

Tipo de artículo: Artículo original
Temática: Bioinformática
Recibido: 20/05/2017 | Aceptado: 25/06/2017

La fertirrigación inteligente, pilar de una agricultura sostenible

Intelligent fertigation, pillar of sustainable agriculture

Enrique Almeida Maldonado^{1*}, Lorenzo Eddy Camejo Barreiro², Cosme E. Santiesteban Toca³

¹ Facultad de Ciencias Informáticas, Universidad de Ciego de Ávila. Km. 9 de la carretera de Ciego de Ávila a Morón, Cuba. ealmeida@unica.cu

² Centro de Estudios Hidrotécnicos, Universidad de Ciego de Ávila. Km. 9 de la carretera de Ciego de Ávila a Morón, Cuba. eddy@unica.cu

³ Centro de investigación de Bioplantas, Universidad de Ciego de Ávila. Km. 9 de la carretera de Ciego de Ávila a Morón, Cuba. cosme@bioplantas.cu

* Autor para correspondencia: ealmeida@unica.cu

Resumen

La creciente demanda de alimentos en el país ha exigido un aumento de los niveles de producción agrícola y con ello, el incremento de los sistemas de riego. Entre los más difundidos se encuentran los de pivote central, pero su gran número y variedad hace difícil su configuración óptima, generando sobre explotación de recursos naturales como el agua y atentando contra la sostenibilidad de la agricultura y el país. Por tal motivo, el objetivo de la presente investigación fue implementar un software que permitiera obtener la configuración apropiada de estos equipos, utilizando información sobre el tipo de cultivo, las condiciones agroclimáticas de la región y del suelo, de manera que se obtuviera su máximo aprovechamiento. Como resultado se logró una aplicación capaz de realizar los cálculos, tal que el valor de agua entregada por el sistema se aproxime más a las necesidades estimadas para un cultivo en cada una de sus fases. Para demostrarlo se realizó un estudio experimental en condiciones de campo en la empresa agropecuaria La Cuba, de Ciego de Ávila; el mismo mostró que, con la utilización del software, hubo un ahorro de hasta un 94,5% del agua mal utilizada anteriormente. Además, el nivel de líquido aportado permite que el sembrado se encuentre en mejores condiciones de alcanzar su rendimiento óptimo. Como valor agregado, el software presenta una interfaz minimalista e intuitiva, que permite la visualización en tiempo real de la información del campo.

Palabras clave: Agricultura sostenible, Software de configuración y control, Irrigación, Máquinas de pivote central

Abstract

The growing demand for food in the country has demanded an increase in agricultural production levels, and with it, the increase of irrigation systems. Among the most widespread are the central pivot systems, but their large number and variety makes difficult their optimal configuration, generating an overexploitation of the natural resources such as water, undermining the sustainability of agriculture and the country. For this reason, the objective of this research was to implement a software that allows to obtain the best configuration of these equipments, taking into account the crops characteristics, soil features and meteorological information, in order to ensure the maximal performance of these irrigation systems. As a result, a software solution was done, that is capable of performing the calculations such that the value of water delivered by the system is closer to the estimated needs for a crop in each of its phases. To prove this, an experimental study was carried out under field conditions at the Ciego de Avila agricultural enterprise La Cuba; It showed that, with the use of the software, there was a saving of up to 94,5% of the water previously misused. In addition, the quantity of water used allows the plant to be in better conditions to achieve its optimal performance. This solution presents as a benefit, an intuitive and minimalist interface showing the field information in real time.

Keywords: Configuration and control software, Central pivot machines, Irrigation, Sustainable agriculture

Introducción

Satisfacer la creciente demanda de alimentos del país, y el mundo, es un reto que implica enormes costes económicos y medioambientales. Debido a sus impactos negativos sobre los recursos naturales y el medio ambiente (FAO, 2002), la actual trayectoria de incremento de la producción agrícola es insostenible; de hecho, existe una clara correlación entre el crecimiento en la agricultura y la incidencia de ésta en los recursos naturales (FAO, 2009). Algunas de las consecuencias de esta relación se evidencian en el hecho de que, por ejemplo, hasta el 75 por ciento de la diversidad genética de los cultivos se ha perdido, y una tercera parte de la tierra agrícola ya se encontraba degradada a comienzos de este siglo (FAO, 2002); posiblemente, en la actualidad esta proporción es mayor.

Los desafíos globales a los que nos enfrentamos son la degradación rápida de los recursos naturales y la creciente escasez, en un momento en que la demanda de alimentos, piensos, fibra y los bienes y servicios procedentes de la agricultura está aumentando rápidamente (FAO, 2009). Es conocido que la agricultura es una víctima de los cambios climáticos operados a nivel mundial en los últimos años, y a su vez, uno de los principales contribuyentes al mismo.

Cuando se trata de altos niveles de producción, es muy complicado pensar en el desarrollo de agricultura ecológica sin el empleo de organismos genéticamente modificados o productos químicos de síntesis. No obstante, se impone la necesidad de la utilización óptima de los recursos naturales y en especial el agua, de forma que se logre obtener

suficiente alimento, respetando el medio ambiente a la vez que se conserva la fertilidad de la tierra. En el caso de Cuba, a finales de los años 80 del pasado siglo se comenzó a observar un decremento en la productividad, relacionado al deterioro de los suelos debido principalmente a las prácticas agrícolas que se apoyaban en los llamados paquetes tecnológicos; lo cual marcó el comienzo de una nueva visión que trataba de fomentar tecnologías intensivas basadas en una mejor utilización de los medios naturales. En este sentido fueron incluso creadas las condiciones para la producción nacional de elementos de riego por aspersión en fábricas como la “José L. Tassende” de Manzanillo, y la “Vasil Levski” en Cienfuegos (Pacheco Seguí, y otros, 2007).

A partir de este momento, comenzó el uso de diversos sistemas mecanizados para el riego. Los de pivote central, o pivot, fueron los más exitosos por sus características y ventajas y por lo tanto los más extendidos, hasta la actualidad. Sin embargo, dada la cantidad de factores y variables que intervienen en la aplicación eficiente de agua utilizando equipos de tipo pivot, incluso para terrenos relativamente pequeños, y a que las necesidades de cada cultivo varían constantemente, realizar los cálculos adecuados para cada caso empleando los métodos tradicionales es muy difícil. Por ello constituye un problema en la actualidad que, en Cuba, no se cuente con una herramienta que permita configurar de forma rápida y confiable los equipos de riego de pivote central, de forma que se logre la adaptabilidad necesaria a las condiciones agroclimáticas cambiantes, y obtener el máximo aprovechamiento de los mismos. El objetivo de la presente investigación es dar solución a este problema haciendo uso de tecnologías informáticas. Para ello se presenta un software que permite obtener la mejor configuración para los equipos de riego de pivote central, tomando en cuenta la información sobre el tipo de cultivo, las características del suelo y las condiciones agroclimáticas de la región; este sistema fue empleado a modo de experimentación en las empresas agroindustriales de Ceballos y La Cuba, en la provincia de Ciego de Ávila.

El presente artículo está estructurado de la siguiente forma: un breve análisis de la situación actual de los sistemas de cálculo de irrigación. A continuación, se presenta el sistema de cálculo y control de equipos de riego propuesto. Posteriormente, se realiza una valoración del impacto del sistema propuesto en entidades agrícolas de Ciego de Ávila. Por último, se presentan las conclusiones de la investigación.

Materiales y métodos

Inicialmente, los terrenos ocupados actualmente por las provincias de Artemisa, Mayabeque y Matanzas contaban con el grueso de las máquinas de pivote central instaladas en el país, coincidiendo, además, con que eran las provincias de mayor aporte a la producción agrícola por unidad de área sembrada; lo cual demostró la factibilidad de estos sistemas y motivó su expansión al resto del territorio nacional. A partir de entonces, en dependencia de las condiciones

económicas y las coyunturas políticas que debían ser sorteadas, fueron adquiridos diferentes aparatos de este tipo. La mayoría de las máquinas conseguidas por Cuba pertenecen a las firmas OTECH, RDK, WESTERN y FABRE; configurarlas para obtener resultados óptimos no es trivial ni genérico puesto que cada una cuenta con diferentes especificaciones en las tecnologías de automatización y control. Las dificultades intrínsecas de este proceso están establecidas también porque, además de las particularidades técnicas de cada tecnología, existen otros elementos condicionantes como: las características del tipo de suelo, los requerimientos del cultivo en cada uno de sus ciclos, y las condiciones agroclimáticas del área de siembra.

Una vez establecida la cantidad de agua requerida según la fase en que se encuentre el cultivo y las condiciones del terreno, es necesario recurrir a los parámetros técnicos por los cuales se rige la máquina de riego. Estos pueden ser: velocidad de la última torre; el tiempo estimado por revolución; y configuración del cronómetro, que establece el flujo de agua a aplicar por unidad de área abarcada. Actualmente, en todos los casos, las configuraciones se realizan a partir de aproximaciones a los valores proporcionados por el fabricante; lo cual implica miles de metros cúbicos de agua son desperdiciados, o no aplicados, en cada ciclo del cultivo, desaprovechándose así el líquido, y afectando además el rendimiento, como se explica a continuación.

La FAO (Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas), a finales de los años setenta del siglo pasado encontró la ecuación (1), que describe correspondencia entre el rendimiento de un sembrado y sus valores de evapotranspiración (Smith, y otros, 2014):

$$\left(1 - \frac{Y_r}{Y_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_m}\right) \quad (1)$$

donde, Y_m y Y_r son los rendimientos máximo y real, ET_m y ET_r son la evapotranspiración máxima y real, respectivamente. El factor de respuesta del rendimiento (K_y) establece la relación entre la producción final y el uso del agua en un cultivo, sus valores son específicos de cada cultivo y varían para cada ciclo de la planta. Esta ecuación puede ser graficada de manera general, puesto que los valores exactos son propios de cada planta, como se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Relación entre la evaporación y el rendimiento de un cultivo. Representa los puntos críticos por defecto o exceso de la aplicación de agua y la ventana de aplicación óptima.

Como se puede observar en el eje de las abscisas, los rendimientos próximos al máximo de un cultivo se pueden encontrar dentro de un rango determinado de valores de evapotranspiración. Sin embargo, la productividad de la plantación es marcadamente inferior al que se podría esperar cuando el agua proporcionada es tal, que la evapotranspiración del sistema es inferior o superior a los límites establecidos. Por este motivo se puede afirmar que, sobre todo en el clima del país, aunque los cultivos por término general son más sensibles al déficit de agua, su productividad también se ve afectada en mayor o menor medida, dependiendo de la planta, por el exceso de humedad. De ahí que un redondeo en la configuración de los parámetros en las máquinas de pivote central que implique una entrega de agua diferente a la requerida por el cultivo, no garantiza la producción óptima y generalmente implica un consumo innecesario.

En la actualidad existen numerosas aplicaciones destinadas a la optimización de los recursos utilizados en los cultivos. Estos sistemas proporcionan, además, recomendaciones sobre tipos de fertilizantes, dosis y aplicación, basándose en los análisis de suelos, de agua, foliares y los requerimientos nutricionales del cultivo. Dentro de los más representativos se encuentran: eFoodPrint (© eFoodPrint® Tots, 2017), FertiSoft Cultivos (OFIAGRO Mediciones, 2015), Plataforma interactiva de Ocean Business (© 2017 Diversified Communications UK, 2017), Orcelis Fitocontrol (Grupo Orcelis, 2017), Smart Fertilizer (SMART Fertilizer Group, 2017). Sin embargo, su utilización práctica en Cuba se encuentra limitada por:

- Si se decidiera usar sus recomendaciones respecto a los fertilizantes, los productos que sugieren en sus planes muchas veces no están disponibles, por el precio u otros motivos, en Cuba.
- No se adaptan a la heterogeneidad de los sistemas de riego y cultivo instalados.
- Altos precios de adquisición, despliegue, puesta a punto y soporte.

Por estos motivos se justifica la creación de un sistema que se adecúe a las condiciones nuestro país, el cual debe cumplir como valor agregado de vital importancia, que presente una interfaz minimalista, intuitiva y atractiva puesto que debe ser operado principalmente por el personal vinculado directamente a las labores productivas en el campo.

Sistema propuesto

Para el desarrollo del sistema, se empleó una combinación de metodologías ágiles: Scrum para la gestión del proyecto (Scrum.org, 2017); y XP para el desarrollo (Wells, 2017), empleando el Desarrollo Dirigido por Pruebas (TDD) (Jurado, 2010). Esta combinación de metodologías no es nueva, ya ha sido ampliamente empleada sin violar los principios de ninguna de las dos (Kniberg, 2007).

La aplicación se decidió que fuera web. Para su implementación se utilizó lenguaje Python, debido principalmente a que es muy flexible; su código es legible y bien organizado, con lo cual se facilitan las labores de mantenimiento y ulteriores desarrollos; además, permite el uso de librerías en C y C++, lo cual puede ser utilizado para ofrecer funcionalidades complejas para las cuales la creación de una librería desde cero podría ser muy costoso. Como marco de desarrollo se utilizó Web2Py, entre otros motivos, porque ofrece una estructura y sintaxis muy organizadas, adicionalmente hasta la fecha no se han reportado incidentes de seguridad en ningún sitio desarrollado con él (Piero, 2016).

Como consecuencia del uso de este marco de desarrollo, se utilizó el patrón arquitectónico Modelo–Vista–Controlador (MVC). Siguiendo esta filosofía, se separaron la representación de los datos (Modelo), la presentación de los mismos (Vista) y la implementación de las funcionalidades (Controlador). Esta distribución puede ser observada en la Figura 2, donde se exponen los elementos más relevantes, el resto sigue el mismo patrón.

La Figura 2, muestra la distribución lógica de los componentes de software del sistema propuesto, el cual se compone de seis paquetes fundamentales: aplicación de oficina, en el cual se encuentran los planes de riego y de siembra, las especificaciones de los tipos de suelos, cultivos y maquinaria de riego; aplicación de campo, encargado de representar la información necesaria para el operario de campo utilizando técnicas de realidad aumentada; aplicación de control, establece las configuraciones necesarias para hacer efectivos los planes de riego por sistemas automatizados; administración del sistema, gestiona la seguridad e integridad de la información; modelos, contiene las bases de datos

referentes a la información necesaria para realizar los planes de siembra y cultivo; drivers, garantiza la adaptabilidad de la aplicación a la alta heterogeneidad de los sistemas de riego y cultivo instalados en Cuba.

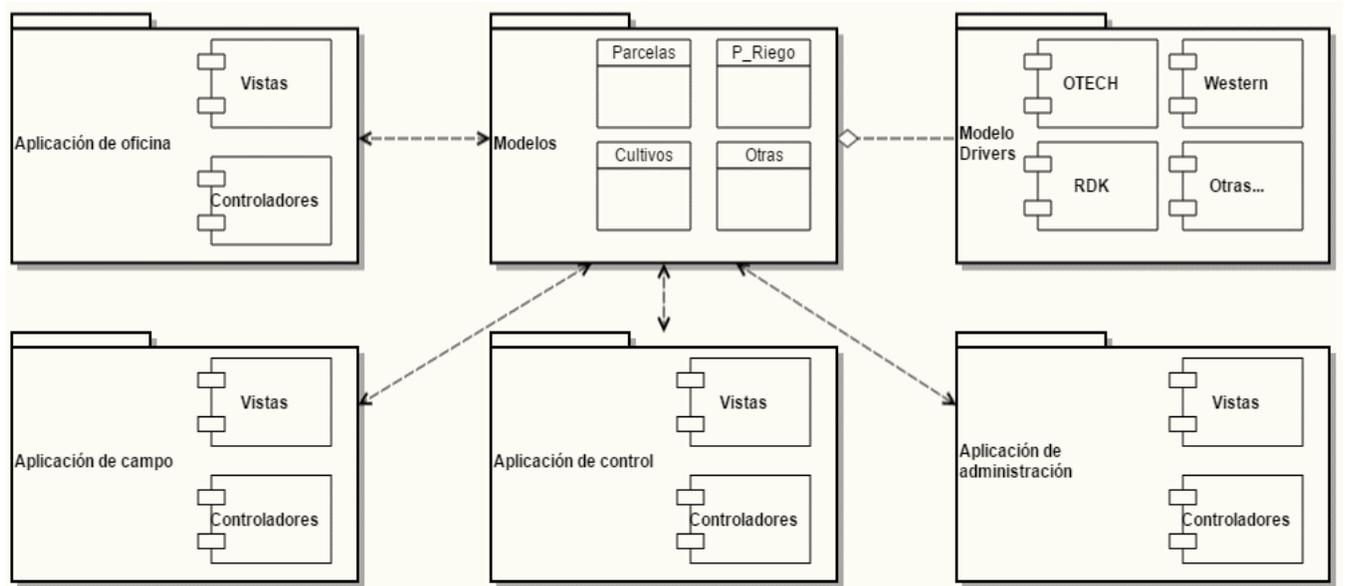


Figura 2. Diagrama de paquetes de componentes de la aplicación.

Una vez desplegada la aplicación, se puede acceder a la misma utilizando un mecanismo de autenticación basado en usuario y contraseña. Para la autorización se empleó un mecanismo basado en roles según el cual, cada usuario autorizado deberá pertenecer a uno o varios de los definidos a continuación:

- Administrador de suelos: Actualiza los datos de composición de tipos de suelos y parcelas, sus modificaciones al sistema deben estar amparadas por pruebas de laboratorios o bibliografía confiable.
- Administrador de equipos de riego: Gestiona los datos técnicos de la maquinaria de riego disponible, sus modificaciones deben estar respaldadas por los catálogos originales.
- Gestor de cultivos: Gestiona los datos de las plantas, sus modificaciones deben estar respaldadas por bibliografía confiable, preferiblemente emitida por el Ministerio de la Agricultura.
- Agrónomo: Puede realizar planes de riego y siembra. Además, puede revisar los registros históricos de la parcela y hacer modificaciones en los requerimientos establecidos para el cultivo.
- Administrador del sistema: Solo tiene acceso a la asignación de usuarios a roles.

Una vez concluido el sistema, para analizar su impacto se realizó un estudio experimental durante el año 2016 en la empresa agropecuaria La Cuba, de la provincia de Ciego de Ávila. Se empleó el cultivo del frijol negro, en suelo ferralítico rojo, sin considerar las lluvias y utilizando una máquina con las siguientes características:

- Máquina de Riego de Pivote Central eléctrica: OTECH de 5 Torres.
- Gasto: 164 m³/h.
- Longitud Total: 333,6 m.
- Área: 34,96 ha.

En la Tabla 1 se muestran las especificaciones para la máquina de riego empleada, tomando como variable independiente la cantidad de agua a aplicar en milímetros y la configuración necesaria para lograrla en porcentajes del cronómetro. Es importante hacer notar que estos valores los aporta el fabricante y son los que actualmente se utilizan por aproximación en las planificaciones hechas a mano. A pesar de que este equipo, como la mayoría de los disponibles en Cuba, permiten la configuración del cronómetro en valores más exactos, es necesaria la ayuda de sistemas automáticos y, sobre todo, de algún mecanismo de respuesta rápida capaz de proporcionar los valores necesarios, sin tenerlos que calcular cada vez que cambie algún factor determinante.

Tabla 1. Especificaciones de máquina de riego de pivote central OTECH de 5 Torres.

Aplicación _(mm)	Config. _(%)	Aplicación _(mm)	Config. _(%)
5,72	100	16,34	35
6,35	90	19,06	30
7,15	80	22,88	25
8,17	70	28,59	20
8,80	65	38,13	15
9,53	60	47,66	12
10,40	55	63,54	9
11,44	50	95,32	6
12,71	45	190,63	3
14,30	40		

Aplicación – Aplicación de lámina de agua (milímetros). Config. – Configuración del cronómetro (en porcentaje).

Como se puede observar, el uso de la tabla proporcionada por el fabricante no permite un aporte preciso de la cantidad de líquido requerida por el cultivo. Si se toman los valores correspondientes a los porcentos de configuración más bajos, se pueden observar diferencias significativas, que, como consecuencia, hacen imposible pensar en el aporte correcto de un valor exacto calculado previamente.

Experimentalmente, esta situación quedó evidenciada durante el estudio cuando, usando la vía de cálculo tradicional, se realizó un diseño agronómico al cultivo objetivo, cuyos resultados son mostrados en la Tabla 2. En la misma se

especifican las necesidades de agua para cada fase del mismo; la regulación utilizada en el cronómetro de la máquina de riego; la cantidad de agua real entregada por el equipo en la configuración escogida; los días a partir de los cuales debe volverse a aplicar un riego durante el ciclo atendiendo a que el agua, por evapotranspiración, ha disminuido su nivel en el suelo hasta llegar al límite productivo; así como la diferencia entre el agua realmente aplicada y las necesidades calculadas.

Tabla 2: Diseño agronómico manual empleado para el cultivo del frijol.

CC (días)	ARH (m ³ /ha)	ARV (m ³ /vuelta)	IR (días)	RM (%)	AEH (m ³ /ha)	AEV (m ³ /vuelta)	Diferencia		
							(m ³ /vuelta)	(m ³ /ciclo del cultivo)	%
---	365	12760,4		15	381,3	13330,248	569,8	-	
0-30	183	6397,68	3	30	190,6	6663,376	265,7	2657,0	104,2%
31-60	244	8530,24	4	25	228,8	7998,848	-531,4	-3985,4	93,8%
61-90	270	9439,2	4	20	289,9	10134,904	695,7	5217,8	107,4%
91-120	242	8460,32	4	25	228,8	7998,848	-461,5	-3461,0	94,5%

CC– Ciclo del cultivo. ARH – Agua requerida por hectárea. ARV – Agua requerida por vuelta.
 IR –Intervalo de riego. RM – Regulación máquina utilizada. AEH – Agua entregada por hectárea.
 AEV – Agua entregada por vuelta.

Se puede observar que existen diferencias, tanto por exceso como por defecto, en las cantidades de agua utilizada en cada ciclo respecto a las necesidades del cultivo. Por ejemplo, durante el ciclo comprendido entre los días 31 al 60 del cultivo se dejaron de aplicar 3985,4 metros cúbicos de agua, es decir, faltó un 6,2% del agua requerida por la planta; sin embargo, en el siguiente, entre los días 61 y 90, se utilizaron innecesariamente 5217,8 lo cual significa que un 7,4% del líquido necesario fue desperdiciado.

Resultados y discusión

Como se planteó con anterioridad, un sistema informático fue propuesto; el mismo está pensado para que pueda trabajar en dos modos diferentes: como un software sin dependencias; o como módulo de un sistema de agricultura de precisión. En el primer caso no es necesario ningún tipo de instalación o configuración previa; en el segundo, es necesario un despliegue más complejo, el cual está previsto siguiendo el esquema mostrado en la Figura 3.

La Figura 3, muestra todos los componentes que forman parte del despliegue de la aplicación dentro de un sistema de agricultura de precisión, donde intervienen:

- Servidor meteorológico: encargado de proveer la información sobre las condiciones climáticas actuales y las predicciones para la región. Las cuales provienen de estaciones agro-meteorológicas del territorio, así como la red de pluviómetros provincial.
- Servidor de base de datos: contiene toda la información de los cultivos necesaria para los planes de riego. Entre los que se encuentran los instructivos técnicos para cada cultivo, el personal disponible para contratación, así como el histórico de rendimiento de las parcelas, entre otros.
- Servidor de geolocalización: permite la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelación de la información geoespacial de la región donde se encuentran los cultivos.
- Servidor de aplicación: contiene la aplicación para el cálculo de las configuraciones necesarias para hacer efectivos los planes de riego. Este es el núcleo principal del sistema propuesto.
- Estación cliente: garantiza la gestión de los planes de riego y la información relacionada con parcelas, cultivos y equipos de riego del lado del cliente.
- Dispositivo móvil: presenta una interfaz minimalista, intuitiva y atractiva. Permite la visualización en tiempo real de la información del campo utilizando técnicas de realidad aumentada.
- Servidor de control automático: es el encargado de ejecutar en tiempo real los planes de riego generados por el servidor de aplicación, para cada equipo de riego en específico.

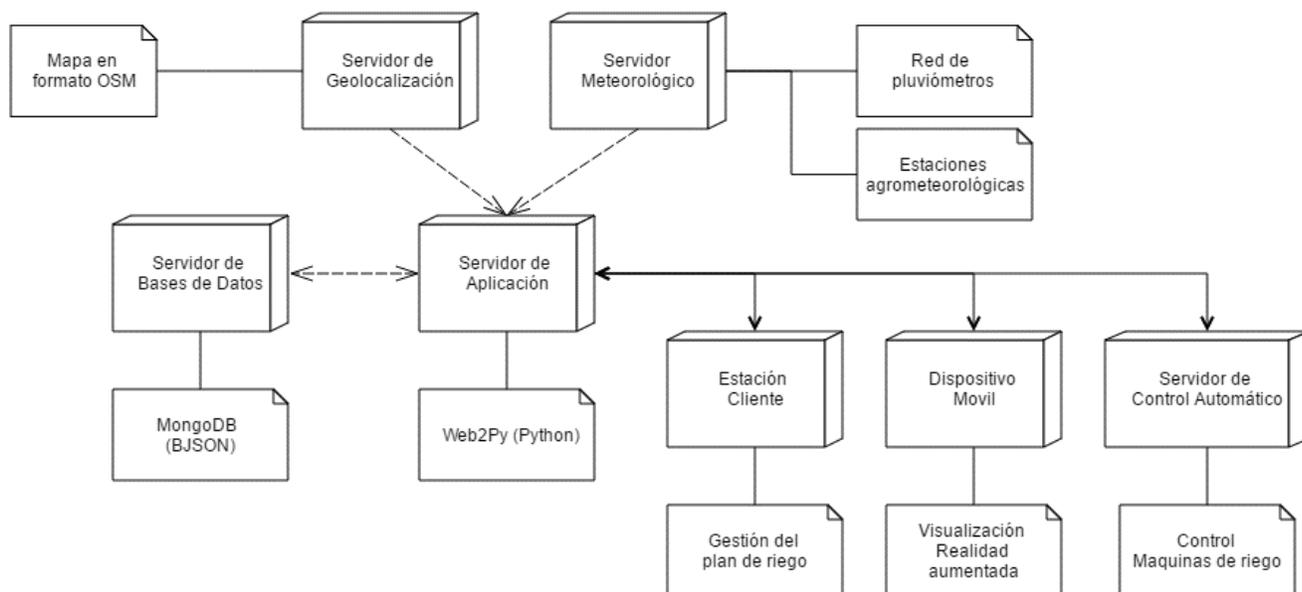


Figura 3. Diagrama de Despliegue del sistema como módulo de un sistema de agricultura de precisión

En un flujo normal de eventos, el software ya debería tener en su base de datos la información de las parcelas, tipos de cultivos y equipamiento con el que se trabajará; de no existir esta información completa, deberá ser introducida por algún usuario que pertenezca al rol correspondiente. Para que el agrónomo pueda hacer la planificación de una siembra, solo tiene que definir la parcela que será cultivada, el equipo de riego del que dispone y el cultivo a plantar. El sistema es capaz entonces de calcular los requerimientos de agua y nutrientes, y establecer los valores a los que debe ser configurada la máquina para proporcionarlos con la mayor exactitud posible. Además, si en esa parcela ya existen registros de cultivos previos, el software permitirá acceder a los mismos, de esta manera la aplicación se convierte en un soporte adicional a la toma de decisiones. En caso de necesidad, un cambio en algún valor del suelo o el cultivo puede ser introducido en cualquier momento; la aplicación entonces recalculará instantáneamente todos los valores necesarios, empleando las medias ponderadas de los datos históricos para el caso donde algunas de las variables involucradas se encuentren incompletas. De esta forma se aporta un dinamismo que permite el ajuste de la planificación a las condiciones cambiantes originadas por situaciones meteorológicas, actualización de la bibliografía u otras, y que son características de un sembradío real. Utilizando este sistema, se hizo el diseño agronómico a un sembrado con iguales características al que se le había realizado el diseño agronómico de forma manual. El resultado se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Diseño agronómico automatizado empleado para el cultivo del frijol.

CC (días)	ARH (m ³ /ha)	ARV (m ³ /vuelta)	IR (días)	RM (%)	AEH (m ³ /ha)	AEV (m ³ /vuelta)	Diferencia		
							(m ³ /vuelta)	(m ³ /ciclo del cultivo)	%
---	365	12760,4		15,7	364,3	12737,0	-23,4		
0-30	183	6397,7	3	31,3	182,7	6388,9	-8,8	-88,2	99,9%
31-60	244	8530,2	4	23,4	244,4	8545,8	15,5	116,5	100,2%
61-90	270	9439,2	4	21,10	271,1	9477,3	38,1	285,8	100,4%
91-120	242	8460,32	4	23,7	241,6	8444,7	-15,6	-116,9	99,8%

CC– Ciclo del cultivo. ARH – Agua requerida por hectárea. ARV – Agua requerida por vuelta.
 IR –Intervalo de riego. RM – Regulación máquina utilizada. AEH – Agua entregada por hectárea.
 AEV – Agua entregada por vuelta.

Como se puede observar en la tabla anterior, las diferencias entre el agua requerida por ciclo del cultivo y la entregada por el sistema utilizando el software propuesto, nunca es mayor al 0,5%. Este valor implica que, solamente se utilizó de más, o de menos, una fracción del agua que se malgastaba con las estimaciones manuales. Por ejemplo, en el ciclo

comprendido entre los días 61 y 90, la máquina echó 5217,8 m³ de más cuando utilizó los valores calculados a mano, mientras que, en ese mismo ciclo, utilizó solamente 285,8 m³ de más cuando se rigió por los números aportados por la aplicación. En términos de economía hídrica, se puede afirmar que hubo un ahorro del agua malgastada de hasta un 94,5% (4932,0 m³). Además, es necesario valorar la influencia de esta práctica en el rendimiento final del cultivo, puesto que los valores suministrados se ajustan más a sus necesidades reales, significando que un sembrado, atendiendo a los valores de evapotranspiración, se encuentra en mejores condiciones de alcanzar su rendimiento óptimo.

En la Figura 4 se muestra la comparación entre las necesidades reales del cultivo en cada una de sus fases, contra las cantidades de agua proporcionadas al mismo utilizando, tanto la vía de cálculo tradicional, como los valores aportados por el sistema de configuración asistida.

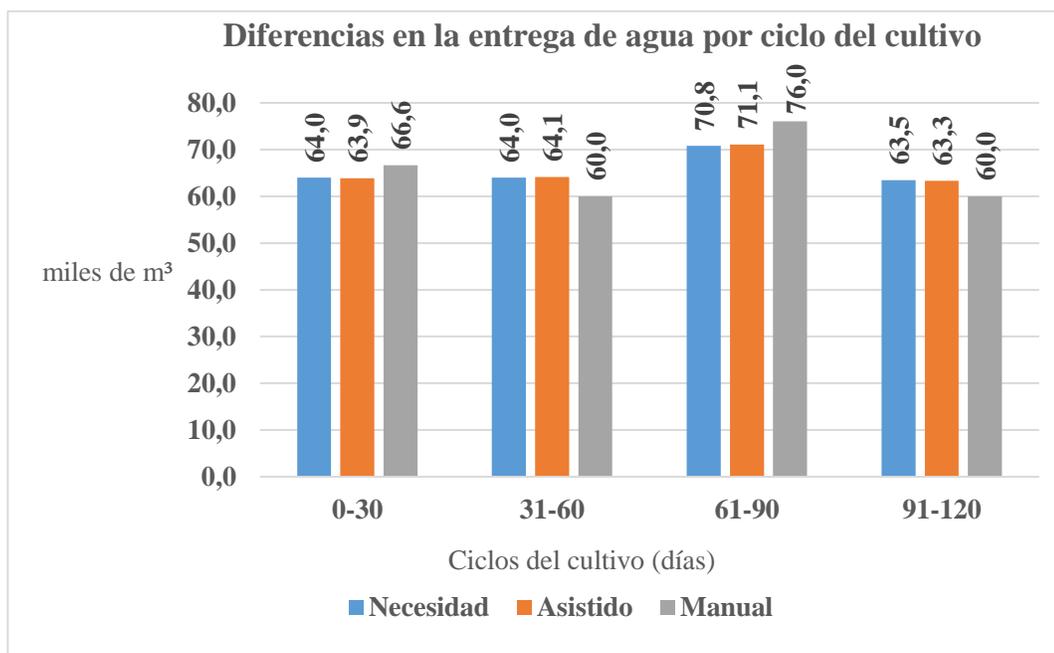


Figura 4. Gráfica comparativa de los resultados de la aplicación de los valores de configuración devueltos por el software propuesto, respecto a la configuración manual.

Como se puede apreciar, sin el uso de la aplicación, los valores utilizados para el riego fueron marcadamente superiores o inferiores a los calculados para el cultivo en cada una de sus fases. Sin embargo, los valores obtenidos con empleo del software se acercan considerablemente a los teóricos necesarios.

Conclusiones

Como resultado de la presente investigación se presentó un sistema informático, que posibilita la irrigación asistida por software a través de la configuración rápida y confiable los equipos de riego presentes en Cuba, y que constituye un paso fundamental en la implantación de prácticas relacionadas con la agricultura de precisión. El sistema propuesto, fue validado mediante un estudio experimental en la empresa agropecuaria “La Cuba”, en cultivo de frijol, alcanzando un ahorro del agua utilizada innecesariamente de hasta un 94,5%, lo cual permitió obtener un mejor aprovechamiento de la máquina de riego empleada. Como valor agregado, el software presenta una interfaz minimalista, intuitiva y atractiva, que permite la visualización en tiempo real de la información del campo, mediante el empleo de técnicas de realidad aumentada. A partir de estos resultados, se impone como trabajo futuro la incorporación de técnicas de inteligencia artificial que contribuyan a la toma de decisiones en el proceso de elaboración de los planes de riego.

Agradecimientos

Esta investigación se inserta en el proyecto asociado al Programa Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación: “Automatización de los procesos productivos en las empresas agrícolas en busca de la eficiencia, el ahorro y la sostenibilidad.”. Especial agradecimiento a las empresas agroindustriales Ceballos y La Cuba, donde se realizaron las experimentaciones. Así como a todo aquel que contribuyó con sus invaluable comentarios y consideraciones.

Referencias

- © 2017 Diversified Communications UK. 2017. Ocean business. [Online] 2017. [Cited: enero 26, 2017.] <http://www.oceanbusiness.com/>.
- © eFoodPrint® Tots. 2017. eFoodPrint. Agrifood software and solutions. [Online] © eFoodPrint® Tots, 2017. [Cited: enero 20, 2017.] <http://efoodprint.com/en/>.
- FAO. 2002. *Agua y Cultivos. Logrando el uso óptimo del agua en la agricultura*. Roma : s.n., 2002.
- . 2009. *La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050*. Roma : s.n., 2009.
- Grupo Orcelis. 2017. Solución Integral para el Asesoramiento y Gestión de cultivos. [Online] 2017. [Cited: marzo 1, 2017.] <https://fitocontrol.com/>.
- Jurado, Carlos Blé. 2010. *Diseno Agil Con TDD*. 2010. 978-1-4452-6471-4.
- Kniberg, Henrik. 2007. *Scrum y Xp desde las trincheras*. s.l. : Enterprise Software Development Series, 2007. 978-1-4303-2264-1.

- OFIAGRO Mediciones. 2015. FertiSoft Cultivos: Programa informático de riego, abonado y Gestión de fincas. [Online] OFIAGRO Mediciones S.L., 2015. [Cited: febrero 5, 2017.] <http://www.ofiagro.es/fertisoft.html>.
- Pacheco Seguí, Juan, Rodríguez, Alonso and Camejo Barreiro, Lorenzo Eddy. 2007. *Riego y Drenaje*. La Habana : Félix Varela, 2007. 9789590706219.
- Piero, Massimo Di. 2016. *WEB2PY, COMPLETE REFERENCE MANUAL, 5TH EDITION*. Chicago : Creative Commons, 2016. 978-0-578-12021-8.
- Scrum.org. 2017. The Home of Scrum. [En línea] © 2017 Scrum.org., 2017. [Citado el: 7 de febrero de 2017.] <https://www.scrum.org/>.
- SMART Fertilizer Group. 2017. SMART! Fertilizer Management. [Online] 2017. [Cited: enero 20, 2017.] <http://www.smart-fertilizer.com/>.
- Smith, Martin, et al. 2014. *Estudio FAO: Riego y Drenaje. Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Roma : ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, 2014. 9789253085644.
- Wells, Don. 2017. Extreme Programming: A gentle introduction. [Online] ExtremeProgramming.org home, 2017. [Cited: enero 15, 2017.] <http://www.extremeprogramming.org>.