

# Optimization of Irrigation Time Programming to Reduce Water Consumption in Crops

Edwin Collado, Ph.D.<sup>1</sup>, Martin Poveda, Eng.1, and Yessica Sáez, Ph.D.<sup>1,2,\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, {edwin.collado, martin.poveda, [yessica.saez](mailto:yessica.saez@utp.ac.pa)}@utp.ac.pa

<sup>2</sup>Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP)

Autor de correspondencia: [yessica.saez@utp.ac.pa](mailto:yessica.saez@utp.ac.pa)

*Abstract— In recent decades, the disproportionate use of water has become one of the main problems worldwide, especially in the Latin American and Caribbean region. For this reason, some governments have developed initiatives to encourage the population to make rational use of water in the different economic sectors. One of these initiatives is the implementation of advanced technologies to improve water management in agricultural systems since the agricultural sector represents one of the main consumers of this resource. This work proposes the implementation of Information and Communication Technologies (ICT) for the design of an irrigation system that minimizes the total water consumption in crop irrigation systems by optimizing the programming of the system's operating time, considering the needs hydric of plants and environmental conditions. The proposed problem is represented by a linear programming problem that is solved using mathematical and simulation tools. The results presented show that, compared to traditional irrigation systems, the proposed algorithm uses less water when optimizing irrigation time, guaranteeing at all times the minimum water requirement of the plants.*

*Keywords— ICT, Intelligent irrigation systems, Efficient water management, Optimization, Water consumption in crops, Control of irrigation systems.*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.23>  
ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

# Optimización de la Programación del Tiempo de Riego para Reducir el Consumo de Agua en Cultivos

Edwin Collado, Ph.D.<sup>1</sup>, Martin Poveda, Eng.<sup>1</sup>, and Yessica Sáez, Ph.D.<sup>1, 2, \*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, {edwin.collado, martin.poveda, yessica.saez}@utp.ac.pa

<sup>2</sup>Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP)

\*Autor de correspondencia: yessica.saez@utp.ac.pa

**Resumen**—En las últimas décadas, el uso desproporcionado del agua se ha convertido en uno de los principales problemas a nivel mundial, especialmente en la región Latinoamericana y el Caribe. Por ello, algunos gobiernos han desarrollado iniciativas para incentivar a la población a hacer uso racional del agua en los distintos sectores económicos. Una de estas iniciativas es la implementación de tecnologías avanzadas para mejorar el manejo de agua en sistemas agrícolas, puesto que el sector agrícola representa uno de los principales consumidores de este recurso. Este trabajo propone la implementación de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) para el diseño de un sistema de riego que minimice el consumo total de agua en los sistemas de riego de cultivos al optimizar la programación del tiempo de operación del sistema, considerando las necesidades hídricas de las plantas y las condiciones ambientales. El problema propuesto se representa mediante un problema de programación lineal que es resuelto utilizando herramientas matemáticas y de simulación. Los resultados presentados demuestran que, en comparación con los sistemas de riego tradicionales, el algoritmo propuesto utiliza menor cantidad de agua al optimizar el tiempo de riego, garantizando en todo momento la necesidad de agua mínima de las plantas.

**Palabras claves**—TIC, sistemas de riego inteligente, manejo eficiente de agua, optimización, consumo de agua en cultivos, control de sistemas de riego.

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos más importantes para garantizar la seguridad alimenticia, crecimiento industrial y sostenibilidad ambiental que la humanidad necesita para subsistir. Lastimosamente, estudios recientes han demostrado que existe un crecimiento acelerado en la demanda de agua, el cual puede causar una crisis de sequía mundial en un futuro no muy lejano [1]. Por ejemplo, en 1995 la extracción mundial de agua fue de 3,906 km<sup>3</sup> para uso doméstico, industrial y agrícola. Se estima que para el 2025, estos mismos sectores demandarán aproximadamente 50% más agua [2]. Este fenómeno, sin duda está vinculado con el rápido crecimiento de la población y la demanda en la producción de alimentos en el mundo. Por ello, el sector agrícola es reconocido como uno de los agentes que más demanda agua en el mundo, principalmente si se utilizan técnicas ineficientes de riego que presentan un alto grado de pérdidas en los cultivos.

Hoy en día, cerca de 250 millones de hectáreas de tierra son regadas para la producción agrícola alrededor del mundo, lo cual equivale a cinco veces más que al inicio del siglo XX [2]. Con las estrategias actuales de manejo de agua, se estima que para 2025 el sector agrícola a nivel mundial va a necesitar cerca de 1,600 km<sup>3</sup> para abastecer los sistemas de riego, el cual

representará aproximadamente el 30% del consumo total [2]. Esto ha motivado a algunos gobiernos a desarrollar estrategias para incentivar a la población a hacer uso racional del agua en los distintos sectores económicos.

En el sector agrícola, se ha propuesto la implementación de tecnologías modernas para mejorar la eficiencia en los sistemas de riego en cultivos. Una de las soluciones más prometedoras es el uso de sistemas basados en TIC para monitorear, automatizar y controlar el uso del agua en el proceso de producción de alimentos [3]-[6]. Estos sistemas automatizados son comúnmente separados en sistemas de riego sin retroalimentación y sistemas de riego con retroalimentación. Los sistemas de riego sin retroalimentación son aquellos en los que la operación se lleva a cabo sobre la base de condiciones preestablecidas (tiempo y volumen). Los sistemas de riego con retroalimentación son aquellos que son impulsados por al menos dos señales de entrada provenientes de sensores de variables agroclimáticas como humedad del suelo, lluvia, temperatura, entre otros. Además, los sistemas con retroalimentación son controlados por una computadora que cuenta con una interfaz y software especializado que calcula los requerimientos de agua del cultivo basados en la información recolectada para así proporcionar un método para controlar la aplicación de agua y monitorear en tiempo real [7], [8]. Estos sistemas recientemente han incorporado métodos para ser operados remotamente utilizando tecnologías basadas en Internet de las Cosas (IoT) [9]-[11].

En las últimas décadas, investigadores e ingenieros alrededor del mundo han optado por incorporar técnicas de optimización para mejorar el funcionamiento de los sistemas de riego. La optimización no es más que el método matemático que permite modificar un sistema o proceso para obtener resultados que están por encima de lo esperado [12]. En este sentido, la optimización permite gestionar de manera más eficiente los recursos en función del objetivo deseado. 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 son programación multi-objetivo [13], [14]; programación lineal [15]; programación cuadrática [16] y programación dinámica [17]. En este trabajo se propone un algoritmo de optimización implementado en un sistema de riego inteligente basado en TIC, el cual toma en consideración las necesidades reales de agua de las plantas y otros factores como características ambientales, la máxima capacidad de riego del sistema y el flujo de agua adecuado para cada tipo de cultivo. Con este sistema de riego optimizado se pretende

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.23>

ISBN: 978-0-9993443-6-1 ISSN: 2414-6390

reducir el desperdicio de agua en los sistemas de riego de los cultivos al optimizar el tiempo de operación del sistema de riego, mientras se garantiza las limitaciones del sistema y las necesidades hídricas mínima de las plantas

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera. La sección II describe el modelo conceptual del sistema. La sección III presenta la formulación del problema de optimización, su análisis matemático y el algoritmo propuesto para resolver el mismo. La sección IV 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 mundo. La sección V 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 basado en TIC

En Fig. 1, se muestra el sistema de riego optimizado con sensores agroambientales propuesto en este artículo.

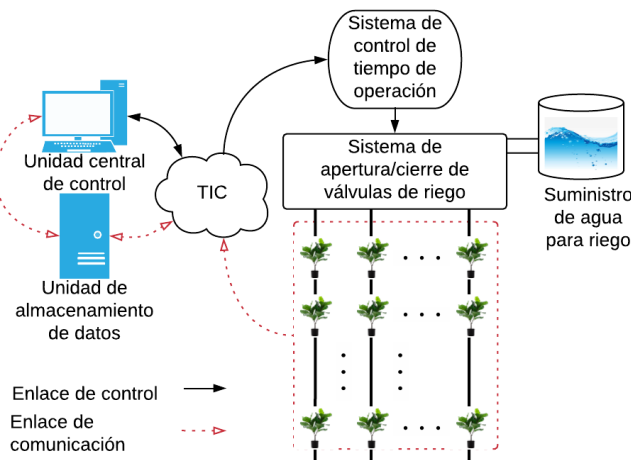


Fig. 1 Sistema de riego basado en TIC.

Este sistema está conformado por una unidad de almacenamiento de datos que recolecta la información generada por los sensores agroambientales del sistema (flujo en líneas de riego, cantidad de agua disponible, características de las plantas, estado de suelo, información del ambiente, límite de tiempo de riego deseado, entre otros). Esta información es utilizada por la unidad central de control para procesar los datos obtenidos y decidir óptimamente el tiempo de operación de cada línea de riego con el fin de minimizar el consumo total de agua. Una vez obtenido el plan óptimo de riego, la unidad central de control envía esta información al sistema de control de tiempo de operación utilizando soluciones TIC para administrar eficientemente el tiempo en que cada línea de riego va a suministrar el agua a cada grupo de plantas. A su vez, el sistema de control de tiempo de operación está conectado a un sistema de apertura/cierre de válvulas de riego, el cual controla el paso de agua en cada línea de riego. Cada línea consta de un

gran número de plantas, las cuales llevan implementadas terminales con sensores que permiten obtener información de las plantas, suelo, ambiente, etc. Esta información es enviada a la unidad de almacenamiento de datos utilizando soluciones TIC como las propuestas en [18]-[20] y de esta forma monitorear y controlar el tiempo de operación del sistema de riego.

## II. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN DE SISTEMA DE RIEGO

### A. Formulación del Problema de Optimización

En el problema propuesto, se asume un sistema con  $K$  líneas de riego con capacidad de flujo  $F_k$  y  $N$  plantas por línea de riego. Cada línea de riego es considerada como una zona de riego, denotada por  $A_k$ . Asumiendo que las plantas presentan características similares, cada zona de riego cuenta con una necesidad hídrica  $Z_k$  y una humedad de saturación de suelo  $H_{sat}$ . Para evitar el desperdicio de agua, el sistema cuenta con sensores que analizan en tiempo real la humedad  $H_k$  de cada zona. En este problema, el tiempo de operación de cada línea de riego es denotado por la variable  $x_k$ . Además, el tiempo total de operación del sistema está limitado por un periodo de  $T$  horas.

El objetivo de este problema es reducir el consumo total de agua al minimizar de forma óptima el tiempo de operación del sistema de riego, mientras se satisfacen las restricciones. Por ello, se considera un problema de programación lineal que minimiza el tiempo total de operación de las líneas de riego, dado por:

$$\sum_{k=1}^K x_k, \quad (1)$$

donde  $0 \leq x_k \leq T$ .

Las horas de funcionamiento de cada zona de riego deben garantizar que la humedad del suelo de la zona sea mayor o igual a la humedad requerida por el cultivo, y menor o igual a la humedad de saturación. Esto puede ser representado como:

$$Z_k - H_k \leq x_k F_k \leq H_{sat} \quad (2)$$

El problema general de la optimización del tiempo de funcionamiento de las líneas de riego se puede formular de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } \sum_{k=1}^K x_k, \quad (3)$$

Sujeto a:

$$Z_k - H_k \leq x_k F_k, \forall x_k \in X \quad (3.1)$$

$$x_k F_k \leq H_{sat}, \forall x_k \in X \quad (3.2)$$

$$0 \leq x_k \leq T, \quad (3.3)$$

en donde (3.1) garantiza que la cantidad de agua suministrada a cada zona de riego siempre será mayor o igual a la diferencia de la necesidad hídrica y la humedad actual de la zona; (3.2) garantiza que la cantidad de agua suministrada a cada zona de riego no sobrepasará la humedad de saturación del suelo de la zona y (3.3) determina el rango factible de la variable de decisión  $x_k$ .

Note que (1) es una función lineal, lo cual convierte el problema en un problema de optimización lineal. Estos problemas pueden ser resueltos utilizando un gran número de herramientas. En este análisis se utilizó la herramienta condiciones Karush-Kuhn-Tucker [12], como se observa en la siguiente sección.

### B. Análisis Matemático

Las condiciones KKT es una herramienta de análisis de problemas de optimización que consta de una serie de requerimientos necesarios y suficientes para que la solución de un problema de programación matemática sea óptima [12]. A continuación, se presenta la solución matemática resolviendo paso por paso cada uno de estos requerimientos.

Primero se debe garantizar que el problema está escrito en formato estándar, el cual está definido de la siguiente manera:

$$\text{Optimizar } f(x) \quad (4)$$

Sujeto a:

$$g(x) \leq 0, \forall x \in X \quad (4.1)$$

$$h(x) \leq 0, \forall x \in X \quad (4.2)$$

$$x \in X \quad (4.3)$$

Para convertir el problema (3) en formato estándar, se debe reescribir cada función de la siguiente manera:

$$f(x_k) = \sum_{k=1}^K x_k \quad (5)$$

$$g_1(x_k) = Z_k - H_k - x_k F_k \leq 0, \forall x_k \in X \quad (6)$$

$$g_2(x_k) = x_k F_k - H_{\text{sat}} \leq 0, \forall x_k \in X \quad (7)$$

$$g_3(x_k) = -x_k \leq 0, \forall x_k \in X \quad (8)$$

$$g_4(x_k) = x_k - T \leq 0, \forall x_k \in X \quad (9)$$

Luego, se procede a obtener la función Lagrange de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F(x_k)}{\partial x_k} + \mu_k \frac{\partial g_1(x_k)}{\partial x_k} + \lambda_k \frac{\partial g_2(x_k)}{\partial x_k} + \\ \alpha_k \frac{\partial g_3(x_k)}{\partial x_k} + \beta_k \frac{\partial g_4(x_k)}{\partial x_k} = 0 \\ 1 - \mu_k F_k + \lambda_k F_k - \alpha_k - \beta_k T = 0 \\ F_k = \frac{\alpha_k + \beta_k T - 1}{\lambda_k - \mu_k} \end{aligned} \quad (10)$$

Después, se verifican las condiciones de factibilidad, holgura y viabilidad. En este paso, se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$g_1(x_k^*) = Z_k - H_k - x_k^* F_k \leq 0, \forall x_k^* \in X \quad (11)$$

$$g_2(x_k^*) = x_k^* F_k - H_{\text{sat}} \leq 0, \forall x_k^* \in X \quad (12)$$

$$g_3(x_k^*) = -x_k^* \leq 0, \forall x_k^* \in X \quad (13)$$

$$g_4(x_k^*) = x_k^* - T \leq 0, \forall x_k^* \in X \quad (14)$$

$$\mu_k (Z_k - H_k - x_k^* F_k) = 0 \quad (15)$$

$$\lambda_k (x_k^* F_k - H_{\text{sat}}) = 0 \quad (16)$$

$$\alpha_k (x_k^*) = 0 \quad (17)$$

$$\beta_k (x_k^* - T) = 0 \quad (18)$$

$$\mu_k \geq 0 \quad (19)$$

$$\lambda_k \geq 0 \quad (20)$$

$$\alpha_k \geq 0 \quad (21)$$

$$\beta_k \geq 0 \quad (22)$$

Una vez se obtienen las ecuaciones (10)-(21), entonces se procede a resolver el sistema de ecuaciones para cada combinación posible de  $\mu_k$ ,  $\lambda_k$ ,  $\alpha_k$  y  $\beta_k$  hasta obtener la solución óptima de  $x_k^*$ .

De los 16 posibles casos, se obtiene que la solución óptima de la asignación del tiempo de operación de riego está dada por:

$$x_k^* = \begin{cases} 0, & Z_k \leq H_k \\ \frac{Z_k - H_k}{F_k}, & H_k < Z_k \leq H_{\text{sat}} + H_k \text{ y } F_k > \frac{H_{\text{sat}}}{T} \\ T, & H_k < Z_k \leq H_{\text{sat}} \text{ y } F_k \leq \frac{H_{\text{sat}}}{T} \end{cases} \quad (23)$$

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

### C. Algoritmo Propuesto

Basado en la solución óptima presentada, este trabajo propone también un algoritmo para resolver el problema de optimización de la programación de riego en sistemas de cultivo (ver Tabla I). Una vez encendido el sistema, el algoritmo inicializa las variables a utilizar para evitar errores al almacenar datos en las mismas. Luego, toda la información requerida por el algoritmo es recopilada en la unidad de almacenamiento de datos. Esta información está compuesta por datos del sistema, necesidad hídrica del cultivo, características de las plantas, estado de suelo, información del ambiente, tiempo de riego deseado, entre otros. Esta información es enviada

posteriormente a la unidad de control central donde es analizada y procesada para la ejecución del algoritmo. La solución de la programación óptima de riego es enviada después al sistema de control de tiempo de operación, donde la decisión de funcionamiento de cada línea de riego es almacenada para futura ejecución. Por último, con base en la programación óptima obtenida, el sistema de apertura/cierre de válvulas de riego controla el tiempo de funcionamiento de las líneas de riego para así reducir el consumo de agua en el cultivo. Este algoritmo es ejecutado cada vez que el sistema del riego es encendido por primera vez.

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

Paso 1:	Inicializar las variables a utilizar.
Paso 2:	Recopilar información del sistema y el ambiente.
Paso 3:	Asignar de manera óptima el tiempo de operación $x_k^*$ de cada línea de riego $k$ de la siguiente manera:
	$x_k^* = \begin{cases} 0, & Z_k \leq H_k \\ \frac{Z_k - H_k}{F_k}, & H_k < Z_k \leq H_{sat} + H_k \text{ y } F_k > \frac{H_{sat}}{T} \\ T, & H_k < Z_k \leq H_{sat} \text{ y } F_k \leq \frac{H_{sat}}{T} \end{cases}$
Paso 4:	Enviar solución al sistema de control de tiempo de operación.
Paso 5:	Controlar el tiempo de operación del sistema de riego mediante el sistema de apertura/cierre de válvulas de riego.

### III. SIMULACIONES Y RESULTADOS

Esta sección presenta los resultados de las simulaciones conducidas para ilustrar el rendimiento del algoritmo propuesto utilizando la herramienta basada en MATLAB para el análisis de problemas de optimización CVX [21] en un computador con procesador Intel Core i7, velocidad CPU 2.30 GHz, y memoria de 8 GB RAM.

Por simplicidad, se considera un escenario con  $K = 2$  líneas de riego limitados por un flujo fijo de  $F_1 = 51/\text{min}$   $F_2 = 41/\text{min}$ , respectivamente, lo cual representa dos zonas diferentes (A y B) con gran número de plantas, tiempo total de operación  $T = 24 \text{ h}$ , una humedad deseada  $Z_k = 101$ , una humedad de saturación de suelo de  $H_{sat} = 201$ , una humedad inicial en zona 1 (A) de  $H_1 = 81$  y una humedad inicial en zona 2 (B) de  $H_2 = 7.51$ . Además, se consideraron otras características como las pérdidas de absorción de agua en cada zona  $P_1 = 0.221/\text{min}$  y  $P_2 = 0.251/\text{min}$  considerando dos tipos de suelo.

Los siguientes resultados muestran el rendimiento del algoritmo propuesto en este trabajo comparado con un sistema sencillo donde el agua es suministrada utilizando los mismos flujos de agua en cada línea de riego por un tiempo fijo de  $x_0 = 5 \text{ h}$ . Además, los sistemas tradicionales de gran tamaño

usualmente están programados para utilizar una línea de riego (zona) cada día de la semana para así evitar daños al sobrepasar el límite del sistema.

La siguiente tabla muestra un resumen de los resultados obtenidos por el sistema de riego optimizado.

TABLE II  
RESUMEN DEL RENDIMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO OPTIMIZADO

	Día de riego					
	1	2	3	4	5	6
$x_1$ (h)	0.7836	1.0141	1.0084	1.0028	0.9972	1.0009
$x_2$ (h)	1.1931	1.4510	1.4078	1.4211	1.4156	1.4100
$x_1 + x_2$ (h)	1.9767	2.4650	2.4162	2.4239	2.4127	2.4197
$x_0$ (h)	5	5	5	5	5	5
Ahorro en tiempo (h)	3.0233	2.5350	2.5838	2.5761	2.5873	2.5803

Estos resultados pueden interpretarse mediante los siguientes análisis.

#### A. Análisis del Consumo Total del Sistema

En la Fig. 2, se ilustra el consumo total de agua durante una semana de riego. Se puede observar que el algoritmo propuesto reduce significativamente el consumo de agua cuando se compara con el sistema de riego no optimizado. Esto se debe a que el sistema propuesto consta de un mecanismo que le permite regular de manera óptima el tiempo de operación de cada línea de riego, garantizando así un menor uso de agua. De esta manera, el sistema de riego optimizado consume aproximadamente 50% menos agua que el sistema tradicional. Otro resultado importante es que el sistema optimizado asigna un tiempo de operación constante después del segundo día de riego, como se puede observar en Tabla II y Fig. 2. Esto garantiza un consumo de agua uniforme para ambas zonas durante todo el periodo de riego establecido.

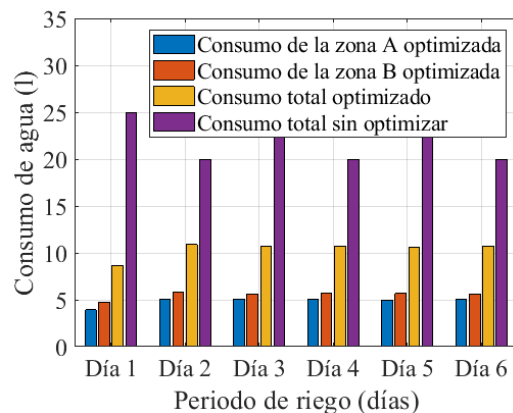


Fig. 2 Consumo total de agua.

#### B. Análisis del Tiempo de Operación

El algoritmo propuesto no solo mejora el consumo de agua, sino que acorta el tiempo de operación lo cual puede traducirse en ahorro económico por parte del operador del sistema de cultivo. La Fig. 3 muestra como el sistema de riego optimizado

acorta el tiempo de operación aproximadamente a la mitad, comparado con el sistema de riego tradicional con flujo de agua y tiempo de funcionamiento fijos.

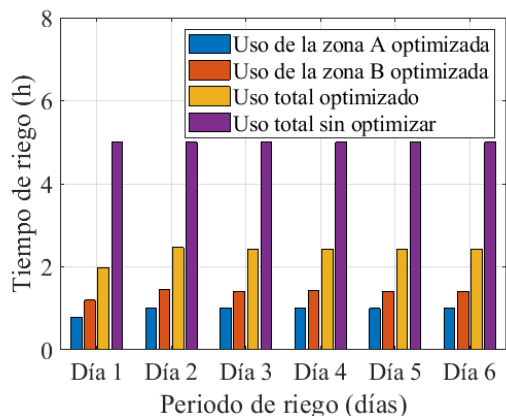


Fig. 3 Tiempo de operación de riego.

### C. Análisis del Comportamiento de Humedad en el Suelo

En la Fig. 4 se ilustra cómo se comporta el suelo con respecto a su humedad, tomando en cuenta la humedad de saturación y las pérdidas de absorción. Se puede observar que el sistema de riego sin mecanismo de optimización opera ineficientemente porque proporciona más agua de la necesaria por línea de riego o zona (pico inferior de humedad está por encima de la necesidad hídrica 10 l). Además, este sistema permite que la humedad del suelo alcance su límite superior  $H_{sat} = 20$  l al operar en un tiempo fijo de 5 h, lo cual se traduce en un desperdicio significativo del recurso y problemas para el cultivo. Por el contrario, el sistema de riego optimizado propuesto en este trabajo distribuye solo la cantidad requerida por cada zona, lo cual garantiza un uso racional del agua. Esto permite regar las plantas en periodos cortos y constantes con picos bajos de consumo de agua, lo cual facilita regar varias zonas simultáneamente, mantener las plantas hidratadas la mayor parte del tiempo, reduce el consumo de agua y satisface los requerimientos de saturación del suelo.

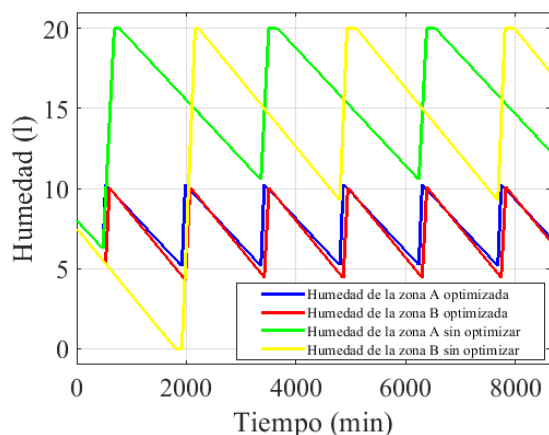


Fig. 4 Comportamiento de la humedad en el suelo.

Por último, en la Fig. 5 se ilustra el tiempo total requerido por el algoritmo propuesto para obtener la solución óptima de la programación de funcionamiento de las líneas de riego. Se puede observar que el tiempo promedio necesario para obtener dicha solución es aproximadamente 0.005 s, lo cual demuestra que el algoritmo propuesto no solo reduce el consumo de agua, sino que también obtiene esta respuesta de manera rápida y eficientemente.

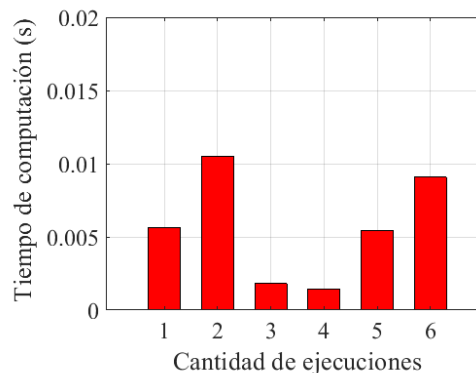


Fig. 5 Tiempo total de computación.

## IV. CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentó un algoritmo para reducir el consumo de agua en cultivos agrícolas, mediante el uso de TIC y herramientas de optimización. Específicamente, el algoritmo busca disminuir el consumo de agua al optimizar la programación del tiempo de operación de las líneas de riego, mientras se satisfacen los requerimientos del cultivo (las necesidades hídricas reales de las plantas, características del ambiente que les rodea, entre otros factores), el sistema de riego y el suelo. El problema de optimización ha sido formulado como un problema de optimización lineal, lo cual permitió encontrar una solución óptima de forma cerrada utilizando la herramienta condiciones KKT. Esta solución fue posteriormente utilizada para diseñar un algoritmo que garantiza distribuir el tiempo de riego de manera óptima de manera rápida y sencilla.

El rendimiento de este algoritmo fue comparado con un sistema de riego sencillo donde el agua es suministrada utilizando flujos fijos en cada línea de riego por un tiempo de funcionamiento fijo. Además, se contemplaron sistemas tradicionales que son programados para utilizar sólo una línea de riego (zona) al día para así evitar daños al sobrepasar el límite del sistema. Los resultados presentados muestran que el algoritmo propuesto reduce significativamente el consumo de agua total del cultivo al optimizar el tiempo de operación de cada línea de riego y al suministrar siempre la cantidad exacta de agua requerida por cada tipo de planta. Al acortar el tiempo de riego, el sistema tiene la habilidad de poder regar distintas zonas en un mismo día. Además, de minimizar el consumo de agua, este algoritmo también garantiza el cumplimiento de

todos los requerimientos de cultivo, sistema de riego y suelo establecidos por el operador de antemano.

El análisis realizado en este trabajo fue basado en características del cultivo, sistema, suelo y pronósticos ambientales conocidos por el controlador central de antemano. Sin embargo, comúnmente esta información no está disponible, por lo que es más apropiado analizar problemas de optimización de sistemas de riego en tiempo real que utilicen herramientas estadísticas para solucionar este asunto.

El trabajo presentado está basado en fundamentos teóricos y conceptuales, respaldados por análisis matemáticos y simulaciones. Sin embargo, como parte de futura investigación, se espera implementar este sistema en el sector productivo agropecuario.

## V. AGRADECIENTOS

Yessica Sáez agradece al Sistema Nacional de Investigación (SNI-SENACYT) de Panamá por el apoyo a sus miembros y al Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP) por su apoyo en proyectos de investigación.

## REFERENCIAS

- [1] I. A. Shiklomanov and J. C. Rodda, "World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century," International Hydrology Series, Cambridge University Press, 435 pp, 2003.
- [2] M. W. Rosegrant, X. Cai, and S. A. Cline, "World water and food to 2025: dealing with scarcity," Intl Food Policy Res Inst, 2002.
- [3] 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.
- [4] D. Rajakumar, S. Rathika, and G. Thiyagarajan "Automation in micro-irrigation," New Delhi: Technology Innovation Management and Entrepreneurship Information Service, 1998.
- [5] B. Cardenas-Lailhacar, "Sensor-based automation of irrigation of bermudagrass," Gainesville: University of Florida, 2006.
- [6] 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.
- [7] B. Boman, S. Smith, and B. Tullios, "Control and automation in citrus microirrigation systems," Gainesville: University of Florida, 2006.
- [8] A. Benzekri, K. Meghriche, 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.
- [9] N. Dlodlo and J. Kalezhi, "The internet of things in agriculture for sustainable rural development," *Emerging Trends in Networks and Computer Communications (ETNCC)*, 2015 International Conference on Windhoek, pp. 13–18, May 2015.
- [10] R. Somvanshi I, 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] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex optimization," Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK: Cambridge University Press, Mar. 2004.
- [13] 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.
- [14] R. Linker and G. Sylaos, "Efficient model-based sub-optimal irrigation scheduling using imperfect weather forecasts," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 130, pp. 118–127, October 2016.
- [15] J. Reça, 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.
- [16] 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.
- [17] Z. Shangguan, 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] M. Grant and S. Boyd. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming (web page and software), 2008. Available from: <http://www.stanford.edu/boyd/cvx/>