultores de la región, son proteger los cultivos de las plagas y evitar las restricciones que el medio impone al desarrollo de las plantas (Juárez et al., 2011; Moreno et al., 2011), una alternativa a estos problemas es el uso de espacios de cultivo controlados. En nuestro país se ha incrementado la tasa de cultivos en ambientes protegidos principalmente mediante el uso de invernaderos y casas sombras (Van 't Ooster et al., 2008).

Sin embargo, en la región de Loma Bonita Oaxaca, el uso de este tipo de sistemas no es habitual debido a que las condiciones climatológicas de la región favorecen a un aumento considerable en la temperatura y humedad al interior de los invernaderos durante gran parte del año, provocando estrés en los cultivos. Al ser estructuras sencillas y de bajo costo sin medios de ventilación, el control climático al interior se reduce solo a la apertura y cierre de las ventanas laterales o cenitales en caso de existir. Además, el material antiáfidos de las mallas son un obstáculo más a considerar para el flujo de aire que pueda ingresar (Li et al., 2018; Arellano et al., 2011; Valera et al., 2006).

En invernaderos tradicionales, el método de ventilación natural es el más utilizado para reducir la temperatura al interior (Romero-Gomez et al., 2008; Flores y Villarreal, 2014; Misra y Ghosh, 2018). Sin embargo, la región de Loma Bonita presenta un promedio de velocidad anual muy bajo (0.65 ms^{-1}) que aunado a diversos factores reducen la eficiencia de los invernaderos y es necesario recurrir a dispositivos mecánicos de ventilación que permitan reducir el excedente de calor sensible, mejorar la transpiración de la planta y en general tener un mayor control en las temperaturas sobre todo en la época más cálida del año (Baeza et al., 2014; Thipe, 2017; Misra y Ghosh, 2018). La ventilación forzada mediante dispositivos mecánicos propicia además que el campo de temperatura y humedad sea mucho más homogéneo que mediante la ventilación natural (Kittas et al., 2001). En la presente investigación, se determinó el número de renovaciones de aire necesarios para mantener las condiciones adecuadas para los cultivos de la región, así como los equipos mecánicos adecuados y la cantidad de energía necesaria para este fin, así es posible proponer una opción sustentable del acondicionamiento del espacio (energía solar).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó para una casa sombra en la cual se cultivan chile soledad, jitomate, chile habanero y pepino ubicada en la Universidad del Papaloapan, campus Loma bonita, ubicado en el municipio de Loma Bonita Oaxaca, México, en las coordenadas geográficas $18^{\circ} 05' 52.8''$ latitud norte y $95^{\circ} 53' 46.8$ longitud oeste. Tiene una longitud de 30m de largo, 10m de ancho y una altura promedio de 5m. Los materiales de la cubierta son malla sombra de tipo agrícola con reducción de la radiación solar al 70% color negro y en los laterales malla antiáfidos de 40 X 25 hilos por pulgada cuadrada.

Se realizaron mediciones climatológicas de octubre a diciembre del año 2017 al interior de la casa sombra mediante un sensor de temperatura y humedad marca Spectrum® modelo A1610 y se registraron los datos cada diez minutos; las variables climatológicas se registraron en el área central del invernadero. Las condiciones climáticas al exterior fueron registradas cada hora mediante una estación meteorológica automática Vantage Pro2 de la marca Davis®, durante todo el año 2017. Se realizaron simulaciones térmicas por medio del software Trnsys 16® para determinar las condiciones de temperatura y humedad al interior de la casa sombra durante el 2017. En las simulaciones se incluyó la base de datos Meteonorm del mismo año de la ciudad de Loma Bonita y se incluyeron las características físicas y térmicas de los materiales usados en la construcción de la casa sombra (conductividad, capacidad térmica, densidad y espesores), así como la temperatura y humedad ambiente registradas en la localidad el 1 de enero como condiciones iniciales para las simulaciones.

Los datos registrados al interior de la casa sombra, fueron comparados con los datos obtenidos en Trnsys para validar las simulaciones, se consideró la humedad relativa dentro de la casa sombra y la del simulador como tratamientos y cada respuesta como una repetición, se utilizó así una prueba de medias de Tukey. Para la validación, se eligió la semana del 4 al 10 de octubre, ya que durante este periodo se observó un elevado porcentaje de humedad relativa ambiente, considerando estos días como uno de los periodos más extremos de humedad a remover; además se observó estabilidad en los datos climatológicos. Una vez realizada la validación, se propusieron nuevas simulaciones en Trnsys en las cuales se incluyó la opción de ventilación mecánica para encontrar el número adecuado de renovaciones de aire por hora en función de las condiciones climatológicas de la región. Se utilizaron valores de 0.2 hasta 90 renovaciones de aire por hora. Con el número adecuado de renovaciones de aire, se extrapolaron las simulaciones a otros periodos del año, así se eligieron, la semana en la cual se registró el día más caluroso del año, la semana que presenta la temperatura y humedad relativa más elevada en conjunto y la semana que presenta el día con la temperatura ambiente más baja del año.

RESULTADOS

Validación de las condiciones climatológicas internas

La fig. 1, presenta la validación de los datos obtenidos por la simulación en Trnsys en contraste con los datos experimentales obtenidos al interior de la casa sombra durante el periodo de prueba; mediante una prueba de medias se determinó que se requiere una DMS de 4.3; de acuerdo a la tabla no existen diferencias entre ambos. De igual forma se analizó una comparación del comportamiento de la humedad relativa exterior medida a través de la EMA Vantage Pro2 Davis con el desarrollo de la humedad relativa exterior generada por el simulador y la base de datos climatológica, no se observaron diferencias significativas, por lo que el modelo se considera adecuado.

Tabla 1. Medias de HR (%) en el interior de la casa sombra

Situación	Humedad relativa (%)
Casa sombra	79.317 a
Simulación	82.332 a

Con $\alpha \leq 0.05$, medias con la misma letra no representa diferencia significativa (DMS=4.3295)

La literatura reporta que las renovaciones por hora para un invernadero deben ser entre 40 y 60 renovaciones para climas tropicales (Flores-Velázquez et al., 2011; Villagrán et al, 2012), sin embargo, de las simulaciones y mediante un análisis estadístico de los resultados, se concluye que el número de renovaciones por hora para mantener al interior las condiciones climáticas semejantes al exterior son de 10 a 30 renovaciones ya que no existe diferencia significativa en la variable de humedad relativa interna (tabla 2); de igual forma se observó una diferencia máxima de 4°C al interior con respecto a la temperatura externa. Para este análisis se utilizaron 30 r/h para las extrapolaciones en cada época del año, renovaciones por arriba de esta cantidad incrementan la humedad interna y por debajo de ésta, incrementan la temperatura al interior de la casa sombra.

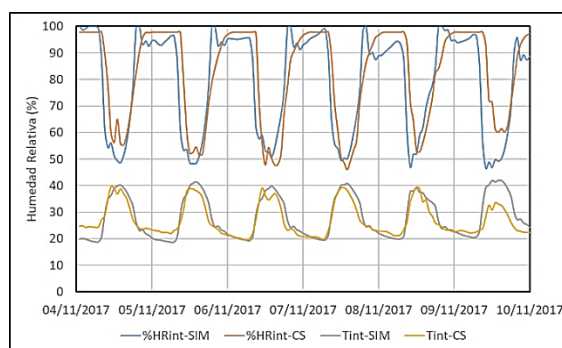


Figura 1. Validación de la temperatura y humedad relativa interna de la casa sombra mediante datos experimentales reales.

Comparación entre tratamientos

Tabla 2. Validación estadística del número de renovaciones de aire al interior de la casa sombra

Renovaciones de aire	Humedad relativa (%)
Amb.	80.2a
90	79.4a
40	78.4a
30	77.9b
10	75.3b

Con $\alpha \leq 0.05$, medias con la misma letra no representa diferencia significativa (DMS=4.4027)

Las figs. 2, 3, 4 muestran los resultados de la simulación a 30 r/h, extrapolados para diferentes periodos del año.

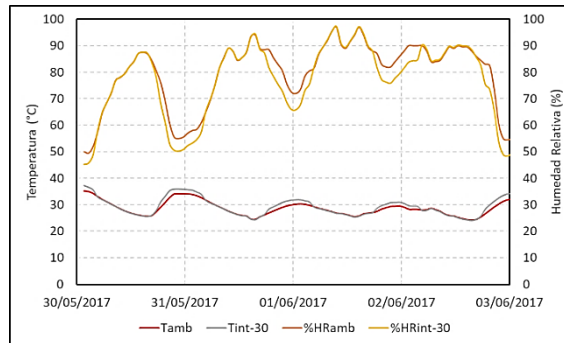


Figura 2. Comportamiento de la temperatura y humedad relativa al interior de la casa sombra, durante la época más calurosa del año.

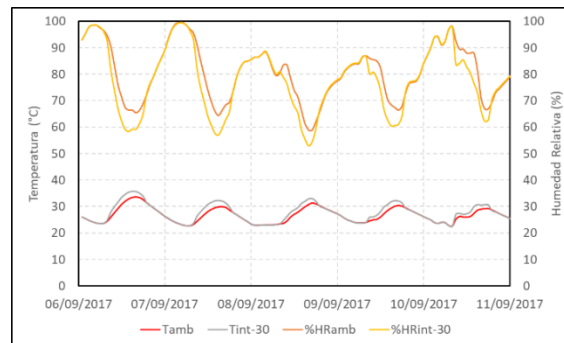


Figura 3. Comportamiento de la temperatura y humedad relativa al interior de la casa sombra, durante la época más calurosa y húmeda del año.

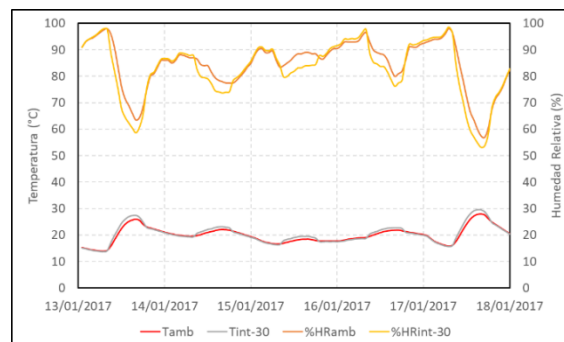


Figura 4. Comportamiento de la temperatura y humedad relativa al interior de la casa sombra, durante la época más fría año.

Cálculo del caudal de ventilación

Los resultados mostrados en las Figuras 2 a 4, se obtuvieron considerando un número de renovaciones de aire mediante convección forzada por un ventilador mecánico. Así fue posible determinar el tipo de dispositivo adecuado para mantener el control de la temperatura y

humedad interna, así como la energía y la inversión necesaria para este fin. La región de Loma Bonita se caracteriza además por un elevado índice de radiación solar durante prácticamente todo el año, alcanzando los 800 W/m² durante la época de primavera y verano, por lo que una opción a considerar para la ventilación del invernadero es mediante el uso de paneles solares para alimentación de ventilación.

$$\begin{aligned} \text{Caudal de aire de ventilación} &= \text{Volumen casa sombra (m}^3\text{) X no. de renovaciones (r/h)} \\ &= 1275 \text{ (m}^3\text{) X 30 r/h} = \mathbf{38250 \text{ m}^3\text{/h}} \end{aligned}$$

Las Tablas 3 y 4 presentan las características de caudal de aire y mecánicas necesarias de los equipos ventiladores para mantener las condiciones internas de temperatura y humedad, así como la cantidad de energía y emisiones de CO₂ derivadas del uso de cada configuración.

Tabla 3. Características técnicas de los equipos mecánicos (con datos de fabricante www.ventdepot.com)

Fuente de energía	Caudal a descarga libre (m ³ /h)	∅ aspas (pulg)	RPM	Voltaje (V)	HP	Unidades requeridas	Costo (\$M.N.)
Electricidad	27095	49	400	220	3/4	2	10,426.8
Solar	2805	12	1000	24 d.c.		14	83,451.2

El consumo anual de energía (kWh) se obtiene mediante el producto de la potencia de cada equipo (kW) y el tiempo anual de operación del mismo (h/año); para este estudio se consideró el costo del kW como \$3.50 M.N. La cantidad de emisiones de CO₂ se calcula mediante el factor de emisión de 0.582 ton de CO₂/MWh (CRE, 2017)

Tabla 4. Consumo de energía y costos anuales

Fuente de energía	Consumo (kW)	Consumo anual (kWh)	Costo anual (\$M.N.)	CO ₂ emitido (kg)
Electricidad	2.684	23,511.8	82,291.4	13,683.4
Solar (motor y panel)	0.476	4,169.7	0.0	0.0

CONCLUSIONES

Las condiciones climatológicas de Loma Bonita, Oaxaca, no permiten el correcto uso de invernaderos o casas sombra sin el adecuado control de la temperatura y humedad interna. Se realizaron simulaciones térmicas para determinar el número adecuado de renovaciones de aire para mantener las condiciones internas de temperatura y humedad relativa sin diferencias significativas con el exterior, éstas fueron 30 r/h. Las simulaciones térmicas permitieron extrapolar las condiciones climatológicas internas para diferentes estaciones del año, figs. 2 a

4, obteniendo durante la etapa más fría una diferencia promedio de 2.2°C por arriba de la temperatura ambiente y de 5% por debajo de la humedad ambiente para las horas más cálidas del día; para la época más calurosa del año los resultados presentan una diferencia de 1.7°C para la temperatura y de 10% para la humedad; finalmente para la estación calurosa y con una alta humedad se encontraron diferencias de 2.5°C y 12% respectivamente. Mantener las condiciones climatológicas internas de temperatura y humedad relativa en la casa sombra, implica el uso de dispositivos mecánicos que pueden ser operados con energía eléctrica de la red o mediante el uso de energía solar. Aunque el costo de inversión inicial para equipos solares de ventilación es 80% mayor, se debe considerar el costo de energía eléctrica para el caso convencional de conexión a la red eléctrica, el cual durante el primer año de operación asemejaría a la inversión inicial solar. Además, la cantidad de energía eléctrica demandada de la red eléctrica involucra una emisión de 13.6 toneladas de CO₂ enviadas a la atmósfera.

REFERENCIAS

- Arellano G., Valera M., Urrestarazu G., Quezada M., Murguía L. Zermeño G. (2011). Ventilación natural y forzada de invernaderos tipo Almería y su relación con el rendimiento de tomate. *Terra Latinoamericana*, 29, 379-386.
- Baeza R., Montero I., Pérez P., Bailey J., López H., Gázquez G. (2014). Avances en el estudio de la ventilación natural. *Cajamar*. Recuperado de www.publicacionescajamar.es
- Comisión reguladora de energía. Factor de emisión del Sector Eléctrico Nacional, 2017. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene> (Consultado el 12 de octubre de 2018).
- Flores V., Villarreal G. (2014). Diseño de un sistema de ventilación forzada para un invernadero cenital usando CFD. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 6 (2).
- Flores-Velázquez, J., Mejía-Saenz, E., Montero-Camacho, J. I., Rojano, A. (2011). Numerical analysis of the inner climate in a mechanically-ventilated greenhouse with three spans. *Agrociencia*. 45: 545-560. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825936150> (Consultado el 12 de octubre de 2018).
- INEGI, (2005.) Cuaderno Estadístico Municipal, Loma Bonita Oaxaca. Disponible en:
- Juárez L., Bugarín M., Castro B., Sánchez M., Cruz C., Juárez R., Alejo S., Balois M. (2011). Estructuras utilizadas en la agricultura protegida. *Revista Fuente*, 3 (8).
- Kittas, C.; Bartzanas, T. and Jaffrin, A. 2001. Greenhouse evaporative cooling: measurements and data analysis. *Trans. ASAE*. 44(3):683-689.
- Li G, Tang L., Zhang X., Dong J., and Xiao M. (2018) Factors affecting greenhouse microclimate and its regulating techniques: A review. *Earth and Environmental Science*, 167.
- Misra D., Ghosh S. (2018). Evaporative cooling technologies for greenhouses: a comprehensive review. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 20(1).
- Moreno R., Aguilar D., Luévano G. (2011). Características de la agricultura protegida y su entorno en México. *Quinta Época*, 29.

- Romero-Gomez, P., I. L. Lopez-Cruz, and C. Y. Choi. (2008). Analysis of greenhouse natural ventilation under the environmental conditions of central Mexico. *Trans. ASABE* 51: 1753-1761.
- Thipe L. (2014). Comparative analysis of two greenhouse microclimates in the sub-humid climate of South Africa (Tesis de maestría). College of Agriculture, Engineering and Science, Pietermaritzburg, Africa.
- Valera, D. L., A. J. Álvarez, and F. D. Molina. (2006). Aerodynamic analysis of several insect screens used in greenhouses. *Span. J. Agric. Res.* 4: 273-279.
- Van 'T Ooster, A., E. Heuvelink, V. M. Loaiza M., and E. J. Van Henten. (2008). Technical solutions to prevent heat stress induced crop growth reduction for three climatic regions in Mexico. *Acta Hortic.* 801: 1251-1258.
- Villagrán, E. A., Gil, R., Acuña, J. F., Bojacá, C. R. (2012). Optimization of ventilation and its effect on the microclimate of Colombian multi-span greenhouse. *Agronomía Colombiana.* 30 (2). 282-288.
- www.ventdepot.com (Consultado el 12 de octubre de 2018).