



## **CRITERIOS DE EFICIENCIA PARA LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS Y OPERACIÓN DEL RIEGO POR ASPERSIÓN.**

**Maiquel López Silva<sup>1\*</sup>; Dayma Carmenates Hernández<sup>1</sup>; Albi Mujica Cervantes<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Centro 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.

[maiuelcuba@yahoo.com](mailto:maiuelcuba@yahoo.com) - (053) 58717520 (\*Autor de correspondencia)

### **Resumen**

En este trabajo se plantearon diferentes criterios de eficiencia para la evaluación de proyectos y operación del riego por aspersión. La investigación se realizó a 6 pivotes centrales de la empresa Cubasoy y La Cuba. La metodología utilizada relaciona las variables climáticas, hidráulicas y energéticas por medio del consumo de la energía específica normalizada en el riego, de forma que permite caracterizar los sistemas a nivel de proyecto y de explotación. Se verificó que la energía específica normalizada en el riego osciló entre 17,16 a 30,53 kWh mm<sup>-1</sup> ha<sup>-1</sup> 100<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> para unas eficiencias de aplicaciones de 77,30 a 82,80% y una eficiencia de la energía realmente aprovechado en el riego de 8,92 a 15,80% en condiciones específicas de operación del sistema de riego.

**Palabras clave:** agua, energía, pivote central.



## Introducción

En la actualidad se encuentran deficiencias en los proyectos de la irrigación virtualmente en todas las regiones, normalmente con la ignorancia de aquéllos que los usan para la producción. Estas deficiencias pueden ser instalación, explotación, y mantenimiento al equipo (Camejo *et al.*, 2017).

En Cuba se ha reportado un incremento notable del área bajo riego con superficie cultivada superior al 45,1% de la superficie agrícola, regándose el 15,9 % con técnicas de riego por aspersión y el 5,3 % con los sistemas de riego de pivote central. No obstante, La provincia de Ciego de Ávila supera los 500 pivotes centrales que representan un área superior a las 6000 hectáreas que ha provocado un aumentado del volumen de extracción de agua en los acuíferos de un 32% y energía eléctrica de 28% (ONEI, 2010).

La eficiencia en el riego de los pivotes centrales puede ser evaluada por el Coeficiente de Uniformidad de Heerman y Hein y por la Eficiencia de Aplicación; mientras que, la energía específica en estos sistemas es a través de indicadores de potencia o consumo específico (Barreta, 2012). Por ejemplo, en Brasil pueden ser caracterizados en cuanto a su consumo específico entre 0,2 a 0,6 kWh m<sup>-3</sup> (Lima, 2008) y en la unión europea se obtienen 0,20 kWh m<sup>-3</sup> a 0,33 kWh m<sup>-3</sup> (Camacho *et al.*, 2010). Sin embargo, no son suficientes para caracterizar la eficiencia global de un sistema de riego (López, 2015).

IWA (2000) y Lima (2008) planearon desarrollaron criterios de eficiencia que posibilita un adecuado proyecto de diseño y operación de los sistema de riego para las condiciones específicas de operación. En este sentido, el objetivo de este trabajo es analizar los criterios de eficiencia para la evaluación de proyectos y operación del riego por aspersión en la empresa agropecuaria Cubasoy y cultivos varios la Cuba de la provincia de Ciego de Ávila.

## Materiales y Métodos

La investigación se desarrolló en la empresa Cubasoy y La Cuba dentro del sector hidrogeológico sur CA-II-1 y norte CA-I-8, mientras que sus niveles freáticos promedio se comportan en 9,66 m y 17,53 m respectivamente, según la serie histórica de 30 años (1985 a 2015). En la tabla 1 se muestran las características del sistema de riego a presión de pivote central que se analizaron.



**Tabla 1.** Características del sistema de riego a presión

Zona	Pivote	Aspensor	Área (ha)	Desnivel topográfico (m)	Tubería de succión*		Tubería de impulsión*		Tubería del lateral**	
					DN (mm)	L (m)	DN (mm)	L (m)	DN (mm)	L (m)
Cuba soy	2415	Rotator	63,86	18,0	203,2	17,50	203,20	8,0	168,30	451
	3120	Rotator	58,87	16,9	203,20	20,0	203,20	12,0	168,30	433
	3116	Rotator	57,25	17,7	203,20	18,30	203,20	10,0	168,30	427
La Cuba	Lango	Spray	62,30	9,1	203,20	7,65	203,20	12,0	168,30	445
	Higinio	Spray	62,50	9,0	203,20	8,0	203,20	31,0	168,30	446
	Frutero	Spray	41,00	10,1	203,20	9,30	203,20	6,50	168,30	362

\*de hierro galvanizado; \*\* de acero galvanizado; DN el diámetro nominal; L la longitud de la tubería

### Eficiencia del conjunto bomba-motor

El criterio de eficiencia en los sistemas de riego inicia en determinar el mínimo trabajo para bombear el agua utilizada por el cultivo. La energía que no se transforma en trabajo útil representa una pérdida y por ende una oportunidad para minimizarla.

La potencia hidráulica en un sistema de riego es el trabajo que realiza la bomba sobre el líquido en un segundo y la eficiencia del conjunto bomba-motor representado por la relación de la potencia hidráulica y la potencia eléctrica medida en el motor, que se expresan mediante la siguiente ecuación:

$$P_H = \gamma \cdot Q \cdot H_m \quad (1)$$

$$\eta_{bm} = \frac{P_H}{P_e} \quad (2)$$

Donde  $P_H$  es la potencia hidráulica de la bomba (kW);  $\eta_{bm}$  es el rendimiento del conjunto bomba-motor (decimal);  $\gamma$  el peso específico del agua ( $9,806 \text{ kN m}^{-3}$ );  $Q$  el caudal medido a la salida de la bomba ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ );  $H_m$  la altura manométrica de la bomba (m);  $P_e$  la potencia medida en el motor (kW).

### Potencia disipada

A partir de los criterios físicos la potencia útil para el sistema de riego se puede obtener a partir del nivel del agua en el pozo y el punto más desfavorable del área de riego (ecuación 3). Mientras que, las potencias disipadas en cada uno de los elementos del sistema de riego (succión, bomba-motor, impulsión, aspensor) en función de la eficiencia de aplicación para el 80% del área adecuadamente regada, se puede expresar por las expresiones (4; 5 y 6).



$$P_{usr} = \gamma \cdot Q \cdot h_g \frac{EA_{80}}{100} \quad (3)$$

$$P_{dbm} = \gamma \cdot Q \cdot H_m \left( \frac{1 - \eta_{bm}}{\eta_{bm}} \right) \quad (4)$$

$$P_{de} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot \Delta h}{\eta_{bm}} \quad (5)$$

$$P_{dasp} = \gamma \cdot Q \left[ H_m \left( 1 - \frac{EA_{80}}{100} \right) + \frac{EA_{80}}{100} h_{asp} \right] \quad (6)$$

Donde:  $P_{usr}$  la potencia útil del sistema de riego (kW);  $P_{dbm}$  la potencia disipada en el conjunto bomba motor (kW);  $P_{de}$  la potencia disipada en el elemento (kW);  $P_{dasp}$  la potencia disipada en los aspersores (kW);  $h_g$  el desnivel topográfico entre el nivel del agua en el pozo y el aspersor en la condición más desfavorable del sistema (m);  $EA_{80}$  la eficiencia de aplicación del agua (%);  $\Delta h$  la pérdida de carga en los elementos del sistema (m), siendo las tuberías y accesorios;  $h_{asp}$  altura manométrica del aspersor (m)

#### Criterios de eficiencia del sistema de riego

Los criterios de eficiencia se basaron en el consumo específico de la energía del sistema de riego conforme con las siguientes ecuaciones:

$$CEN_{BM} = \frac{P_e}{36 \cdot Q \cdot H_m} \quad (7)$$

$$CE_E = \frac{P_e}{36 \cdot Q} \quad (8)$$

$$CE_{U80} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot EA_{80} \cdot h_g \cdot T_R}{100 \cdot A} \quad (9)$$

$$CE_{Asp} = \frac{P_{dasp}}{3,6 \cdot Q \cdot EA_{80}} \quad (10)$$

$$CEN_R = \frac{100 \cdot P_e}{3,6 \cdot Q \cdot EA_{80} \cdot h_g} \quad (11)$$

$$E_R = \frac{EA_{80} \cdot h_g \cdot \eta_{bm}}{H_m} \quad (12)$$

Donde;  $CEN_{BM}$  el consumo de energía normalizada del conjunto bomba-motor ( $\text{kWh m}^{-3} 100^{-1}$ );  $CE_E$  el consumo de la energía específica ( $\text{kWh m}^{-3}$ );  $CE_{U80}$  el consumo de la energía útil ( $\text{kWh ha}^{-1}$ );  $CE_{Asp}$  el consumo específico en los aspersores ( $\text{kWh mm}^{-1} \text{ha}^{-1}$ );  $CEN_R$  el consumo de la energía específica normalizada en el riego ( $\text{kWh mm}^{-1} \text{ha}^{-1} 100^{-1} \text{m}^{-1}$ );  $E_R$  el porcentaje de energía realmente aprovechado (%);  $Q$  el caudal medido a la



salida de la bomba ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ );  $T_R$  el tiempo que demora el lateral en aplicar un riego (h);  $P_{dasp}$  la potencia disipada en los aspersores (kW);  $h_g$  el desnivel topográfico entre el nivel del agua en el pozo y el aspersor en la condición más desfavorable del sistema (m);  $T_R$  el tiempo que demora el lateral en aplicar un riego (h);  $A$  el área de riego del pivote central (ha) y  $H_m$  la altura manométrica de la bomba (m).

Se determinó el caudal y velocidad de líquido en la tubería de impulsión a través del medidor ultrasónico PCE-TDS-100 con una precisión de  $\pm 1,5\%$ . La potencia en el motor eléctrico se obtuvo a partir del analizador de redes MI 2392 Power Q Plus con una precisión de  $\pm (1 \% + 0.5 \text{ V})$ ,  $\pm(2 \% + 0.3 \text{ A})$ ,  $\pm(3 \% + 3 \text{ Wh})$ ,  $\pm 0.06 \text{ Coseno } \varphi$  y  $\pm(0.5 \% + 0.02 \text{ Hz})$ . Se tomó la lectura de presión en el pivote, en las torres y final del lateral mediante el manómetro digital de alta precisión Tipo CPG1500 marca WIKA con una precisión de 0,05%. Las variables climáticas se midieron a partir del Anemómetro Climático móvil AVM-40 (Kestrel 4000) con precisión de  $\pm 3\%$  en la velocidad del viento, la temperatura  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  y la humedad relativa del aire  $\pm 3 \%$ .

## Resultado y Discusión

En la tabla 2 se muestran los resultados de las variables medidas en los sistemas de riego. Se observa que los caudales en los sistemas de riego oscilan entre 60,10 a 76,67 L/s. Sin embargo, las alturas manométricas de las bombas centrifugas son superiores en la empresa Cubasoy y consecuentemente alcanzó mayor consumo eléctrico promedio de 69%. La velocidad del viento predominante en los pivotes centrales se clasifican como vientos bajos según (Tarjuelo, 2005), lo que influye favorablemente en una eficiencia de aplicación para el 80% del área adecuadamente regada de 77,30% a 82,80%.

**Tabla 2.** Medidas de las variables hidráulicas, energéticas y climáticas

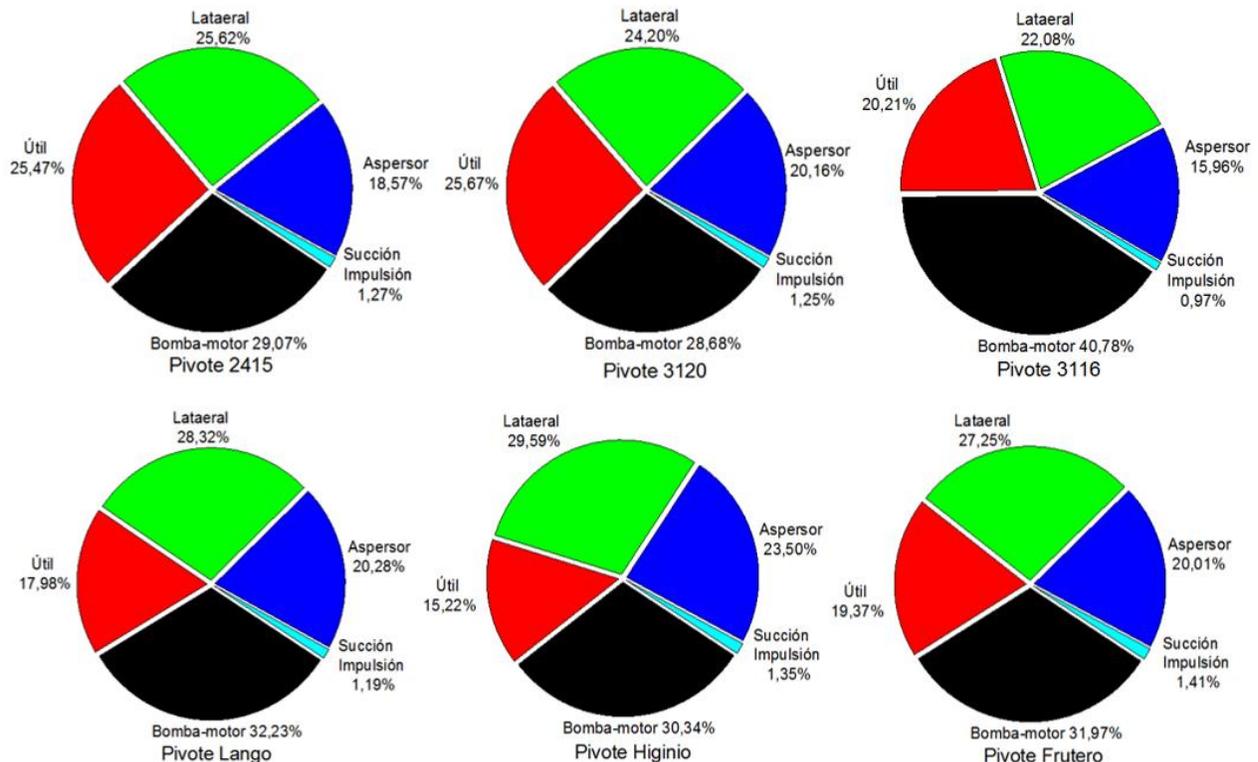
Zona	Pivote	Hidr ( $\text{L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ )	$H_b$ (m)	$T_R$ (h)	$P_e$ (kW)	$EA_{80\%}$	Condiciones climáticas		
							T ( $^\circ\text{C}$ )	HR (%)	V ( $\text{m s}^{-1}$ )
Cubasoy	2415	1,20	83,02	47	70,30	82,80	31,20	70,30	2,0
	3120	1,23	86,17	35	72,0	80,0	32,40	63,60	2,77
	3116	1,21	88,52	56	80	81,02	33,0	75,40	2,30
La Cuba	Lango	0,96	55,41	56	40,48	81,40	29,30	79,15	1,60
	Higinio	1,15	69,92	68	69,87	77,30	30,0	69,50	2,20
	Frutero	1,62	54,43	50	44,22	80,88	26,0	80,0	1,30

*Hidr es el hidromódulo;  $EA_{80\%}$  la eficiencia de aplicación para el 80% del área adecuadamente regada; T la temperatura; HR la humedad relativa del aire y V la velocidad del viento.*

La potencia disipada en cada elemento del sistema de riego se muestra en la figura 1. Se observa que el componente de mayor consumo de potencia es el conjunto bomba-motor y el 3116 consume el 40,78% de su energía eléctrica para convertirla en energía, mientras

que, la estación de bombeo 3120 solo emplea el 28,68%. Estos valores obtenidos son próximos a los alcanzados por Lima (2008) y Lima *et al.*, (2008).

En la figura 1 los laterales de los pivotes centrales las potencias disipadas oscilan de 24,20% a 29,59% con longitudes de 309 m a 451 m. El pivote 3116 dotado del aspersor Rotator alcanzó menor potencia disipada de 15,96%, dicho valor es superior respecto a los obtenidos por Lima *et al.*, (2008), parámetro que se le atribuye a los años del sistema de riego en funcionamiento sin recibir el mantenimiento adecuado. Sin embargo, las potencias útiles de los pivotes centrales de la empresa Cubasoy son superiores respecto a los de la Cuba, debido a que emplean los mayores parámetros hidráulicos caudal y altura manométrica de la bomba y consecuentemente la potencia eléctrica.



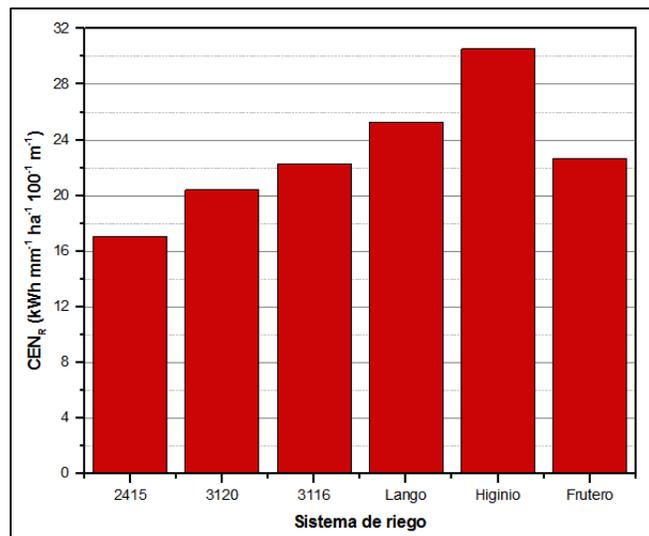
**Figura 1.** Estratificación de la potencia disipada en los sistemas de riego.

La estratificación de la potencia disipada en cada componente de los sistemas de riego proporciona una visión de la pérdida de energía, pero de acuerdo con Lima (2008) queda restringido porque considera que toda el agua bombeada es aprovechada por el cultivo, por tanto es necesario obtener indicadores de eficiencia expresados en función de la eficiencia de aplicación.

En el análisis de los aspectos energéticos en los sistemas de riego de la empresa Cubasoy y La Cuba, el pivote central más favorable al consumo de energía útil fue el de Lango con  $3,93 \text{ kWh ha}^{-1}$  y el de mayor consumo el pivote 3116 con  $9,55 \text{ kWh ha}^{-1}$  para el 80% del área adecuadamente regada al 81,40% y 81,02% de la eficiencia de aplicación del sistema de riego respectivamente. Sin embargo, los consumo de energía específica para bombear un metro cubico oscilaron entre  $0,18 \text{ kWh m}^{-3}$  a  $0,32 \text{ kWh m}^{-3}$ . Esto

resultado es favorable con respecto a los obtenidos por Lima (2008); Schons (2010) e Ibañez (2015).

El pivote con mejor desempeño del consumo de energía normalizada del conjunto bomba-motor es de 2415 con  $0,31 \text{ kWh m}^{-3} 100^{-1} \text{ m}^{-1}$ , lo que significa que el punto de funcionamiento del sistema de riego opera con una eficiencia estable superior al 80%. Sin embargo, se identificó que la selección del conjunto bomba-motor para el pivote 3116 no fue el más adecuado, porque posee el mayor consume de  $0,36 \text{ kWh m}^{-3} 100^{-1} \text{ m}^{-1}$ . No obstante, los resultados obtenidos son inferiores a los que determino Lima *et al.*, (2008), Schon *et al.*, (2012) y Ibañez (2015).



**Figura 2.** Consumo de energía específica normalizada en el riego.

En la figura 2 se muestra el consumo de energía específica normalizada en el riego. Se observa que el pivote 2415 obtiene el menor consumo de energía específica normalizada en el riego de  $17,16 \text{ kWh}$  para proporcionar un milímetro de agua en el 80 % del área adecuadamente regada, cuando la altura geométrica es inferior de 100 m. Sin embargo, en la figura 3 se muestra el porcentaje de energía realmente aprovechado y el sistema 2415 alcanza 15,80% con mayor porcentaje de energía realmente aprovechado en el riego; lo que significa que el 84,20% de la energía es disipada por el conjunto bomba-motor, las tuberías, las pérdidas de agua por fuga, los reguladores de presión, aspersores y pérdidas de agua por evaporación y arrastre.

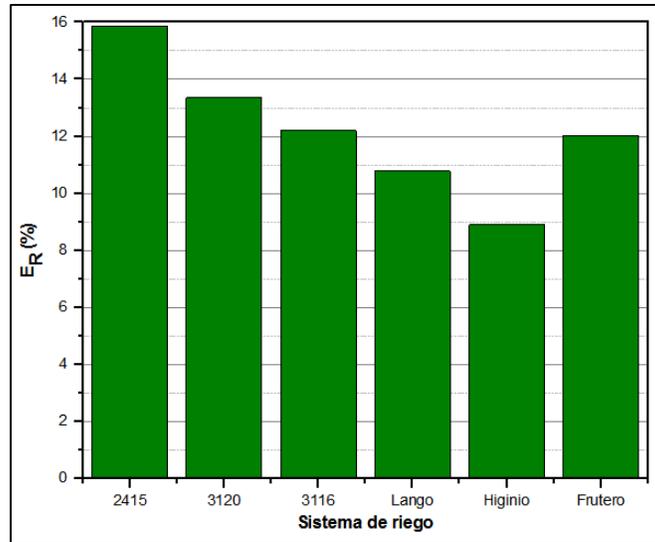


Figura 3. Porcentaje de energía realmente aprovechado.

De forma general en las figuras 1 y 2 se observa que los pivotes centrales de la empresa de Cubasoy presentan menor consumo de energía específica y a su vez mayor energía realmente aprovechada en el riego. Este resultado se debe a que a partir del análisis de sensibilidad realizado a los indicadores energéticos se obtuvo que por cada 1 kW de potencia medido en el motor eléctrico el consumo de energía específica normalizada en el riego es de  $0,25 \text{ kWh mm}^{-1} \text{ ha}^{-1} 100^{-1} \text{ m}^{-1}$ . Mientras que, por cada 1 m de desnivel topográfico entre el nivel del agua en el pozo y el aspersor en la condición más desfavorable del sistema, aumenta 0,88% el porcentaje de energía realmente aprovechado. Estos factores también se deben a las características de las curvas de las bombas centrífugas colocadas en los sistemas de riego a presión.

## Conclusiones

La estratificación de la potencia disipada en cada componente del sistema de riego permitió identificar la estación de bombeo como la de mayor consumo de energía como fue el equipo 3116 con 40,78% y el inmediato mantenimiento de los componentes. El pivote central 2415 fue el que mejor desempeño de los indicadores de eficiencia alcanzó con un consumo de energía normalizada del conjunto bomba-motor de  $0,31 \text{ kWh m}^{-3} 100^{-1} \text{ m}^{-1}$ , una energía específica normalizada en el riego de  $17,16 \text{ kWh mm}^{-1} \text{ ha}^{-1} 100^{-1} \text{ m}^{-1}$  a una eficiencia de aplicación de 82,80% para 15,80% de energía realmente aprovechado en el riego. Se confirmó que los criterios de eficiencia contribuyen a la valorización de las tecnologías de riego eficientes para la modalidad de proyecto y en las condiciones específicas de explotación para la óptima productividad del cultivo a partir de un uso sostenible de los recursos naturales; así como permite mejorar la toma de decisión para el mantenimiento previo.



## Referencias Bibliográficas

- Barreda, T. A. (2012). Método práctico de obtención de potencia y eficiencias de unidades de bombeo en operación. Ingeniería hidráulica y ambiental, vol. XXXIII (3), Página 86-97, 2012.
- Camacho, P. E.; Rodríguez, J. A.; Montesinos, P.; Carrillo, T. (2010). Ahorro de Energía en el Riego. Catedrático de Hidráulica y Riegos. Sustentabilidad del Regadío. Dossier. ETSIAM. Universidad de Córdoba. España.
- 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.
- Ibañez, C. R. (2015). Evaluación hidráulica y energética de máquinas de pivote central eléctricas para riego del cultivo de soya y maíz en CUBASOY de Ciego de Ávila. Tesis en opción al título de Master en Ciencias de Riego y Drenaje. Centro de Estudios Hidrotécnicos, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Ciego de Ávila "Máximo Gómez Báez". pp 71.
- InternationalWater Association, IWA (2000) Performance indicators for water supply services. Versão portuguesa: Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pp. 200.
- Lima, A. C. (2008). Desenvolvimento de indicadores de eficiência energética para avaliação de pivôs centrais de irrigação. Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Universidade Federal de Uberlândia: Faculdade de Engenharia Elétrica. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Uberlândia, pp. 205.
- López, S. M. (2015). Modelación matemática para el diseño hidráulico y manejo de los sistemas de riego de pivote central en la Empresa Agropecuaria CUBASOY de la provincia de Ciego de Ávila, pp 94., Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias. Centro de Estudios Hidrotécnicos, Universidad de Ciego de Ávila, Ciego de Ávila.
- Oficina Nacional de Estadística e Información de la República de Cuba, ONEI (2010). Producción y consumo de electricidad. Enero - Junio 2010. Edición de agosto.
- Schons, L. R. (2010). Critérios para o aumento do índice de eficiência nos sistemas de irrigação tipo pivô central. Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Brasil. pp. 139.
- Tarjuelo, J. M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología, Ed. MundiPrensa. Tercera edición, Madrid, España, pp. 220-436.