

Modelado del clima en invernaderos:

Respuesta de la temperatura a cambios de humedad

Javier Leal Iga

Facultad de Ingeniería Civil, UANL

Efraín Alcorta García

FIME, UANL

Humberto Rodríguez Fuentes

Facultad de Agronomía, UANL

jlealiga@yahoo.com.mx, ealcorta@fime.uanl.mx, hrodrigu10@yahoo.com.mx



RESUMEN

El cambio de las condiciones atmosféricas durante los ciclos climáticos hace necesario utilizar invernaderos para proteger ciertos cultivos. Los invernaderos son estructuras cerradas en las que se mantienen microambientes que son adecuados para un buen desarrollo de las plantas. El control efectivo de algunas variables de clima dentro de invernadero es posible con el auxilio de modelos matemáticos. En este trabajo se presenta un modelo mejorado mediante una propuesta que incluye el efecto de la humedad sobre la temperatura dentro del invernadero. Esto constituye un avance al estado del arte en modelos de clima de los invernaderos. Se presentan los resultados de la simulación llevada a cabo en este trabajo en donde se muestran las ventajas del modelo propuesto.

PALABRAS CLAVE

Temperatura del aire, invernadero, modelado, clima.

ABSTRACTS

Change of the atmospheric conditions during the climate cycles makes necessary to use green houses for protecting some kind of crops. Green houses are closed structures where adequate microenvironments for the good development of plants are maintained. Effective control of some of the climatic conditions in a green house is possible with the aid of mathematical models. An improved model that includes a change that involves the effect of humidity over the temperature inside the green house is presented in this work. This constitutes an advancement of the state of the art in climate modeling in green houses. Results of the simulation carried out in this work are shown, demonstrating the advantages of the proposed model.

KEYWORDS

Air temperature, green house, modeling, climate.



INTRODUCCIÓN

Una experiencia frecuente entre los cultivadores a cielo abierto es la amenaza constante de las variaciones de condiciones climáticas. Como ejemplo se tienen variaciones atípicas en la temperatura, la falta o exceso de lluvia, los cambios fuertes en la humedad ambiental, entre otras. Una forma de hacer frente a los retos que impone la naturaleza es mediante el uso de invernaderos. Un invernadero es una estructura generalmente cubierta por plástico y/o malla antiáfidos que permite proteger el cultivo de los efectos de la naturaleza, proporcionando, además, protección contra algunas plagas y posibilitando un mejor control de la nutrición y uso eficiente del agua.

La gran cantidad de variables presentes dentro de un invernadero hace que su manejo no sea trivial. El uso eficiente de invernaderos es tema actual de estudio en la literatura internacional.¹ Uno de los temas de gran importancia consiste en el control de la temperatura, la cual es responsable, en buena medida, del crecimiento y desarrollo de plantas.^{2,3 y 4} Un aspecto de gran interés radica en la operación del invernadero con un mínimo de energía, pero cumpliendo un perfil de funcionamiento deseado.¹ En este sentido se hace necesario el uso de técnicas de control automático^{1,5} y esto a su vez motiva la necesidad de contar con un modelo del clima dentro del invernadero.

Los modelos de clima para invernaderos reportados en la literatura consideran cuatro o cinco variables en las que se basa la descripción.⁵ Un modelo aceptado ampliamente en la literatura considera variables de temperatura en el ambiente, y suelo, humedad y concentración de CO₂ dentro del invernadero. A pesar de que la humedad es

considerada en general dentro de la descripción ésta no se utiliza en el balance realizado para la modelación de la temperatura.¹ Sin embargo, es bien sabido que la humedad y la temperatura están íntimamente relacionadas.

En este trabajo se presenta una propuesta para considerar el efecto de la humedad en la ecuación de temperatura del invernadero. La idea de la propuesta se basa en la consideración de la variación de la densidad del aire. De aquí se derivan expresiones que permiten describir el efecto de cambios de humedad en la temperatura dentro del invernadero. El modelo que contiene la modificación propuesta muestra una mayor sensibilidad a los cambios de la humedad cuando se compara con el modelo de la referencia.¹

ANTECEDENTES

La modelación del clima dentro de los invernaderos se desarrolla de manera formal a partir de los 80. Dos de las primeras propuestas fueron realizadas en la Universidad Agrícola de Wageningen, Holanda en 1983. En ambos modelos se consideran ecuaciones para la temperatura dentro del invernadero, e incluyen el efecto del calentamiento y la apertura de ventanas y consideran al invernadero como un tanque mezclado perfecto, en el cual las variables climáticas son uniformes.^{5 y 6} La diferencia esencial fue que en ⁵ se utilizó un modelo de bajo orden, linealizado y que considera el efecto de la radiación y el calor de absorción del cultivo por evaporación en una manera empírica, evitando la necesidad del pronóstico de la radiación de onda larga de la atmósfera. En cambio en ⁶ se utiliza un modelo de alto orden, maneja una cantidad relativamente grande de variables de estado no relacionadas directamente a la producción del cultivo, debido a que el suelo se divide en varias capas, y a que requiere el conocimiento de la radiación de onda larga de la atmósfera.

En 1992 Tchamitchian⁷ propone una mejora al modelo⁵ despreciando los tiempos muertos existentes y cambiando la entrada de calor por la suposición de que los cambios en la temperatura de la tubería son lo suficientemente rápidos para considerar a la tubería en un pseudo-equilibrio estático. Fue en el año 2000 cuando F. Tap¹ complementó el modelo de Tchamitchian considerando el efecto de la humedad

del aire dentro del invernadero (pero no en la ecuación de la temperatura), así como un modelado más preciso de la ventilación.

De forma independiente de los trabajos descritos anteriormente, Takakura² propone un modelo no lineal distinto a los anteriores, el cual considera la temperatura de la cubierta, la temperatura del aire interior, piso y temperatura de la planta como variables de estado. Este sistema de ecuaciones representa una alternativa al modelo de Tap.¹ Utilizando otro punto de vista, Nielsen y Madsen³ proponen un modelo lineal estocástico de tiempo continuo. En este caso la linealidad limita su aplicación. Recientemente Ferreira y Ruano⁸ desarrollaron un modelo basado en redes neuronales artificiales. Este modelo tiene el inconveniente de que las variables internas no necesariamente tienen una interpretación física.

MODELO DE CLIMA EN INVERNADERO (CON DENSIDAD DE AIRE CONSTANTE)

Este modelo fue tomado del trabajo de Tap.¹ Las ecuaciones fueron obtenidas de balances de masa y energía 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:

Temperatura dentro del invernadero

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

Esta ecuación 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).

Temperatura del suelo

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

En esta ecuación 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).

Concentración de CO₂

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

Para esta ecuación 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).

Humedad

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

Esta ecuación 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).



DENSIDAD DEL AIRE DENTRO DEL INVERNADERO

Los modelos de clima para invernaderos consideran que la densidad del aire dentro del invernadero permanece constante en los balances relacionados con la ecuación de cambio de temperatura.¹ La densidad del aire debe de ser considerada variante en el tiempo. La forma en que esta consideración puede realizarse en el modelo existente se presenta a continuación.

Composición de la densidad del aire

La densidad del aire se define como la división de la masa de las moléculas del aire entre el volumen que las contienen, y será representada en este trabajo con unidades de Kg/m³.

Una manera de considerar la humedad es mediante la representación de la masa de aire como la suma de dos componentes:

- a) La masa de aire seco m_{dry}
- b) La masa de vapor de agua $m_{W,vapor}$

Utilizando esta representación de la masa de aire y sustituyéndola en la ecuación para la densidad del aire $M_{Air} = \frac{m_{Air}}{Volumen}$, se obtiene la expresión:

$$M_{Air} = \frac{m_{dry}}{Volumen} + \frac{m_{W,vapor}}{Volumen},$$

$$M_{Air} = \gamma_o + V_i \quad (1)$$

en donde: γ_o es la densidad del aire seco (Kg/m³). Esta cantidad representa la masa del aire seco por unidad de volumen a una temperatura específica de 20 °C, valor que se considerará constante.

V_i Es la concentración de humedad dentro del invernadero (Kg/m³). Esta cantidad representa la masa de vapor de agua por unidad de volumen. Este valor no es constante (varía con el tiempo). Esta variable se calcula dentro del modelo de clima en el invernadero y la ecuación correspondiente fue precisada anteriormente.

De esta manera, la densidad del aire M_{Air} considerando el efecto de la humedad, es evaluada como la variación de la concentración de vapor de agua, por medio de la ecuación (1). El resultado muestra que es posible representar la densidad

del aire como la suma de la densidad del aire seco y la del vapor de agua. Esto permitirá hacer un ajuste importante a las ecuaciones del modelo y en particular a la relacionada con la temperatura del aire dentro del invernadero. El coeficiente crítico en este caso es el de capacidad de calor C_p .

Aplicación al modelo de clima en invernaderos

Aplicando la ecuación de la variación de la densidad del aire por efecto de la humedad, en la ecuación de temperatura en el invernadero se obtiene:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{1}{h(c_p\gamma_o + C_H V_i)} \left[K_v(T_o - T_g) + \alpha(T_p - T_g) + K_r(T_o - T_g) + K_s(T_s - T_g) + Z\eta G - \lambda E + \frac{\lambda}{\epsilon + 1} M_c - C_H T_g (E - \Phi_v(V_i - V_o) - M_c) \right]$$

De la ecuación anterior se puede apreciar (por comparación con la ecuación de temperatura del aire dentro del invernadero) cuales son los términos afectados. Detalles sobre las ecuaciones y valores de parámetros se pueden encontrar en.^{9 y 10}

Respuesta de la temperatura a cambios de humedad

En esta sección se presentan los resultados de simulación de los modelos considerados en este trabajo. Por un lado se realizó la simulación utilizando el modelo que considera la densidad del aire constante en la ecuación de temperatura¹ y en el otro caso se simuló el modelo con los ajustes propuestos para tomar en cuenta el efecto de variaciones en la humedad.

Marco para la realización de las simulaciones

En ambos casos se utilizan los datos presentados en el trabajo de Tap.¹ La información disponible corresponde a las mediciones de la temperatura, humedad, radiación solar, velocidad del viento, concentración de CO₂, durante un periodo de 72 horas. Los valores de los parámetros del modelo también provienen del trabajo antes mencionado.

Consideraciones de los parámetros de capacidades de calor

El interés por considerar este parámetro C_g en particular radica en que el valor que se propone en el trabajo de Tap¹ es de 32,000 Joules/(kg °C). Este valor numérico resulta muy alto (del orden de 10 veces mayor) en comparación con el valor técnico que se obtiene de la literatura. Es de enfatizar que el valor de C_g utilizado en¹ fue ajustado (calibrado, tal y como es llamado este procedimiento en Agronomía) y no calculado a partir de las constantes asociadas con las propiedades físicas. Para el modelo propuesto se utilizan los valores correspondientes al $c_p = 1010$ Joules/(kg °C), que representa el calor específico del aire a presión constante y $C_H = 2010$ Joules/(kg °C) que corresponde al calor específico del vapor de agua a presión constante.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Los resultados de las simulaciones pueden apreciarse en las siguientes figuras. La línea continua representa la variable calculada utilizando el modelo propuesto mientras que la línea discontinua corresponde al modelo de Tap.¹

En forma general se puede decir que las demás variables sólo presentan desviaciones muy pequeñas en magnitud, figuras 1, 2 y 3. Sin embargo, un hecho significativo es que la tendencia de la gráfica correspondiente al modelo propuesto (línea continua) muestra una mayor sensibilidad a las variaciones del

día que el modelo de Tap¹. Es de resaltar además el hecho de que las condiciones ambientales de donde se obtuvieron los datos utilizados en la simulación corresponden a una zona donde las variaciones de humedad no son grandes.

Al analizar los resultados se aprecia en la figura 4, correspondiente a la concentración de CO₂, no hubo variación entre los modelos.

Esto se debe a que los valores de temperatura en el aire dentro del invernadero no influyen en la ecuación relacionada con la concentración de CO₂.

Las figuras 5 y 6, muestran la diferencia entre ambos modelos, (temperatura del aire y del suelo respectivamente).

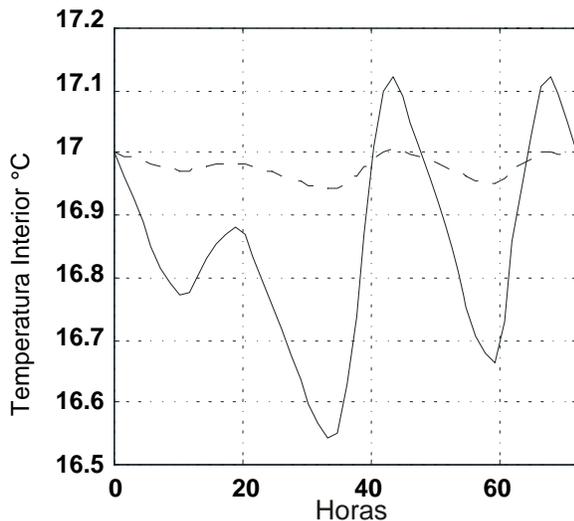


Fig. 1. Temperatura del aire en el invernadero.

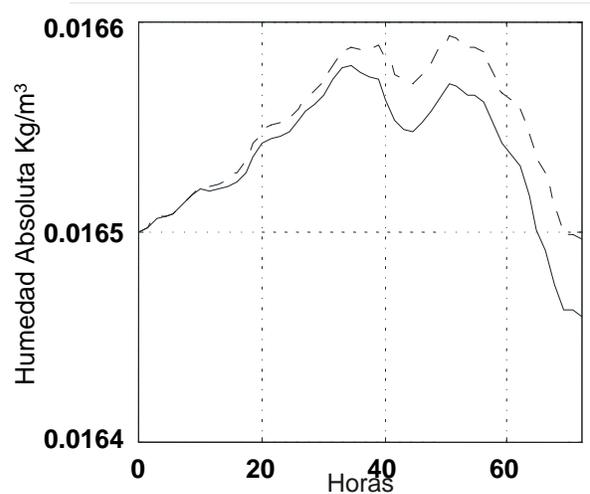


Fig. 2. Humedad en el invernadero.

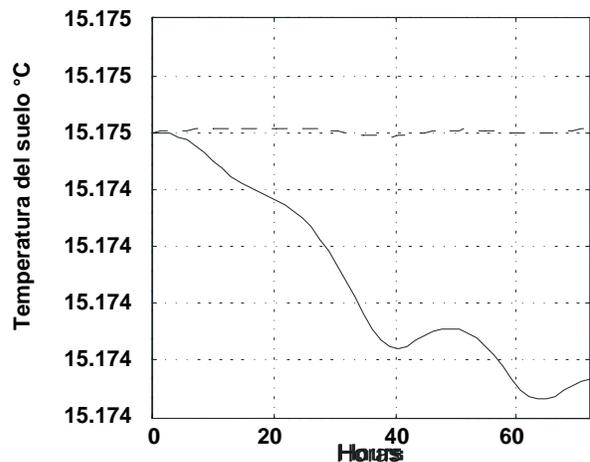


Fig. 3. Temperatura del suelo en el invernadero.

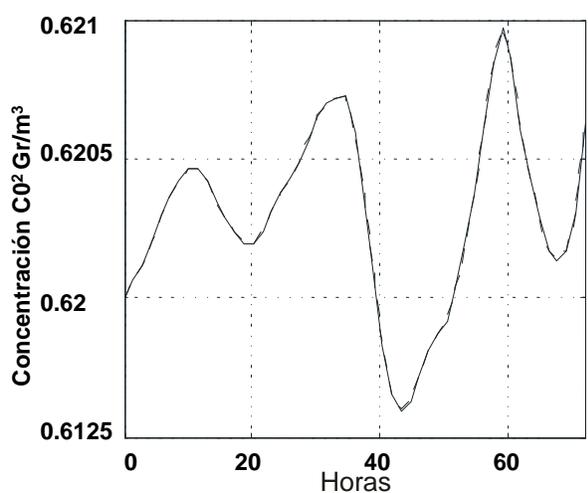


Fig.4. Concentración de CO₂ en ambos modelos.

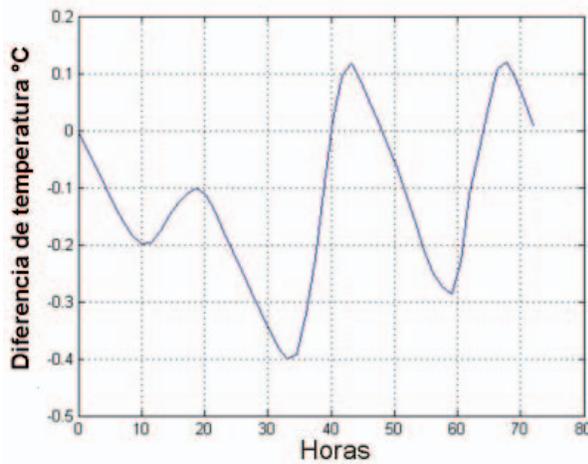


Fig.5. Diferencia de temperaturas del aire.

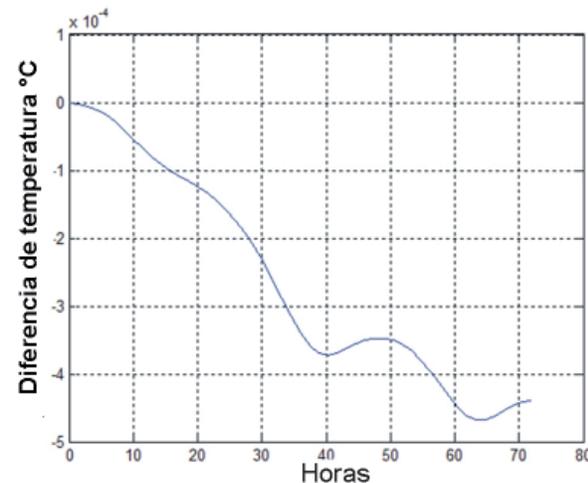


Fig.6. Diferencia de temperaturas del suelo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se muestra una manera de considerar el efecto de la humedad en el cálculo de temperatura dentro de un invernadero.

El punto de partida es un modelo aceptado generalmente en la literatura. Basados en una representación de la humedad se obtiene una ecuación que permite considerarla como variable en el tiempo. El modelo se modifica para incluir los cambios propuestos y así obtener un nuevo modelo (denominado modelo propuesto). Ambos modelos (el original obtenido de la literatura y el propuesto) se evalúan bajo el mismo marco de referencia. Se observa que el modelo propuesto presenta una mayor sensibilidad y que al menos en la tendencia sigue mejor los cambios naturales del día. En magnitud, la variación es casi despreciable. El marco de simulación empleado contempla pocas variaciones de humedad y los cambios de magnitud pequeños que se observaron pueden obedecer a este hecho.



REFERENCIAS

1. Tap F. Economics-based optimal control of greenhouse tomato crop prod., PhD Thesis, Wageningen Agr. Univ., 2000.
2. Takakura, T, Climate Under cover, digital dynamic simulation in plant Bioengineering, Kluwer Academia Publisher, The Netherlands. 1993.
3. Nielsen, B. and H. Madsen (1998). Identification of a linear continuous time stochastic model of the heat dynamic of a greenhouse. J. Agr. Eng. Res. 71, 249–256.

4. J. Muños Ramos, J. Z. Castellanos R., Horticultura protegida, antecedentes y perspectivas de desarrollo en México y el sistema agrícola almeriense, 1er S. regional de producción de cultivos en invernaderos, Monterrey., N. L., México, Abril 2003.
5. Udink ten Cate A.J., Modeling and (adaptive) control of greenhouse climates, PhD Thesis, Wageningen Agr. Univ. 1983.
6. Bot G. Greenhouse Climate: from physical processes to a dynamic model, PhD Thesis, Wageningen Agr. Univ. 1983.
7. Tchamitchian M., van Willigenburg L.G., van Straten G., Short term dynamic optimal control of the greenhouse climate, Wageningen MRS report, 92-3.
8. Ferreira, P.M., Ruano, Greenhouse Air Temperature Modelling with Radial Basis Function Neural Networks Workshop on Management,, Identification and Control of Agriculture Buildings, Universidade de Trás os Montes e Alto Douro, Portugal. 2001.
9. J. Leal Iga, E. Alcorta García y H. Rodríguez Fuentes, "Influence of air density variations in the climate of greenhouse", 2nd IFAC Symposium on System, Structure and Control, Oaxaca, Mexico, 2004.
10. J. Leal Iga, E. Alcorta García y H. Rodríguez Fuentes, "Efecto de la variación de la densidad del aire en la temperatura bajo condiciones de invernadero", CIENCIA UANL. Vol. IX, No. 3, Julio-Sep. 2006.

Ingenierías
en línea

**A TEXTO COMPLETO
DESDE EL NÚMERO 1**

consulta en:
<http://ingenierias.uanl.mx>