

LA ENTALPÍA Y LA ZONA DE CONFORT EN LA PRODUCCIÓN DE JITOMATE

THE ENTHALPY AND THE COMFORT ZONE IN TOMATO PRODUCTION

**Raquel Salazar-Moreno^{1*}; Abraham Rojano-Aguilar; Martín J Montero-Martínez²;
Irineo López-Cruz**

¹Universidad Autónoma Chapingo, Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Estado de México, C. P. 56230, MÉXICO.

²Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Cuernavaca, Morelos MÉXICO.

Correo-e: raquels85@yahoo.com.mx (*Autor de correspondencia)

RESUMEN

Debido a la falta de información sobre el consumo energético de los sistemas de calefacción y enfriamiento en los invernaderos, en este trabajo se utilizó la entalpía como una variable indicadora de la cantidad de energía en el ambiente. Se realizó un análisis de sensibilidad a través de siete modelos de redes neuronales, y se encontró que las variables que afectan en mayor medida el contenido energético dentro del invernadero son la temperatura, la transpiración y los sistemas de calefacción y enfriamiento, correspondientes al modelo 4 de redes neuronales que tuvo un error cuadrado medio de 0.38 y 1.28, para uno y dos tiempos adelante, respectivamente. La región bajo estudio es Santa Rosa, Sinaloa, en donde se realizó el análisis general de la información sobre temperatura y humedad relativa durante el periodo 1999-2009. Se construyeron las elipses de confort para la producción de jitomate para determinar de manera mensual qué tan lejanas están las condiciones externas respecto a las condiciones óptimas, y evaluar la cantidad de energía que se requiere en cada caso para llegar a la zona de confort. El análisis de datos mostró que la mayor parte del tiempo los datos se encuentran abajo y a la derecha de la zona de confort; es decir, se tiene el problema de alta temperatura y baja humedad relativa. También se encontró que los meses más críticos para la producción de jitomate son de julio a septiembre, ya que las condiciones externas se encuentran muy alejadas de la zona de confort, por lo que se recomienda dedicar esos meses a las labores de limpieza del invernadero.

Palabras clave adicionales: Temperatura, humedad relativa, zona de confort.

ABSTRACT

Due to the lack of information about energy consumption in heating and cooling requirements in greenhouses, the enthalpy was used as an approach of the energy content in the environment. A sensitivity analysis was done through seven Neural Network models for enthalpy prediction. It was found that the most important variables to explain the energy content in the greenhouse are temperature, transpiration, and heating and cooling systems, which correspond to inputs of model 4 with a MSE equal to 0.38 and 1.28 for one and two times ahead, respectively. Temperature and relative humidity data were collected from Santa Rosa, Sinaloa, from 1999 to 2009. The ellipses for the comfort zone were constructed in order to determine how far the external conditions are comparable with the optimal conditions for tomato production, and also to estimate the amount of energy required in each case to reach the comfort zone. Data analysis showed that most of the time those external conditions are below and right from the comfort zone, which pointed out a problem of high temperature and low relative humidity. Besides, the most critical months for tomato production are from July to September because the external conditions are far away from comfort zone. Therefore, it is recommended to dedicate those months for cleaning the greenhouse.

Additional key words: Temperature, relative humidity, comfort zone.

INTRODUCCIÓN

La producción intensiva de jitomate en invernaderos requiere del uso de sistemas que consumen grandes cantidades de energía. Para climas con temperaturas extremas, se tiene la estimación de que la energía requerida durante todo el año en un invernadero con doble cubierta de polietileno es de 2100 MJ m². En Europa, por ejemplo, para mantener rentable la producción de jitomate bajo invernadero durante todo el año, se deben emplear cerca de 8.5 euros/m² de superficie de invernadero, con una producción anual de 50 kg·m⁻². Un incremento en el precio del gas de 0.15 euros·m⁻³ a 0.30 euros·m⁻³ significa que a precios constantes de venta de 1 euro·kg⁻¹ se deba incrementar la producción a 65 kg·m⁻² de superficie de invernadero para sostener la empresa. En este punto se alcanzan los límites de rendimiento del cultivo. Si llegara un invierno frío, podría suceder que la ganancia se alcanzaría apenas con 70 kg·m⁻² (Greenenergy, 2005).

El panorama presentado de los costos totales de operación y de capital muestra que una empresa se acerca rápidamente al límite de rentabilidad debido a los bajos precios de venta, variaciones estacionales de precio y diferentes influencias climáticas. Es por ello que un área central de la investigación y desarrollo modernos en el sector de invernaderos es la energética. En este sentido, es indispensable empezar a realizar estudios regionales sobre el comportamiento de las principales variables climatológicas, con el fin de buscar la mejor estrategia de control para disminuir los costos de producción en los invernaderos. Debido a la falta de información sobre el consumo energético de los sistemas de calefacción y enfriamiento en los invernaderos, en el presente trabajo se utilizó la entalpía como una aproximación de la cantidad de energía en el invernadero.

La entalpía es una variable que representa el estado energético en un sistema, e incluye el calor sensible correspondiente al incremento de la temperatura del aire seco y el calor latente como función de la presencia del contenido de humedad y el incremento de la temperatura (Hasan y Siren, 2002). De acuerdo a la Figura 1, por un lado se tiene la energía térmica que depende de la radiación global y de los sistemas de calefacción y por otro lado está el vapor de agua que es afectado por la evapotranspiración y los sistemas de nebulización.

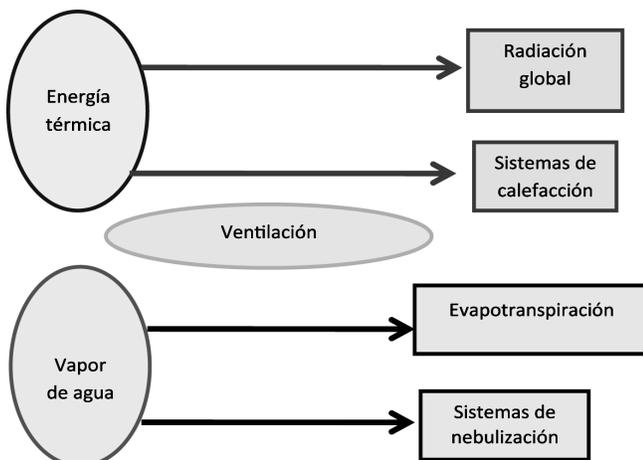


Figura 1. Factores que afectan los cambios en la entalpía.

En la tecnología controlada, el diagrama de fases del aire húmedo que se utiliza para mostrar la interconexión entre varias variables de estado del aire (temperatura, humedad relativa, entre otras) se llama diagrama de Mollier (por el físico alemán Richard Mollier) (Schmidt, 2004). La Figura 2 muestra los cambios en la ventilación, calefacción y sistema de aspersión en el diagrama de Mollier.

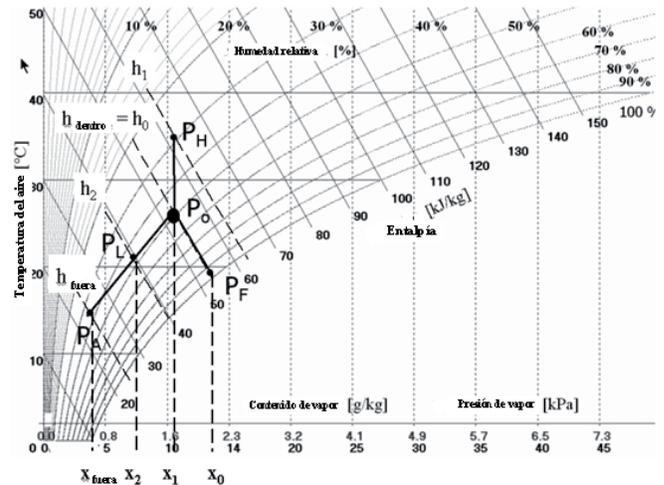


Figura. 2 Cambios teóricos de la condición del aire con los sistemas de calefacción (PH), ventilación (PL) y sistemas de aspersión (PF) en el diagrama de Mollier (Schmidt, 1996).

La entalpía es la cantidad total compuesta del calor sensible y latente consiste de la cantidad total de energía en el aire, y está representada por las líneas inclinadas. El calor sensible corresponde a los cambios en la temperatura que no alteran el contenido de humedad en el aire, en tanto que el calor latente se relaciona con el nivel de humedad en el aire. La temperatura del bulbo seco, representada por líneas horizontales, es la lectura que da un termómetro seco, e indica el contenido de calor sensible en el aire. La temperatura del bulbo húmedo indica el contenido de calor latente en el aire, y en el diagrama corresponde a las líneas que tienen la misma pendiente que la entalpía.

El radio de humedad es el peso del vapor de agua por cada gramo de aire seco, y son las líneas verticales. La humedad relativa son las curvas que van desde cero a 100 % cuando el aire está completamente saturado. El diagrama de Mollier, también llamado Tabla o Carta Psicométrica, ha sido muy utilizado para describir las condiciones del ambiente dentro del invernadero, y con base en ella se han establecido las zonas de confort de los cultivos; por ejemplo, para el caso del cultivo de jitomate la temperatura óptima para su desarrollo oscila entre 20 y 30 °C, y la humedad relativa entre 60-80 %. Estos rangos se pueden ubicar en el diagrama y definir la zona de confort para este cultivo en particular. Las variables representadas en el diagrama de Mollier no son lineales; esto genera que ante un incremento o decremento en una de las variables, el resto se mueva de una manera no lineal, y esto provoca que aun en condiciones controladas los cultivos puedan estar fácilmente fuera de la zona de confort.

En el presente estudio se aborda el análisis de la zona de confort para el cultivo de jitomate y la entalpía asociada. Por ello, se realizó un análisis de sensibilidad para identificar las variables que afectan en mayor medida el estado energético del invernadero. Debido al hecho de que el invernadero es considerado como un sistema no lineal, multivariado, no estacionario y abierto al ambiente exterior (Bennis *et al.*, 2008), los modelos de caja negra han sido utilizados de manera exitosa en control climático. Entre éstos están los modelos de redes neuronales artificiales (RNA), que son útiles cuando las reglas no son conocidas y permiten un buen ajuste para datos complejos multivariados (Chen *et al.*, 2008).

Las RNA son sistemas que se asemejan a las habilidades que tiene el cerebro humano de reconocer patrones de comportamiento y aprender de ellos. Estas RNA han sido utilizadas en el control ambiental en invernaderos (Seginer, 1997). Asimismo, en Kalogirou (2000) se presentan varias aplicaciones de las redes neuronales en problemas de energía y se menciona que constituyen un método robusto y tolerante al ruido blanco de los datos, lo que las hace ideales para tratar datos provenientes de sistemas de energía.

La iteración entre los factores del microclima y las respuestas de las plantas requiere del procesamiento de la información, además de una herramienta de predicción de algunas variables con propósitos de control. Schmidt (1996) presenta la integración de los modelos del microclima dentro del sistema de control.

En este trabajo se hizo el análisis de sensibilidad de la entalpía, implementando siete modelos diferentes de redes neuronales con el fin de identificar las variables más importantes dentro del invernadero que están afectando el estado energético del mismo. Posteriormente se presenta un caso de estudio para la región de Santa Rosa, en el estado de Sinaloa, debido a que en esta región se experimentan elevadas temperaturas en el verano y bajas temperaturas en invierno, por lo cual puede considerarse como una zona crítica para estudiar el consumo de energía en invernaderos. Se estudian las tendencias de la temperatura y humedad relativa y se calcula la diferencia de entalpías fuera y dentro del invernadero, para determinar qué tanta energía se requiere para mantener el cultivo de jitomate dentro de la zona de confort.

Para la construcción de las elipses de las zonas de confort se consideraron tres tipos de tecnología. La tecnología baja implica que las condiciones del invernadero dependen en gran medida de las condiciones externas, es decir, existe ventilación natural por medio de ventanas laterales o en el techo, no hay calefacción y se cuenta con suelo en la zona de raíz; en otras palabras, existe una modificación mínima del ambiente del invernadero. La tecnología media es una combinación de baja y alta tecnología; puede existir enfriamiento pasivo y activo, puede tener o no calefacción, con control ambiental básico, y el sustrato puede ser con o sin suelo. La llamada alta tecnología consiste en el control ambiental basado en la planta para maximizar la productividad y la calidad

de los frutos; incluye el control computarizado automático de temperatura, riego y sombreado basado en la integración de luz, y enriquecimiento de CO_2 , así como sistemas hidropónicos, ventilación forzada, sistemas de enfriamiento evaporativo y calefacción (Giacomelli, 2007). En tal contexto, los objetivos del presente estudio consisten en determinar los factores que más influyen sobre los cambios en la entalpía dentro del invernadero, determinar los índices extremos de temperatura y humedad relativa para el periodo de estudio de 1999-2009 en la región de Santa Rosa, Sinaloa, comparar la entalpía en la elipse de zona de confort para la producción de jitomate con la información mensual para estimar el consumo de energía requerida en cada mes, y analizar en qué medida la tendencia en el clima de la región es favorable o no para la producción de jitomate.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se construyó un modelo de redes neuronales utilizando datos provenientes de un sistema de fitomonitorio de un invernadero experimental en la Universidad Humboldt de Berlín, debido a que no se contó con datos disponibles en México. La Figura 3 muestra el modelo general de redes neuronales; las variables de entrada son: temperatura del aire al interior del invernadero (T_a , °C), humedad relativa (HR, %), transpiración (T_{ra} , $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), radiación fotosintéticamente activa (PAR, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), radiación solar (RS , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), entalpía en el exterior (E_{ext} , kJ), porcentaje de apertura de las ventanas en la izquierda (V_{IZQ} , %), porcentaje de apertura de las ventanas en la derecha (V_{DER} , %), y temperatura promedio del agua en el sistema de calefacción en el techo y en el piso (T_{TECHO} , T_{PISO} , °C). La salida del modelo es la entalpía dentro del invernadero 5 y 10 min adelante (E_{t+1} , E_{t+2} , kJ kg^{-1}).

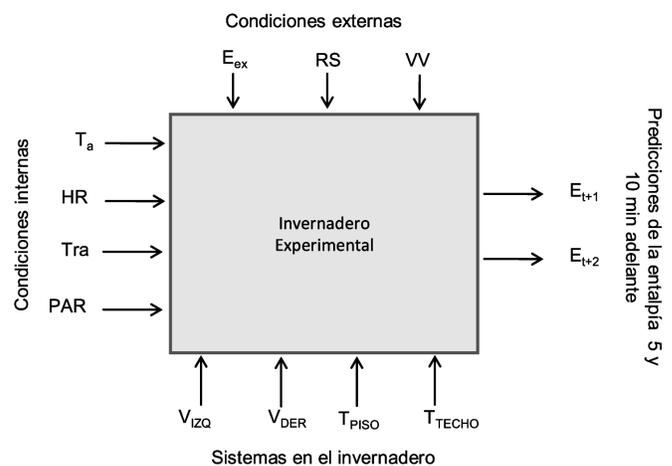


Figura 3. Variables de entrada y salida en el modelo general de redes neuronales para la predicción de entalpía

Aunque el modelo de redes neuronales se construyó utilizando datos de la Universidad Humboldt de Berlín, debido a que no se tienen datos registrados sobre transpiración para la zona de estudio, los resultados servirán para identificar las variables más importantes que afectan la entalpía. Partiendo del modelo global se generaron siete modelos para la predicción

de la entalpía utilizando una combinación de las variables que se mencionaron anteriormente, con el propósito de identificar las variables más importantes para la predicción de la entalpía (análisis de sensibilidad). La región de estudio fue Santa Rosa, situada en el Valle del Fuerte, al norte del estado de Sinaloa, con altitud promedio de 20 m. El cultivo bajo estudio fue jitomate, cuya temperatura óptima oscila entre 20 y 30 °C durante el día y entre 1 y 17 °C durante la noche. Temperaturas superiores a los 30-35 °C afectan a la fructificación por mal desarrollo de óvulos, el desarrollo de la planta en general, y del sistema radicular en particular. Temperaturas inferiores a 12-15 °C también originan problemas en el desarrollo de la planta. La humedad relativa óptima oscila entre el 60 y 80 %. Humedades relativas muy elevadas favorecen el desarrollo de enfermedades del follaje y el agrietamiento del fruto y dificultan la fecundación, debido a que el polen se compacta, abortando parte de las flores. También una humedad relativa baja dificulta la fijación del polen al estigma de la flor (UACH, 2007).

Considerando las recomendaciones anteriores, y con el propósito de construir las zonas de confort, se establecieron los límites de temperatura entre 15-30 °C y de humedad relativa entre 60-80 %, ubicándose los óptimos en 22.5°C y 70 % de HR. Para saber cómo ha evolucionado el clima de la región de estudio se utilizó información sobre la evolución de temperatura y humedad relativa para el periodo 1999-2009, proveniente del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Con la información anterior se calculó el número de horas en las que la temperatura fue menor a 15 °C y mayor a 30 °C, así como el número de horas en los que la HR fue menor a 60 % y mayor a 80 %. Con este análisis se pretende saber en qué medida las variaciones del clima han afectado la región y si dicho cambio es favorable o no para la producción de jitomate.

Asimismo, con la información de los valores permisibles de temperatura y humedad relativa se construyeron las elipses de las zonas de confort para baja, media y alta tecnología, utilizando un modelo matemático programado en Matlab®. Los niveles de tecnología se establecieron dependiendo de qué tanto control se tenga de estas dos variables en el invernadero. Después se unió la información de la gráfica de dispersión de temperatura y humedad relativa para todo el periodo estudiado 1999-2009 con las zonas de confort. Esta gráfica permitió conocer la tendencia general de la región para saber en qué área fuera de la zona de confort yace la mayor parte de los datos. El mismo análisis se realizó de manera mensual con el fin de determinar en qué meses las condiciones externas se alejan más de la zona de confort, y de esta forma se pueda recomendar el periodo más apto para la producción.

El último análisis que se realizó fue la cuantificación de la cantidad de energía que se requiere en cada mes para estar dentro de la zona de confort para la producción de jitomate. La estimación de tal energía se hace a través de la entalpía, que es una variable que describe la cantidad de calor latente y sensible en el aire o es el contenido energético del aire, y se obtiene utilizando la Ecuación (1).

$$H_0 = C_{PL} * t_a + X_L(C_{pV}t_a + r_0) \quad (1)$$

Donde H_0 es entalpía, t_a es temperatura del aire, C_{PL} es la capacidad específica del aire seco, C_{pV} es la capacidad específica del vapor de agua, X_L es el contenido de vapor en el aire y r_0 es el calor específico de vaporización del agua.

Asimismo, se utilizó el software Matlab® para aproximar una elipse a los puntos de la periferia de las gráficas de dispersión mensual y de esta forma calcular la diferencia en entalpías entre cada elipse mensual y la elipse de la zona de confort.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por medio del programa Matlab® se probaron siete modelos diferentes para la predicción de la entalpía, utilizando 1,700 datos provenientes del invernadero experimental de la Universidad Humboldt de Berlín. El Cuadro 1 muestra los resultados; el modelo con el menor error cuadrado medio y coeficiente de correlación más elevado fue el Modelo 4, el cual incluye únicamente temperatura, transpiración, sistemas de calefacción y ventilación.

Para probar las habilidades predictivas del Modelo 4, se utilizaron 180 datos de las variables de entrada diferentes a los que se utilizaron para el entrenamiento de la red. Los resultados se muestran en la Figura 4, donde se encuentra que los valores observados están muy cercanos a los predichos.

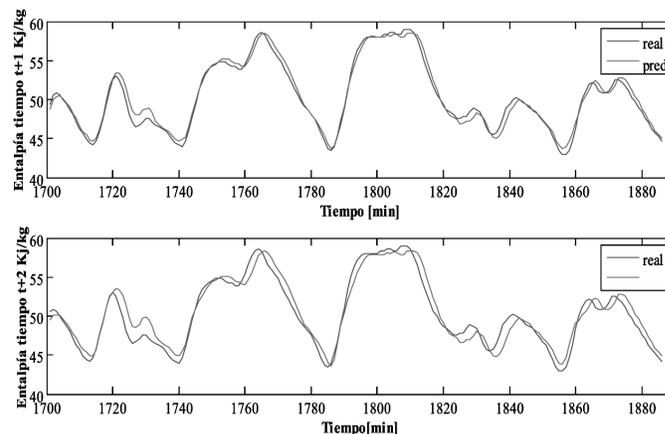


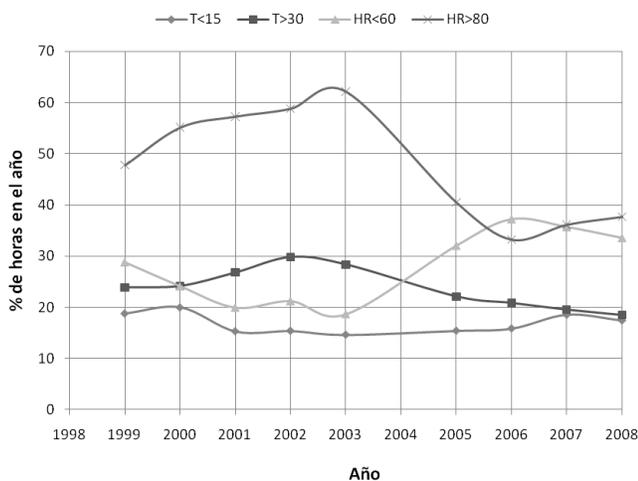
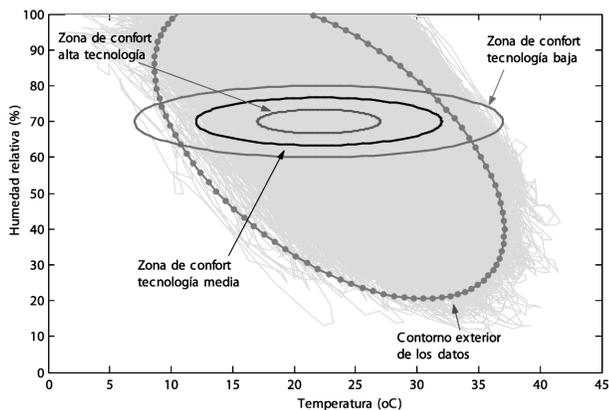
Figura 4. Valores reales y predichos para el Modelo 4 de predicción de la entalpía

La Figura 5 muestra el porcentaje de horas en el año en las que la temperatura está debajo de 15 °C y arriba de 30 °C, y el porcentaje de horas en que la humedad relativa estuvo por debajo del 60 % y arriba del 80 %. A partir del año 2005 la región se ha hecho más seca, debido a que ha disminuido el número de horas con humedad relativa arriba de 80 % y han aumentado las horas con humedad relativa debajo de 60 %. En cuanto a la temperatura, el número de horas con temperatura inferior a los 15 °C se ha mantenido casi constante, en tanto que el número de horas con temperatura arriba de los 30 °C ha disminuido.

Cuadro 1. Análisis de sensibilidad del Modelo de Redes Neuronales para la predicción de la entalpía

MODELO	ECM (T+1)	ECM (T+2)	R (T+1)	R (T+2)
1. T_a , HR, PAR, Tra, E_{ex} , RS, VV, V_{IZQ} , V_{DER} T_{TECHO} , T_{PISO}	0.4239	1.1331	0.991	0.973
2. T_a , HR, E_{ex} , V_{IZQ} , V_{DER} , T_{TECHO} , T_{PISO}	1.171	2.259	0.984	0.961
3. T_a , HR, V_{IZQ} , V_{DER} , T_{TECHO} , T_{PISO}	0.4837	1.432	0.989	0.966
4. T_a , Tra, V_{IZQ} , V_{DER} , T_{TECHO} , T_{PISO}	0.377	1.2825	0.991	0.968
5. RS, Tran, V_{IZQ} , V_{DER} , T_{TECHO} , T_{PISO}	5.94	6.31	0.872	0.849
6. RS, HR, V_{IZQ} , V_{DER} , T_{TECHO} , T_{PISO}	6.35	7.38	0.885	0.847
7. T_a , HR	0.7709	2.3324	0.981	0.94

ECM= Error Cuadrado Medio

**Figura 5. Número de horas de extremos desde 1999-2008.****Figura 6. Gráfica de dispersión de Temperatura y Humedad Relativa para la estación 3765 de Sinaloa, años 1999-2009**

En la Figura 6 se esquematizan tres elipses de zonas de confort para la producción de jitomate, desde muy baja tecnología hasta tecnología alta, y se grafican junto con el diagrama de dispersión de temperatura y humedad relativa durante los años 1999-2009. La mayor parte del tiempo las condiciones externas de temperatura y humedad relativa se encontraron fuera de la zona de confort para la producción de jitomate.

En las Figuras 7 y 8 se presentan las gráficas de dispersión de temperatura y humedad mensuales para los años 1999-2009 (los diferentes colores representan cada uno de los años) y su comparación con la zona de confort (círculo rojo). Dado que en general el ciclo productivo del jitomate es de tres meses, las gráficas están agrupadas con base en este periodo con el fin de seguir una misma estrategia de control dentro del invernadero en los diferentes ciclos de producción.

En las Figuras 7 y 8 se observa que de enero a junio las temperaturas no se alejan mucho de la zona de confort; sin embargo, existe gran oscilación en la humedad relativa que puede ir desde 20 a 100 %. Los meses más críticos para la producción de jitomate son de junio a septiembre, ya que las condiciones externas se encuentran prácticamente fuera de la zona de confort y las temperaturas están la mayor parte del tiempo arriba de los 30 °C, llegando hasta 40 °C en algunas horas. Con los datos de 1999-2009 se realizó el análisis mensual y con la ayuda de Matlab® se construyeron las elipses para el contorno de los diagramas de dispersión mensuales (elipse azul); la elipse roja representa la zona de confort. Un ejemplo se muestra en la Figura 9 para el mes de abril.

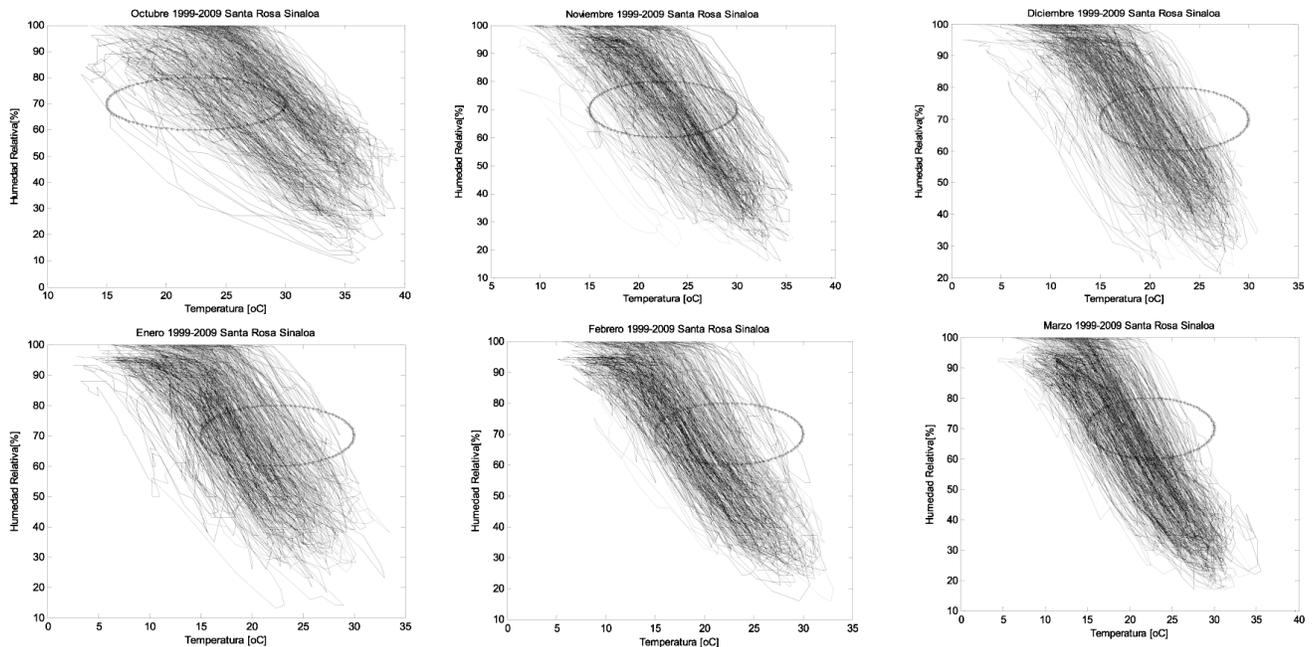


Figura 7. Diagramas de dispersión de temperatura y humedad relativa meses octubre a marzo.

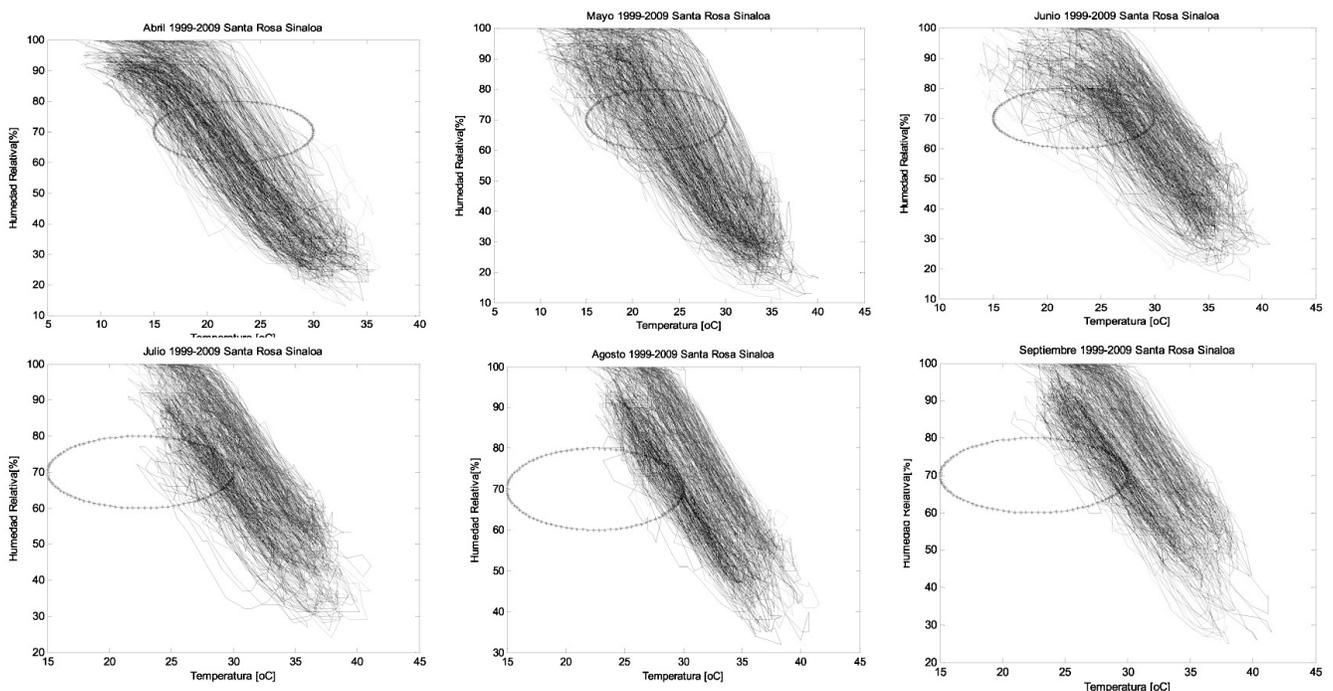


Figura 8. Diagramas de dispersión de temperatura y humedad relativa meses abril a Septiembre.

La construcción de las elipses permitió estimar la entalpía en cada punto de la elipse, y luego calcular la diferencia de entalpías con respecto a la elipse de confort. De esta forma se estimó la energía mensual máxima requerida. La diferencia de entalpías se calculó mensualmente, el resultado que se muestra en la Figura 10. Durante la mayor parte de los meses se requiere de incrementar la entalpía para llegar a la zona de confort.

CONCLUSIONES

El modelo 4 de redes neuronales, que usó a la temperatura, transpiración, sistemas de calefacción y enfriamiento como variables de entrada, permitió una adecuada predicción de la variación de la entalpía dentro del invernadero. Por consiguiente, las variables incluidas en ese modelo son las que permiten explicar el comportamiento de la entalpía. En la medida en que

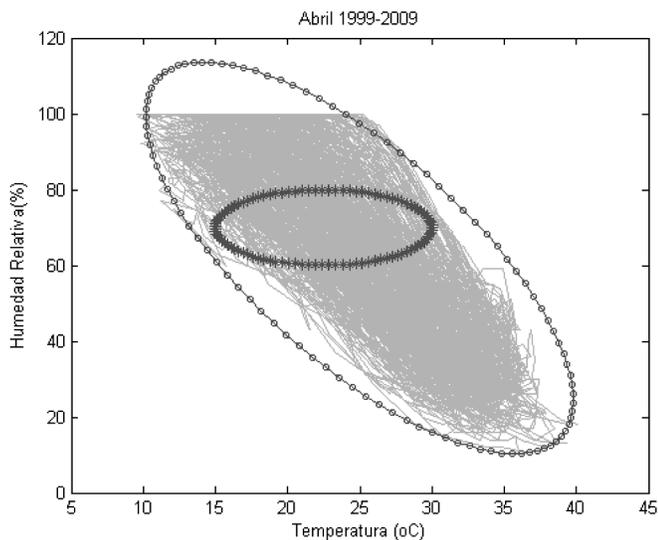
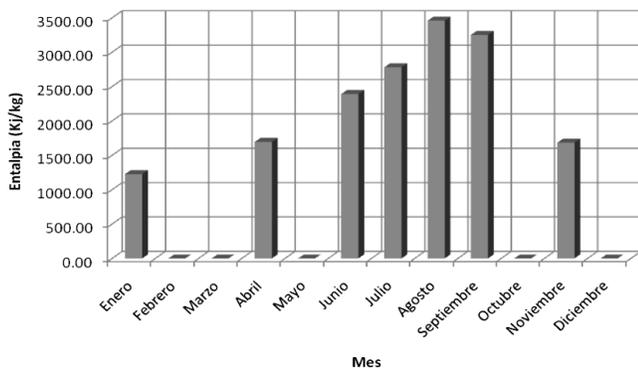


Figura 9. Elipse de contorno del diagrama e dispersión entre temperatura y humedad relativa comparado con la elipse de la zona de confort.

Disminución en la entalpía para llegar a la zona de confort



Incremento en la entalpía para llegar a la zona de confort

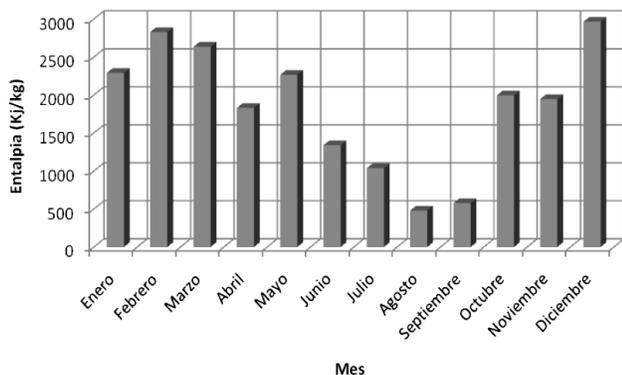


Figura 10. Energía requerida (entalpía) en cada mes para llegar a la zona de confort.

las condiciones externas se alejan de la zona de confort de los cultivos, se requiere de mayor consumo de energía para mantener las condiciones favorables dentro del invernadero. La humedad relativa requerida por las plantas depende de la temperatura; se requiere de alta humedad relativa cuando la temperatura es alta, y viceversa. Lo anterior ayuda a moderar la tasa de transpiración,

dado que a elevadas temperaturas la planta transpira más, y si se mantiene una humedad relativa alta se reduce la transpiración. El análisis de datos y entalpías realizado en Santa Rosa, Sinaloa, muestra que durante el periodo 1999-2009 la región se ha hecho más seca, a pesar de lo cual los extremos de temperaturas mayores a los 30 °C no se han incrementado con los años. La mayor parte del tiempo los datos se encuentran abajo y a la derecha de la zona de confort, es decir, se tiene el problema de alta temperatura y baja humedad relativa. En esta situación la única opción es tener paneles húmedos y nebulizadores, ya que cuando la aspersión se convierte en vapor se pierde gran cantidad de calor disminuyendo la temperatura. Los meses más críticos para la producción de jitomate van de junio a septiembre, ya que las condiciones externas se encuentran prácticamente fuera de la zona de confort. Puesto que los ciclos de producción de jitomate son en general de tres meses se recomienda dedicar los meses de julio a septiembre a las labores de limpieza y desinfección del invernadero, ya que las temperaturas son extremadamente altas. Durante los meses, de octubre-junio se pueden tener tres ciclos continuos de producción de jitomate; son los meses en los cuales hay que aumentar la entalpía en lugar de disminuirla.

LITERATURA CITADA

Bennis N.; Duplaix J.; Enea G.; Haloua M.; Youlal H. 2008. Greenhouse climate modeling and robust control. *Computers and Electronics in Agriculture* 61: 96-107.

Chen S. H.; Jakeman A. J.; Norton J. P. 2008. Artificial intelligence techniques: an introduction for their use for modeling environmental systems. *Mathematics and Computers in Simulation* 78: 379-400.

Giacomelli G. 2007. Designing the Greenhouse to Meet Your Expectations: What's Your Technology Level? Controlled Environment Agriculture Center (CEAC). The University of Arizona, USA.

Greenergy. 2005. Energy optimization in European greenhouses. <http://cordis.europa.eu/>.

Hasan A.; Siren K. 2002. Theoretical and Computational Analysis of Closed Wet Cooling Towers and Applications in Cooling of Buildings. Laboratory and Heating Ventilating and Air Conditioning. Helsinki University, Finland.

Kalogirou, S. A. Applications of artificial neural networks for energy systems. *Applied Energy* 67:17-35. Elsevier science Ltd, 2000.

Schmidt U. 1996. Greenhouse climate control with a combine model of greenhouse and plant by using online measurement of leaf temperature and transpiration. *Acta Horticulturae* 304: 353-362.

Schmidt, U. 2004. Decision support for greenhouse climate control using a computerised Mollier diagram. *Acta Horticulturae* 654: 187-194.

Seginer I. 1997. Some artificial neural network applications to greenhouse environmental control. *Computers and Electronics in Agriculture* 18: 167-186.