Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Modelado de un Sistema Difuso de Temperatura y Humedad para Macro Túneles de Plantas Ornamentales

Modelling of a Temperature and Humidity Fuzzy System for Ornamental Plants Macro Tunnels

Flores-Gallegos, E.[a], Farías-Mendoza, N.[a], Silos-Espino, H. [b], García-Díaz, N. [a], Vargas-González C.O.[a]

[a] Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación. Instituto Tecnológico de Colima; C.P. 28976 Villa de Álvarez, Colima.
[b] Laboratorio de Biotecnología Aplicada. Instituto Tecnológico El Llano Aguascalientes. Km. 18 Carretera. Aguascalientes-San Luís Potosí, México.
g1546007@itcolima.edu.mx, nfarias@itcolima.edu.mx, silosespino@hotmail.com, ngarcia@itcolima.edu.mx, cristian.vargas@itcolima.edu.mx

Innovación tecnológica: Sistema Difuso para Macro Túneles de Plantas de Ornato.

Área de aplicación industrial: Agricultura, Tecnificación de Invernaderos.

Recibido: 24 Mayo 2017.
Aceptado: 20 Julio 2017.

Abstract

Macro tunnels are ideal for vegetative spread by cuttings of ornamental species, nevertheless it is necessary to have appropriate temperature and humidity for their correct development. This article presents the modeling of a fuzzy system for monitoring temperature and humidity in cuttings rooting tunnels of ornamental plants vivariums, with the intention of improve productivity by obtaining an increase in the survival index of cuttings. The modeling of the system was developed with MATLAB. Considered as input variables were temperature error and moisture error, while output variables were considered change of temperature and humidity. The type of diffuse inference system utilized was Mamdani, in which a centroid defuzzification method was used. Obtained results from the system modeling allow us to know the behavior of the cuttings production monitoring in accordance with the stated physical parameters, concluding that these results coincide with the ones obtained by the macro tunnel operator This investigation applied innovative technics and hardware to give a particular approach to cuttings reproduction in rooting tunnels.

Keywords: Fuzzy Logic, Cuttings, Macro Tunnels, Mamdani, Ornamental Plants.

Resumen

Los macro túneles son ideales para la propagación vegetativa por esquejes de especies ornamentales, no obstante es necesario tener una temperatura y humedad apropiadas para el correcto desarrollo de los esquejes. Este artículo presenta el modelado de un sistema difuso para monitorear la temperatura y la humedad relativa en macro túneles de enraizamiento de esquejes en viveros de plantas ornamentales con el propósito de aumentar la productividad al obtener un incremento en el índice de sobrevivencia de esquejes. El modelado del sistema se desarrolló con la herramienta MATLAB. Para el modelado del sistema se consideraron como variables de entrada el error de temperatura y error de humedad, así como variables de salida la variación de temperatura y la humidificación; se utilizó un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani, en el cual se utilizó el método de desfusificación tipo centroide. Los resultados obtenidos del modelado del sistema nos permiten conocer el comportamiento del monitoreo de la producción de esquejes conforme a los parámetros físicos especificados, concluyendo que estos resultados coinciden con los obtenidos por el operador del macro túnel. Esta investigación aplicó técnicas y herramientas innovadoras para dar un enfoque particular a la reproducción de esquejes en túneles de enraizamiento al determinar los requerimientos específicos de especies de plantas tropicales.

Palabras clave: Lógica Difusa, Esquejes, Macro túneles, Mamdani, Plantas Ornamentales.

1. Introducción.

La industria de la floricultura puede definirse como el cultivo y comercialización de una amplia variedad de plantas y materiales de siembra, productos parentales como partes de plantas y recortes así como productos finales para el mercado como flores de corte, follaje y plantas [1], esta industria genero exportaciones globales aproximadas a los US$ 21.5 billones en 2012 [2].

Los países del oeste de Europa, Norte América y Japón son considerados los principales productores y consumidores de flores en el mundo [3]. Por su parte México tiene las condiciones ideales para la floricultura comercial, dada su diversidad de climas, flora inmensamente variada, su ubicación geográfica y una mano de obra grande y de bajo costo, no obstante México aún no se ha dado cuenta de su potencial como exportador de flores, mientras que las flores mexicanas siguen dirigidas a los mercados nacionales y no a los internacionales [4]. Además los factores avanzados como la infraestructura, recursos humanos especializados y el soporte de la ciencia y la tecnología tienen bajo nivel de adopción por su elevado costo, lo que se traduce en una producción de menor calidad [5]. En el estado de Colima, estos factores se ven reflejados en la poca tecnificación de los invernaderos teniendo en el mejor de los casos algunos instrumentos de medición manuales con lo que procesos de producción como el enraizamiento de esquejes se ve afectado ya que tener un control eficiente de parámetros críticos consume mucho tiempo y recursos.

Las variables de entorno tienen por naturaleza, un comportamiento dinámico y no lineal. Por lo tanto, soluciones para el proceso de la información son requeridas, basadas en técnicas y tecnologías avanzadas para proveer un mejor resultado en la producción [6]. El control de estas variables climáticas en invernaderos ha recibido considerable atención en los últimos años. La principal razón para el incremento del interés está relacionado a los siguientes objetivos financieros y agropecuarios [7]:

(a) Extender la temporada de crecimiento y el rendimiento potencial.
(b) Gestionar el clima con el fin de alcanzar altos niveles de calidad.
(c) Desarrollo de sistemas de producción de bajo costo, compatibles con la escasez de recursos y la baja capacidad de inversión de los productores.

La temperatura y la humedad relativa son dos importantes variables que son complicadas de controlar debido a que depende una de la otra. La alta temperatura y la alta humedad durante los meses de verano, causa efectos negativos en la producción de cultivos en regiones tropicales. Por lo tanto, en dichas regiones, la reducción o la regulación de la temperatura durante el verano son necesarias para una producción de cultivos exitosa [8]. El éxito del enraizamiento de los esquejes va a depender de las condiciones ambientales donde se lleve la multiplicación. Las condiciones ambientales fundamentales son [9]:

- *Humedad Relativa:* dado que los esquejes no poseen raíces, las condiciones de humedad relativa y disponibilidad de agua del ambiente deben de ser máximas; de otra forma se produce un desecamiento que tiene consecuencias desastrosas para la formación de raíces.
- *Temperatura:* las temperaturas elevadas en el sustrato, aunque en algunos casos favorecen el enraizamiento, no son aconsejables, puesto que estimulan el crecimiento de microorganismos que pueden provocar la podredumbre de las raíces además de que se limitará más la transpiración.

1.1. Trabajos Relacionados.

Para controlar estas variables diversos trabajos con sistemas difusos se presentan en la literatura. En [10] se presenta un sistema de lógica difusa (LD) para controlar la humedad, temperatura, CO_2 y la luminosidad en un invernadero, teniendo como resultado un importante ahorro de energía y agua. Por su parte, en el trabajo de investigación desarrollado por [11] fue propuesto un sistema difuso que mediante las variables de humedad relativa, temperatura y etapa del cultivo automatiza el riego en un invernadero de chiles habaneros teniendo como resultados un importante ahorro en el agua suministrada. En el estudio elaborado por [12] se diseñó e implementó un control y monitoreo de temperatura y humedad para invernaderos en el cual se desarrolló un sistema difuso para controlar el microclima, las simulaciones de monitoreo y control del sistema se mostraron en tiempo real. En [13] se presentó la validación experimental de un modelo de invernadero dinámico para evaluar la correlación y comportamiento de la temperatura interior y la humedad relativa utilizando un sistema difuso tipo Mamdani con resultados positivos. Finalmente, en el trabajo desarrollado en [14] los investigadores elaboraron un sistema difuso tipo Mamdani para controlar la humedad relativa, la temperatura y la luminosidad dentro de un invernadero, para las pruebas del sistema desarrollaron una interfaz gráfica con la que el rendimiento fue probado manualmente teniendo resultados favorables en las pruebas realizadas.

1.2. Propuesta de solución.

Este artículo presenta el modelado de un sistema difuso para macro túneles de enraizamiento (Fig. 1) de esquejes con lo que se pretende controlar la temperatura y la humedad relativa con el objetivo de tener las condiciones óptimas de enraizamiento de esquejes para obtener un incremento en el índice de sobrevivencia y un óptimo desarrollo. Para la implementación de un

sistema difuso dentro del túnel se consideró la capacidad de modelar sistemas no-lineales con la que cuenta la LD, adecuado a lo complejo que resultan las variables de entorno de los túneles de enraizamiento. Además de esto, la alta flexibilidad, la tolerancia con la imprecisión y su base en el lenguaje natural hacen que la implementación de este tipo de sistemas sea cada vez más común en el sector de la agricultura.

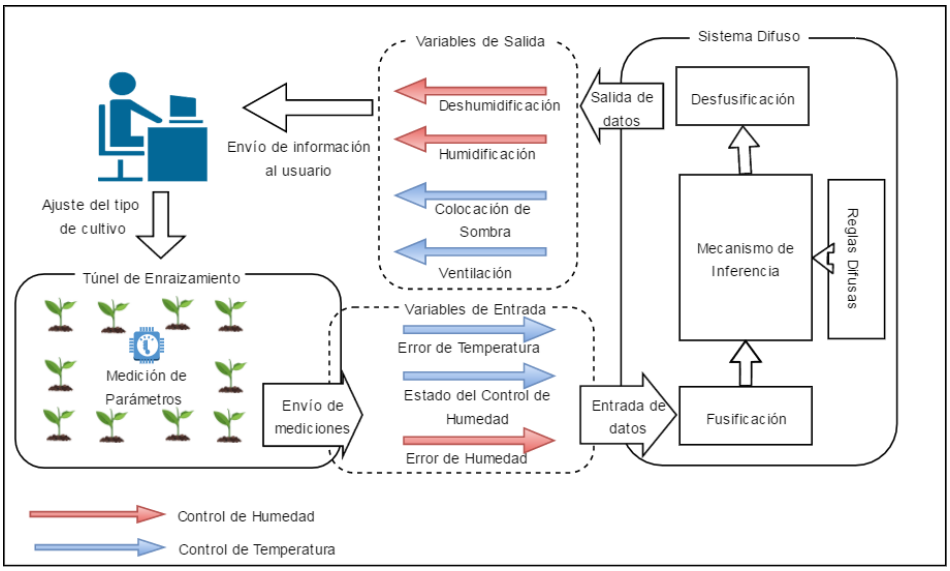


Figura 1. Modelo del sistema desarrollado.

Primero se definió el caso de estudio para continuar con el modelado en el cual las variables de entrada fueron: error de humedad relativa, error de temperatura y estado del controlador de humedad, las variables de salida fueron ventilación y colocación de sombra para la temperatura mientras que humidificación y deshumidificación para la humedad. Posteriormente, un experto en el área definió los parámetros de las funciones de membresía las cuales fueron de tipo triangular y trapezoidal. El método de inferencia del modelo fue de tipo Mamdani con conocimiento del operario para elaborar la matriz de reglas. Este trabajo aporta la posibilidad de adaptar los modelos difusos a diferentes tipos de plantas ornamentales tropicales, atendiendo los requerimientos específicos de cada una de ellas. Para validar el modelo se realizaron simulaciones de las variables de entrada, estas validaciones fueron hechas con MATLAB.

1.3. Lógica Difusa (LD).

El concepto de LD fue introducido por L. Zadeh en 1965, en su trabajo [15] definió a los conjuntos difusos como clases con un continuo grado de pertenencia, con lo que elaboró el modelo matemático para definir estas clases imprecisas que juegan un importante rol en la forma de pensar de los humanos, la comunicación de la información y la abstracción. Desde entonces, sistemas difusos han sido aplicados satisfactoriamente en campos como la automatización, clasificación de datos, análisis de decisiones, sistemas expertos y visión computacional [16].

Los controladores basados en la teoría de los conjuntos difusos son usados para representar la experiencia y el conocimiento de un operador humano en términos de variables lingüísticas que son llamadas reglas difusas [17]. Un sistema difuso está compuesto principalmente por 4 partes

(Fig.2): fusificación, reglas, inferencia y desfusificación. Las cuales según [18] las define de la siguiente manera:

- *Fusificación:* es un proceso de conversión de datos medidos del mundo real a un valor lingüístico en el mundo de la LD utilizando las funciones de membrecía de las variables lingüísticas para calcular el grado de pertenencia (grado de verdad).
- *Reglas o Base de Conocimientos:* contiene las reglas lingüísticas del control y la información referente a las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos. Estas reglas lingüísticas, tienen típicamente la forma mostrada en la ecuación 1.

$$Si\ x_1 es\ A\ y\ x_2\ es\ B\ entonces\ y\ es\ C \quad \textbf{(Ec. 1)}$$

- *Motor de Inferencia:* realiza la tarea de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada, mediante las reglas del controlador y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos a la salida.
- *Desfusificación:* la desfusificación es el proceso que provee salidas discretas y determinísticas a partir de los conjuntos difusos obtenidos como resultado de la inferencia.

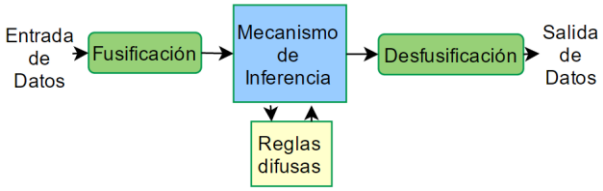


Figura 2. Esquema de un sistema basado en LD.

1.3.1. Sistemas de inferencia Mamdani.

El método Mamdani utiliza reglas tipo si-entonces (if-else). Una regla de la base de reglas o base de conocimiento tiene dos partes, el antecedente y la conclusión como se observa en la Figura 3. En un sistema difuso Mamdani tanto el antecedente como el consecuente de las reglas están dados por expresiones lingüísticas [19].

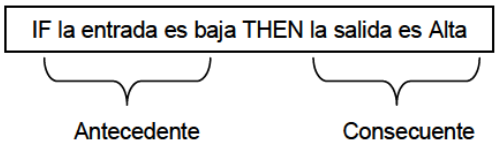


Figura 3. Reglas Si-Entonces Mamdani.

1.4. Reproducción vegetativa por esquejes.

La multiplicación por esquejes es una técnica de amplia repercusión en la horticultura ornamental, tanto de plantas perennes como caducas, en floricultura y en muchas especies frutícolas. La propagación por esquejes consiste en separar un fragmento de una planta (tallo, raíz, hoja u órgano especializado) y colocarlo en unas condiciones favorables que conlleven la regeneración de una planta completa. Es un método económico, rápido y simple que permite obtener plantas uniformes en superficies reducidas [9].

1.5. Macro túneles para el enraizamiento de esquejes.

Los túneles de enraizamiento llamados "macro túneles o túneles altos" son aquellos que cuentan con estructuras que no reúnen las características apropiadas, en ancho y altura al canal o pared recta, para ser consideradas como invernaderos, pero permiten que las personas realicen labores en el interior, son ideales para semilleros o almácigos de especies hortícolas y ornamentales además de abrigo en la propagación vegetativa de especies de interés comercial. Como principales desventajas con respecto a los invernaderos retienen menos el calor por las noches

debido a su poco volumen, y en muchos casos una elevada temperatura durante el día por carecer de ventilación [20].

2. Materiales y Equipos.

2.1 Caso de Estudio.

El caso de estudio de este trabajo fueron los túneles de enraizamiento de esquejes de Viveros Massangeana S.A. de C.V. con una latitud 19°13'48.76"N y una longitud: 103°45'20.25"O. En la Figura 4 se muestran las dimensiones del túnel.

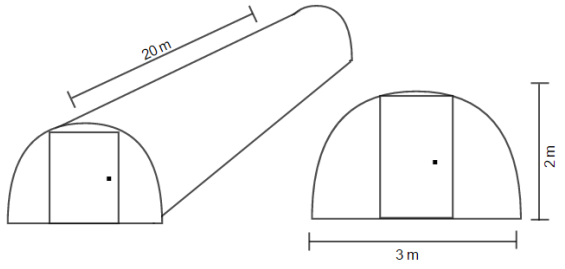


Figura 4. Dimensiones del macro túnel.

2.2 Herramienta de diseño y simulación de sistemas de LD.

Para el diseño y validación del modelo se utilizó la herramienta Fuzzy Logic Toolbox™ de MATLAB la cual proporciona funciones, aplicaciones y simulaciones para analizar, diseñar y simular sistemas basados en LD [21].

2.3 Especie Ornamental Bugambilia (Bougainvillea glabra Choisy).

Para el desarrollo del modelado se utilizó especie Bugambilia (Bougainvillea glabra Choisy). La cual es una de las principales especies producidas en el caso de estudio. En la Tabla 1 se muestran los parámetros apropiados para estas plantas que fueron proporcionados por el experto.

Tabla 1. Especie ornamental seleccionada y sus parámetros óptimos de temperatura y humedad relativa.

Especie	Temperatura ideal para reproducción del esqueje	Humedad Relativa ideal para reproducción del esqueje
Bugambilia	28 °C	70 %

3. Métodos Empleados.

Para el modelado y validación del sistema se siguieron las siguientes etapas:

- *Definición de las variables de entrada.*
- *Definición de las variables de salida.*
- *Definición de las reglas.*
- *Implementación en MATLAB.*
- *Validación del modelo.*

4. Modelado del Sistema.

4.1 Definición de las variables de entrada.

El primer paso para el modelado del sistema fue definir las variables de entrada, para las cuales se estimó la diferencia de los parámetros óptimos (temperatura interior y la humedad relativa) con los valores reales de sus mediciones. A esta diferencia se le llamo error de temperatura (ΔT) (Ec. 2) y error de humedad (ΔH) (Ec. 2), las cuales se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$\Delta T = T_{esperada} - T_{real} \qquad \textbf{Ec. (2)}$$

$$\Delta H = H_{esperada} - H_{real} \qquad \textbf{Ec. (3)}$$

También se especificó la variable de entrada Estado del Control de la Humedad debido a la relación que tiene el control esta variable sobre la temperatura. Los tipos de funciones de membresía que se utilizaron fueron triangulares y trapezoidales (Tabla 2). Los grados de membresía de cada variable

fueron definidos por conocimiento experto (Tabla 3).

Tabla 2. Representación gráfica y matemática de los tipos de funciones de membresía utilizadas *[22]*.

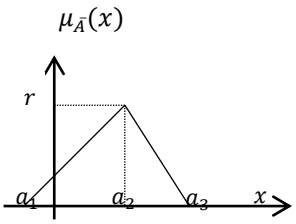
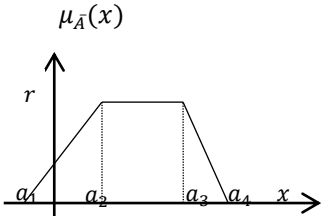
Tipo de Función de Membresía (MF)	Representación Gráfica	Representación analítica
Triangular MF		$\mu_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} r, if\ a_1 \le x \le a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2} r, if\ a_2 \le x \le a_3 \\ 0\ , \end{cases}$ **Ec. (4)**
Trapezoidal MF		$\mu_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1} r, if\ a_1 \le x \le a_2 \\ r,\ if\ a_2 \le x \le a_3 \\ \frac{a_4-x}{a_4-a_3} r, if\ a_3 \le x \le a_4 \\ 0\ , \end{cases}$ **Ec. (5)**

Tabla 3. Parámetros de las funciones de membresía de las variables de entrada.

Variable de entrada	Rango	MF	Abreviación	Tipo de MF	Parámetros
Error de Humedad	-70 – 30 (%)	Bajo	B	Trapezoidal	[-80 -70 -15 -0]
		Mínimo	Min	Triangular	[-15 0 15]
		Alto	A	Trapezoidal	[0 15 30 45]
Error de Temperatura Interior	-25 - 25 (°C)	Bajo	B	Trapezoidal	[-30 -25 -8 0]
		Mínimo	Min	Triangular	[-8 0 8]
		Alto	A	Triangular	[0 8 16]
		Muy Alto	MA	Trapezoidal	[8 16 25 33]
Estado del Control de Humedad		Humidificación	H	Triangular	[0 1 2]
		OFF	OFF	Triangular	[-0.8 0 0.8]
		Des-humidificación	DH	Triangular	[0 -1 -2]

4.2 Definición de las variables de salida.

Debido a la tecnificación pasiva con la que cuenta el caso de estudio la cual según [23] es aquella que no tiene automatización; está cubierta por malla o plástico y está expuesta a cambios climáticos, los procesos para el ajuste de los parámetros se realizan de forma manual; cuando se requiere bajar la temperatura se realiza por medio de ventilación abriendo la puerta del macro túnel y se agrega o quita una sombra sobre el techo. El control de la humedad se realiza por medio de esparción de agua y deshumidificación. Para la implementación del sistema difuso se pretende instalar actuadores que realicen los trabajos que se hacen de forma manual. Los parámetros de las funciones de membresía de las variables de salida se muestran en la Tabla 6.

4.3 Definición de las reglas.

Ahora viene la segunda etapa del proceso, crear un conjunto de reglas que permitan utilizar las composiciones que se han realizado. Las reglas son los conectores que unen los antecedentes con la conclusión además de la politica que utilizan los expertos para llevar a cabo el control, empleando preposiciones [24]. Estas reglas fueron proporcionadas por el operador de los macro túneles, de ahí la importancia de determinar el caso de estudio ya que las variables de salida y las reglas se especifican al caso de estudio teniendo en cuenta la relación de ambos parámetros. En las Tablas 4 y 5 se muestran las matrices con las reglas de inferencia.

Tabla 4. Matriz de reglas para el Error de Humedad.

Error de Humedad		
Bajo	Mínimo	Alto
ON	OFF	OFF
OFF	OFF	ON

Humidificación
Deshumidificación

Tabla 5. Matriz de reglas para el Error de Temperatura.

	Estado del Control de Humedad		
Error de Temperatura	**H**	**DH**	**OFF**
Bajo	MB	MB	MB
	C	C	C
Mínimo	B	B	M
	C	C	Q
Alto	M	M	A
	C	Q	Q
Muy Alto	A	A	MA
	Q	Q	Q

Ventilación
Sombra

Tabla 6. Los parámetros de las funciones de membresía de las variables de salida se muestran en la Tabla 4.

Variable de Entrada	**Variable de Salida**	**Rango**	**MF**	**Abreviación**	**Tipo de MF**	**Parámetros**
Error de Humedad	Humidificación	0 - 1	ON	ON	Triangular	[0 1 2]
			OFF	OFF	Triangular	[-1 0 1]
	Des-humidificación	0 - 1	ON	ON	Triangular	[0 1 2]
			OFF	OFF	Triangular	[-1 0 1]
Error de Temperatura	Ventilación	0 - 100 (%)	MuyBaja	MB	Triangular	[-25 0 25]
			Baja	B	Triangular	[0 25 50]
			Media	M	Triangular	[25 50 75]
			Alta	A	Triangular	[50 75 100]
			MuyAlta	MA	Triangular	[75 100 125]
	Sombra	0 - 1	Quitar	Q	Triangular	[-1 0 1]
			Colocar	C	Triangular	[0 1 2]

4.4 Método de desfucificación.

Para la desfusificación de las salidas se utilizó el método centroide o centro de gravedad debido a su aplicación en controladores difusos (Ec. 6).

$$Salida = \frac{\sum_{x=a}^{b} \mu(x) \cdot x}{\sum_{x=a}^{b} \mu(x)} \qquad \textbf{Ec. (6)}$$

Su metodología es sencilla: corta la función de membresía al grado de la membresía respectiva, es decir, segmenta las funciones de membresía, generando en cada función dos áreas. El área inferior que se forma es la que se toma para hacer el cálculo. Se sobreponen todas estas áreas y se saca el centroide de la superposición, el cual nos dice la salida real del sistema [24].

5. Resultados y Discusión.

Como resultado se obtuvo el modelado, la simulación y la validación del sistema difuso tipo Mamdani para la temperatura y humedad relativa en MATLAB. El modelado del sistema se muestra en las Figuras 5 y 6; para las variables de entrada se utilizaron funciones de membresía trapezoidales y triangulares como se muestra en las Figuras 7 y 8. Por su parte, para las funciones de membresía de las variables de salida fueron triangulares (Figura 9). Para el desarrollo de las reglas difusas se utilizó la experiencia del operador y la relación entre la humedad relativa y la temperatura. Estas reglas se muestran en las Figuras 10 y 11. Una vez modelado el sistema se procedió a la simulación del modelo (Figuras 12 y 13), para lo cual se tomaron los rangos de las mediciones de temperatura y humedad relativa posibles en el caso de estudio.

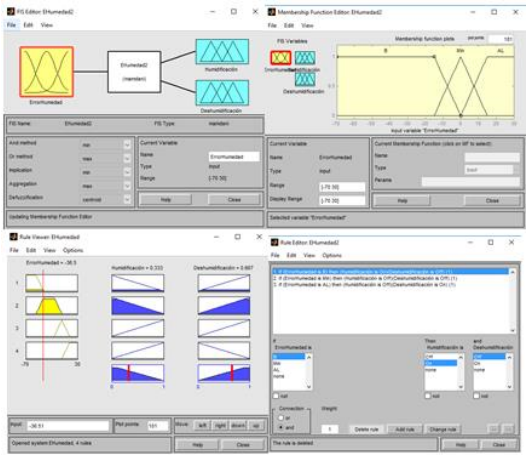


Figura 5. Sistema Difuso para el control de la humedad relativa desarrollado en MATLAB.

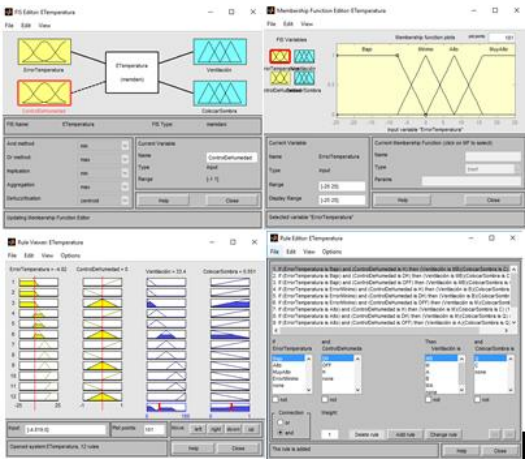


Figura 6. Sistema Difuso para el control de la Temperatura desarrollado en MATLAB.

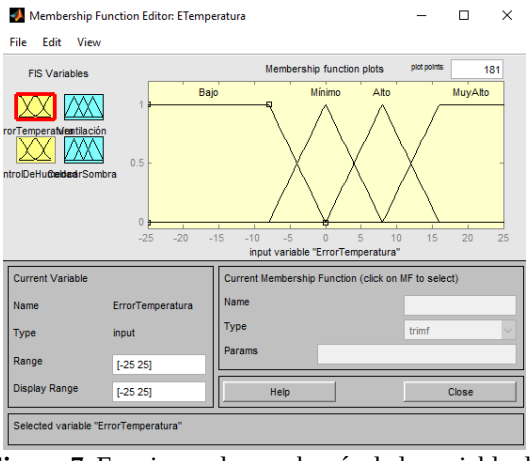


Figura 7. Funciones de membresía de la variable de entrada Error de Temperatura.

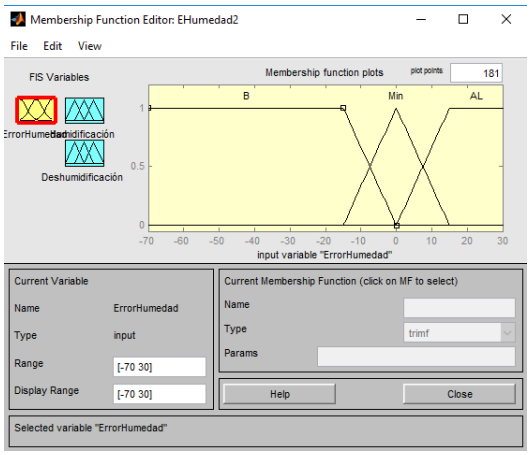


Figura 8. Funciones de membresía de la variable de entrada Error de Humedad.

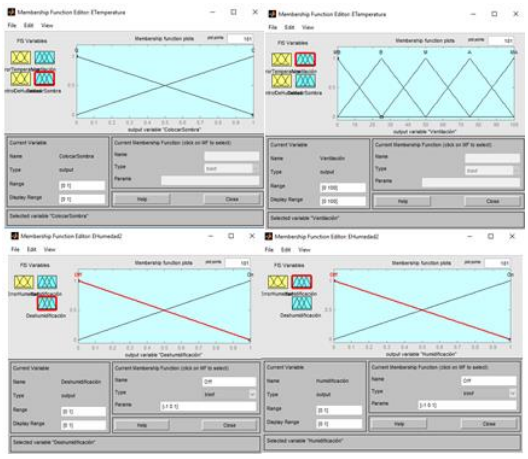


Figura 9. Variables de salida del Error de Temperatura y Error de Humedad.

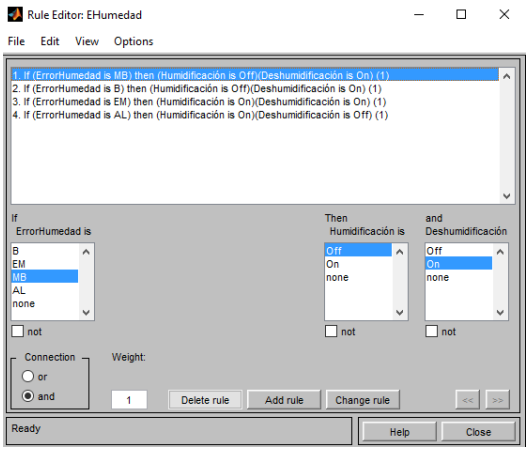


Figura 10. Reglas Difusas para la variable de entrada Error de Humedad.

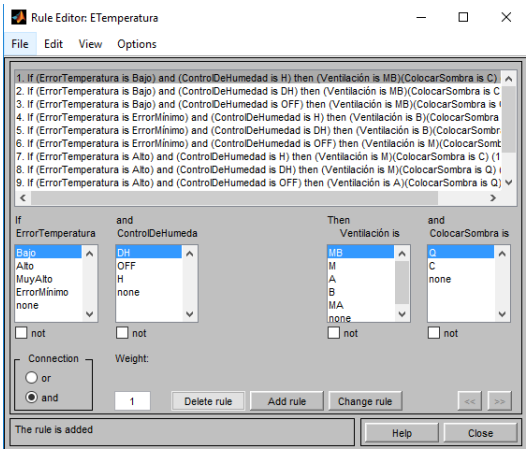


Figura 11. Reglas Difusas para la variable de entrada Error de Temperatura.

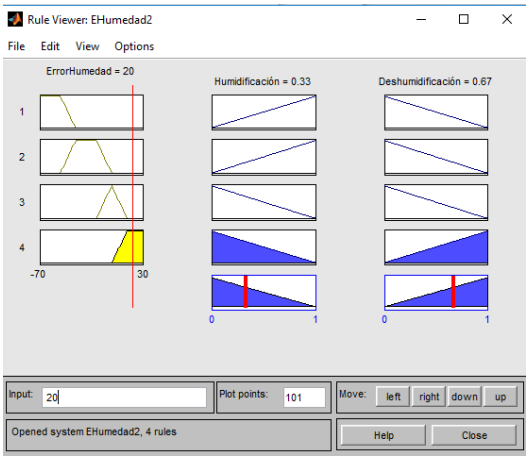


Figura 12. Simulación del modelo para el control de la humedad relativa.

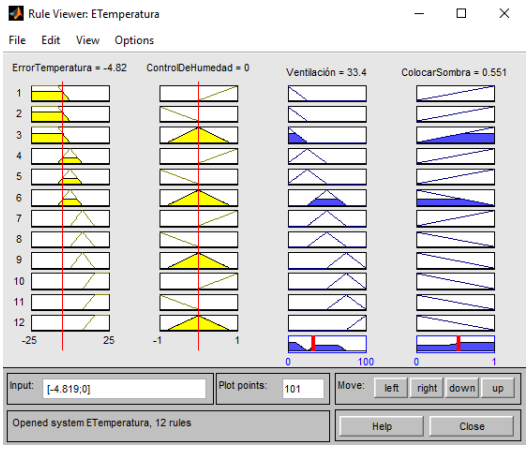


Figura 13. Simulación del modelo para el control de la temperatura.

Por último se procedió a la validación del modelo, para lo cual se tomó la planta Bugambilia que se produce en el caso de estudio, en las Tablas 7 y 8 se muestran los valores con los que se validó el sistema. Para el control de la temperatura se tomaron los tres posibles estados del control de la humedad: Deshumidificación, Apagado (OFF) y Humidificación.

Tabla 7. Resultados del modelo para el control de la humedad relativa realizado en MATLAB.

Esqueje: Bugambilia			
Humedad Relativa óptima: 70%			
Valores	Error de Humedad	Humidificación	Deshumidificación
100%	30%	0.33	0.67
90%	20%	0.33	0.67
80%	10%	0.358	0.581
70%	0%	0.33	0.33
60%	- 10%	0.581	0.358
50%	- 20%	0.67	0.33

Tabla 8. Resultados del modelo para el control de la temperatura realizado en MATLAB.

Especie de esqueje óptima: Bugambilia			
Temperatura: 28 ℃			
Estado del Control de Humedad: Des-humidificación			
Valores	Error de Temperatura	Ventilación	Colocación de Sombra
45 ° C	17℃	75%	0.333
40 ℃	12 ℃	62.5%	0.386
30 ℃	2 ℃	32.2%	0.616
20 ℃	- 8℃	8%	0.670
Estado del Control de Humedad: OFF			
Valores	Error de Temperatura	Ventilación	Colocación de Sombra
45 ° C	17℃	92%	0.333
40 ℃	12 ℃	78.2%	0.386
30 ℃	2 ℃	57.5%	0.347
20 ℃	- 8℃	8%	0.670
Estado del Control de Humedad: Humidificación			
Valores	Error de Temperatura	Ventilación	Colocación de Sombra
45 ° C	17℃	75%	0.333
40 ℃	12 ℃	62.5%	0.500
30 ℃	2 ℃	32.2%	0.653
20 ℃	- 8℃	8%	0.670

Con esto podemos observar que el modelo cumple con lo que realizaría el operador por lo que puede ser implementado en un microcontrolador. A diferencia de los trabajos citados en los cuales trabajan con cultivos específicos, este modelo puede trabajar con catálogos de plantas ornamentales tropicales pre-definidos, atendiendo las diferentes especies cultivadas en el estado de Colima.

6. Conclusiones y Trabajo a Futuro.

Con base a los resultados obtenidos podemos concluir lo siguiente:

- Las variables de salida de sistema difuso modelado en este trabajo cumplen con lo que realizaría el operador dependiendo del valor de los parámetros críticos de entrada error de temperatura y error de humedad.
- Debido a que es muy poco factible medir manualmente los parámetros dentro de los macro túneles de enraizamiento ya que al acceder a ellos se pierde humedad además de tiempo, los sistemas difusos son una opción viable para aplicar el conocimiento del experto en dichos macro túneles.
- La utilización de un sistema de LD para macro túneles de enraizamiento de esquejes resulta apropiada por lo complejo y no lineal de su comportamiento.

Ya una vez validado el modelo, queda como trabajo a futuro la implementación del sistema conectado a una red de sensores inalámbrica dentro de los macro túneles de enraizamiento y comprobar si se aumenta la productividad de los productores con el sistema así como el tiempo de retorno de inversión.

7. Agradecimientos.

Los autores de este artículo, agradecemos al Instituto Tecnológico de Colima, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), así como a los programas: 1000 Jóvenes en la Ciencia del TecNM y al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP).

8. Referencias.

[1] O. Martsynovka (2011), *Global Floriculture Industry Value Chain. Position of the Ukirainian Firms in the Floriculture Business*, Masther Thesis. Master Programme in Economic Growth, Innovation and Spatial Dynamics.

[2] M. Maleka, J. Albertyn y J. Spies (2013), *The floriculture industry and flower pigmentation – a review*, Philosophical Transactions in Genetics 5, vol. 2, pp. 55-110.

[3] J. H. Wijnands, J. Bijman y R. B. Huirne (2007), *Impact of institutions on the performance of the flowers industry in developing countries*, ISNIE Conference, pp. 21-23.

[4] Y. Xia, d. Xianbao, P. Zhou, K. Shima y J. A. Teixera da Silva (2006), *The World Floriculture Industry: Dynamics of Production and Markets*, Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology, vol. IV, nº Floriculture, Ornamental and Plant Biotechnology, pp. 336-347.

[5] Orozco Hernández, M. E., Mendoza Martínez, M., & María Estela Orozco Hernández, M. M. (2003). *Competitividad local de la agricultura ornamental en Méxic*o (No. 300). e-libro, Corp.

[6] H. Turral, M. Svendsen y J. Marc Faures (2010), *Investing in irrigation: Reviewing the past and looking to the future*, Agriculture Water Management, vol. 97, nº 4, pp. 551-560. doi: 10.1016/j.agwat.2009.07.012.

[7] N. Bennis, J. Duplaix, G. Enéa, M. Haloua y H. Youlal (2008), *Greenhouse climate modelling and robust control*, Computers and Electronics in Agriculture, vol. 61, pp. 96-107 doi: 10.1016/j.compag.2007.09.014.

[8] K. Kumar, K. Tiwari y M. K. Jha (2009), *Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review*, Energy and Buildings, nº 41, pp. 1269-1275. doi: 10.1016/j.enbuild.2009.08.003.

[9] F. X. M. Farré (2006), *Multiplación de hornamentales por esquejes de tallo*, de Compendios de Horticultura, Horticom , pp. 83-102.

[10] M. Azaza, C. Tanougast, E. Fabrizio y A. Mami (2016), *Smart green house fuzzy logic based control system enhanced with wireless data monitoring*, ISA Transactions, vol. 61, pp. 297-307. doi: 10.1016/j.isatra.2015.12.006.

[11] M. R. Ceballos, J. L. Gorricho, O. Palma Gamboa, M. Karel Huerta, D. Rivas y M. Erazo Rodas (2015), *Fuzzy System of Irrigation Applied to the Growth of Habanero Pepper (Capsicum chinense Jacq.) under Protected Conditions in Yucatan, Mexico*, International Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 2015, p. 13 doi: 10.1155/2015/123543.

[12] K. M. AI-Aubidy, M. M. Ali, A. M. Derbas y A. W. AI-Mutairi (2014),

Real-Time Monitoring and Intelligent Control for Greenhouses Based on Wireless Sensor Network, IEEE, p. 7. doi: 10.1109/SSD.2014.6808765.

[13] M. Azaza, K. Echaieb, F. Tadeo, E. Fabrizio, A. Iqbal y A. Mami (2015), *Fuzzy Decoupling Control of Greenhouse Climate*, Arabian Journal for Science and Engineering., p. 9.

[14] A. Siriraman y V. Mayorga (2007), *Climate Control inside a Greenhouse: An Intelligence System Approach Using Fuzzy Logic Programming*, Journal of Environmental Informatics, vol. 10, nº 2, pp. 14-20.

[15] L. A. Zadeh (1965), *Fuzzy Sets*, Information and Control, vol. 8, pp. 338-353 doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

[16] S. Lee, R. Howlett y S. Walters (2006), *Fuzzy and Neuro-fuzzy Techniques for Modelling and Control*, KES 2006, Part I, LNAI 4251, p. 1206 – 1215.

[17] I. H. Altas y A. M. Sharaf (2007), *A Generalized Direct Approach For Designing Fuzzy Logic Controllers In MATLAB/SIMULINK GUI Enviroment*, International Journal of Information Technology and Intelligent Computing, vol. 1, nº 4, p. 27.

[18] G. Bojórquez Delgado y J. Bojórquez Delgado (2014), *Metodología para la Implementación de Sistemas Difusos Tipo Mandami en Lenguajes de Programación de Proposito General*, Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica, vol. 36, pp. 318-323.

[19] W. Siler y J. Bucley (2005), *Fuzzy Experts Systems And Fuzzy Reasoning*, Wiley-Interscience.

[20] A. Bastida Tapia y G. Flores Escobar (2016), *Tecnologías y Estructuras de la Agricultura Protegida*, II Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2016, p. 21.

[21] The MathWorks, Inc. (2017), *Fuzzy Logic Toolbox | MATLAB*, MathWorks,. [En línea]. Available: https://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html. [Último acceso: 27 04 2017].

[22] R. A. Aliev (2013), *Fundamentals of the Fuzzy Logic-Based Generalized Theory of Decisions*, Bakú: Springer.

[23] Asociación Mexicana de Horticultura Protegida (2013), *Agricultura Protegida en México*. [En línea]. Available: http://www.amhpac.org/es/index.php/homepage/agricultura-protegida-en-mexico. [Último acceso: 10 03 2017].

[24] P. P. Cruz (2010), *Inteligencia Artificial con Aplicaciones a la Ingenieria*, México D.F.: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México,.