



Artículo: COMEII-18011

**IV CONGRESO NACIONAL
DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018**
Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

SOFTWARE PARA EL DISEÑO HIDRÁULICO DE LOS SISTEMAS DE RIEGO DE PIVOTE CENTRAL

**Maiquel López Silva^{1*}; Dayma Carmenates Hernández¹; Albi Mujica Cervantes¹;
Oscar Brown Manrique¹**

¹Centro de Estudios Hidrotécnicos, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Ciego de Ávila
"Máximo Gómez Báez" - Carretera a Morón km 9 ½ Ciego de Ávila Cuba.

maiquelcuba@yahoo.com - (053) 58717520 (*Autor de correspondencia)

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, aunque, puede ser empleado en cualquier otro país.

Palabras clave: programación, agua, energía.



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 (Kisekka *et al.*, 2016; Ferreira y Assunção, 2015; 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 noventa 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; Valín *et al.*, 2012; Montero *et al.*, 2012; Moreno *et al.*, 2012; Irmak, 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.

Materiales y 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.

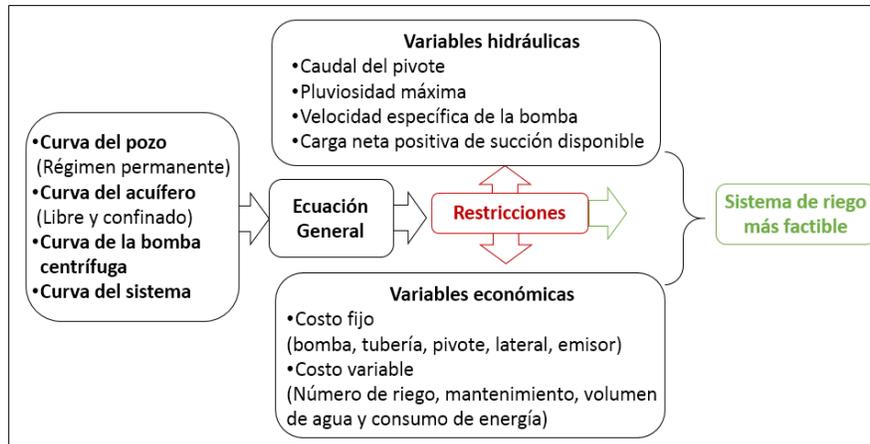


Figura 1. Diagrama de flujo del modelo matemático.

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 siguiente expresión:

$$D + EQ + FQ^2 - h_g - \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot T} W(u) - CQ^2 - P_o - \left[\frac{C_L \cdot Q^{1.852}}{D_{rs}^{4.871}} \int_{s=0}^{s=rs} \left[1 - \left(\frac{s}{L} \right)^2 \right]^{1.852} ds \right] - h_p - \Delta Z -$$

$$- 9,2 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{Q^{1.8} \cdot L_b}{D_{PEBD}^{4.8}} \right) - \left[\left(\frac{0,25 \cdot L_t}{\left[2 \cdot \log \left(\frac{\varepsilon / D_t}{3,7} + 2,03 \left(\frac{v \cdot D_t}{Q} \right)^{0,9} \right) \right]^2} + (K_{loc}) \right) \frac{8}{g \cdot \pi^2 \cdot D_t^4} \cdot Q^2 \right] = 0 \quad (1)$$

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

Se determinó el diámetro económico para el caudal de diseño en la expresión (1), apartir 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 es el costo total (\$ ha⁻¹ año⁻¹); C_F el costo fijo (\$ año⁻¹); C_V el costo variable (\$ ha⁻¹ año⁻¹); A el área de riego (ha); FRC el factor de recuperación de la inversión (%); r la tasa de interés real y t la 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.*, (2012) que se expresan mediante las ecuaciones:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Donde C_{ee} el costo de la energía eléctrica consumida (\$ ha⁻¹ año⁻¹); C_{ma} el costo de mantenimiento (\$ ha⁻¹ año⁻¹) y C_a el costo del agua (\$ ha⁻¹ año⁻¹); C_w el costo del volumen de agua extraído (0,01 \$ m⁻³ según la Resolución No. 421/2012; t_D el tiempo de trabajo



diurno al mes (h); t_N el tiempo de trabajo nocturno al mes (h); A el área de riego (ha); T_m la tasa anual de mantenimiento (%); PS el 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; N_r el número de riegos (adimensional); η_b la eficiencia de la bomba (decimal); H_b la altura manométrica de la bomba (m); γ el peso específico del agua (9,806 kN m⁻³).

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 Environment 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.

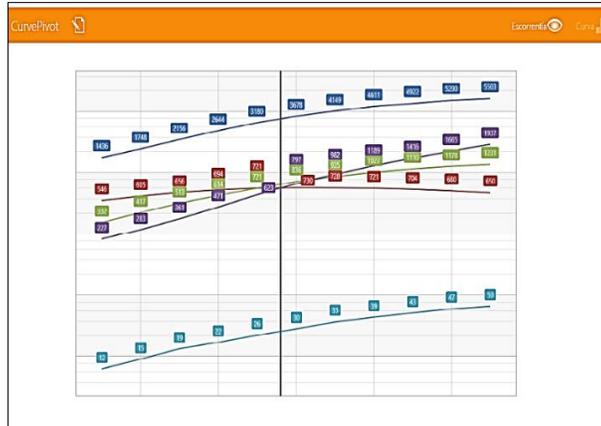


Figura 2. Pantalla principal del sistema informático



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



Bomba	
Tiempo de funcionamiento (h):	20
No. Puntos:	14
Altitud del lugar (m):	25
Temperatura °C:	15
RPM:	1750
Impelentes:	4
No. riego:	32
Necesidad neta de cultivo (mm/día):	6.5
Factor K:	4.9666

Figura 4. Pantalla de datos de la bomba centrífuga

Tubería	
Material:	Acero Galvanizado
Diámetro (mm):	200
Accesorio:	puerta totalmente abiertas
Tubería de impulsión (m):	10

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.

Pivote Central	
Cantidad de torres:	8
Diámetro del lateral (mm):	127
Longitud de la torre (m):	127
Diámetro del voladizo (mm):	168.3
Longitud del voladizo (m):	254
Altura del pivote (m):	4
Altura del emisor (m):	1.2
Desnivel topográfico (m):	0.002
Eficiencia de aplicación (decimal):	0.82
Tipos de emisores:	
Presión (kpa):	Boquilla difusora cubana
Diámetro de cobertura (m):	Spray
Espaciamiento entre emisores (m):	Rotator
	Komet Precision Twister
	LEPA

Figura 6. Pantalla de datos del pivote central.

Tipo suelo y cultivo	
Proporción del agua (decimal):	0,95
Eficiencia de distribución (decimal):	0,84
Ks:	Suelo surcado
Suelo:	Ferráltico rojo típico
Cultivo o Etapa:	Arenoso cuarcítico típico
	Ferráltico rojo típico
	Ferráltico rojo compactado
	Oscuro plástico gleyzado gris
	Ferráltico cuarcítico amarillo lixiviado típico
	Pardo con carbonatos típicos
	Humico carbonático típico
	Aluvial diferenciado y estratificado
	Arenoso cuarcítico gleyzoso
	Ferráltico cuarcítico amarillo gleyzoso concrecionario

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.

Parámetro	Valor	Control
Caudal (L/s)	78.88	<input type="checkbox"/>
Altura Manométrica (m)	80.55	<input type="checkbox"/>
Eficiencia de la bomba (%)	82.34	<input type="checkbox"/>
Potencia de la bomba (kW)	75.7	<input type="checkbox"/>
Velocidad específica	51.7	<input type="checkbox"/>
Diámetro tubería de impuls...	200	<input checked="" type="checkbox"/>
Abatimiento total en el pozo...	6.12	<input type="checkbox"/>
Presión en el pivote (m)	43.64	<input type="checkbox"/>
Número de torres	8	<input checked="" type="checkbox"/>
Tiempo de trabajo (h)	20	<input type="checkbox"/>
Costo total (\$/ha año)	7375.276	<input type="checkbox"/>
Cantida de emisores	117	<input checked="" type="checkbox"/>
Presión al final del lateral (m)	18	<input type="checkbox"/>
Tipo de emisor	Rotator	<input checked="" type="checkbox"/>
Diámetro del voladizo (mm)	101.6	<input type="checkbox"/>
Diámetro de torre (mm)	168.3	<input type="checkbox"/>
Longitud del voladizo (m)	11	<input checked="" type="checkbox"/>
Longitud de torre (m)	55	<input checked="" type="checkbox"/>
Pérdidas en la tubería de im...	5.51	<input type="checkbox"/>

Figura 8. Pantalla de resultados del sistema de riego

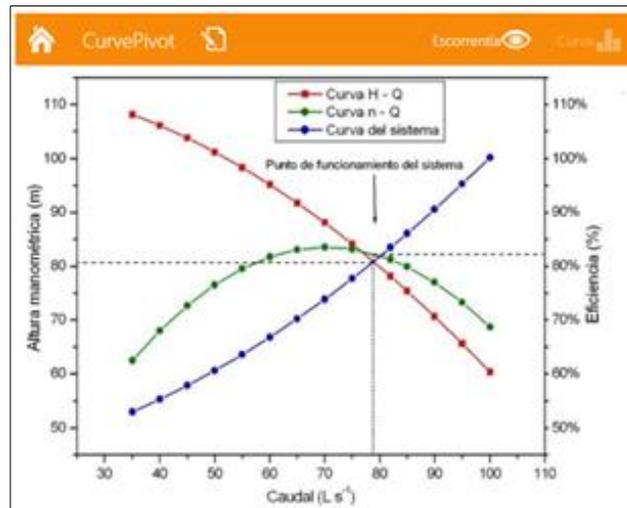


Figura 9. Pantalla del punto de funcionamiento del sistema.

En la figura 9 se observa la obtención de las curvas del punto de funcionamiento del sistema (H_b v Q ; η 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.	D _{ba} (mm)	D _a (mm)	P _{mA} (mm min ⁻¹)	T _d (h d ⁻¹)	V (m s ⁻¹)	AM _t (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. (1991). USUPIVOT (Center Pivot and Linear Move Nozzle Selection Program. User's, manual. Dept. Biological and Irrigation Engineering. Utha State Univresity.
- Almeida, N. A.; Coelho, D. R.; Costa, O. J.; Farias J. A. (2017) .Methodology for dimensioning of a center pivot irrigation system operating with dripper type emitter. Eng. Agríc., Jaboticabal, ISSN: 1809-4430, DOI-10.1590/1809-4430, Volumen 37 (4): Pages, 828-837.
- Camejo, B. L.; Duarte, N. D.; Guerra, H. G. (2017) Diseño agronómico en máquinas de pivote central, rendimientos, ahorro de agua y energía. INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL, VOL. XXX VIII, No. 2, Página 3-16.



- Ferreira, L. G., Y Assuncao, C. J. Graficbomb. (2015) Software para cálculos hidráulicos e custos de bombeamento, *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*, Botucatu, ISSN: 1808-8546, Volumen 20 (4): Página 694-704.
- Irmak, S. (2015). Interannual Variation in Long-Term Center Pivot-Irrigated Maize Evapotranspiration and Various Water Productivity Response Indices. II: Irrigation Water Use Efficiency, Crop WUE, Evapotranspiration WUE, Irrigation-Evapotranspiration Use Efficiency, and Precipitation Use Efficiency. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. DOI-10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000826.
- Kisekka, I., G. Nguyen, J. Aguilar and Danny Rogers. (2016). Mobile Drip Irrigation Evaluation in Corn. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, DOI-10.4148/2378-5977.1253, Volumen 2 (7), 2016.
- Köpp, L.M.; Peiter, M.X.; Robaina, A.D.; Toescher, C.F. (2016). Caracterização de estações de bombeamento em lavouras de arroz do rio grande do sul, *Engenharia Agrícola*, ISSN: 0100-6916, DOI: 10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n2p342-351/2016. Volumen 36(2), Página, 342-351.
- López, B. E.; Martínez, Á.; Alcívar, R. S. F.; González, C. O.; Herrera; S. J. (2017a). Factores que incrementan el consumo energético en las máquinas de riego de pivote central. *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN-2306-1545, Volumen 7 (4), Página 41-46.
- López, S. M.; Carmenates. H. D.; Mujica, A. Duarte, D. C. Paneque, R. P. (2017b). Nuevo criterio para el diseño hidráulico del sistema de riego de pivote central. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. ISSN -1010-2760, Vol 26 (3), Página.
- Montero, J.; Martínez, A.; Valiente, M.; Moreno, M. A.; Tarjuelo, J. M. (2012). Analysis of water application cost with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain. *Springer, Journal of Irrigation Science*, ISSN: 0342-7188, DOI-10.1007/s00271-012-0326-4, Volumen 31 (3): Pages 507-521.
- Moreno, M. A.; Medina D.; Ortega, J. F.; Tarjuelo, J. M. (2012). Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. *Agricultural Water Management* 107, pp. 112-121, 2012. DOI-10.1016/j.agwat.2012.01.016.
- Pinheiro, F. E.; Y Alves, A. W. (2017). The center pivot irrigation in minas gerais state, Brazil, under the optics of google earth. *Brazilian, Journal of Irrigation and Drainage*, ISSN: 1808-8546, DOI-10.15809/irriga.2017v22n1p249-258. Volumen 22 (2).
- Resolución No. 28/2011 del Ministerio de Finanzas y Precios. Sistema tarifario eléctrico para servicios no residenciales, pertenecientes a empresas y entidades 100% cubanas, Cuba.



Resolución No. 421/2012 del Ministerio de Finanzas y Precios. 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. Cuba.

Valín, M.I; Cameira, M. R.; Teodoro, P. R.; Pereira, L. S.: Depivot. (2012). A model for center-pivot design and evaluation. Science Elsevier Computers and Electronics in Agriculture. DOI-10.1016/j.compag.2012.06.004. Volume (87): Pages 159-170.