



SOIL AND WATER  
SUELO Y AGUA



<https://eqrcode.co/a/ztx5gu>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

# Operational Parameters in Center Pivot Machines and their Influence on the Delivery Irrigation Duty

*Los parámetros operacionales en máquinas de pivote central, su influencia en las normas de entrega*

Dr.C. Enrique Cisneros-Zayas\*, Dr.C. Felicita González-Robaina, MSc. Zenén Placeres-Miranda,  
MSc. Reinaldo Cun-González

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba.

**ABSTRACT.** The objective of the work was to study the technical-operational parameters of the electric central pivot machines and their relationship with the norms of water delivery to crops. For the analysis, seven central pivot machines were selected in three productive entities of Güira de Melena Agricultural Enterprise, which were hydraulically evaluated to know their operating status according to NC ISO 11545. The parameters studied were the uniformity coefficient, distribution uniformity and discharge efficiency as indicators of irrigation quality. The results showed that the wind has a marked influence on the evaluated technical-operational parameters, deteriorating the quality of irrigation to average values of Heermann and Hein Uniformity Coefficient of 79.39%, Distribution Uniformity<sub>25%</sub> of 64.90% and Discharge Efficiencies of 74.08%, which directly affects the low percentage of area adequately irrigated. When the gross partial norms of the operation tables for efficiencies of 85% were compared with those obtained in the field evaluations, it was possible to know that deficits in deliveries between 6 and 23 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> can occur in each irrigation duty.

**Keywords:** Hydraulic Evaluation, Irrigation Quality, Uniformity Coefficient, Distribution Uniformity, Discharge Efficiency.

**RESUMEN.** El objetivo del presente trabajo fue estudiar los parámetros técnicos - operacionales de las máquinas de pivote central eléctrica y su relación con las normas de entrega de agua a los cultivos. Para el análisis fueron seleccionadas siete máquinas de pivote central en tres entidades productivas de la Empresa Agropecuaria Güira de Melena, las cuales fueron evaluadas hidráulicamente para conocer su estado de funcionamiento según la NC ISO 11545, los parámetros estudiados fueron el Coeficiente de Uniformidad, la Uniformidad de distribución y la Eficiencia de descarga como indicadores de la calidad del riego. Los resultados mostraron que el viento tiene una influencia marcada en los parámetros técnicos-operacionales evaluados, deteriorando la calidad del riego, al obtenerse valores promedios de Coeficiente de Uniformidad de Heermann y Hein de 79,39%, Uniformidad de Distribución<sub>25%</sub> de 64,90% y Eficiencias de descarga del 74,08%, lo que incide directamente en el bajo porcentaje de área regada adecuadamente. Al comparar las normas parciales brutas de las tablas de explotación para eficiencias del 85% con las obtenidas en las evaluaciones de campo se pudo conocer que se pueden producir déficit en las entregas entre 6 y 23 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en cada riego.

**Palabras clave:** evaluación hidráulica, calidad del riego, Coeficiente de Uniformidad, Uniformidad de Distribución, Eficiencia de Descarga.

## INTRODUCTION

A main parameter to evaluate irrigation systems is the uniformity of water application on the surface of the irrigated

## INTRODUCCIÓN

Un parámetro principal para evaluar sistemas de riego es la uniformidad de aplicación de agua en la superficie del área irrigada,

\* Author for correspondence: Enrique Cisneros-Zayas, e-mail: [enrique.cisneros@boyeros.iagric.cu](mailto:enrique.cisneros@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1021-0680>

Received: 07/02/2021.

Approved: 18/06/2021.

area, directly showed in the management and performance of the crop, in the efficiency of water use, in the cost of irrigation and, therefore, in the production (Bernardo *et al.* 2009, cited by Flórez-Tuta *et al.*, 2013). The total area under irrigation in the Ministry of Agriculture productive system is 416,367 ha (Cuba, Ministry of Agriculture, 2017), where the highest growth rates in areas with use value under different irrigation techniques are, in gravity irrigation (about 80%) as well as irrigation with electric center pivot machines (42%) and drip (32%). Center pivot machines are among the most popular irrigation systems in the world, they have made irrigation easy and very effective in many areas where other irrigation methods are not suitable (González, 2006 cited by Jiménez *et al.*, 2010).

In recent years, the use of these pressurized irrigation systems has increased due to its advantages and because they are water-saving compared to traditional ones. This, undoubtedly, leads to a better operation together with the knowledge of the operating state. Alabanda (2001) states that the evaluation of an irrigation system includes the study of the uniformity of distribution and the efficiency of application, as well as the analysis of all the elements of the irrigation system. Traditionally, the distribution of water through the irrigation system has been determined by means of experimental measurements of water collected on a network of rain gauges placed on the surface of the soil at different points of the plot and, logically, provided by the irrigation system under the conditions of normal operation. During the evaluation, a specific and perfectly referenced methodology is followed according to the existing irrigation system (Stambouli *et al.*, 2014). The detailed difference in the water collected by the rain gauges during the evaluation of the system is expressed by: Uniformity Coefficient (CU), Distribution Uniformity (UD), Variation Coefficient (CV).

The concept of irrigation uniformity contemplates the difference in the water collected between the different points of an irrigated surface. The methodology followed for the measurement and quantification of irrigation uniformity in sprinkler systems is systematized and referenced (Montero, 1999) where all researchers agree that field evaluations are the way to proceed for its determination. Other parameters to express irrigation uniformity (UD and Cv) are based on analogous principles, that is, they compare the point values obtained throughout the water distribution achieved in the test. Of all of them, CU is widely used and its use is mandatory in all sprinkler irrigation uniformity studies (Tarjuelo, 1999).

According to Tarjuelo (2005), when the objective is to identify the irrigation systems quality, the management aspects that try to achieve the adequacy of the irrigation in terms of the moment and the water volume to be irrigated can be omitted. In this case, only the concepts of CU, UD and Ed are used. At present in Cuba, the increase in agricultural production is of vital importance and the growing demand for food encourages the introduction of new technologies and the renewal produced in the whole of hydraulic pivot machines constitutes a step in that direction.

reflejándose directamente en el manejo y desempeño del cultivo, en la eficiencia del uso del agua, en el costo del riego y por tanto de la producción (Bernardo *et al.* (2009) citado por Flórez *et al.* (2013).

El área total bajo riego en el sistema productivo del Ministerio de la Agricultura es de 416 367 ha según Minag-Cuba (2017), donde los mayores crecimientos en áreas con valor de uso bajo diferentes técnicas de riego son, en el riego por gravedad (cerca del 80%) así como en el riego con máquinas de pivote central eléctricos (42%) y el goteo (32%).

Las máquinas de pivote central están entre los sistemas de riego más populares en el mundo, ellas han hecho fácil y muy eficaz el riego en muchas áreas donde otros métodos de irrigación no son adecuados (González (2006 citado por Jiménez *et al.* (2012).

En los últimos años se ha incrementado el uso de estos sistemas de riego presurizados por las ventajas que presentan y por ser economizadores de agua con respecto a los tradicionales. Esto conlleva indudablemente a una operación correcta de los mismos unido al conocimiento del estado de funcionamiento. Alabanda (2001) plantea que la evaluación de un sistema de riego comprende el estudio de la uniformidad de distribución y la eficiencia de aplicación, así como el análisis de todos los elementos del sistema de riego.

Tradicionalmente, la distribución de agua por el sistema de riego se ha determinado mediante medidas experimentales de agua recogida sobre una red de pluviómetros colocados en la superficie del suelo en distintos puntos de la parcela y, lógicamente, aportada por el sistema de riego en las condiciones normales de funcionamiento; durante la evaluación se sigue una metodología concreta y perfectamente referenciada en función del sistema de riego existente (Stambouli *et al.*, 2014). La diferencia puntual en el agua recogida por los pluviómetros durante la evaluación del sistema se expresa mediante: Coeficiente de Uniformidad (CU), Uniformidad de distribución (UD), Coeficiente de Variación (CV).

El concepto de uniformidad de riego contempla la diferencia de agua recogida entre los distintos puntos de una superficie regada. La metodología seguida para la medida y cuantificación de la uniformidad de riego en sistemas de aspersión, se encuentra sistematizada y referenciada (Montero *et al.* (1999), donde todos coinciden que las evaluaciones de campo son el modo de proceder para su determinación.

Otros parámetros para expresar la uniformidad de riego (Uniformidad de Distribución (UD) y Coeficiente de Variación (Cv)) se fundamentan en principios análogos, es decir, comparan los valores puntuales obtenidos a lo largo de la distribución del agua alcanzada en el ensayo. De todos ellos el CU es muy empleado y su uso es obligatorio en todos los estudios de uniformidad de riego por aspersión (Tarjuelo, 1999).

Según Tarjuelo (2005), cuando el objetivo que se persigue es identificar la calidad del riego de los sistemas, puede prescindirse de los aspectos de manejo que tratan de conseguir la adecuación del riego en cuanto al momento y el volumen a aportar. En ese caso, únicamente se utilizan los conceptos de coeficiente de uniformidad (CU), uniformidad de distribución (UD) y eficiencia de descarga (Ed).

En la actualidad cubana es de importancia vital el aumento de la producción agrícola, la demanda creciente de alimentos origina la introducción de nuevas tecnologías y la renovación producida en el parque de máquinas de pivote hidráulico un paso en esa dirección.

On the operation, the proper application of irrigation is when the water needs of the crop are met (Placeres *et al.*, 2013). For this reason, the massive introduction in agricultural production of machines, affected by problems of deficient technical parameters, required a study of the behavior in the delivery of the doses. Consequently, that motivated a series of actions to review the technological sheets and the correct placement of the emitters' module, for guaranteeing the quality of artificial rain in the operation of spray irrigation, technology used in Cuba, where those modules are manufactured.

Güira de Melena Municipality has a total area under irrigation of 5600.27 ha, of which 5539.22 with use value. At the end of 2019, the Irrigation and Mechanization Center reported 5328.15 ha in exploitation under irrigation and of them, the electric central pivot machines represent 25% with more than 15 years of operation. There, the irrigation quality parameters have been deteriorated, affecting the norms of water delivery to the crops. That observation has been made by several farmers who associate the low productions obtained to the irrigation quality reduction. That is why the objective of this work was to study the technical-operational parameters of the central pivot machines and their relationship with the delivery irrigation rates to the crops.

## MATERIALS AND METHODS

The work was carried out at Güira de Melena Agricultural Enterprise in Artemisa Province, with geographic coordinates 22° 44' 6.39", North latitude and 82° 30' 11.54" West longitude (Figure 1). The height above mean sea level is 8 m. Seven central pivot machines located in different areas within Güira de Melena Agricultural Enterprise were selected for the study; two in the South zone, two in the Center and three in the North zone, which are part of two productive forms, the Basic Unit of Cooperative Production (UBPC) and the Agricultural Production Cooperative (CPA). In Figure 1, the evaluated machines and their location in the entities studied in Güira de Melena municipality are shown.

Según Placeres *et al.* (2013)2013, en la explotación, la aplicación adecuada del riego es cuando se satisfacen las necesidades hídricas del cultivo. Por ello la introducción masiva de máquinas en la producción agrícola afectadas por problemas de deficientes parámetros técnicos, imponía un estudio del comportamiento en la entrega de las dosis, que ha motivado una serie de acciones dirigidas a la revisión de las cartas tecnológicas y la colocación correcta del módulo de emisores, garantizando la calidad de la lluvia artificial en el funcionamiento del riego con spray, tecnología usada, y que se producen en nuestro país.

El municipio Güira de Melena posee un área total bajo riego de 5 600,27 ha, de ella 5 539,22 con valor de uso, al cierre del 2019 el Establecimiento de Riego y Mecanización informa que bajo riego en explotación existen 5328,15 ha, de estas, las máquinas de pivote central eléctricas representan el 25% con más de 15 años de explotación y donde en los últimos tiempos se han visto deteriorados los parámetros de calidad del riego incidiendo en las normas de entrega a los cultivos, observación señalada por varios productores y que lo asocian con las bajas producciones obtenidas. Es por ello que el objetivo del presente trabajo es estudiar los parámetros técnicos–operacionales de las máquinas de pivote central y su relación con las normas de entrega de agua a los cultivos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en la Empresa Agropecuaria Güira de Melena de la provincia Artemisa, con coordenadas geográficas 22° 44' 6,39», latitud Norte y 82° 30' 11,54" longitud Oeste (Figura 1). La altura sobre el nivel medio del mar es de 8 m.

Para el estudio fueron seleccionadas siete máquinas de pivote central ubicadas en diferentes zonas dentro de la Empresa Agropecuaria Güira de Melena; dos en la zona Sur, dos en la Centro y tres en la zona Norte las que forman parte de dos formas productivas, la Unidad Básica de Producción Cooperativa (UBPC) y Cooperativa de Producción Agropecuaria (CPA). En la figura 1 se muestra las máquinas evaluadas y su ubicación de las entidades estudiadas del municipio Güira de Melena.

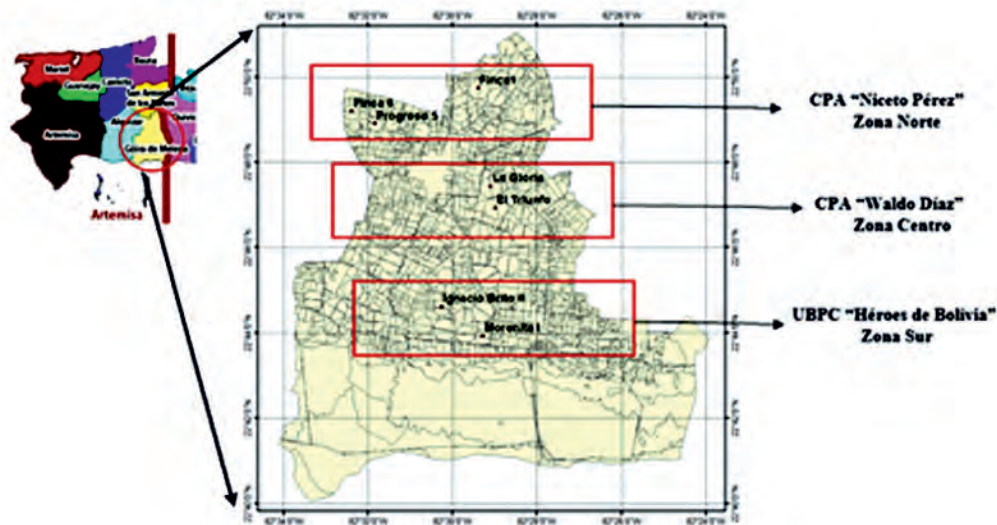


FIGURE 1. Geographical location of the irrigation systems studied.  
FIGURA 1. Ubicación geográfica de los sistemas de riego estudiados.

To fine-tune the sprinkler irrigation system with the selected central pivot machine and to define the correct location of the nozzles, the PIVOT program (García, 2006) was run. To determine the maximum speed of advance and the field evaluations, the Cuban Standard NC-ISO 11545 of 2007 was used.

The uniformity coefficient of Heermann and Hein (1968), is a modification of Christiansen's Uniformity Coefficient (1942) to evaluate pivot systems, where each collector represents a different area. Therefore, its value affects to a greater or lesser extent the quality of irrigation of the machine.

$$CU_h = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |C_i - M_C|}{\sum_{i=1}^n C_i \cdot D_i} \right] \cdot 100(\%) \quad (1)$$

The Coefficient of Variation Uniformity (CU<sub>v</sub>) of Bremond and Molle (1995) is a parameter that includes the coefficient of variation within the CU<sub>h</sub>. Therefore, it is a more sensitive indicator to the distribution of the irrigation sheet.

$$CU_v = \left[ 1 - \frac{1}{\frac{\sum C_i D_i}{D_i}} \cdot \sqrt{\sum \left( C_i - \frac{\sum C_i D_i}{D_i} \right)^2 D_i} \right] \cdot 100(\%) \quad (2)$$

Where:

CU<sub>H</sub> - Heermann and Hein uniformity coefficient (%).

CU<sub>v</sub> - variation uniformity coefficient (%).

*n* - number of collectors used in the data analysis.

*C<sub>i</sub>* - Value collected by each collector.

*D<sub>i</sub>* - distance that the collector is from the pivot or the area that it represents within the total area of the machine

*i* - number assigned to designate a particular collector, usually starting with the collector closest to the pivot (*i* = 1) and ending with *i* = *n* for the collector farthest from the point.

*M<sub>c</sub>* - measured average volume (mass or depth) of the collected water. It is calculated as:

$$M_C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (3)$$

A plot is considered to be well watered when a CU<sub>H</sub> between 85 and 90% is achieved. With values higher than 90% the plot is very well watered. On the other hand, with CU<sub>H</sub> values lower than 85%, it is considered that the pivot does not water adequately. A CU<sub>v</sub> value of 80% is accepted as a minimum to consider that a pivot irrigates adequately (Tarjuelo, 1999). The uniformity of distribution was calculated according to Merriam and Keller (1978, cited by Tarjuelo, 2005), and is defined as:

$$UD_{25\%} = 100 \cdot \frac{V_{25\%}}{V} = \frac{100}{V} \left( \frac{\sum C_i D_i}{\sum D_i} \right)^{25\%} \quad (4)$$

Para la puesta a punto del sistema de riego por aspersión con máquina de pivote central seleccionada se corrió el programa PIVOT de García (2006), para la definición de la ubicación correcta de las boquillas. Para la determinación de la velocidad máxima de avance y las evaluaciones de campo se utilizó la Normas Cubana: NC ISO 11545: 2007 (2007).

El coeficiente de uniformidad de Heermann & Hein (1968), es una modificación del Coeficiente de uniformidad de Christiansen (1942), para evaluar los sistemas de pivote, donde cada colector representa un área diferente. Por tanto, su valor incide en mayor o menor medida en la calidad de riego de la máquina.

$$CU_h = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |C_i - M_C|}{\sum_{i=1}^n C_i \cdot D_i} \right] \cdot 100(\%) \quad (1)$$

El coeficiente de uniformidad de Variación (CU<sub>v</sub>) de Bremond & Molle (1995), es un parámetro que incluye el coeficiente de variación dentro del CU<sub>h</sub>. Por tanto, es un indicador más sensible a la distribución de la lámina de riego.

donde:

CU<sub>H</sub> - es el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (%);

CU<sub>v</sub> - es el coeficiente de uniformidad de variación (%);

*n* - es el número de colectores usados en el análisis de los datos;

*C<sub>i</sub>* - Valor recogido por cada colector;

*D<sub>i</sub>* - Es la distancia en que se encuentra el colector del pivote o el área que este representa dentro del área total de la máquina. (m);

*i* - número asignado para designar un colector en particular, normalmente comienza por el colector más próximo al pivote (*i* = 1) y terminando con *i* = *n* para el colector más alejado del punto;

*V<sub>i</sub>* o *L<sub>i</sub>* - el volumen (o alternativamente la masa o la profundidad) del agua recogida en el colector *i* (mL);

*S<sub>i</sub>* - es la distancia del colector *i*. al punto de pivote (m);

*M<sub>c</sub>* - es el volumen promedio medido (masa o profundidad) del agua recogida. Se calcula como:

$$M_C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i D_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (3)$$

Se considera que una parcela está bien regada cuando se logra un CU<sub>H</sub> entre 85 y 90%. Con valores superiores al 90% la parcela está muy bien regada. En cambio, con valores de CU<sub>H</sub> menores de 85% se considera que el pivote no riega adecuadamente. Se acepta como mínimo un valor de CU<sub>v</sub>, del 80% para considerar que un pivote riega adecuadamente; (Tarjuelo, 1999).

La uniformidad de distribución se calculó según Merriam y Keller (1978 citado por Tarjuelo (2005), y se define como:

$$UD_{25\%} = 100 \cdot \frac{V_{25\%}}{V} = \frac{100}{V} \left( \frac{\sum C_i D_i}{\sum D_i} \right)^{25\%} \quad (4)$$

where:

$UD$ : Distribution Uniformity, (%).

$V_{25\%}$  - average volume collected from 25% of the lowest values (mL)

$V$  - average of all values (mL)

### Discharge efficiency

The discharge efficiency ( $Ed$ ) of the project can be determined using the average value of all the values obtained, in determining the range of the emitter (Tarjuelo, 2005).

$$Ed = \frac{\text{sheet of the } \frac{1}{4} \text{ of the lower values}}{\text{mean of the obtained values}} \quad (5)$$

According to Tarjuelo (2005), the discharge efficiency or proportion of the water that reaches the ground is obtained by dividing the average height collected by the rain gauges (AMR) by the average height discharged by the emitters (AMD).

$$Ed = \frac{AMR}{AMD} \quad (6)$$

The mean unloaded height (AMD) is determined according to the expression proposed by Tarjuelo (2005).

$$AMD = \frac{Qa * Tr}{A} \quad (7)$$

Where:

$AMD$ : Average unloaded height (mm).

$Qa$ : Discharge flow ( $L \cdot h^{-1}$ ).

$Tr$ : time the pivot takes to make one complete turn (h).

$A$ : Irrigated area ( $m^2$ ).

The mean AMR collected height (mm) was determined by dividing the weighted mean volume by the collecting area of the rain gauge used in the test. The result is converted to mm (1 cm = 10 mm).

$$Vp = \frac{\sum_{i=1}^n Vi * Si}{\sum_{i=1}^n Si} \quad (8)$$

Where:

$Vp$ : weighted average volume of all observations.

(1 mL = 1 cm<sup>3</sup>)

$n$ : number of collectors used.

$i$ : number set to designate a particular collector, normally begins with the collector closest to the pivot ( $i = 1$ ) and ends with ( $i = h$ ) for the collector farthest from the point.

$Vi$ : volume (or alternatively the mass or depth) of the water collected in the collector (i). (mL)

$Si$ : distance from the collector (i) to the pivot point. (m)

$Ac$ : collector area. (cm<sup>2</sup>).

$$AMR = \frac{Vp}{Ac} \quad (9)$$

For the definition of the percentages of irrigated areas the criterion of Tarjuelo (2005) was used, where:

donde:

$UD$ : Uniformidad de Distribución (%);

$V_{25\%}$  - promedio del volumen recogido del 25% de los valores más bajos (mL);

$V$  - promedio de todos los valores (mL).

### Eficiencia de descarga

La eficiencia de descarga ( $Ed$ ) para proyecto se puede determinar utilizando el valor promedio de todos los valores obtenidos, en la determinación del alcance del emisor (Tarjuelo, 2005).

$$Ed = \frac{\text{sheet of the } \frac{1}{4} \text{ of the lower values}}{\text{mean of the obtained values}} \quad (5)$$

Según Tarjuelo (2005), la eficiencia de descarga o proporción del agua que llega al suelo se obtiene dividiendo la altura media recogida por los pluviómetros (AMR) entre la altura media descargada por los emisores (AMD).

$$Ed = \frac{AMR}{AMD} \quad (6)$$

La altura media descargada (AMD) se determina según la expresión propuesta por Tarjuelo (2005).

$$AMD = \frac{Qa * Tr}{A} \quad (7)$$

donde:

$AMD$ : Altura media descargada (mm);

$Qa$ : Caudal de descarga ( $L \cdot h^{-1}$ ). Medido con un caudalímetro ultrasónico;

$Tr$ : tiempo que tarda el pivote en dar una vuelta completa (h);

$A$ : Superficie regada ( $m^2$ ).

La altura media recogida AMR (mm) se determinó dividiendo el volumen medio ponderado por el área de captación del pluviómetro utilizado en la prueba. El resultado se convierte en mm (1 cm= 10 mm).

$$Vp = \frac{\sum_{i=1}^n Vi * Si}{\sum_{i=1}^n Si} \quad (8)$$

donde:

$Vp$ : volumen promedio ponderado de todas las observaciones

(1 mL = 1 cm<sup>3</sup>);

$n$ : es el número de colectores utilizados;

$i$ : número fijado para designar un colector particular, normalmente comienza por el colector más próximo al pivote ( $i=1$ ) y termina con ( $i=h$ ) para el colector más alejado del punto;

$Vi$ : el volumen (o alternativamente la masa o profundidad) del agua recogida en elcolector (i) (mL);

$Si$ : distancia del colector (i) al punto del pivote (m);

La altura media recogida (AMR) se determina según la expresión propuesta por Tarjuelo (2005).

$$AMR = \frac{Vp}{Ac} \quad (9)$$

donde:

- Adequately Irrigated Area (ARA): the sheet that is within the range of 10% above and below the middle sheet.
- Excessively Irrigated Area (ARE): the sheet that is above 110% of the middle sheet.
- Insufficiently Irrigated Area (ARI): the sheet that is below 90% of the middle sheet.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Pluviometry Evaluation of the Different Irrigation Systems Studied

As part of the work, the different irrigation machines in Güira de Melena Agricultural Enterprise were evaluated. The result of these evaluations can be seen in Table 1, where the Heermann and Hein uniformity coefficient ( $CU_{H-H}$ ) ranged from 78.6% to 81.4%. According to Tarjuelo (2005), these values are classified as inadequate and bad, indicating that the plot is not adequately watered. The uniformity of distribution ( $UD_{25\%}$ ), that represents the percentage of the middle sheet of 25% of the least irrigated area, ranged from 60.01 to 70.88%, which is considered high.

Ac: área del colector ( $cm^2$ ).

Para la definición de los porcentos de áreas regadas se utilizó el criterio de Tarjuelo (2005) donde:

- Área Regada Adecuadamente (ARA): la lámina que está dentro del rango del 10% por encima y por debajo de la lámina media.
- Área Regada Excesivamente (ARE): la lámina que está por encima del 110% de la lámina media.
- Área Regada Insuficientemente (ARI): la lámina que está por debajo del 90% de la lámina media.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Evaluación pluviométrica a los diferentes sistemas de riego estudiados

Como parte del trabajo fueron evaluadas las diferentes máquinas de riego en la Empresa Agropecuaria Güira de Melena. El resultado de dichas evaluaciones se puede apreciar en la Tabla 1, donde el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein ( $CU_{H-H}$ ) varió de 78,6% a 81,4%. Según Tarjuelo (2005) estos valores se clasifican como inadecuados y malos, indicando que la parcela no está adecuadamente regada.

La uniformidad de distribución ( $UD_{25\%}$ ), que representa el porcentaje de la lámina media del 25% del área menos regada, varió de 60,01 a 70,88%, considerándose elevado.

TABLE 1. Technical parameters of irrigation quality  
TABLA 1. Parámetros técnicos de calidad del riego

Site	Middle sheet (mm)	Heermann & Hein Uniformity Coefficient (%)	Bremond & Molle Variation Uniformity Coefficient (%)	Uniformity Distribution ( $UD_{25\%}$ )	Real Ed (%)	Mean wind speed (m s <sup>-1</sup> )
I. Brito II	16,42	78,8	69,27	64,80	75,15	5,3
Morenita I	17,34	81,4	72,87	65,50	77,34	3,2
La Gloria	17,77	77,4	68,79	60,01	71,18	4,7
El Triunfo	15,30	79,6	72,89	66,38	75,57	3,8
Progreso 5	16,26	80,1	72,00	64,23	74,16	3,8
Finca I	17,22	78,6	70,25	62,48	71,15	4,8
Finca 6	15,94	79,8	71,87	70,88	73,98	3,3
Mean	16,61	79,39	71,13	64,90	74,08	4,13

The indicator that is related to the water that reaches the crop is the discharge efficiency (Ed). As it can be seen, it varied between 71.15% and 77.34%, which is low, taking into account that in the central pivot machines this value is considered good from 85% onwards. Regarding the coefficient of uniformity of variation (CUV), the values reached a range of 68.79% to 72.89%. This statistical parameter, according to Bremond and Molle (1995), is based on the coefficient of variation, due to that it is more sensitive to extreme variations in the sheet collected by the collectors than the  $CU_{H-H}$ . In general, it can be seen that the mean wind speed during the tests ranged from 3.2 m s<sup>-1</sup> to 5.3 m s<sup>-1</sup>, values that influence the parameters measured.

A study carried out by Playán (2012, cited by Cisneros *et al.* 2013) relating the wind speed with the uniformity coefficient expresses that as the speed increases the uniformity coefficient deteriorates, that is why it is recommended to suspend irrigation

El indicador que está relacionado con el agua que llega al cultivo es la eficiencia de descarga (Ed) como se aprecia la misma varió entre 71,15 y 77,34% los que resultan bajos teniendo en cuenta que en las máquinas de pivote central este valor se considera bueno del 85% en adelante. En cuanto al Coeficiente de uniformidad de variación ( $CU_v$ ), los valores alcanzaron un rango de 68,79 a 72,89%. Este parámetro estadístico, según Bremond & Molle (1995), está basado en el coeficiente de variación, por lo que es más sensible a las variaciones extremas de lámina recogida por los colectores que el  $CU_{H-H}$ . De modo general se puede apreciar que la velocidad media del viento durante las pruebas varió de 3,2 m s<sup>-1</sup> a 5,3 m s<sup>-1</sup>, valores que influyen en los parámetros medidos.

Estudio realizado por Playán (2012 citado por Cisneros *et al.* (2013), relacionando la velocidad del viento con el coeficiente de uniformidad expresa que a medida que aumenta la velocidad el co-

with speeds above  $2.5 \text{ m s}^{-1}$ , for his part, Tarjuelo (2005) states that under these conditions, water losses due to evaporation and carry-over can reach 30%.

According to Shilo (2000) and Tarjuelo (1999, cited by Naroua *et al.*, 2012) the results obtained indicate that all the machines are operating below the minimum values of 75% and 85% for the Uniformity of Distribution and Uniformity Coefficient, respectively. Similar results have been reported by Placeres (2011), Aguilar *et al.* (2012) and Cun *et al.* (2019) in field evaluations carried out on irrigation machines for the same study region.

Taking into account the restrictions in the use of water for irrigation and the low availability of such an important resource in the municipality of Güira de Melena, the use of central pivot machines is an adequate solution, but considering their years of operation, frequent evaluation is required to know and specify the exploitation parameters that allow improving irrigation management.

This is confirmed by Jiménez (2012) and Abd el-Wahed *et al.* (2015), stating that central pivot machines, like other irrigation equipment, need to be evaluated to verify the parameters provided by the manufacturer when they are purchased. Moreover, given that the working pressures, the spacing between sprayers and the height over the ground also influence these parameters, it is necessary to monitor the quality of irrigation during the machines' useful life.

As it can be seen in Table 2, in the joint analysis of the distribution of the percentages of the area, the adequately irrigated area reached the highest average value (55.4%), followed by the excessive area (13.3%). The insufficiently irrigated area reaches an average value of 31.7%

eficiente de uniformidad se deteriora, es por ello que se recomienda suspender el riego con velocidades por encima de los  $2,5 \text{ m s}^{-1}$ , por su parte Tarjuelo (2005) plantea que bajo estas condiciones las pérdidas de agua por evaporación y arrastre pueden llegar a un 30%.

De acuerdo con Shilo (2000) y Tarjuelo (1999), citado por Naroua *et al.* (2012), los resultados obtenidos indican que todas las máquinas, se encuentran funcionando por debajo de los valores mínimos del 75 y del 85% para la Uniformidad de Distribución y Coeficiente de Uniformidad respectivamente.

Resultados similares han sido informados por Placeres (2011); Aguilar (2012) y Cun *et al.* (2019) en evaluaciones de campo efectuadas en máquinas de riego para la misma región de estudio.

Teniendo en cuenta las restricciones en el uso del agua para riego y la baja disponibilidad de tan importante recurso en el municipio de Güira de Melena, la utilización de máquinas de pivote central es una solución adecuada, pero teniendo en cuenta los años de operación de las mismas se requiere de una evaluación frecuente para conocer y precisar los parámetros de explotación que permitan mejorar la gestión del riego.

Lo anterior es confirmado por Jiménez *et al.* (2012) y Abd El *et al.* (2015), que las máquinas de pivote central, como otros equipos de riego, necesitan ser evaluadas con los objetivos de verificación de los parámetros suministrados por el fabricante cuando es adquirido y que las presiones de trabajo, el espaciamiento entre difusores y la altura del mismo sobre el terreno también influyen en dichos parámetros por lo que es necesario dar seguimiento de la calidad del riego durante su vida útil.

Como se puede observar en la tabla 2, en el análisis conjunto la distribución de los porcentos del área, se aprecia que el área regada adecuadamente alcanzó el valor promedio más elevado (55,4%), seguida del área excesiva (13,3%). El área regada insuficientemente alcanza un valor medio de 31,7%.

**TABLE 2. Percentage of irrigated areas distribution (Adequate, Insufficient and Excessive)**  
**TABLA 2. Distribución del porcentaje de áreas regadas (Adecuada, Insuficiente y Excesiva)**

Site	Adequate Irrigated area (%)	Excessive Irrigated area (%)	Insufficient irrigated area (%)
<b>UBPC "Héroes de Bolivia"</b>			
Ignacio Brito II	52	13	35
Morenita I	59	12	29
<b>CPA "Waldo Díaz"</b>			
La Gloria	51	16	33
El Triunfo	56	12	32
<b>CPA "Niceto Pérez"</b>			
Progreso 5	58	12	30
Finca 1	55	14	31
Finca 6	57	11	32
Mean	55,4	13,3	31,7

When correlating the percentages of adequately irrigated area (ARA) with the wind speeds, an inverse linear relationship was found with a coefficient of determination greater than 85%, which can be verified in Figure 2. As the wind speed increases, the percentages of adequately irrigated area are reduced, a climatic variable that must be taken into account because it is decisive in the quality of irrigation and in the discharge efficiency.

Al correlacionar los porcentos de área regada adecuadamente (ARA) con las velocidades del viento se encontró una relación lineal inversa con un coeficiente de determinación superior al 85%, lo que puede comprobarse en la figura 2. En la medida que aumenta la velocidad del viento se reducen los porcentos de área regada adecuadamente, variable climática que debe tenerse en cuenta pues es determinante en la calidad del riego y en la eficiencia de descarga.

Authors such as Tornes *et al.* (2009); Jiménez *et al.* (2010) and Mujica *et al.* (2014), evaluating exploitation parameters in central pivot machines in different areas of the country, report similar results where they give great importance to the wind as a climatic variable that distorts the water sheet and influences the quality of irrigation and therefore, the percentage of areas irrigated adequately. Similar results were obtained by Pérez *et al.* (2003); they evaluated central pivot machines and emitters in Güira de Melena Municipality and obtained a decrease in CU,  $UD_{25\%}$  and the percentage of ARA with the increase in wind speed.

Autores como Tornes *et al.* (2009); Jiménez *et al.* (2012) y Mujica *et al.* (2014), evaluando parámetros de explotación en máquinas de pivote central en diferentes zonas del país informan resultados similares donde le confieren gran peso al viento como variable climática distorsionadora de la lámina de agua e influye en la calidad del riego y por tanto de los porcentos de áreas regadas adecuadamente. Similares resultados fueron obtenidos por Pérez *et al.* (2003), donde evaluando máquinas de pivote central y emisores en el municipio de Güira de Melena obtuvo una disminución del CU,  $UD_{25\%}$  y el porcentaje de ARA con el aumento de la velocidad del viento.

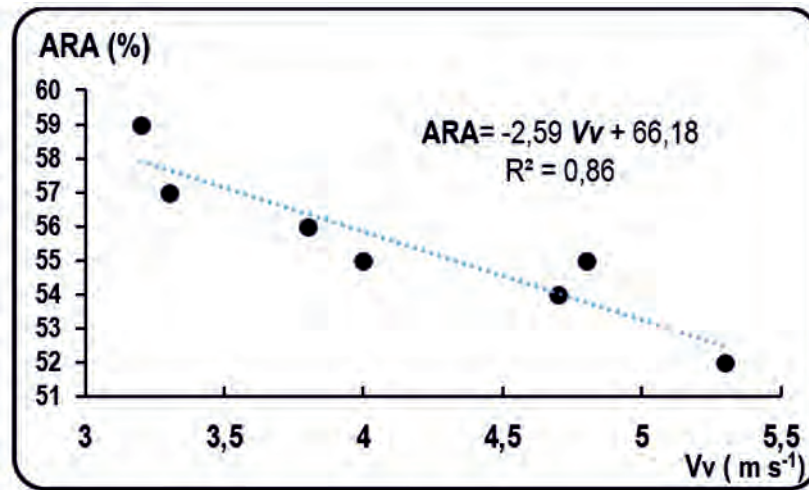


FIGURE 2. Relationship adequately irrigated area (%) and wind speed.  
FIGURA 2. Relación porcentaje de área regada adecuadamente y velocidad del viento.

### Relationship between Uniformity Coefficient and Discharge Efficiency

In Figure 3 it is possible to observe the trend in the behavior of the uniformity coefficient (CU) and the discharge efficiency (Ed) in all the irrigation machines evaluated; as it is shown, there are irrigation systems that with high uniformity coefficients present low discharge efficiency. As it can be seen, point 2 has a uniformity coefficient of approximately 78.6%, however, it has the same discharge efficiency as point 1 with lower CU. Something similar happens with point 4: despite having a CU of almost 80%, it has lower discharge efficiency than point 3. That behavior is an element to be taken into account in the operation, because many farmers give greater weight to the CU and, as shown in the present study, the distribution of water in the plot may be adequate, however, the water level that reaches the ground is not enough to satisfy the demand of the crop, since efficiencies of 85% are considered in the operation tables for center pivot machines.

Studies carried out by González (2012) on the efficient use of water in different irrigation systems report that irrigation techniques with good uniformity coefficient present low discharge efficiencies, and give as an example the case of the side roll and the central pivot machine. This is not the case for the reel with an irrigation wing due to the lower height of the nozzles with respect to the ground.

### Relación Coeficiente de Uniformidad–Eficiencia de descarga

En la Figura 3 se puede observar la tendencia en el comportamiento del coeficiente de uniformidad (CU) y la eficiencia de descarga (Ed) en todas las máquinas de riego evaluadas, como se muestra existen sistemas de riego que con coeficientes de uniformidad elevados presentan baja eficiencia de descarga, como se puede apreciar el punto 2 tiene un coeficiente de uniformidad aproximadamente de 78,6% sin embargo presenta la misma eficiencia de descarga que el punto 1 con menor CU. Algo similar sucede con el punto 4 a pesar de tener un CU casi del 80% tiene una menor eficiencia de descarga que el punto 3. Dicho comportamiento es un elemento a tener en cuenta en la explotación, porque muchos productores le conceden un mayor peso al CU y como se muestra en el presente estudio el reparto del agua en la parcela puede ser adecuado sin embargo la lámina de agua que llega al suelo no es suficiente para satisfacer la demanda del cultivo al considerarse eficiencias del 85% en las tablas de explotación para las máquinas de pivote central.

Estudios realizados por González (2012), sobre el uso eficiente del agua en diferentes sistemas de riego informa que técnicas de riego con un coeficiente de uniformidad bueno presentan eficiencias de descarga bajas, y pone como ejemplo el caso del lateral rodante y la máquina de pivote central, no así para el enrollador con ala pivovana por tener una menor altura de las boquillas con respecto al suelo.



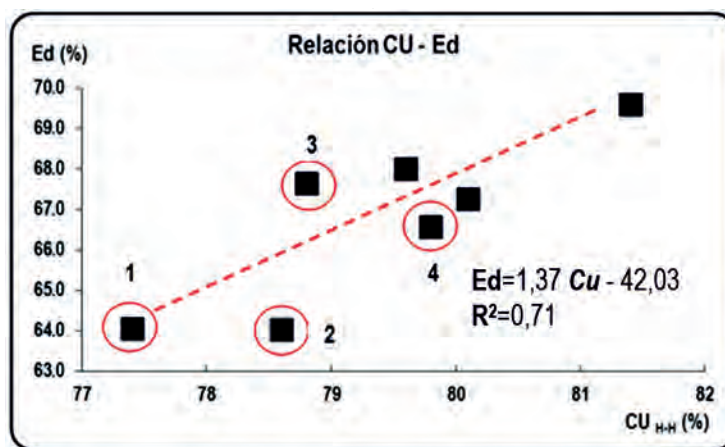


FIGURE 3. Relationship between Heermann-Hein Uniformity Coefficient and Discharge Efficiency  
 FIGURA 3. Relación entre el Coeficiente de Uniformidad de Heermann – Hein y la Eficiencia de descarga.

In a work on storage efficiency in irrigated agricultural soils in Cuba (López *et al.*, 2010), relating this parameter to discharge efficiency, it is specified that for an irrigation system discharge efficiency of 80% and a productive limit of 85% of the field capacity, storage efficiency is reduced in a range from 4% for clay soils to 10% for sandy soils. With the reduction of the discharge efficiency and the increase of the productive limit, the range of reduction of the irrigation water application efficiency becomes greater (between 15% and 60%), an element that must be taken into account because, to achieve high storage efficiencies, work should be done with discharge efficiencies greater than 85%.

In the operation of sprinkler irrigation systems in agriculture, more importance has been given to uniformity than to efficiency. Such is the case, that Tarjuelo (2005) establishes a classification of the quality of irrigation based on the Coefficient of Uniformity, where it states that, if this parameter is greater than 90%, the plot is very well watered, when it ranges between 85% and 90% is well watered and when it is less than 85% it is badly watered. However, production practice has shown that sprinkler irrigation systems with good uniformity show drops in the yields of irrigated crops.

### Relationship between Uniformity Coefficient and Distribution Uniformity<sub>25%</sub>

Among the irrigation quality parameters, those that are closely linked are the Coefficient of Uniformity and the Uniformity of Distribution<sub>25%</sub>, the latter is stricter since it has to do with the lower quarter or the part of the plot that receives less water and is used, according to Keller and Bliesner (1990), as an indicator of the magnitude of the problems in the water application process.

Figure 4 shows this linear relationship with a determination coefficient of 60%, where there is a tendency to increase the Distribution Uniformity<sub>25%</sub> proportionally to the increase in the Uniformity Coefficient, but there are evaluations where irrigation systems with values of Coefficients of High Uniformity present Distribution Uniformities<sub>25%</sub> lower, which confirms what Keller (1990, cited by Tarjuelo 2005) stated about

En un trabajo sobre eficiencia de almacenamiento en suelos agrícolas irrigados de Cuba (López *et al.*, 2010). relacionando este parámetro con la eficiencia de descarga, plantea que para una eficiencia de descarga del sistema de riego del 80% y un límite productivo del 85% de la capacidad de campo, la misma se reduce en un rango desde 4% para los suelos arcillosos hasta un 10% para los suelos arenosos. Con la disminución de la eficiencia de descarga y el aumento del límite productivo, el rango de reducción de la eficiencia de aplicación del agua de riego se hace mayor (entre 15% hasta 60%), elemento este que debe tenerse en cuenta pues para lograr eficiencias de almacenamiento elevadas se debe trabajar con eficiencias de descarga mayor del 85%.

En la explotación de los sistemas de riego por aspersión en la agricultura, se le ha dado más importancia a la uniformidad que a la eficiencia. Tal es así, que Tarjuelo (2005), establece una clasificación de la calidad del riego a partir del Coeficiente de uniformidad, donde plantea que, si este parámetro es superior al 90%, la parcela está muy bien regada, cuando oscila entre el 85 y 90% está bien regada y cuando es menor del 85% está mal regada. Sin embargo, la práctica productiva ha demostrado que sistemas de riego por aspersión con buena uniformidad, presentan caídas en los rendimientos de los cultivos regados.

### Relación Coeficiente de uniformidad–Uniformidad de distribución<sub>25%</sub>

Entre los parámetros de calidad del riego los que tienen una estrecha vinculación son el Coeficiente de Uniformidad y la Uniformidad de Distribución<sub>25%</sub>, este último es más estricto ya que tiene que ver con el cuarto inferior o la parte de la parcela que menos agua recibe y se utiliza según Keller & Bliesner (1990), como indicador de la magnitud de los problemas en el proceso de aplicación del agua.

En la Figura 4 se muestra dicha relación lineal con un coeficiente de determinación del 60%, donde existe una tendencia a aumentar la Uniformidad de Distribución<sub>25%</sub> proporcionalmente al aumento del Coeficiente de Uniformidad, pero se tienen evaluaciones donde sistemas de riego con valores de Coeficientes de Uniformidad elevados presentan Uniformidades de Distribución<sub>25%</sub> inferiores, lo que confirma lo planteado por Keller (1990) citado por Tarjuelo (2005), sobre la existencia de otros

the existence of other factors that should be studied in future research related to the distribution of water in the plot.

factores que deben ser estudiados en futuras investigaciones relacionados con el reparto del agua en la parcela.

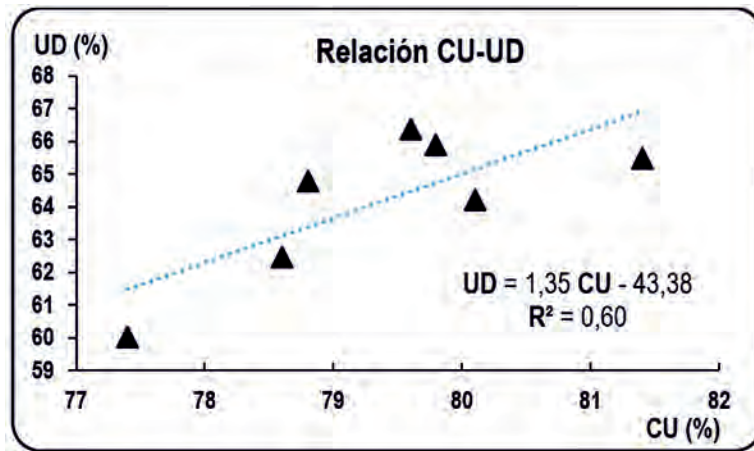


FIGURE 4. Relationship between Heenman - Hein Uniformity Coefficient and Distribution Uniformity<sup>25%</sup>  
 FIGURA 4. Relación entre el coeficiente de uniformidad de Heenman-Hein y la Uniformidad de Distribución<sup>25%</sup>.

Walter (1979, cited by Uribe, 2011), studied the relationship between the uniformity coefficients and the factors that affected them in the sprinkler systems, stating that the optimal design of an irrigation system and its management takes into account all aspects affecting uniformity. In order to optimize the irrigation system design and its management decisions, a relationship between uniformity of water application and efficiency of application is required. On the other hand, Hart and Reynolds (1965, cited by Cárdenas, 2000), show that for a normal distribution function, the coefficient of uniformity and the uniformity of distribution are related to the coefficient of variation. From this relationship, other can be established for performance parameters (application efficiency, deficit coefficient, etc.), which allows obtaining management diagrams.

#### Analysis between the Discharge Efficiency Assumed in the Operation Tables of the Center Pivot Machines and the Discharge Efficiency Obtained in Field Evaluations

Keller (1990, cited by Tarjuelo 2005) maintains that, under normal conditions, evaporation and drag losses can vary between 5% and 10%, a criterion assumed in this work for the analysis of discharge efficiencies. In Table 3, it can be seen how the real discharge efficiencies vary for the different irrigation systems between 71% and 77%, taking into account the reduction in 10% of the mean discharge height (AMD) by evaporation and dragging. When the gross partial standards applied are analyzed, considering the operating tables of these systems that assume efficiencies of 85% and the gross partial standards for actual discharge efficiencies, there are deficits in the order of 6 and 23 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. If it is considered that these deficits will be proportional to the stages of higher demand, there is a risk that the crop does not receive the amount of water necessary to satisfy its water needs, causing, among other effects, reductions in yields.

Walter (1979) citado por Uribe *et al.* (2001), estudió para los sistemas de aspersión la relación entre los coeficientes de uniformidad y los factores que afectaban a estos, planteando que el diseño óptimo de un sistema de riego y su manejo tiene en cuenta todos los aspectos que afectan a la uniformidad. En aras de optimizar el diseño del sistema de riego y las decisiones de manejo, se requiere una relación entre la uniformidad de aplicación del agua y la eficiencia de aplicación.

Por su parte Hart & Reynolds (1965) citado por Cárdenas (2000), demuestran que para una función de distribución normal el coeficiente de uniformidad y la uniformidad de distribución están relacionados con el coeficiente de variación. A partir de tal relación se puede establecer otra para la obtención de los parámetros de comportamiento (eficiencia de aplicación, coeficiente de déficit, etc.), que da lugar a los diagramas de manejo.

#### Análisis entre eficiencia de descarga asumida en las tablas de explotación de las máquinas de pivote central y la eficiencia de descarga obtenida en evaluaciones de campo

Keller (1990) citado por Tarjuelo (2005) mantiene que, en condiciones normales las pérdidas por evaporación y arrastre pueden variar entre un 5 y 10%, criterio asumido en este trabajo para el análisis de las eficiencias de descarga.

En la Tabla 3 se puede apreciar como las eficiencias de descarga reales teniendo en cuenta la reducción en un 10% de la altura media descarga (AMD) por evaporación y arrastre las mismas varían para los diferentes sistemas de riego entre 71 y 77%. Cuando se analiza las normas parciales bruta aplicada considerando las tablas de explotación de dichos sistemas que asumen eficiencias del 85% y las normas parciales brutas para las eficiencias de descarga real se tienen déficits en el orden de los 6 y 23 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>. Si se considera que dichos déficits serán proporcionales para las etapas de mayor demanda se corre el riesgo que el cultivo no reciba la cantidad de agua necesaria para satisfacer sus necesidades hídricas, provocando entre otros factores reducciones en los rendimientos.

Tarjuelo (1999), when addressing the influence of the uniformity of the irrigation of the pivots, states that both with a good uniformity and with another not so good, high productions can be achieved. The difference is in the amount of water necessary for this, being clearly less the greater the uniformity is, and the areas with deficit and percolation will also be smaller.

Tarjuelo (1999), al abordar la influencia de la uniformidad del riego de los pivotes plantea que tanto con una buena uniformidad como con otra no tan buena se pueden alcanzar altas producciones. La diferencia está en la cantidad de agua necesaria para ello, siendo claramente menor cuanto mayor sea la uniformidad, y también serán menores las zonas con déficit y con percolación.

**TABLE 3. Summary of the partial gross norms to be applied to guarantee a partial net norm of 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> taking into account the different discharge efficiencies obtained in the evaluations**

**TABLA 3. Resumen de las normas parciales brutas a aplicar para garantizar una norma neta parcial de 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> teniendo en cuenta las diferentes eficiencias de descarga obtenidas en las evaluaciones**

Farm	AMR (mm)	AMD theoretical (mm)	AMD (-10%loess)	Ed real (%)	NPB m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> η: 85%	NPB m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> η: real	deficit (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	NR	season deficit (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )
Brito II	16.42	24.27	21.85	75.15	196.0	208.0	12.0	18	216.0
Morenita I	17.34	24.91	22.42	77.34	208.0	214.0	6.0	19	114.0
La Gloria	17.77	27.74	24.96	71.18	192.0	214.0	22.0	20	440,0
El Triunfo	15.30	22.49	20.25	75.57	197.0	207.0	10.0	20	200.0
Progreso 5	16.26	24.17	21.75	74.16	190.0	203.0	13.0	21	273.0
Finca 1	17.22	26.89	24.20	71.15	193.0	216.0	23.0	21	483.0
Finca 6	15.94	23.94	21.54	73.98	188.0	202.0	14.0	21	294.0

**Legend:** AMR: mean height collected, AMD: mean height discharged taking into account 10 % losses due to evaporation and dragging, Ed: Discharge Efficiency, NPB: gross partial norm, NR: Irrigation numbers. **Note:** The gross partial norms (NPB) for 85 % efficiency are taken from operation table of each irrigation system.

Studies conducted by Jiménez *et al.* (2012) and Placeres *et al.* (2013) on the operating parameters of the central pivot machines, indicate that due to the lack of knowledge about them, a deficit in the delivery standards of these systems can be generated, which affects low crop yields.

En estudios realizados por Jiménez *et al.* (2012) y Placeres *et al.* (2013), sobre los parámetros de explotación de las máquinas de pivote central informan que debido al desconocimiento de los mismos se puede incurrir en déficit en las normas de entrega de estos sistemas lo que incide en los bajos rendimientos de los cultivos.

**Relationship between Discharge Efficiency and Wind Speed**

In Figure 5, it can be seen how the discharge efficiency is affected by the increase in wind speed, the study found an inverse linear correlation in the evaluated systems with a coefficient of determination R<sup>2</sup> = 0.80. Although this phenomenon is known, in the current conditions of Güiira de Melena Municipality, where the speed of the winds between 10:00 am and 12:00 m varies between 3.5 and 5.5 m s<sup>-1</sup>, it is important that the farmer’s bear in mind that the quality of irrigation is affected, which, in turn, affects yields.

**Relación Eficiencia de descarga–Velocidad del viento**

En la Figura 5 se puede apreciar como la Eficiencia de descarga es afectada por el aumento de la velocidad del viento, del estudio se encontró una correlación lineal inversa en los sistemas evaluados con un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> = 0,80. Aunque este fenómeno es conocido, en las condiciones actuales del municipio de Güiira de Melena donde la velocidad de los vientos entre las 10:00 am y 12:00 m varía entre 3,5 y 5,5 m s<sup>-1</sup>, es importante que los productores tengan en cuenta que la calidad del riego se ve afectada, lo que repercute en los rendimientos.

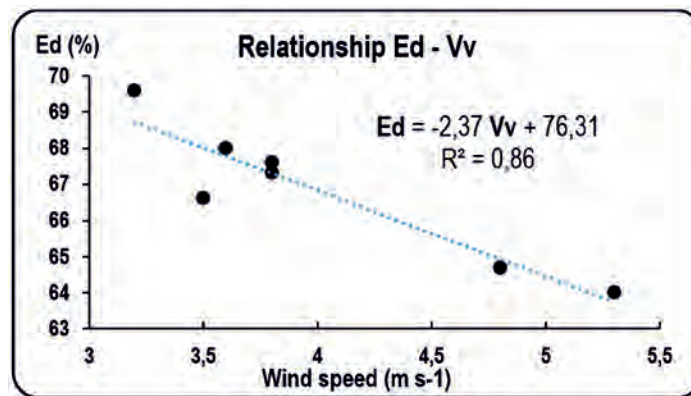


FIGURE 5. Relationship between discharge efficiency and wind speed  
 FIGURA 5. Relación entre la eficiencia de descarga y la velocidad del viento.

The most relevant climatic factor in the behavior of the water distribution pattern is the wind, and its speed, direction and persistence must be considered. Operation planning should consider the hours without wind and the hours with wind speeds less than  $2.5 \text{ m s}^{-1}$ . Faci and Bercero (1991) and Tajuelo *et al.* (1994) place the general wind speed limit between  $2.5$  and  $3.5 \text{ m s}^{-1}$  above which it is not advisable to irrigate by sprinkler irrigation. In recent work, Cisneros *et al.* (2019) evaluated irrigation quality parameters in a sprinkler system in Güira de Melena Municipality. They reported that with high wind speeds, the effective range radius of the sprinklers is reduced by  $0.90 \text{ m}$  with respect to that of the project. This same phenomenon can occur in irrigation machines with the overlap between the diffusers affecting the discharge efficiency.

### Relationship between Loss by Evaporation and Drag and Wind Speed

Tarjuelo (2005) and Playán *et al.* (2006) studied losses due to evaporation and drag during irrigation and indicated that these can reach up to 40%. Losses due to evaporation and drag are those that occur since water leaves the emitter until it reaches the surface of the soil or the crop. This concept of losses includes both, the drops that become vapor (evaporation) and those that are blown by the wind (Tajuelo, 1999).

For the study conditions in Figure 6, it is shown that they vary between 30 and 36%, also finding a direct relationship with a coefficient of determination  $R^2 = 0.71$ . From this correlation it can be estimated that for speeds greater than the  $4.5 \text{ m s}^{-1}$  (which is the average speed in the municipality between 10:00 am and 12:00 m), there are reductions in the applied irrigation sheet due to 33% losses, hence the importance of an adequate exploitation in the irrigation machines to guarantee the norms of delivery to the crops. A similar result was obtained by Pérez (2005) when evaluated central pivot machines under the same study conditions.

El factor climático de mayor relevancia en el comportamiento del patrón de distribución del agua es el viento, debiendo considerarse su velocidad, dirección y persistencia. La planificación de operación deberá considerar las horas sin viento y las horas con viento de velocidades menores a  $2,5 \text{ m s}^{-1}$ . Faci & Bercero (1991) y Tarjuelo *et al.* (1994), sitúan entre  $2,5$  y  $3,5 \text{ m s}^{-1}$  el límite general de velocidad del viento por encima del cual no resulta recomendable regar en riego por aspersión.

En trabajo reciente realizado por Cisneros *et al.* (2019) en el municipio Güira de Melena, evaluando parámetros de calidad del riego en un sistema por aspersión, informan que con las elevadas velocidades del viento se reduce el radio de alcance efectivo de los aspersores en  $0,90 \text{ m}$  con respecto al del proyecto. Este mismo fenómeno puede suceder en las máquinas de riego con el solape entre los difusores afectando la eficiencia de descarga.

### Relación pérdidas por evaporación y arrastre – velocidad del viento

En estudios realizados por autores como Tarjuelo (2005) y Playán *et al.* (2006), donde se refieren a las pérdidas que se producen por evaporación y arrastre durante el riego indican que estas pueden alcanzar hasta un 40%. Las pérdidas por evaporación y arrastre son las que se producen desde que sale el agua del emisor hasta que llega a la superficie del suelo o del cultivo. En este concepto de pérdidas están incluidas tanto las gotas que se convierten en vapor (evaporación), como las que son por arrastradas por el viento Tarjuelo (1999).

Para las condiciones de estudio en la Figura 6, se muestran que las mismas varían entre un 30 y 36%, encontrándose además una relación directa con un coeficiente de determinación  $R^2 = 0,71$ , en dicha correlación se puede estimar que para velocidades superiores a los  $4,5 \text{ m s}^{-1}$  que es la velocidad promedio en el municipio entre las 10:00 am y 12:00 m, se producen reducciones de la lámina de riego aplicada debido a las pérdidas en un 33%, de ahí la importancia de una adecuada explotación en las máquinas de riego para garantizar las normas de entrega a los cultivos. Resultado similar fue obtenido por Pérez (2005), evaluando máquinas de pivote central en las mismas condiciones de estudio.

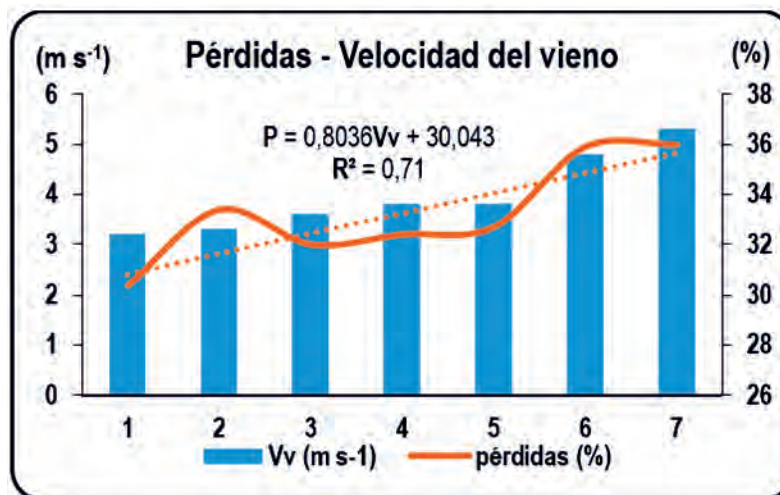


FIGURE 6. Relationship between losses by evaporation and drag and wind speed  
FIGURA 6. Relación entre las pérdidas-velocidad del viento.

Similar results were obtained by Martínez-Cob *et al.* (2010) while studying the wind and irrigation. They found the variability of the wind in Aragon and its influence on sprinkler irrigation, and reported that the irrigation quality parameters deteriorated as a function of wind speed when evaporation and drag losses increased.

## CONCLUSIONS

- The wind has a marked influence on the evaluated technical-operational parameters, which damage the quality of irrigation. Average values obtained from all the machines studied were: Heermann and Hein Uniformity Coefficient 79.39%, Distribution Uniformity<sub>25%</sub> 64.90% and Discharge Efficiency 74.08%, which directly affected the low percentage of area adequately irrigated.
- No direct relationship was found between Uniformity Coefficient and Discharge Efficiency. The study considered Uniformity Coefficient values classified as good and Discharge Efficiencies related to the water that reached the crop classified as low. Therefore, the study confirms what is reported by other authors referring to the fact that a high Uniformity Coefficient does not always mean that the planned water reaches the crop.
- When comparing the gross partial norms of the operational tables for efficiencies of 85% with those obtained in the field evaluations, it was possible to know that deficits in deliveries between 6 and 23 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> can occur per irrigation.
- To guarantee the norms of water delivery to the crops, it is necessary to prepare the operation tables of the central pivot machines, taking into account the discharge efficiency obtained in the field evaluation.
- Evaporation and drag losses in center pivot machines vary between 30 and 36% for the study conditions.

## REFERENCES

- ABD EL, W.M.H.; MEDICI, M.; LORENZINI, G.: "Harvesting water in a center pivot irrigation system: Evaluation of distribution uniformity with varying operating parameters", *Journal of Engineering Thermophysics*, 24(2): 143-151, 2015, ISSN: 1990-5432, DOI: <https://dx.doi.org/10.1134/S1810232815020058>.
- AGUILAR, S.E.: *Precisión en la programación de riego para el cultivo de la papa, regado con máquinas de pivote central en la finca Girón de Güira de Melena*, Instituto de investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Tesis presentada en opción al título de Especialista en Explotación de Sistemas de Riego y Drenaje, La Habana, Cuba, 68 p., 2012.
- ALABANDA, P.: *Evaluación y manejo de sistemas de riego*, Universidad de Córdoba, Dpto. de Agronomía, Trabajo profesional de fin de carrera, Córdoba, Argentina, 2001.
- BREMOND, B.; MOLLE, B.: "Characterization of rainfall under center pivot: influence of measuring procedure", *Journal of irrigation and drainage engineering*, 121(5): 347-353, 1995, ISSN: 0733-9437.
- CÁRDENAS, J.F.: *Estudio del uso de la boquilla difusora cubana en las máquinas de riego de pivote central*, Universidad Agraria de La Habana, Tesis para optar por Título de master en ciencias de Riego y Drenaje, La Habana, Cuba, 2000.
- CHRISTIANSEN, E.J.E.: *Irrigation by sprinkling*, Ed. University of California Berkeley, Calif. Agric. Exp. Stn. B-670 ed., vol. 4, Berkeley C. A. 94720, USA, 110-116 p., 1942.
- CISNEROS, Z.E.; PLACERES, M.Z.; JIMÉNEZ, E.E.: "Beneficios obtenidos con la implementación del Servicio de Asesoramiento al Regante (SAR) en diferentes zonas regables de la provincia Mayabeque, Cuba", *Revista Ingeniería Agrícola*, 3(2): 46-52, 2013, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- CISNEROS, Z.E.; VENERO, D.Y.; PLACERES, M.Z.; GONZÁLEZ, R.F.: "El viento y su influencia en los parámetros de calidad del riego", *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(4): 27-35, 2019, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- CUN, G.R.; GONZÁLEZ, R.F.; CISNEROS, Z.F.: *Fortalecimiento de Capacidades para la Coordinación de Información y los Sistemas de Monitoreo/ MST en Áreas con problemas de Manejo de los Recursos Hídricos. Evaluación de máquinas de pivote central eléctricas en el municipio Güira de Melena*, Inst. Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric), Informe proyecto OP-15. Proyecto 2, La Habana, Cuba, 15 p., 2019.

Resultados similares fueron obtenidos por Martínez *et al.* (2010), donde estudiando el viento y riego encontró la variabilidad del viento en Aragón y su influencia en el riego por aspersión informando que los parámetros de calidad del riego se deterioraron en función de la velocidad del viento al incrementarse las pérdidas por evaporación y arrastre.

## CONCLUSIONES

- El viento tiene una influencia marcada en los parámetros técnicos-explotativos evaluados, dañando la calidad del riego, al obtenerse valores promedios entre todas las máquinas de Coeficiente de Uniformidad de Heermann y Hein de 79,39%, Uniformidad de Distribución<sub>25%</sub> de 64,90% y Eficiencias de descarga del 74,08%, incidiendo directamente en los bajos porcentajes de área regada adecuadamente.
- No se encontró una relación directa entre coeficiente de uniformidad y eficiencia de descarga. En el estudio se tienen valores de Coeficiente de Uniformidad clasificados como buenos y Eficiencias de descarga relacionados con el agua que llega al cultivo bajas. Por consiguiente, el estudio confirma lo informado por otros autores refiriéndose a que un coeficiente de uniformidad alto no siempre significa que al cultivo llegue el agua planificada.
- Al comparar las normas parciales brutas de las tablas de explotación para eficiencias del 85% con las obtenidas en las evaluaciones de campo se pudo conocer que se pueden producir déficits en las entregas entre 6 y 23 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> en cada riego.
- Para garantizar las normas de entrega de agua a los cultivos confeccionar las tablas de explotación de las máquinas de pivote central teniendo en cuenta la eficiencia de descarga obtenida en la evaluación de campo.
- Las pérdidas por evaporación y arrastre en las máquinas de pivote central varían entre un 30 y 36% para las condiciones de estudio.

- FACI, J.; BERCERO, A.: "Efecto del viento en la uniformidad en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión", *Investigación Agraria. Producción y protección vegetales*, 6(2): 171-182, 1991, ISSN: 0213-5000.
- FLÓREZ, T.N.; ZUTION, G.I.; FEITOSA, D.R.; AGNELLOS, B.E.A.; DEUS, F.P.; DIEGO, R.M.; EIJI, M.E.: "Eficiencia de aplicación de agua en la superficie y en el perfil del suelo en un sistema de riego por aspersión", *Agrociencia*, 47(2): 107-119, 2013.
- GARCÍA, O.: *Software Pivote*, (Versión Versión 1.0 (1996)), ser. Herramienta de Cálculo de Excel, Excel, La Habana, Cuba, 2006.
- GONZÁLEZ, A.: *Evaluación de los sistemas de riego por aspersión para un uso eficiente del agua en la Cooperativa de Producción Agropecuaria "Jorge Dimitrov"*, Tesis presentada en opción al título de Especialista en Riego y Drenaje, 70 p., 2012.
- HEERMANN, D.F.; HEIN, P.R.: "Performance Characteristics of Self-Propelled Center-Pivot Sprinkler Irrigation System", *Transactions of the ASAE*, 11(1): 11-15, 1968.
- JIMÉNEZ, E.E.R.; GONZÁLEZ, B.P.; DOMÍNGUEZ, G.M.: "Relación entre parámetros de uniformidad de riego en máquinas de pivote central", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3): 18-22, 2012, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D.: *Sprinkler and Trickle Irrigation*, Ed. Van Nostrand Reinhold, New York, USA, 1990.
- LÓPEZ, S.T.; CID, L.G.; HERRERA, P.; GONZÁLEZ, R.F.: *Eficiencia de almacenamiento del agua en suelos agrícolas irrigados de Cuba*, Inst. Sitio FAO, La Habana, Cuba, 2010.
- MARTÍNEZ, C.A.; ZAPATA, N.; SÁNCHEZ, I.: "Viento y riego. La variabilidad del viento en Aragón y su influencia en el riego por aspersión", *Zaragoza: Institución Fernando el católico*, 2010.
- MINAG-CUBA: *Balace de áreas bajo riego*, Inst. Ministerio de Agricultura (MINAG), Informe de balance, La Habana, Cuba, 2017.
- MONTERO, J.; ORTEGA, F.; TARJUELO, J.M.; HONRUBIA, T.: "Análisis de las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión", En: *XV Congreso Nacional de Riegos*, Palma de Mallorca, España, 1999.
- MUJICA, C.A.; LÓPEZ, S.M.A.; CARMENATES, H.D.; MUJICA, L.C.; RIVERON, L.A.R.: "Evaluación de los indicadores hidráulicos de las máquinas de pivote central eléctrica", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 23(1): 53-55, 2014, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- NAROUA, I.; PEREIRAS, S.L.; SÁNCHEZ, C.R.: "Evaluación de los sistemas de riego por aspersión en la Comunidad de Regantes" Río Adaja" y propuestas para la mejora del manejo del riego", [en línea], En: *XXX Congreso Nacional de Riegos, Albacete*, Albacete, España, 2012, Disponible en: [http://oa.upm.es/19378/1/INVE\\_MEM\\_2012\\_140545.pdf](http://oa.upm.es/19378/1/INVE_MEM_2012_140545.pdf).
- NC ISO 11545: 2007: *Máquinas agrícolas para riego-pivotes centrales y Máquinas de avance frontal equipadas con boquillas difusoras o aspersores-determinación de la uniformidad de distribución del agua*, Inst. Oficina Nacional de Normalización, Norma ISO 11545:2001, IDT, La Habana, Cuba, 2007.
- PÉREZ, L.R.: "Las pérdidas por evaporación y arrastres en las máquinas de pivote central. Estudio teórico", En: *2do Congreso Internacional de Riego y Drenaje CUBARIEGO*, Ed. Ed. digital, La Habana, Cuba, 2005, ISBN: 959-7164-95-7.
- PÉREZ, L.R.; ALFONSO, G.E.J.; CÁRDENAS, L.J.F.; LÓPEZ, C.G.; ALEMÁN, G.C.C.: "Un estudio de evaluación de la aplicación del riego en sistemas por pivote central", *Tecnología y ciencias del agua*, 18(3): 45-53, 2003, ISSN: 2007-2422.
- PLACERES, M.Z.: *Determinación de los parámetros de explotación en máquinas de pivote central, que inciden en los rendimientos de la papa en las provincias Artemisa y Mayabeque*, Universidad Agraria de La Habana, Tesis en opción al Título de Maestro en Ciencias en Riego y Drenaje, San Jose de las Lajas, Mayabeque. Cuba, 70 p., 2011.
- PLACERES, M.Z.; JIMÉNEZ, E.E.; DOMÍNGUEZ, G.M.; GUZMÁN, V.J.; SÁNCHEZ, P.Y.: "Determinación de los parámetros de explotación de las máquinas de pivote central, en las provincias Artemisa y Mayabeque, para satisfacer las dosis necesarias de los cultivos", *Revista Ingeniería Agrícola*, 3(1): 3-7, 2013, ISSN: 2306-1545, e-ISSN: 2227-8761.
- PLAYÁN, E.; ZAPATA, N.; FACI, J.M.; TOLOSA, D.; LACUEVA, J.; PELEGRÍN, J.; ALBRIZIO, R.; SÁNCHEZ, I.; LAFITA, A.: "Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model", *Agricultural Water Management*, 84(1-2): 89-100, 2006, ISSN: 0378-3774.
- SHILO, C.: "Riego por aspersión, aumentando su eficiencia", *Revista. Internacional Agua Riego*, 20: 15-22, 2000.
- STAMBOULI, T.; R N ZAPATA; PLAYÁN, J.E.; FACI, G.J.M.: "La uniformidad del riego en coberturas fijas de aspersión con aspersores provistos de boquillas de plástico", *Revista Tierras*, 220, 2014, ISSN: 1889-0776.
- TARJUELO, J.; CARRIÓN, P.; VALIENTE, M.: "Simulación de la distribución del riego por aspersión en condiciones de viento", *Investigación Agraria: Producción e Protección Vegetal*, 9(2): 255-271, 1994.
- TARJUELO, M.B.J.M.: *El riego por aspersión y su tecnología*, Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España, 1999.
- TARJUELO, M.B.J.M.: *El riego por aspersión y su tecnología*, Ed. Mundi-Prensa, 3ra. ed., Madrid, España, 2005.
- TORNES, N.; PUJOL, P.; GÓMEZ, Y.; BOICET, T.; GOITE, C.L.: "Evaluación de la calidad del riego en máquinas eléctricas de pivote central del modelo o tipo Ballama", *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(1): 59-63, 2009, ISSN: 1010-2760, e-ISSN: 2071-0054.
- URIBE, H.; LAGOS, L.; HOLZAPHEL, E.: *Pivote Central*, [en línea], Inst. Comisión Nacional de Riego, Corporación de Fomento de la Producción, Chile, 2001, Disponible en: <http://www.cnr.gob.cl>, [Consulta: 10 de enero de 2018].

Enrique Cisneros-Zayas, Investigador Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: [enrique.cisneros@boyeros.iagric.cu](mailto:enrique.cisneros@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-1021-0680>

Felicita González-Robaina, Investigadora Titular, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: [felicita.gonzalez@boyeros.iagric.cu](mailto:felicita.gonzalez@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8245-4070>

Zenén Placeres-Miranda, Especialista, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: [zenen.placeres@boyeros.iagric.cu](mailto:zenen.placeres@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-3679-1663>

Reinaldo Cun-González, Inv. Auxiliar, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola (IAgric). Boyeros, La Habana, Cuba, e-mail: [reinaldo.cun@boyeros.iagric.cu](mailto:reinaldo.cun@boyeros.iagric.cu) ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-5100-7902>

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation to them, neither by the authors nor by the publisher.