

Sistema de Riego Inteligente para Optimizar el Consumo de Agua en Cultivos en Panamá

Edwin Collado, PhD¹, Yessica Sáez, PhD¹

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá,
{edwin.collado, yessica.saez}@utp.ac.pa

Resumen— Hoy en día, la escasez de agua se está convirtiendo en uno de los mayores problemas en Panamá y a nivel mundial. Así como el agua es un derecho universal y una necesidad para el ser humano y los animales, también lo es para las plantas. Por lo tanto, el sector agrícola es uno de los principales interesados en desarrollar métodos que ayuden con la conservación de agua. Sin embargo, el uso innecesario de agua es un problema notable en la actividad agrícola panameña, pues muchas veces los sistemas de riego utilizados por los agricultores suministran cantidades de agua inadecuada a los cultivos. En este trabajo, se propone un sistema de riego inteligente que permitirá minimizar el consumo total de agua en los sistemas de riego de cultivos en Panamá, mientras se satisfacen las necesidades hídricas de las plantas. El problema de optimización consiste en minimizar una función cuadrática que representa la suma residual de la discrepancia cuadrática entre el flujo de agua distribuido y el flujo de agua deseado para cada tipo de planta. Para resolver este problema, se propone un algoritmo que toma en consideración las necesidades reales de agua de las plantas y características del ambiente que las rodea, entre otros factores. A través de los resultados de simulaciones se demuestra que, en comparación con sistemas de riego que suministran un flujo de agua fijo, el algoritmo propuesto permite que el sistema consuma menos cantidad de agua a medida que aumenta el tiempo de riego y la cantidad de plantas en los cultivos.

Palabras claves— Sistemas de riego inteligente, manejo de flujo de agua, optimización, consumo de agua en cultivos, control de sistemas de riego.

I. INTRODUCCIÓN

Durante el periodo 2015-2016, Panamá registró una de las peores crisis de escasez de agua que ha enfrentado este país en los últimos años, como consecuencia de la manifestación del fenómeno climático de “EL NIÑO” [1], [2]. Los efectos de este fenómeno se vieron evidenciados principalmente por las afectaciones en la producción de alimentos. Una merma en la producción agrícola surgió como resultado de los azotes de la sequía que se produjo debido a la disminución de caudales de cuencas hidrográficas en todo el país, incluyendo riesgos de sequía en la zona del canal. Motivadas por esta situación, las autoridades panameñas han incitado a todos los sectores al uso racional del vital líquido, con miras a reducir su consumo y la huella hídrica.

A nivel de las provincias, el sector agrícola constituye uno de los motores principales de la economía de Panamá, donde cerca del 9% de los suelos se encuentran cultivados [3]. Esta actividad depende en gran medida de las condiciones que existen en el medio ambiente que rodea el campo agrícola, tales como el clima, la topografía, etc., [4].

La agricultura es reconocida por la gran demanda de agua que conlleva, en donde el desperdicio del recurso limitado es un problema significativo, especialmente cuando se utilizan técnicas de riego masivo tradicionales como regaderas y/o canales de agua, operados manualmente. Esto ha motivado el desarrollo de sistemas de riego automatizados que faciliten el suministro automático adecuado de agua y así optimizar el uso del agua en el proceso de producción de alimentos.

Dentro de los sistemas de riego automatizados están los sistemas que no utilizan retro-alimentación, es decir, aquellos en los que la operación se lleva a cabo sobre la base de condiciones preestablecidas (tiempo y volumen) y sistemas de realimentación en tiempo real, los cuales son impulsados por al menos dos señales de entrada (humedad del suelo, lluvia, temperatura, etc.) [5]-[7]. La mayoría de estos sistemas son controlados por computadora, lo que proporciona un método para controlar la aplicación de agua y monitorizarla en tiempo real [8], [9]. Se pueden conectar varios sensores a la computadora a través de circuitos de interfaz y software. El software calcula los requerimientos de agua del cultivo basados en diversa información como tipo de cultivo, tipo de suelo, datos meteorológicos, etapas de crecimiento de los cultivos, fecha de siembra y otros factores conocidos y/o sensados, que determinan el requerimiento de agua del cultivo. Además, muchos de los sistemas avanzados están utilizando cada vez más las operaciones basadas en Internet que permiten controlar desde el teléfono móvil [10], [11].

Los sistemas de riego más avanzados incluyen, además de los procesos de automatización y control, procedimientos de optimización para la asignación de agua que permitan maximizar la eficiencia total del sistema de riego. En este sentido, la asignación óptima de agua en las tierras agrícolas por diferentes procedimientos, ha sido objeto de una amplia investigación en los últimos años. Por ejemplo, programación multiobjetivo [12], [13]; programación lineal [14]; programación cuadrática [15] y programación dinámica [16], son solo algunas de las técnicas de optimización utilizadas para desarrollar algoritmos eficaces para resolver problemas de asignación de agua y el uso eficiente de la misma. El algoritmo de optimización propuesto en este trabajo puede ser integrado en sistemas de riego automatizados, para así crear un sistema inteligente que permita reducir el desperdicio de agua en los sistemas de riego de los cultivos en Panamá. A diferencia de otros algoritmos, el objetivo principal es proponer una estrategia de suministro de agua en sistemas de riegos que garantice minimizar el consumo total de agua, mientras que satisface las necesidades hídricas de las plantas. La motivación principal para desarrollar dicho sistema se debe a que cada vez

que se riegan plantas inadecuadamente, se está desperdiciando agua. Por lo tanto, dados los problemas de escasez de agua en Panamá, se considera primordial crear tecnologías que permitan un ahorro del líquido, que tomen en consideración las necesidades reales de agua de las plantas y otros factores como la máxima capacidad de riego del sistema y el flujo de agua adecuado para cada tipo de cultivo.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. La sección II describe el modelo conceptual del sistema, la formulación del problema de optimización y el algoritmo propuesto para resolver el mismo. La sección III ilustra, a través de simulaciones, la funcionalidad y beneficios del algoritmo propuesto comparado a un sistema de riego con flujo fijo, como los utilizados en muchas partes del país. La sección IV presenta un resumen de los resultados; junto con importantes iniciativas de investigación que se considerarán en el futuro.

II. MODELO CONCEPTUAL DEL SISTEMA

A. Sistema de riego inteligente

En Fig. 1, se muestra el sistema de riego inteligente propuesto en este artículo.

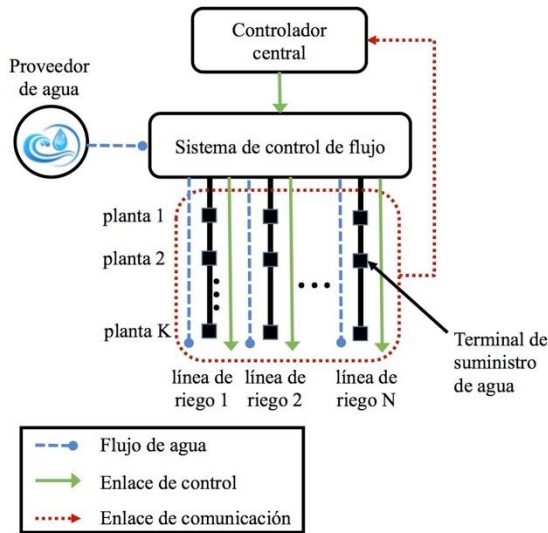


Fig. 1 Sistema de riego inteligente.

Este sistema está conformado por un controlador central que se encarga de decidir óptimamente la cantidad de agua suministrada a cada planta utilizando información recolectada del sistema (límites de flujo en líneas de riego, cantidad de agua disponible, etc.), características de las plantas, estado de suelo, información del ambiente, tiempo de riego deseado, etc. Una vez obtenido el plan óptimo de riego, el controlador central envía esta información al sistema de control de flujo del agua para suministrar eficientemente la cantidad de agua a cada planta en base a la solución encontrada. El sistema de control de flujo está conectado a múltiples líneas de riego, en donde cada línea consta de un gran número de plantas de un mismo

tipo. Las terminales de suministro, localizadas en cada una de las plantas, constan de sensores que permiten obtener información de las plantas, suelo, ambiente, etc. Esta información puede ser enviada al controlador central utilizando tecnología de comunicación inalámbrica como las propuestas en [17]-[19] y de esta forma monitorear y controlar el flujo de agua en el sistema de riego.

B. Formulación del problema

En el problema de optimización del flujo de agua en sistemas de riego, el objetivo es proporcionar una estrategia de distribución para minimizar el consumo total de agua, al controlar óptimamente el flujo de agua suministrado a cada línea de riego, basado en los datos obtenidos por el controlador central. El flujo de agua para cada línea de riego $1 \leq n \leq N$, en cada intervalo de tiempo $1 \leq t \leq T$, es definido como f_{nt} , en donde f_{nt} está limitado por un flujo máximo seguro llamado F_{safe} . Se asume que F_{safe} es una constante establecida con anticipación por el operador del sistema. El flujo total distribuido a todas las líneas de riego al final del día, está representado por $F = \{f_{nt}\}$. Este flujo total está limitado por la capacidad máxima del sistema F_{max} , el cual también es conocido por operador del sistema por adelantado.

El proceso de suministro de agua en cada línea de riego está restringido por el tiempo de inicio de riego r_n y el tiempo de finalización d_n , para cada grupo de plantas n . A su vez, este proceso dependerá de la información sobre las características de las plantas, estado de suelo, información del ambiente, etc., las cuales definen la necesidad de agua w_n para cada grupo de plantas n .

Para la formulación de este problema, la función a minimizar es una función cuadrática que representa la suma residual de la discrepancia cuadrática entre el flujo distribuido y el flujo deseado. Esto significa que a medida que aumenta la diferencia entre estos valores, mayor será la insatisfacción por parte del operador. Basado en esta formulación, el problema de optimización del flujo de agua en sistemas de riego se ha sido propuesto de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } \left(\sum_{n=1}^N \sum_{t=r_n}^{d_n} (f_{nt} - w_n) \right)^2, \quad (1)$$

sujeto a

$$\sum_{n=1}^N f_{nt} \leq F_{max}, \forall t \in [r_n, d_n], \quad (1.1)$$

$$\sum_{t=r_n}^{d_n} f_{nt} = w_n, \forall n, \quad (1.2)$$

$$0 \leq f_{nt} \leq F_{safe}, \forall n \forall t \in [r_n, d_n], \quad (1.3)$$

en donde, la restricción (1.1) garantiza que el flujo total al final del periodo de riego no excederá la capacidad máxima del sistema F_{max} . La restricción (1.2) asegura que cada planta será suministrada con la cantidad de agua requerida w_n . Por último,

la restricción (1.3) define el rango del flujo de agua suministrado en cada línea de riego, el cual está limitado por F_{safe} .

Se puede observar que el problema de optimización (1) presentado anteriormente es un problema convexo cuadrático, lo cual significa que la solución óptima para este problema puede ser fácilmente obtenida mediante diversos métodos para resolver este tipo de problemas. En este caso, la solución al problema se encuentra resolviendo las condiciones *Karush-Kuhn-Tucker* (KKT) [20]. Estos resultados serán incluidos en trabajos futuros.

A continuación, se presenta una descripción detallada del algoritmo propuesto para el sistema de riego inteligente.

C. Algoritmo de sistema de riego inteligente

El algoritmo propuesto para resolver el problema de optimización del suministro de agua en sistemas de riego trabaja de la siguiente manera (ver Tabla I). El primer paso, una vez encendido el sistema, es recopilar toda la información necesitada por el controlador central para resolver el problema de optimización. Esta información está compuesta por datos del sistema, características de las plantas, estado de suelo, información del ambiente, tiempo de riego deseado, etc. Luego, el algoritmo calcula la necesidad de agua w_n para cada grupo de plantas, basado en la información obtenida. Después, el mismo soluciona el problema de optimización (1) para encontrar el flujo de agua óptimo que debe suministrarse a cada grupo de plantas, con el fin de reducir eficientemente el consumo total del agua, lo cual conlleva a una reducción en el desperdicio del vital líquido. Por último, una vez encontrada esta solución, se envía dicha información al sistema de control de flujo para distribuir el agua a través de las líneas de riego. Este algoritmo es ejecutado cada vez que el sistema del riego es inicializado. La Fig. 2, describe brevemente cómo funciona este algoritmo.

TABLA I
ALGORITMO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL SUMINISTRO DE AGUA EN SISTEMAS DE RIEGO

Paso 1:	Inicializar las variables a utilizar.
Paso 2:	Recopilar información de datos del sistema, características de las plantas, estado de suelo, información del ambiente, tiempo de riego deseado, etc.
Paso 3:	Calcular la necesidad de agua de cada grupo de plantas w_n .
Paso 4:	Resolver el problema de optimización (1) utilizando la información obtenida.
Paso 5:	Enviar solución al sistema de control de flujo.
Paso 6:	Distribuir el agua a través de las líneas de riego utilizando el flujo de agua óptimo encontrado.
Paso 7:	Repetir pasos 1 - 6 siempre que el sistema de riego sea inicializado.

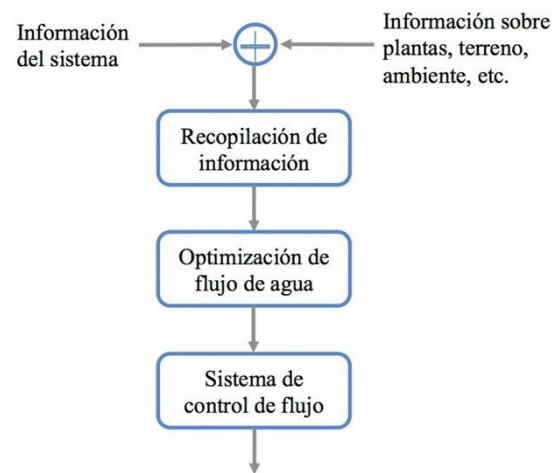


Fig. 2 Algoritmo para la optimización del suministro de agua en sistemas de riego.

III. SIMULACIONES Y RESULTADOS

En este artículo, se considera un escenario con $N = 10$ tipos de plantas diferentes, $T = 24$ horas de operación, un tiempo de inicio de riego r_n arbitrario entre $[1, 12]$ horas (se asume que el primer intervalo de tiempo inicia a las 6 a.m.), un tiempo de finalización de riego d_n arbitrario entre $[r_n + 4, 16]$ horas y una necesidad de agua w_n basada en los valores de Tabla II, los cuales fueron calculados a partir valores presentados en [21]. Estos valores utilizan como unidad de medición el milímetro (mm) de agua caída, el cual puede ser fácilmente convertido a litros (lt) mediante la relación presentada en [22]. Cabe mencionar que estos valores fueron obtenidos tomando en cuenta el periodo de crecimiento de la planta y la cantidad total de agua necesitada durante este proceso. Los valores de w_n utilizados para los distintos escenarios, fueron variados arbitrariamente entre $\pm 5\%$ de los valores mostrados en la Tabla II. Los límites de capacidad del sistema y de flujo por grupo de plantas están establecidos como $F_{max} = 30 lt$ y $F_{safe} = 3 lt$, respectivamente.

TABLA II
NECESIDAD DE AGUA PARA DIFERENTES TIPOS DE PLANTAS

Tipo de planta	Cantidad de agua (lt)
Poroto	4.93
Arroz	5.47
Tomate	3.82
Maíz	5.11
Frijol	7.22
Cebolla	4.44
Naranja	3.47
Plátano	4.93
Camote	5.04
Yuca	2.59

Las siguientes simulaciones muestran el rendimiento del algoritmo propuesto en este trabajo comparado con un sistema sencillo donde el agua es suministrada a un flujo fijo F_o para cada grupo de plantas. Para un mejor análisis, se consideraron 100 escenarios diferentes, en donde se varió arbitrariamente el tiempo de inicio de riego, tiempo de finalización de riego, la cantidad de tipos de plantas siendo regadas al mismo tiempo y la cantidad de agua deseada, con la finalidad de estudiar el comportamiento del algoritmo propuesto, en donde los resultados mostrados reflejan el comportamiento promedio para todos los casos. Los siguientes casos de estudio fueron considerados.

A. Sistema con flujo fijo $F_o = F_{safe}$

En este caso, se considera un sistema de riego donde el flujo de agua es siempre igual al flujo máximo por línea de riego F_{safe} .

En la Fig. 3, se ilustra el consumo total de agua durante el periodo de riego. Se puede observar que el algoritmo propuesto brinda un menor consumo de agua durante todo el periodo de riego. Esto se debe a que el sistema de riego con flujo fijo no consta de ningún mecanismo que le permite regular su consumo, lo cual conlleva a un desperdicio de agua. Por otro lado, el algoritmo propuesto redistribuye mejor el consumo de agua, lo cual reduce el pico alto de consumo.

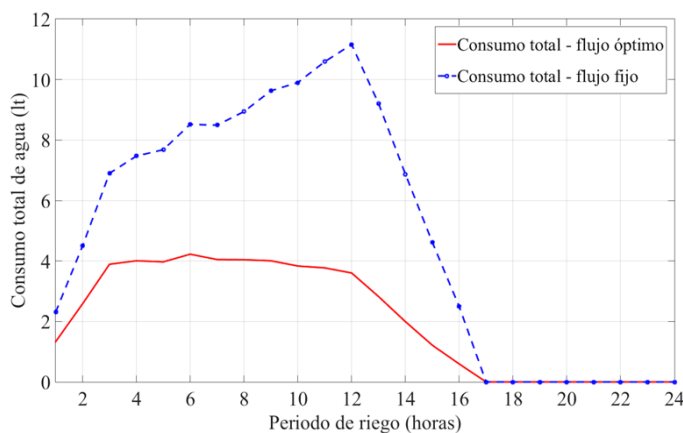


Fig. 3 Consumo total de agua.

Los resultados anteriores se ven reflejados en la cantidad de agua suministrada al final del periodo de riego, como se observa en la Fig. 4. Este resultado muestra que al final del periodo de riego, el sistema con flujo fijo siempre suministra más agua que la cantidad deseada para todos los tipos de plantas, lo cual se traduce en un desperdicio del recurso.

Por otro lado, se observa también que el algoritmo propuesto siempre suministra la cantidad exacta deseada por el operador del sistema para todos los tipos de plantas.

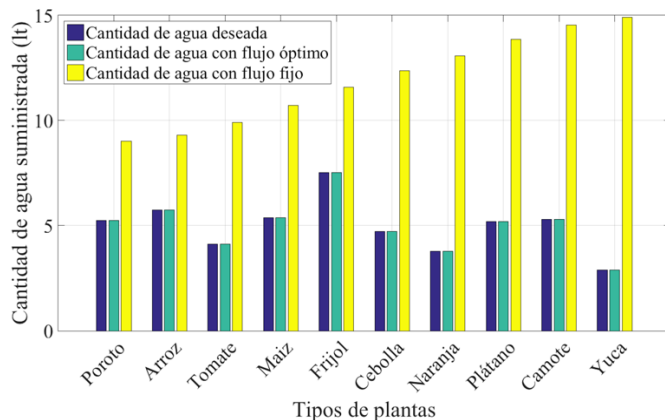


Fig. 4 Cantidad de agua suministrada.

B. Sistema con flujo fijo $F_o = F_{safe}/2$

Para este caso, se considera un sistema de riego en el cual el flujo de agua es fijo y establecido a ser igual a la mitad flujo máximo por línea de riego, es decir, $F_{safe}/2$. Al igual que el caso anterior, se ilustra el consumo total de agua durante el periodo de riego. En la Fig. 5, se puede observar que el algoritmo propuesto consume menor cantidad durante las últimas horas de riego, en donde se asume una mayor cantidad de plantas siendo regadas al mismo tiempo. Sin embargo, se observa también que el sistema con flujo fijo consume ligeramente menos agua durante las primeras horas de riego. Esto se debe a que el algoritmo propuesto redistribuye mejor el consumo con el fin de utilizar mayor cantidad de agua cuando pocas plantas están siendo regadas para reducir los picos de consumo.

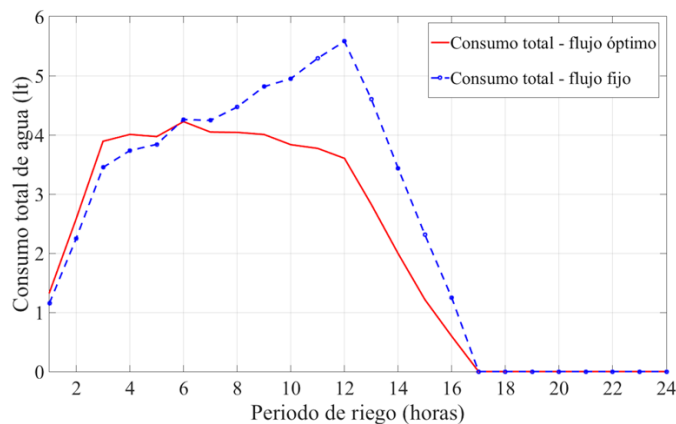


Fig. 5 Consumo total de agua.

En la Fig. 6, se ilustra la cantidad de agua suministrada al final del periodo de riego. Se puede observar que, para varios tipos de planta, el sistema con flujo fijo no satisface las necesidades de las plantas establecidas por el sistema. Por otra parte, el algoritmo propuesto siempre suministra la cantidad exacta deseada por el sistema del sistema para todos los tipos

de plantas. Esto refleja que el sistema de flujo fijo presentado en este caso reduce el consumo de agua casi a la mitad a costa de sacrificar la satisfacción de riego deseada.

Por último, en la Fig. 7 se ilustra el tiempo total requerido por el algoritmo propuesto para obtener la solución óptima del flujo de agua para las líneas de riego. Se puede observar que, para 100 escenarios diferentes, el tiempo promedio necesario para obtener dicha solución oscila alrededor de los 1.1 seg. Este resultado muestra que el algoritmo propuesto no solo proporciona una solución óptima que mejora el consumo de agua, sino que también obtiene esta respuesta rápida y eficientemente.

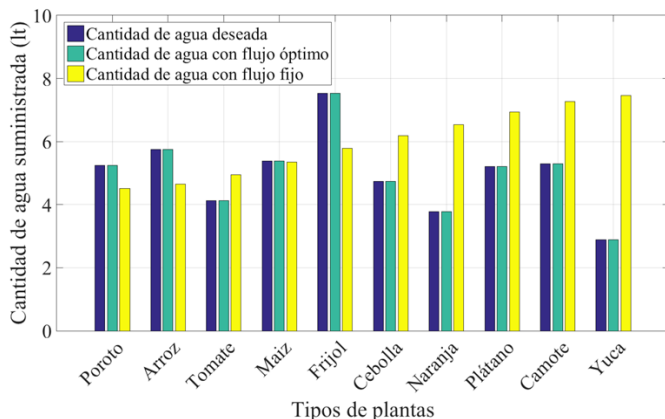


Fig. 6 Cantidad de agua suministrada.

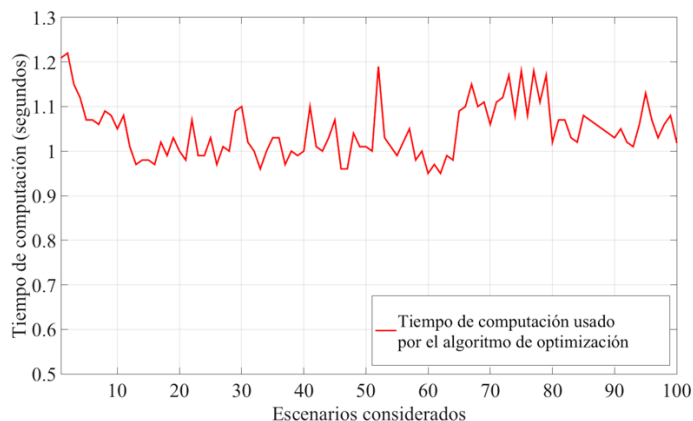


Fig. 7 Tiempo total de computación.

En resumen, el algoritmo propuesto para el sistema de riego inteligente, provee al usuario de un mejor consumo de agua para todos los tipos de plantas en ambos casos propuestos, lo que se refleja en una reducción importante en el desperdicio de agua y una mejor utilización de los recursos.

IV. CONCLUSIÓN

En este estudio se presentó un nuevo enfoque para optimizar un sistema de riego inteligente, con el fin de crear una oportunidad substancial para el ahorro de agua en el sector

agrícola panameño. El problema de optimización se formuló para minimizar una función que representa la desviación cuadrática entre el flujo de agua entregado y el flujo de agua deseado, para diferentes tipos de plantas. El algoritmo propuesto para resolver el problema de optimización planteado, toma en consideración las necesidades reales de agua de las plantas y características del ambiente que las rodea, entre otros factores. El rendimiento de este algoritmo fue comparado con un sistema de riego que suministra flujo fijo para cada grupo de plantas de dos formas: cuando el flujo fijo es igual al máximo flujo de la línea de riego y cuando el flujo fijo corresponde a la mitad del flujo máximo de la línea de riego. Para ambos casos de estudio, el algoritmo propuesto proporcionó de forma rápida una solución óptima que mejora el consumo de agua al reducir el desperdicio de la misma y a la vez satisface eficientemente las necesidades hídricas del sistema, al suministrar siempre la cantidad exacta de agua requerida por cada tipo de planta.

El suministro de agua a las líneas de riego en este trabajo fue realizado basado en demandas diarias del sistema, asumiendo pronósticos ambientales conocidos por el controlador central de antemano. Por lo tanto, debido a que las condiciones climáticas pueden cambiar durante el día, se concluye que, para fines prácticos, la asignación de agua basada en demandas computarizadas en tiempo real es más apropiada y será más aceptable para los agricultores. En este sentido, modelos de sistemas de riego inteligentes que optimicen en tiempo real el consumo de agua merecen una mayor investigación.

REFERENCIAS

- [1] W.E., Arntz y E. Ehrbach., "El niño: experimento climático de la naturaleza," Impresora y Encuadernadora Progreso S.A. de C.V. (IEPSA), Calzada de San Lorenzo, 244, 09830 México, D.F., 1996.
- [2] C.N., Caviedes, "El niño en la historia: storming through the ages," University Press of Florida, 2001.
- [3] C. Echazarreta, J. Arellano, y C. Pech, "Apicultura en mesoamérica," Mérida, Yucatán, Universidad Autónoma de Yucatán, 2002.
- [4] L. Chiddarwar, D. Wankhade, S. Adsul, and A. P. Gargade, "Automated irrigation system," *International Journal of Research*, vol. 3, no. 5, pp. 293–297, March 2015.
- [5] D. Rajakumar, S. Rathika, and G. Thiagarajan "Automation in micro-irrigation," New Delhi: Technology Innovation Management and Entrepreneurship Information Service, 1998.
- [6] B. Cardenas-Lailhacar, "Sensor-based automation of irrigation of bermudagrass," Gainesville: University of Florida, 2006.
- [7] L. Zella, A. Kettab, and G. Chasseriaux, "Design of a micro-irrigation system based on the control volume method," *Biotechnology. Agronomy, Society and Environment*, vol. 10, no. 3, pp. 163–171, 2006.
- [8] B. Boman, S. Smith, and B. Tullis, "Control and automation in citrus microirrigation systems," Gainesville: University of Florida, 2006.
- [9] A. Benzekri, K. Meghrich, and L. Refoufi, "PC-based automation of a multi-mode control for an irrigation system," *Industrial Embedded Systems, 2007 SIES '07 International Symposium on*, pp. 310–315, July 2007.
- [10] R. Somvanshi1, A. Suryawanshi, and R.Toraskar, "Smart irrigation system using mobile phone," *International Research*

- Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 3, no. 4, pp. 1400–1402, April 2015.
- [11] D. Pavithra and S. Srinath, "GSM based automatic irrigation control system for efficient use of resources and crop planning by using an android mobile," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, vol. 11, no. 04, pp. 49–55, August 2014.
 - [12] R. Lalehzari, S. B. Nasab, H. Moazed; and A. Haghighi, "Multiobjective management of water allocation to sustainable irrigation planning and optimal cropping pattern," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 142, no. 1, pp. 1–10, January 2016.
 - [13] R. Linker and G. Sylaios, "Efficient model-based sub-optimal irrigation scheduling using imperfect weather forecasts," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 130, pp. 118–127, October 2016.
 - [14] J. Reza, A. García Manzano, and J. Martínez, "Optimal pumping scheduling for complex irrigation water distribution systems," *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 140, no. 5, pp. 630–637, May 2014.
 - [15] R. Wardlaw and J. Barnes, "Optimal allocation of irrigation water supplies in real time," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 125, no. 6, pp. 345–354, December 1999.
 - [16] Z. Shangquan, et al., "A model for regional optimal allocation of irrigation water resources under deficit irrigation and its applications," *Agricultural Water Management*, vol. 52, no. 02, pp. 139–154, January 2002.
 - [17] M., Karthikeswari and P. Mithradevi, "Automated irrigation system in agriculture using wireless sensor technology," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 3, no. 12, pp. 13622–13627, December 2014.
 - [18] L. Gao, M. Zhang, and G. Chen, "An intelligent irrigation system based on wireless sensor network and fuzzy control," *Journal of Networks*, vol. 8, no. 5, pp. 1080–1087, May 2013.
 - [19] R. Brinda and Dr. P. Marikkannu, "Efficient usage of available fresh water resources through optimized irrigation system using wireless sensor network," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 5, no. 2, pp. 753–755, February 2016.
 - [20] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex optimization," Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK: Cambridge University Press, Mar. 2004.
 - [21] (2016) Página web Orientaciones Normativas del MIDA. Disponible en http://www.mida.gob.pa/direcciones/direcciones_nacionales/direccion-de-agricultura/orientaciones-normativas.html
 - [22] C. Brouwer, A. Goffeau, and M. Heibloem. "Irrigation Water Management: Training Manual No. 1-Introduction to Irrigation." Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1985.