

## Software para el diseño hidráulico de los sistemas de riego de pivote central

### Software for the Hydraulic Design of Central Pivot Irrigation Systems



<http://opn.to/a/qet5E>

Maiquel López-Silva<sup>I\*</sup>, Dayma Carmenates-Hernández<sup>I</sup>, Albi Mujica-Cervantes<sup>I</sup>,  
Pedro Paneque-Rondon<sup>II</sup>

<sup>I</sup>Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba.

<sup>II</sup>Universidad Agraria de La Habana (UNAH), Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

**RESUMEN:** Se elaboró un software CurvePivot 2.0 para el diseño hidráulico de los sistemas de riego de pivote central para las condiciones específicas de operación. El lenguaje de programación que se utilizó fue C# con una interfaz sencilla para el usuario. El programa se fundamentó en un modelo matemático que considera variables hidrogeológicas, hidráulicas, edáficas, agronómicas y económicas, a través del cual, se obtiene de forma rápida y eficaz el caudal de diseño con el menor costo de inversión y operación del sistema de riego. Además se determina la eficiencia y abatimiento del pozo, radio de influencia del pozo, los parámetros de la bomba centrífuga, el punto de funcionamiento del sistema, la pluviosidad en el extremo del lateral, los diámetros y longitudes de las tuberías, presión de trabajo, número de torre y la velocidad de la última torre. Esta herramienta ha sido utilizada en varias empresas agrícolas de la provincia de Ciego de Ávila, Cuba.

**Palabras clave:** programación, agua, energía.

**ABSTRACT:** CurvePivot 2.0 software was developed for the hydraulic design of central pivot irrigation systems for specific operating conditions. The programming language that was used was C# with a simple interface for the user. The program was based on a mathematical model that considers hydrogeological, hydraulic, edaphic, agronomic and economic variables, through which the design flow is obtained quickly and efficiently with the lowest investment and operation cost of the irrigation system. In addition, other parameters are determined like efficiency and depletion of the well, radius of influence of the well, parameters of the centrifugal pump, operating point of the system, rainfall at the end of the lateral, diameters and lengths of the pipes, working pressure, tower number and speed of the last tower. This tool has been used in several agricultural companies in the province of Ciego de Ávila, Cuba.

**Keywords:** programming, water, energy.

\*Autor para correspondencia: Maiquel López-Silva. e-mail: [maiquel@unica.cu](mailto:maiquel@unica.cu)

Recibido: 02/06/2017

Aceptado: 11/09/2018

## INTRODUCCIÓN

Los software en las últimas décadas se han convertido en una herramienta eficaz en el diseño y manejo de los sistemas de riego, con el objetivo de maximizar la producción agrícola con un uso eficiente de los recursos naturales, como alternativa de bajo costo, rápida y fácil de utilizar (Ferreira y Assuncao, 2015; Kisekka *et al.*, 2016; Pinheiro y Alves, 2017).

En el Ministerio de la Agricultura de la república de Cuba los sistemas de riego a presión constituyen los de mayor consumo de energía eléctrica entre el 18% al 20% (López *et al.*, 2017a) y en países desarrollados supera el 20% (Kopp *et al.*, 2016), lo que surge la necesidad de analizar el diseño, explotación y evaluación de estos sistemas. En Cuba en la década de los noventas se realizó el software “PIVOT” para el diseño de los sistemas de riego de pivote central por accionamiento hidráulico y eléctrico, pero este no contempla el parámetro hidrogeológico, el hidráulico en toda su extensión y los económicos (López *et al.*, 2017b).

Han sido varios los autores que han desarrollado metodologías y software para el diseño y evaluación de los sistemas de riego de pivote central (Allen, 1991; Moreno *et al.*, 2012; Valín *et al.*, 2012; Montero *et al.*, 2013; Pérez *et al.*, 2015; Almeida *et al.*, 2017; Camejo *et al.*,

2017), pero tienen como limitantes el análisis de la topografía del terreno, la hidráulica de pozo, las curvas de las bombas centrífugas, los tipos de emisores en el lateral y aspectos económicos. Por tal motivo, es inevitable la importancia de elaborar software sustentado en metodologías óptimas que integren todas las variables para el diseño de los sistemas de riego de pivote central, y así contribuir al aumento de la eficiencia y productividad del riego.

En este sentido, el objetivo de este trabajo es desarrollar un software para el diseño hidráulico de los sistemas de riego de pivote central en condiciones específicas de operación que contemple las variables hidrogeológicas, hidráulicas, edáficas, agronómicas y económicas para la obtención del caudal de diseño.

## MÉTODOS

Se implementó el software CurvePivot 2.0 a partir del modelo matemático propuesto por (López *et al.*, 2017b), atribuyéndoles nuevas condiciones de trabajo, tanto para acuíferos libres y confinados considerando un flujo lineal en régimen permanente en el pozo; así como variables agronómicas, operacionales y económicas que determinan el diseño del pivote central como se muestra en el diagrama de flujo 1.

La ecuación general del modelo matemático que integra la combinación de la curva del acuífero, el pozo, la bomba centrífuga y la curva del sistema de riego se expone mediante la expresión (1).

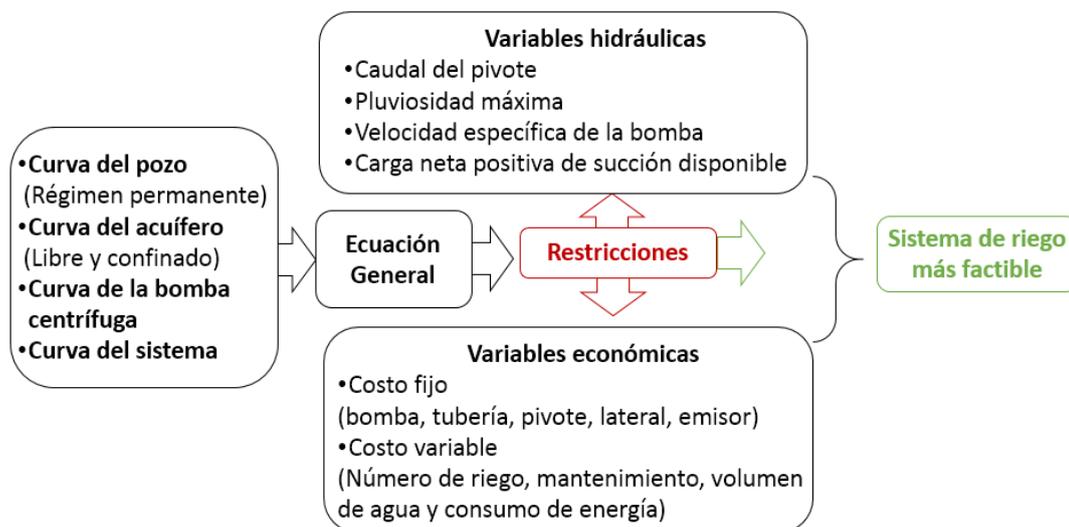


FIGURA 1. Diagrama de flujo del modelo matemático.

$$D + EQ + FQ^2 - h_g - \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} W(u) - CQ^2 - P_o - \left[ \frac{C_L \cdot Q^{1,852}}{D_{rs}^{4,871}} \int_{s=0}^{s=rs} \left[ 1 - \left( \frac{s}{L} \right)^2 \right]^{1,852} ds \right] - h_p - \Delta Z - 9,2 \cdot 10^{-4} \cdot \left( \frac{Q^{1,8} \cdot L_b}{D_{PEBD}^{4,8}} \right) - \left[ \frac{0,25 \cdot L_t}{\left[ 2 \cdot \log \left( \frac{\varepsilon / D_t}{3,7} + 2,03 \left( \frac{v \cdot D_t}{Q} \right)^{0,9} \right) \right]^2 \cdot D_t} + (K_{loc}) \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D_t^4} \right] \cdot Q^2 = 0 \quad (1)$$

Donde:

- $Q$  - caudal de la bomba ( $m^3 s^{-1}$ )
- $D, E, F$  - coeficientes de ajuste de la curva
- $h_g$  - altura de succión del nivel estático del agua en el pozo (m)
- $T$  - transmisividad ( $m^2 s^{-1}$ )
- $W(u)$  - función "u" del pozo
- $CQ^2$  - abatimiento en el pozo (m)
- $P_o$  - presión del último emisor en el lateral (m)
- $C_L$  - coeficiente de rugosidad de la tubería
- $D_{rs}$  - diámetro interno de la tubería del lateral (m)
- $s$  - integración desde el inicio del lateral hasta la distancia rs (m)
- $L$  - longitud del lateral de riego (m)
- $h_p$  - altura del pivote (m)
- $\Delta Z$  - desnivel topográfico entre el punto del pivote y la extremidad del lateral (m)
- $L_b$  - longitud de la tubería de soporte del emisor (m)
- $D_{PEBD}$  - diámetro interno de la tubería de soporte del emisor (m)
- $L_t$  - longitud de la tubería de succión e impulsión respectivamente (m)
- $D_t$  - diámetro interno de la tubería de succión e impulsión respectivamente (m), considerados iguales los diámetros
- $\varepsilon$  - rugosidad absoluta de la tubería (m)
- $v$  - viscosidad cinemática ( $m^2 s^{-1}$ )
- $K_{loc}$  - coeficientes de pérdidas locales (adimensional).

Se determinó el diámetro económico para el caudal de diseño en la [expresión \(1\)](#), a partir del análisis de los costos fijos y de operación del sistema, empleando los diámetros comerciales existentes en el mercado para los sistemas de riego de pivote central, la expresión se muestra mediante las siguientes ecuaciones:

$$C_T = \sum_{m=1}^n \frac{C_F \cdot FRC}{A} + C_v \quad (2)$$

$$FRC = \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (3)$$

Donde:

- $C_T$  - costo total ( $\$ ha^{-1} año^{-1}$ )
- $C_F$  - costo fijo ( $\$ año^{-1}$ )
- $C_v$  - costo variable ( $\$ ha^{-1} año^{-1}$ )
- $A$  - área de riego (ha)

$FRC$  - factor de recuperación de la inversión (%)

$r$  - tasa de interés real

$t$  - vida útil de la inversión (años).

Los costos fijos en la [fórmula \(2\)](#), es la suma de los costos de la bomba, la tubería de impulsión, el pivote, el lateral; así como el tipo de emisor y regulador de presión. Mientras que el costo de la bomba está en función de su potencia y el costo del pivote en dependencia del diámetro, según estudios realizados por ([Montero et al., 2013](#)), que se expresan mediante las ecuaciones:

$$C_F = C_b + C_t + C_p + C_l + C_e + C_r \quad (4)$$

$$C_b = 25,954 (0,0016 P_b^3 + 0,924 P_b^2 + 268,28 P_b) \quad (5)$$

$$C_p = 25,954 \cdot (0,7198 \cdot D^{0,969}) \quad (6)$$

Donde:

- $C_b$  - costo de la bomba (\$)
- $C_t$  - costo de la tubería de impulsión (\$)
- $C_p$  - costo del pivote (\$)
- $C_l$  - costo del lateral (\$), en función del número de las torres y el diámetro
- $C_e$  - costo del tipo emisor (\$)
- $C_r$  - costo del regulador de presión (\$)
- $P_b$  - potencia de la bomba (kW)
- $D$  - diámetro del pivote (mm).

Los costos variables de la [fórmula \(2\)](#), dependen de la operación del sistema de riego, que se define como la suma del costo de la energía, el costo de mantenimiento y el costo del agua que se expresan mediante la ecuación:

$$C_v = C_{ee} + C_{ma} + C_a \quad (7)$$

$$C_{ee} = \frac{N_r \cdot P_b}{0,0433 \cdot A} [t_D \cdot (0,0241 K + 0,0638) + t_N \cdot (0,0161 K + 0,0638)] \quad (8)$$

$$C_{ma} = \frac{T_m \cdot PS}{4,33 A} \quad (9)$$

$$C_a = \frac{3600 C_w (t_D + t_N) \cdot N_r \cdot Q}{A} \quad (10)$$

$$P_b = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_b}{\eta_b} \quad (11)$$

Donde:

- $C_{ee}$  - costo de la energía eléctrica consumida (\$ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)
- $C_{ma}$  - costo de mantenimiento (\$ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)
- $C_a$  - costo del agua (\$ ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>)
- $C_w$  - costo del volumen de agua extraído (0.01 \$ m<sup>-3</sup> según la [Resolución No. 421/2012 \(Ministerio de Finanzas y Precios \(MFP\), 2012; Pérez y Sabatier, 2015\)](#))
- $t_D$  - tiempo de trabajo diurno al mes (h)
- $t_N$  - tiempo de trabajo nocturno al mes (h)
- $A$  - área de riego (ha)
- $T_m$  - tasa anual de mantenimiento (%)
- $PS$  - precio de adquisición e instalación del equipamiento de riego (\$)
- $K$  - coeficiente de ajuste por variación del precio del combustible según la [Resolución No. 28/2011 \(Ministerio de Finanzas y Precios \(MFP\), 2011; Pérez y Sabatier, 2015\)](#)
- $N_r$  - número de riegos (adimensional)
- $\eta_b$  - eficiencia de la bomba (decimal)

- $H_b$  - altura manométrica de la bomba (m)
- $\gamma$  - peso específico del agua (9,806 kN m<sup>-3</sup>)

## RESULTADO Y DISCUSIÓN

Se elaboró el software CurvePivot 2.0 que permite realizar el diseño hidráulico de los sistemas de riego de pivote central para las condiciones específicas de operación, que incluye variables hidrogeológicas, hidráulicas, edáficas, agronómicas y económicas.

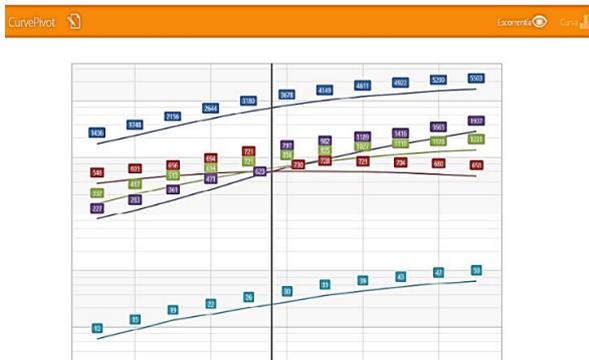
El programa se diseñó con una interfaz sencilla que permite al usuario mayor concentración en el contenido del trabajo. Se utilizó como tecnología Windows Presentation Foundation contenida en el Framework en su versión 4.0 y como lenguaje de programación se utilizó C# en su versión 5.0 y como Interface Development Enviroment Visual Estudio 2015, compatible con la versión Windows XP en adelante.

El usuario accede de una forma lógica y ordenada que se indican a continuación a partir de la información almacenada e introducida como: insertar, seleccionar e importación de datos del Microsoft Excel, eliminar y actualizar datos, diámetros y materiales de las tuberías, tipos de torres, emisores y suelos, muestra de resultados, obtención de las ecuaciones y curvas del sistema; muestra del punto de operación del sistema y de la escorrentía e imprimir tablas o figuras. El software consta de tres interfaces vitales:

- La primera parte, al grupo de pestañas las cuales agrupan los campos de entrada (pozo, bomba, tubería y pivote central) junto con una tabla de resultado, siempre visible para el usuario.
- La segunda parte, se accede mediante el botón de escorrentía de la barra de navegación ingresando a los campos de entrada para el cálculo de la escorrentía y la tabla de resultado.

- La tercera parte, se accede del botón curva de la barra navegación para acceder a las curvas generadas por la bomba y sistema de riego.

En las siguientes figuras se muestra un ejemplo de las características y funcionamiento del Software CurvePivot 2.0 para el diseño del pivote central. En la [Figura 2](#) se muestra la pantalla principal del sistema informático; mientras que, en la [Figura 3](#) se observa la pantalla para introducir los datos de explotación del pozo y el acuífero, como la transmisividad, coeficiente de almacenamiento y los coeficientes de pérdidas del pozo según las características constructiva, así como los niveles freáticos del acuífero.



**FIGURA 2.** Pantalla principal del sistema informático



**FIGURA 3.** Pantalla de datos del pozo.

En la [Figura 4](#) se muestra la pantalla de introducción de datos de la bomba centrífuga y

variables agronómicas, se selecciona la curva de la bomba, el tiempo de funcionamiento de la bomba, número de impelentes, número de riego, la evapotranspiración máxima del cultivo, el coeficiente de ajuste por variación del precio del combustible como el factor K, entre otros. En la [Figura 5](#) se muestra la pantalla de introducción de datos de la tubería impulsión



**FIGURA 4.** Pantalla de datos de la bomba centrífuga



**FIGURA 5.** Pantalla de datos de la tubería impulsión.

La [Figura 6](#) muestra la pantalla de introducción de los datos del pivote central, se seleccionan las características de la tubería del lateral y del emisor, así como la eficiencia del sistema. En la [Figura 7](#) se muestra la pantalla de datos del tipo de suelo y cultivo a regar.



FIGURA 6. Pantalla de datos del pivote central.

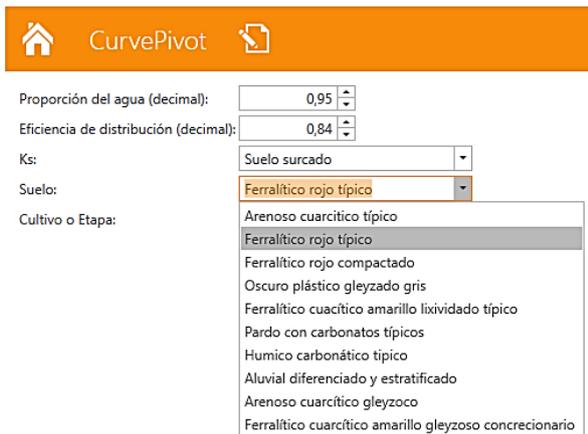


FIGURA 7. Pantalla de datos del tipo suelo y cultivo.

En la [Figura 8](#) se muestra la pantalla de resultados del sistema de riego, como abatimiento del pozo, los parámetros de funcionamiento de la bomba centrífuga, diámetros y longitudes de las tuberías, presión de trabajo, número de torre, velocidad de la última torre y costo total del sistema de riego. Esta pantalla permite la selección técnica y económica más adecuada para elevar la eficiencia de realización de los proyectos de riego con los pivotes centrales en condiciones reales de explotación. De este modo se logra una reducción de gastos de recursos materiales, humanos, energéticos y el tiempo para realizar los cálculos y análisis, garantizando

un mayor control técnico y económico del diseño del sistema de riego con los mínimos recursos.



FIGURA 8. Pantalla de resultados del sistema de riego.

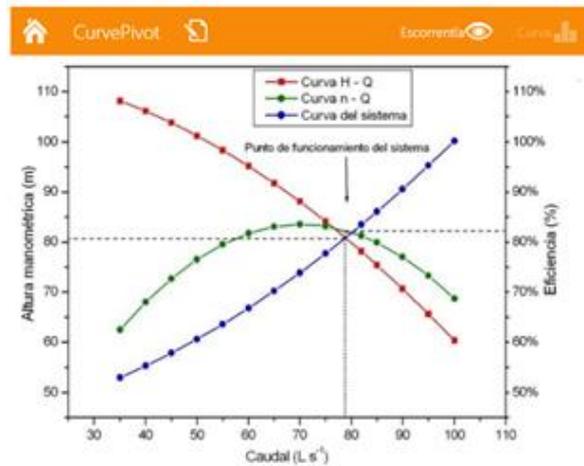
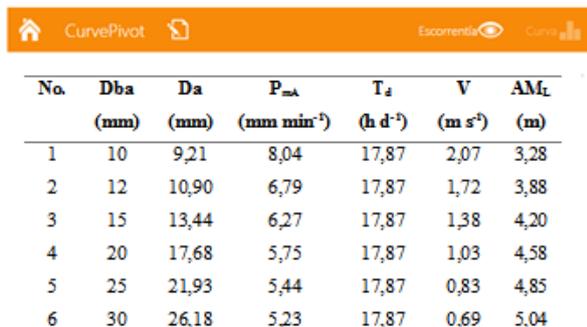


FIGURA 9. Pantalla del punto de funcionamiento del sistema.

En la [Figura 9](#) se observa la obtención de las curvas del punto de funcionamiento del sistema ( $H_b$  v  $Q$ ;  $\eta$  v  $Q$  y curva del sistema), que facilita la interpretación y la visualización de los resultados técnicos para el aumento de la vida útil de la bomba, a partir de la estabilización del punto de funcionamiento que repercute en menor costo de mantenimiento por los sellos mecánicos, rodamientos y menor probabilidad del desalineamiento del eje.

En la [Figura 10](#) se exponen los resultados de la escorrentía en el extremo del lateral. Estos valores posibilitan la selección adecuada del tipo emisor para evitar la escorrentía en el extremo

del lateral según el tipo emisor, que favorece al uso racional del agua y energía en el sistema de riego.



No.	Db <sub>a</sub> (mm)	Da (mm)	P <sub>ma</sub> (mm min <sup>-1</sup> )	T <sub>d</sub> (h d <sup>-1</sup> )	V (m s <sup>-1</sup> )	AM <sub>L</sub> (m)
1	10	9,21	8,04	17,87	2,07	3,28
2	12	10,90	6,79	17,87	1,72	3,88
3	15	13,44	6,27	17,87	1,38	4,20
4	20	17,68	5,75	17,87	1,03	4,58
5	25	21,93	5,44	17,87	0,83	4,85
6	30	26,18	5,23	17,87	0,69	5,04

**FIGURA 10.** Pantalla de la escorrentía en el extremo del lateral para el emisor Rotator.

### CONCLUSIONES

Se elaboró el software CurvePivot 2.0 que constituye una innovación tecnológica de suma importancia que permite realizar el diseño hidráulico óptimo de los sistemas de riego de pivote central para las condiciones específicas de operación.

La implementación del software CurvePivot 2.0 permite la elaboración eficiente de los proyectos de riego con pivote central en menor tiempo, facilita la interpretación y la visualización de los resultados técnicos económicos que repercute en el aumento de la productividad del riego; así como la disminución de los impactos medioambientales.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G.: *USUPIVOT: Centre Pivot and Linear Move Nozzle Selection Program*, ser. User's, manual, Inst. Utah State University, Dept. Biological and Irrigation Engineering, Logan, Utah, USA, 1991.

ALMEIDA, A.N. de; COELHO, R.D.; COSTA, J. de O.; FARIAS, A.J.: "Methodology for dimensioning of a center pivot irrigation system operating with dripper type emitter", *Engenharia Agrícola Jaboticabal*, 37(4): 828-837, 2017, ISSN: 1809-4430, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430>.

CAMEJO, B.L.E.; DUARTE, N.L.; GUERRA, H.G.: "Diseño agronómico en máquinas de pivote central, rendimientos, ahorro de agua y energía", *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 38(2): 3-16, 2017, ISSN: 1815-591X.

FERREIRA, L.G.; ASSUNCAO, C.J.: "Graficbomb.: Software para cálculos hidráulicos e custos de bombeamento", *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*, 20(4): 694-704, 2015, ISSN: 1808-8546.

KISEKKA, I.; OKER, T.; NGUYEN, G.; AGUILAR, J.; ROGERS, D.: "Mobile drip irrigation evaluation in corn", *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 2(7): 8, 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.4148/2378-5977.1253>.

KOPP, M.L.; PEITER, M.X.; ROBAINA, A.D.; TOESCHER, C.F.: "Caracterização de estações de bombeamento em lavouras de arroz do Rio Grande do Sul", *Engenharia Agrícola*, 36(2): 342-351, 2016, ISSN: 0100-6916, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p342-351/2016>.

LÓPEZ, B.E.; MARTÍNEZ, A.D.; ALCÍVAR, R.S.F.; GONZÁLEZ, C.O.; HERRERA, S.M.: "Factores que incrementan el consumo energético en las máquinas de riego de pivote central", *Revista Ingeniería Agrícola*, 7(4): 41-46, 2017a, ISSN: 2306-1545, E-ISSN: 2227-8761.

LÓPEZ, S.M.; CARMENATES, H.D.; MUJICA, C.A.; CARMEN, D.C.; PANEQUE, R.P.: "Nuevo criterio para el diseño hidráulico del sistema de riego de pivote central", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 26(3): 12-21, 2017b, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.

MINISTERIO DE FINANZAS Y PRECIOS (MFP): *Sistema tarifario eléctrico para servicios no residenciales, pertenecientes a empresas y entidades 100% cubanas*, Inst. Ministerio de Finanzas y Precios, RESOLUCIÓN No. 28/2011, La Habana, Cuba, 2011.

MINISTERIO DE FINANZAS Y PRECIOS (MFP): *Tarifas en pesos cubanos (CUP) o pesos convertibles (CUC) para el servicio técnico productivo de abasto de agua y otros servicios afines que prestan las empresas de aprovechamiento hidráulico*, Inst. Ministerio de Finanzas y Precios, RESOLUCIÓN No. 421/2012, La Habana, Cuba, 2012.

MONTERO, J.; MARTÍNEZ, A.; VALIENTE, M.; MORENO, M.A.; TARJUELO, J.M.: “Analysis of water application costs with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain”, *Irrigation Science*, 31(3): 507-521, 2013, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00271-012-0326-4>.

MORENO, M.A.; MEDINA, D.; ORTEGA, J.F.; TARJUELO, J.M.: “Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells”, *Agricultural water management*, 107: 112-121, 2012, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2012.01.016>.

PÉREZ, L.R.; DOMÍNGUEZ, G.J.; PANEQUE, R.P.: “El cambio del módulo de aspersión en pivotes según criterios económicos para Cuba: modelo teórico”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(3): 22-27, 2015, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.

PÉREZ, L.R.; SABATIER, C.Y.: “El cambio del módulo de aspersión en pivotes según criterios económicos: aplicación a dos cultivos”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(4): 25-30, 2015, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054.

PINHEIRO, F.E.; ALVES, A.W.: “The center pivot irrigation in minas gerais state, brazil, under the optics of google earth”, *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*, 22(2): 249-258, 2017, ISSN: 1808-8546, DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2017v22n1p249-258>.

VALÍN, M.I.; CAMEIRA, M.R.; TEODORO, P.R.; PEREIRA, L.S.: “DEPIVOT: A model for center-pivot design and evaluation”, *Computers and electronics in agriculture*, 87: 159-170, 2012, ISSN: 0168-1699, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2012.06.004>.

Maiquel López-Silva Profesor Titular, Universidad de Ciego de Ávila (UNICA), Facultad de Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Hidrotécnicos, Ciego de Ávila, Cuba, e-mail: [maiquel@unica.cu](mailto:maiquel@unica.cu)

Dayma Carmenates-Hernández, e-mail: [daymas@unica.cu](mailto:daymas@unica.cu)

Albi Mujica-Cervantes, e-mail: [albisp@unica.cu](mailto:albisp@unica.cu)

Pedro Paneque-Rondón, e-mail: [paneque@unah.edu.cu](mailto:paneque@unah.edu.cu)

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.