

Propuesta de un sistema para optimizar el riego en invernaderos de plantas heterogéneas usando WNS y algoritmos evolutivos

Verónica del Rocío Ochoa López, Carlos Lino Ramírez, Rosario Baltazar Flores, Miguel Ángel Casillas Araiza, Víctor Manuel Zamudio Rodríguez, Sandra Jaqueline López Cervera, Guillermo Eduardo Méndez Zamora

Instituto Tecnológico de León,
División de Estudios de Posgrado e Investigación, León, Guanajuato,
México

{rocio230483, carloslino, vic.zamudio}@itleon.edu.mx, {miguel.casillas, jclsandra, guillermomendez06}@gmail.com, r.baltazar@ieee.org

Resumen. En este trabajo se presenta la propuesta de un sistema de control de riego para lograr un uso eficiente de agua en invernaderos de plantas heterogéneas sin sacrificar el buen estado de las mismas, para ello se propone primero una clusterización (agrupamiento) de las plantas en base a las necesidades de riego y segundo la implementación de un algoritmo genético que establece los tiempos óptimos de riego y de espera que permitan minimizar la cantidad de agua utilizada al reducir el tiempo de riego y maximizar los tiempos de espera entre cada irrigación. Las distintas especies de plantas fueron agrupadas en base a su comportamiento de la humedad de la tierra bajo condiciones específicas, creando un vector de características que representa dicho comportamiento. El sistema permite un eficiente consumo del agua utilizada en los invernaderos.

Palabras clave: WSN, Xbee, Zigbee, optimización, agrupamiento, mejoramiento de invernadero.

Proposal of a System to Optimize Irrigation in Greenhouses of Heterogeneous Plants Using Evolutionary Algorithms and WNS

Abstract. In this paper, it is proposed an irrigation control system able to use in an efficient way the water in greenhouses of heterogeneous plants without sacrificing the good condition of them, to accomplish this, firstly it is proposed a clustering of plants based on the irrigation needs and secondly implementation of a genetic algorithm that establishes the optimum watering times and waiting between each watering which permit to minimize the amount of water used in each irrigation, minimizing watering time and maximizing the waiting times between each watering. Different species of plants were clustered based on their behavior in the soil moisture under specific conditions, for which a feature vector representing such behavior was created. The system allows efficient use of the water used in greenhouses

Keywords: WSN, Xbee, Zigbee, optimization, clustering, improving of greenhouse.

1. Introducción

De acuerdo a la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación, el riego representa el 70% de las extracciones de agua en el mundo, esto aunado al crecimiento de demográfico que para el año 2050 se espera aumente en un 40% representan una necesidad urgente de crear estrategias basadas en la ciencia y la tecnología para el desarrollo sostenible del uso de este recurso [1].

El desarrollo de sistemas de riego automatizados es una opción viable de contribuir al uso racional y eficiente del agua, ya que el diseño de estos sistemas busca suministrar sólo la cantidad de agua necesaria para la agricultura. Los sistemas de riego se pueden automatizar a través de la información del contenido volumétrico de agua del suelo, usando sensores de humedad para controlar los actuadores y ahorrar agua [2].

Un sistema de riego bien diseñado es un requisito esencial para un riego amigable rentable y ambiental. La tecnología de radiofrecuencia inalámbrica ha proporcionado oportunidades para implementar sistemas de comunicación inalámbrica de datos en la agricultura [3].

En los últimos años se han propuesto e implementado sistemas de apoyo a la horticultura de invernadero que permiten a los usuarios controlar el clima de los invernaderos de forma remota, transmitiendo información hasta los dispositivos como Smartphone o Tablet PC desde donde el usuario puede tomar decisiones o controlar ciertos dispositivos. Algunos de estos sistemas como [4, 5, 6, 7] integran micro-controladores y tecnología de bajo consumo de energía en el diseño de redes de sensores inalámbricas y proponen el uso de tecnología Zigbee en el monitoreo y control ambiental de invernaderos.

En este trabajo se propone un sistema que permite mejorar el riego en invernaderos de plantas de distintas especies y hacer un uso eficiente del agua, el modelo propone lo siguiente: el uso de pipetas para el suministro del agua, la clusterización de distintas especie de plantas en grupos que guarden una similitud en el comportamiento de la humedad de la tierra, la caracterización de los grupos obtenidos y por último la utilización de algoritmos metaheurísticos con el fin de obtener una solución que permita optimizar el consumo de agua al determinar el tiempo necesario de riego y maximizar en lo posible los tiempos de espera entre cada irrigación, sin afectar el crecimiento favorable de las plantas. El sistema trabaja con datos de humedad de la tierra en tiempo real por lo que se diseñó una arquitectura de red que permite obtener dicha información a través de nodos sensores y actuadores que trabajan bajo el protocolo de comunicación Zigbee.

2. Trabajos relacionados

Los grandes avances en el desarrollo y de WSN aplicados en el sector agrícola han hecho posible la automatización y mejoramiento del riego en invernaderos donde las condiciones ambientales pueden ser controladas de manera automática, tal es el caso

de trabajos como [4, 5 y 6] donde se implementaron sistemas de riego automatizados para optimizar el uso del agua para los cultivos agrícolas.

En [7] presenta el diseño de un software que da soporte a la toma de decisiones y su integración con una red de sensores inalámbricos (WSN) implementada en el campo en sitios específicos de control de riego por aspersión, el cual utiliza comunicación inalámbrica Bluetooth.

Los autores de [8] exploran el problema de despliegue óptimo de una WSN teniendo en cuenta la forma única de la disposición espacial del cultivo permanente durante el trasplante. En lugar de la agricultura convencional con fila horizontal o lineal se propuso un patrón hexagonal de la agricultura para los cultivos permanentes.

Otros trabajos como [9 y 10] buscan atacar el problema del desperdicio del agua utilizada en la producción agrícola, implementando sistemas de riego automatizados que utilizan un protocolo de comunicación Zigbee para la comunicación inalámbrica. [9] fue implementado en un invernadero de policultivo en el que cultivaron frijol, chile, maíz y tomate utilizando el método de irrigación por goteo. Mientras que en [10] calculan la cantidad de agua necesaria para las plantas.

También se han desarrollado investigaciones que trabajan con distintas metodologías para optimizar uso del agua. Tal es el caso de [11] donde los autores utilizan lógica difusa en conjunto con WSN como parte de su propuesta de un sistema de control de riego que normaliza el nivel de humedad deseado en el suelo agrícola mediante el control del flujo de agua de la bomba de riego, basado en las lecturas del sensor la bomba cambia los estados entre ON y OFF.

Los autores de [12] utilizan un algoritmo genético para la asimilación de datos y la gestión óptima del agua. Además los autores de [13] utilizan técnicas de programación matemática para desarrollar una estrategia secuencial para la optimización del agua y la energía.

Por otra parte, la clasificación de las plantas es un tema que ha sido abordado en distintas investigaciones desde hace décadas, sin embargo, las primeras investigaciones y propuestas están basadas exclusivamente en la morfología de las plantas como se menciona en [14] donde se propone una clasificación de las plantas basada en cinco factores: 1) la silueta planta o forma general resultante de una combinación de otros sistemas, 2) el grupo de la hoja, 3) el tallo, 4) la raíz, y 5) la inflorescencia.

Con el surgimiento de técnicas de Inteligencia Artificial como el reconocimiento de patrones se han desarrollado investigaciones como [15] en la que se propone una clasificación de las plantas haciendo uso del algoritmo de agrupación k-means donde el vector de características considera los siguientes aspectos: constricción relativa de corola, longitud de la corola incluyendo lóbulos, presencia de glándulas en la corola, color de la corola, forma de cáliz lóbulos y presencia de glándulas en el cáliz.

3. Desarrollo de la propuesta

Se propone un modelo para mejorar el riego en invernaderos dedicados a la producción de diversas especies de plantas. Dicho modelo propone la utilización de pipetas para llevar a cabo el riego, la clusterización de las distintas especies en grupos

cuyo comportamiento de la humedad en la tierra es similar, seguido por una caracterización específica de cada grupo y por último la implementación de un algoritmo metaheurístico que permita establecer los tiempos óptimos de riego y espera para cada grupo definido. La implementación de este modelo en invernaderos de plantas heterogéneas permite hacer un uso eficiente del consumo de agua utilizada para el riego asegurando un crecimiento y estado favorable de las plantas.

3.1 Diseño de software y hardware del sistema

Se diseñó una arquitectura de red centralizada, la cual está conformada por: nodos sensores encargados de recabar información sobre variables de temperatura y humedad ambiental y de la tierra; nodos actuadores que permiten el flujo y suministro de agua a las plantas; un nodo inteligente que analiza la información obtenida y ejecuta un algoritmo de optimización que permite establecer los tiempos de riego y espera entre cada riego; un servidor que almacena los datos recabados por el sistema y una interfaz visual que accede a dichos datos para mostrarlos a manera de graficas al usuario. También cuenta con un nodo central encargado de la comunicación entre nodos y actuadores. Se utiliza la tecnología IEEE 802.15.4 o Zigbee para la comunicación inalámbrica, ya que es capaz de soportar enrutamiento en malla permitiendo que los paquetes de datos atraviesen múltiples nodos (múltiple "saltos"), con el fin de investigar el nodo destino y haciendo posible que los nodos ZigBee se extiendan sobre grandes regiones y sigan apoyando la comunicación entre todos los dispositivos en la red [16].

En la figura 1 se puede observar la arquitectura propuesta.

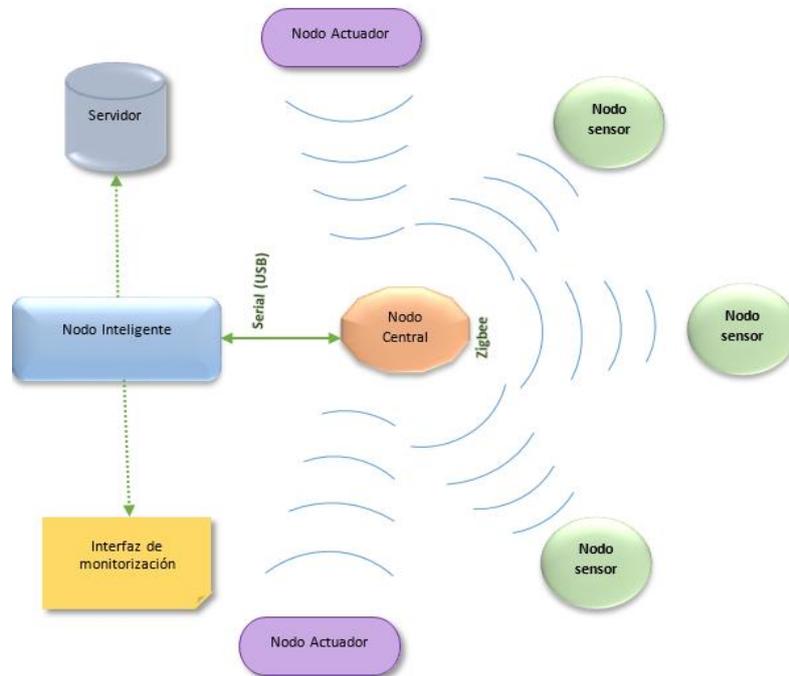


Fig. 1. Arquitectura propuesta.

Para la creación de los nodos sensores encargados de recabar información de las plantas y los nodos actuadores encargados del suministro del agua (Ver figura 2), se utilizaron sensores ambientales de temperatura y humedad, así como un sensor de humedad del suelo y una electroválvula solenoide respectivamente, los cuales están conectados a un microcontrolador y un módulo de comunicación inalámbrica Zigbee, con alimentación portátil (batería).

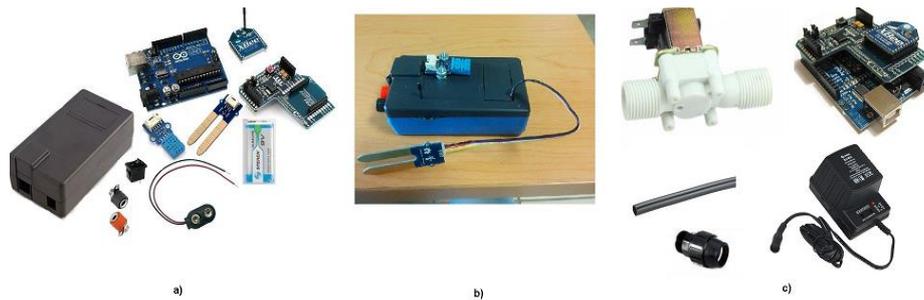


Fig. 2. a) Componentes del nodo sensor. b) Nodo terminado. c) Componentes del nodo actuador

3.2 Utilización de pipetas para el riego

Se propone el uso de pipetas para llevar a cabo el riego, ya que permiten un riego uniforme en todas las plantas del invernadero, asegurando el suministro de agua en cada una de ellas a diferencia del uso de regaderas o mangueras donde la humedad de las plantas después del riego no es uniforme

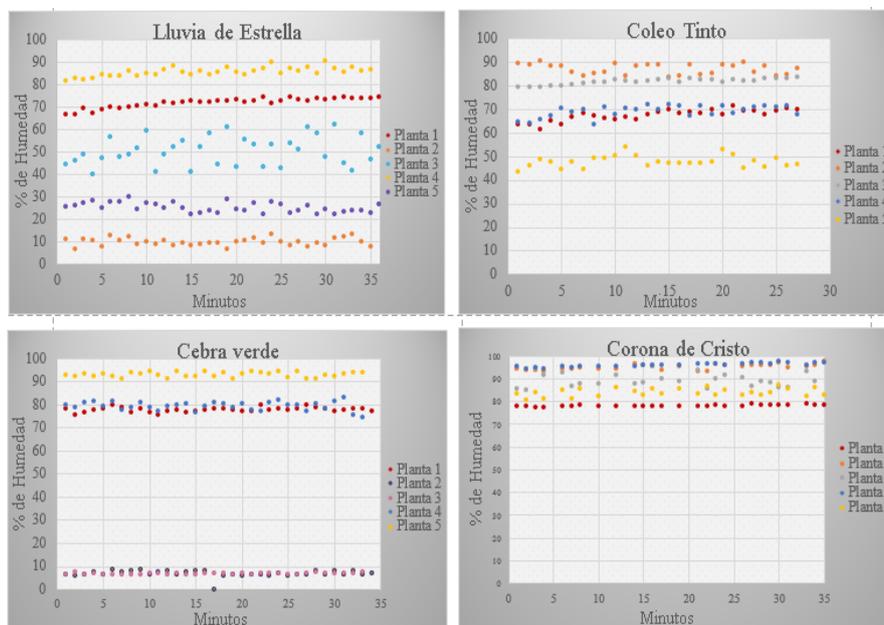


Fig. 3. Humedad de la tierra en las plantas usando el riego con regaderas.

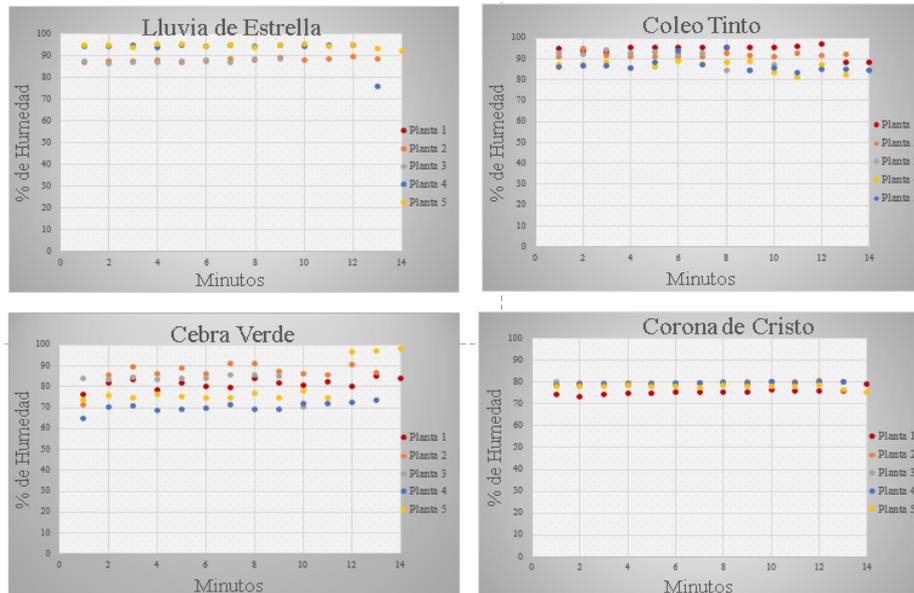


Fig. 4. Humedad de la tierra en plantas utilizando pipetas.

Las figuras 3 y 4 muestran 4 gráficas de distintas especies de plantas donde se observa el nivel de humedad que obtuvo el sensor en un lapso de tiempo después de haber sido regadas haciendo uso de manguera o regadera (figura 4) y utilizando pipetas (figura 5). Con el uso de regadera no todas las plantas recibieron suficiente agua para lograr un nivel de humedad aceptable, mientras que con la utilización de pipetas todas las plantas recibieron agua logrando un nivel de humedad similar.

3.3 Clusterización de las plantas de acuerdo a las necesidades de riego

Se propone agrupar las distintas especies de plantas existentes en un invernadero buscando como característica común de cada grupo el comportamiento de la humedad de tierra, esto con el fin de obtener un número más reducido de grupos y hacer un mejor reacomodo de las plantas, al colocar en un misma hilera de pipetas todas aquellas que pertenecen a un mismo grupo y así poder ser regadas de la misma forma aprovechando el espacio y recursos del invernadero como las tomas de agua utilizada para el riego. El primer paso para poder formar los grupos es recabar información diaria sobre el comportamiento de la humedad de la tierra en las distintas especies, para ello se toma una muestra de cada especie, se riegan a un nivel máximo y se comienza un muestreo diario sobre el comportamiento de la humedad por 5 o más días si se desea, cuidando siempre de no llevar a las plantas a un estrés hídrico. En esta fase se hace uso de sensores de humedad del suelo, los cuales son colocados en las raíces de las plantas.

Generación de un vector de características

Una vez recolectada la información sobre la humedad de la tierra en las distintas especies de plantas se propone realizar un ajuste de datos con la información de cada

planta a fin de obtener una función que describa la curva formada por el comportamiento de la humedad en cada una de ellas. Esto permitirá que las plantas cuyas curvas sean semejantes en forma y posición formen parte de un mismo grupo. Se propone llevar a cabo distintas regresiones y seleccionar aquella función que mejor se ajuste a los datos. Los valores de los coeficientes de la función resultante son considerados como los elementos del vector de características. De tal forma que si se obtiene por ejemplo una función como la siguiente:

$$f(x) = p1 * x^2 + p2 * x + p3. \quad (1)$$

Los valores de $p1$, $p2$ y $p3$ son considerados como el vector de características de la planta.

El grado de la función debe ser el mismo para todas las plantas para asegurar un vector de características del mismo tamaño. Esta propuesta para extraer características resulta simple y fue suficientemente efectiva en este estudio, ya que los vectores formados permitieron obtener grupos de plantas con necesidades de riego similar.

Creación de clusters y reacomodo de plantas

Una vez generado el vector de características para cada planta se utiliza el método de agrupación k-means, el cual agrupará las distintas especies en grupos cuyo comportamiento de la humedad de la tierra es similar entre ellos. Se propone el uso de k-means debido a que es uno de los algoritmos de aprendizaje no supervisado más conocido y cuya implementación requiere pocos recursos computacionales.

Después de obtener los grupos, las especies de plantas que hayan sido agrupadas en un mismo clúster, deben colocarse en una misma hilera de pipetas, la cual estará conectada a una válvula solenoide que permitirá el flujo del agua regando al mismo tiempo a cada una de las plantas pertenecientes a dicho grupo (ver figura 5).

3.4 Caracterización de los grupos formados

Se propone caracterizar cada uno de los grupos formados tomando en cuenta el comportamiento de las siguientes variables: humedad del suelo, volumen de tierra, altura de la maceta, posición del sensor, tiempo de riego (tiempo de activación de la válvula solenoide) y tiempo de espera para llegar a la humedad mínima. Se lleva a cabo un ajuste de datos del comportamiento de las variables obteniendo funciones matemáticas con distintos grados y seleccionando aquella cuyo error medio cuadrático sea menor.

Las funciones resultantes en esta etapa son utilizadas posteriormente como modelado del comportamiento del sistema en el algoritmo de optimización metaheurístico, con la finalidad de obtener tiempos óptimos de activación de la válvula y de espera para cada grupo.

3.5 Implementación de un modelo propuesto para optimizar el uso del agua

Se propone un modelo de optimización que permita ahorrar el consumo del agua a partir de la optimización de tiempos de riego y tiempos de espera entre cada riego

utilizando metaheurísticas y considerando variables como: humedad y temperatura ambiente y la humedad de las raíces de las plantaciones.



Fig. 5. Reacomodo de las distintas especies de plantas en los grupos definidos.

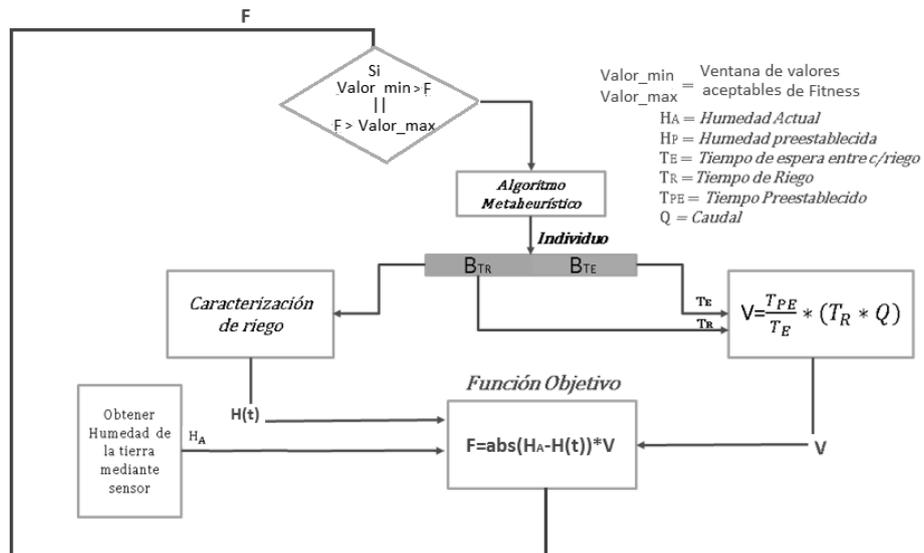


Fig. 6. Modelo de optimización propuesto.

El algoritmo metaheurístico funciona buscando el valor mínimo de la función objetivo (fitness), cuando el valor del fitness se encuentra entre dos números preestablecidos (a la que llamamos ventana del fitness deseada) entonces el algoritmo se detiene y se ajustan los tiempos (de riego y de espera) en las electroválvulas para que se mantengan accionando.

El sistema continuamente toma muestras de la humedad en las raíces para compararlo con la curva de humedad calculada a partir de los tiempos obtenidos por el algoritmo. Si existe una diferencia considerable, entonces el fitness tiene un valor fuera de la ventana del fitness deseada, por lo que el algoritmo volverá a calcular valores de tiempos considerando que pudieron haber cambiado los factores externos como temperatura y humedad ambiental que afectaron el comportamiento de humedad en la tierra.

El proceso seguido por el modelo se muestra en la figura 6.

Descripción del modelo

Para lograr el consumo de agua mínimo, debe considerarse que se busca el mínimo de tiempo de riego y el máximo tiempo de espera entre cada riego, además de buscar la máxima humedad posible permitida en las plantas.

A continuación se describe el modelo diseñado:

- El algoritmo metaheurístico comienza a optimizar tiempos
- Se obtiene el nivel de humedad actual de un grupo de plantas mediante un sensor de humedad del suelo.
- Si la diferencia de la humedad de la tierra actual con la humedad calculada por el algoritmo se encuentra dentro de la ventana establecida de nivel aceptado, entonces el algoritmo se detendrá.
- La optimización (por medio del algoritmo metaheurístico) se realiza a partir de la caracterización de las plantas de cada grupo definido. Con la caracterización se puede obtener a partir de un tiempo definido de riego (T_R) y la humedad del suelo censada (H_A), una humedad promedio que presentaría la planta (H_t). Por otra parte, para la determinación del volumen consumido de agua dados los tiempos de riego (T_R y T_E) se pueden establecer las siguientes ecuaciones:

$$V = T_R * Q, \quad (2)$$

$$f = \frac{T_{PE}}{T_E}, \quad (3)$$

$$V = f * (V_{tr}), \quad (4)$$

dónde: V_{tr} = Volumen consumido en tiempo de riego, T_R = tiempo de riego, Q = caudal de la electroválvula, T_{PE} = tiempo preestablecido (una semana), T_E = tiempo de espera entre cada riego y f = frecuencia de riego, V = volumen utilizado durante un lapso de tiempo T_{PE} .

- Se propone la utilización de algoritmos evolutivos para la optimización, en este caso un algoritmo genético. Se pretende que cada individuo esté conformado por una cadena de bits, donde la mitad de dicha cadena representa el tiempo de espera y la otra mitad el tiempo de riego. De tal forma, que el algoritmo metaheurístico genera los individuos mediante un motor pseudoaleatorio, estos individuos se prueban mediante la función objetivo representada por la siguiente ecuación:

$$F = \text{abs}(H_A - H_t) * V. \quad (5)$$

Así lo que se pretende es minimizar la función objetivo.

- La solución obtenida por el algoritmo será utilizada para ajustar los tiempos que la electroválvula permanecerá activa permitiendo el flujo del agua y alcanzar la humedad deseada para las plantas, así como el tiempo que deberá permanecer desactivada hasta el próximo riego.

4. Experimentación y resultados

Para realizar la experimentación se tomó una muestra de 48 plantas pertenecientes a 13 especies distintas, esta muestra incluía desde plantas de riego frecuente hasta plantas del grupo de las cactáceas o suculentas, las cuales son capaces de almacenar agua en sus hojas y tallos y por lo tanto su riego es más esporádico.

Se hizo un muestreo por 6 días sobre el comportamiento de la humedad de las plantas pertenecientes a la muestra, posteriormente se llevó a cabo un ajuste de datos con la información recabada de cada planta y se obtuvieron varias funciones de distintos grados que describían el comportamiento de la humedad en cada una de ellas. La función seleccionada debido a un mejor ajuste en los datos de cada planta y cuyo vector resultante representó un menor costo computacional al utilizarse en el algoritmo de agrupación fue un polinomio de segundo grado conformado por 3 coeficientes, cada uno de los cuales fue considerado como una característica para el vector de cada planta. Una vez que se obtuvieron los vectores de características de 429 instancias se procedió a realizar el agrupamiento de las distintas especies, para ello se utilizó el método de agrupamiento k-means. El algoritmo fue ejecutado en varias ocasiones asignando distintos valores de K, desde K=2 hasta K=13 (número máximo de especies de plantas), obteniendo distintos grupos en cada una de dichas ejecuciones.

Para evaluar los grupos formados en cada prueba y seleccionar las agrupaciones más adecuadas se tomó como criterio la desviación estándar de la distribución de las especies en cada grupo. En la tabla 1 puede observarse que la desviación estándar obtenida de los grupos formados con K=4 fue menor que el resto, por lo que éstos grupos fueron considerados para llevar a cabo el reacomodo y optimización de los tiempos de riego.

Tabla 1. Grupos formados con distintos valores de K.

Valor de K	Distribución de especies en cada grupo	Desviación estándar de la distribución
2	11,2	7.071067812
3	6, 6, 1	2.886751346
4	4,4,3,2	0.957427108
5	7, 1, 3, 2	2.62995564
6	2,4,2,1,1,3	1.16904519
10	4, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1	1.060660172

Los 4 grupos formados se muestran en la tabla 2 y de manera gráfica pueden visualizarse en la figura 7.

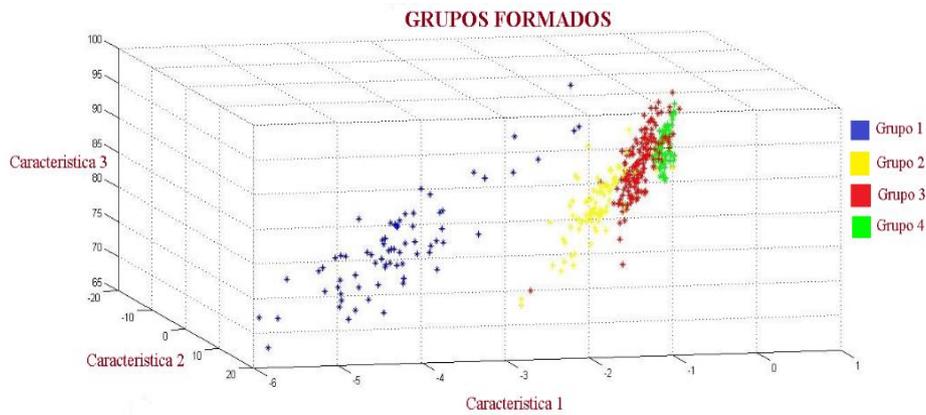


Fig. 7. Grupos formados utilizando el vector de características propuesto.

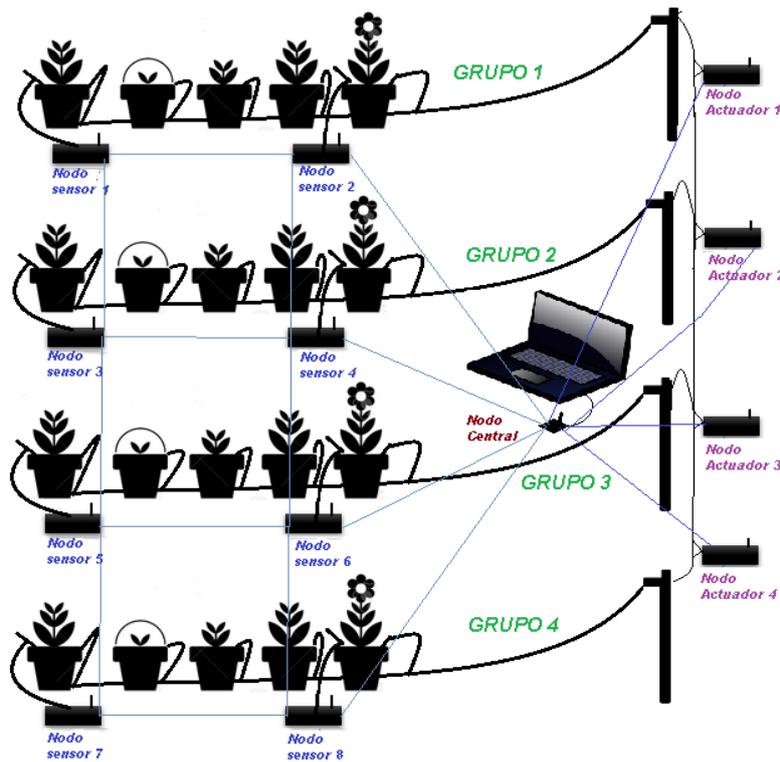


Fig. 8. Reacomodo de las plantas y distribución de los sensores y actuadores.

Con los resultados de la clusterización se hizo un reacomodo de las plantas en base a los grupos formados como se muestra en la figura 8. De este modo al implementar el sistema de riego automatizado las plantas cuyo ciclo de riego es similar estarán acomodadas en una misma fila y se les suministrará de agua al mismo tiempo.

Los sensores fueron configurados para enviar información al nodo central sobre el porcentaje de humedad de la tierra, además de enviar el número del grupo al que pertenecen (1, 2, 3 o 4); el nodo central se encarga de recibir la información y activar las electroválvulas de cada grupo de acuerdo a los tiempos propuestos por el algoritmo de optimización.

Tabla 2. Grupos formados de acuerdo al ciclo de riego.

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
Cebra Verde	Corona de Cristo	Lluvia	Coleo Tinto
Enredadera	Estrellita	Pata Elefante	Lavanda
Estrella	Helecho	Real de Oro	
Rosita	Santolín		

Para la caracterización de cada grupo se llevaron a cabo algunas pruebas que permitieron describir mediante funciones el comportamiento de la humedad en la tierra en cada grupo durante y después del riego, para dichas pruebas se utilizaron plantas con distinto volumen de tierra, plantas en macetas con distintas alturas, además de considerar distintas posiciones para la colocación de los sensores. La utilización de distintos valores de las variables mencionadas permite que el sistema calcule los tiempos de riego y espera para distintos tamaños de plantas.

Las funciones obtenidas en esta etapa se describen a continuación:

1. *Función tiempo de riego vs humedad alcanzada:* describe el comportamiento de la humedad con respecto al tiempo en segundos que se mantuvo activa la electroválvula.
2. *Función tiempo de riego vs volumen:* describe el tiempo en segundos que fue necesario mantener activa la electroválvula para alcanzar una humedad deseada en macetas con distintos volúmenes de tierra.
3. *Función tiempo de riego vs altura:* describe el tiempo en segundos que fue necesario mantener activa la electroválvula para alcanzar una humedad deseada en macetas con distintas alturas.
4. *Función tiempo de riego vs posición del sensor:* describe el tiempo en segundos que se mantuvo activa la electroválvula para alcanzar una humedad deseada en diferentes posiciones de la maceta.
5. *Función tiempo de espera vs humedad alcanzada:* describe el tiempo en segundos transcurrido después del riego hasta llegar a la humedad mínima establecida para el grupo.
6. *Función tiempo de espera vs volumen:* describe el tiempo en segundos transcurrido después del riego hasta llegar a la humedad mínima en macetas con distintos volúmenes de tierra.
7. *Función tiempo de espera vs altura:* describe el tiempo en segundos transcurrido después del riego hasta llegar a la humedad mínima en con distintas alturas.
8. *Función tiempo de espera vs posición del sensor:* describe el tiempo en segundos transcurrido después del riego hasta llegar a la humedad mínima en diferentes posiciones de la maceta.

En la tabla 3 se muestran las funciones obtenidas para el grupo 1. No obstante, para el resto de los grupos se obtuvieron sus ecuaciones respectivas, las cuales fueron utilizadas en la fase de optimización.

Tabla 3. Funciones obtenidas para la caracterización del grupo 1.

Relación	Función	Bondad de ajuste	
Tiempo de Riego vs Humedad	$45.3-39.7*\cos(x*0.1256)-2.022*\sin(x*w)$	SSE	521.8
		R-square Adjusted	0.9799
Tiempo de Riego vs Volumen de tierra	$-1.042*x^2 + 157.2*x - 4550$	SSE	8.4E-23
		R-square Adjusted	1
Tiempo de Riego vs Altura de maceta	$-0.0074*x^2 + 1.034*x - 24.24$	SSE	2.3E-27
		R-square Adjusted	1
Tiempo de Riego vs Posición del sensor	$0.01894*x^2 - 2.217*x + 65.59$	SSE	2.4E-27
		R-square Adjusted	1
Tiempo de Espera vs Humedad	$2.86e-10*x^2 - 0.0002842*x + 78.95$	SSE	1.8E-27
		R-square Adjusted	1
Tiempo de Espera vs Volumen de tierra	$-1.33e-06*x^2 + 0.2595*x - 1.15e+04$	SSE	3.6E-23
		R-square Adjusted	1
Tiempo de Espera vs Altura de la maceta	$-1.40e-09*x^2 + 0.000247*x - 1.791$	SSE	2.6E-28
		R-square Adjusted	1
Tiempo de Espera vs Posición del sensor	$973.4*x^2 - 2.63e+04*x + 2.04e+05$	SSE	5.1E-21
		R-square Adjusted	1

Por último para la etapa de optimización se ejecutó el Algoritmo Genético (AG) [17 y 18], utilizando los siguientes parámetros: Elitismo=10%, Selección= Ruleta pesada, Cruza= En un punto, Muta=One-flip.

Los resultados obtenidos durante la experimentación fueron satisfactorios ya que los tiempos de riego y espera permitieron mejorar el consumo de agua con respecto al riego convencional en cada uno de los grupos definidos, sin sacrificar el buen estado y crecimiento favorable de las plantas.

5. Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se abordó la problemática del uso eficiente del agua en invernaderos de plantas heterogéneas o con distintas necesidades de riego, presentando un modelo en el que se propone la agrupación de las distintas especies de plantas en grupos cuyas

necesidades de riego sean similares y el uso de un algoritmo genético que permite determinar la cantidad de agua necesaria para cada grupo definido.

Se puede observar de acuerdo a los resultados obtenidos que la propuesta para generar un vector de características basado en los coeficientes de la ecuación que describe el comportamiento de la humedad de la tierra fue suficientemente efectivo para hacer una distribución de las plantas en grupos más homogéneos (con necesidades de riego similares).

Las funciones obtenidas en la fase de caracterización en conjunto con un algoritmo genético permitieron determinar los tiempos de riego y espera que hicieron posible minimizar la cantidad de agua utilizada para el riego, sin sacrificar el crecimiento favorable de las plantas. La implementación del algoritmo meta heurístico permite buscar una solución que puede ser óptima para el consumo de agua, gracias a la implementación de esta estrategia de inteligencia artificial nos permitirá en trabajo futuro hacer estudios enfocados a optimización preventiva en base a modelos de un invernadero, donde se buscará no solo optimizar el consumo de agua sino cambiar las formas de las curvas en la caracterización para adaptarlas al ambiente real con diferentes perturbaciones y lograr un control dinámico. Para resolver esto, el espacio de búsqueda aumentará considerablemente, es aquí donde se podrá observar la potencialidad de la estrategia propuesta utilizando algoritmos heurísticos.

El uso de tecnologías como las redes de sensores inalámbricas permitió llevar a cabo el muestro y monitoreo de las variables que ayudaron a obtener la caracterización de cada grupo definido, además de permitir el riego automatizado de las plantas.

El sistema permitirá realizar estudios posteriores para realizar investigación multiobjetivo, además de recolección de datos para realizar minería de datos y avances en el paradigma de *Internet of Things*.

Agradecimientos. El presente trabajo se desarrolló con apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, a través del Programa de Becas Nacionales para estudios de posgrado (Beca 387098), del Tecnológico Nacional de México (Instituto Tecnológico de León), del CONCYTEG y del Instituto de la Memoria.

Referencias

1. Programa de ONU. Agua para la promoción y la comunicación en el marco del decenio (UNW-DPAC). Agua y agricultura en la economía verde (2015)
2. Nemali, K.S., Van Iersel, M.W.: An automated system for controlling drought stress and irrigation in potted plants. *Sci. Horticult*, Vol. 110, No. 3, pp. 292–297 (2006)
3. Oksanen, T., Ohman, M., Miettinen, M., Visala, A.: Open configurable control system for precision farming. *ASABE St. Joseph MI*. (2004)
4. Gutiérrez A., J., Villa Medina, J.F., Nieto Garibay, A., Porta Gándara, M.A.: Automated irrigation system using a wireless sensor network and gprs module. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, Vol. 63 (2014)
5. Li, X-H., Cheng, X., Yan, K., Gong, P.: A monitoring system for vegetable greenhouses based on wireless sensor network. *Sensors* (2010)
6. Zhang, Q. Yang, X-L., Zhou, Y-M., Wang, L-R., Guo, X-S.: A wireless solution for greenhouse monitoring and control system based on ZigBee technology. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A ISSN* (2007)

7. Hema, N., Kant K.: Optimization of sensor deployment in WSN for precision irrigation using spatial arrangement of permanent crop. IEEE (2013)
8. Kim, Y., Evans, R.G.: Software design for wireless sensor-based site-specific irrigation. Computers and Electronics in Agriculture (2009)
9. Torres Lopes, J.G.: Diseño de un sistema de irrigación automatizado para poli-cultivo. Universidad Autónoma de Querétaro (2012)
10. Tao Chi, Ming Chen, Qiang Gao: Implementation and study of a greenhouse environment surveillance system based on wireless sensor network. The 2008 International Conference on Embedded Software and Systems Symposia (ICCESS 2008) (2008)
11. Castro Popoca, M., Águila Marín, F.M., Quevedo Nolasco, A., Kleisinger, S., Tijerina Chávez, L., Mejía Sáenz, E.: Sistema de riego automatizado en tiempo real con balance hídrico, medición de humedad del suelo y lisímetro (2008)
12. Amor V.M., I., Honda, K., Das Gupta, A., Droogers, P., Clemente, R.S.: Combining remote sensing-simulation modeling and genetic algorithm optimization to explore water management options in irrigated agriculture. Agricultural Water Management (2006)
13. Grossmann, I.E., Martin, M.: Energy and water optimization in biofuel plants. Chinese Journal of Chemical Engineering (2010)
14. Halloy, S.A.: Morphological classification of plants, with special reference to the New Zealand alpine flora. Journal of Vegetation Science 1, pp. 291–304 (1990)
15. Orloci, L.: Automatic classification of plants based on information content. Canadian Journal of Botany (2011)
16. XBee®/XBee-PRO® ZB RF. Modules. Digi International Inc (2012)
17. Jones, M.T.: Artificial Intelligence A System Approach. Infinity Science Press LLC Hingham, Massachusetts New Delhi (2008)
18. Talb, El G.: Metaheuristics from design to implementation. University of Lille CNRS INRIA by John Wiley and Sons, Inc. (2009)