

Pérdida de carga y carga de presión en pivotes centrales para el riego de cítricos

Head loss and pressure head in central pivots for citrus irrigation



<https://cu-id.com/2177/v33n4e01>

Kaddiel Fernández Hung^{I*}, Pável Vargas Rodríguez^{II},
 Jorge Carlos Armas Baño^{II}, Alberto Méndez Jocik^{III}

^IInstituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical, Grupo de Difusión Tecnológica de Contramaestre, Santiago de Cuba, Cuba.

^{II}Universidad de Oriente, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba.

^{III}Empresa Nacional de Proyectos e Ingeniería, Plaza, La Habana, Cuba.

RESUMEN: El riego de plantaciones de cítricos contribuye a obtener cosechas rentables y para ello se emplean, entre otras técnicas, las máquinas de pivote central. Las ecuaciones para el cálculo de la pérdida de carga y la carga de presión, disponibles para los pivotes centrales con riego a cobertura completa, no ofrecen resultados suficientemente precisos en las máquinas de riego configuradas para cítricos. El objetivo del presente estudio es desarrollar nuevas expresiones matemáticas para el cálculo de la pérdida de carga y la carga de presión en pivotes centrales configurados para el riego de cítricos. Se presentan las ecuaciones de estos dos parámetros hidráulicos, que garantizan suficiente precisión, validada por mediciones de campo.

Palabras clave: citrus, riego, riego por pivót, hidráulica agrícola.

ABSTRACT: Irrigation of citrus plantations contributes to obtaining profitable harvests and for this, central pivot machines are used, among other techniques. The equations for calculating head loss and pressure head, available for center pivots with full coverage irrigation, do not provide sufficiently accurate results on irrigation machines configured for citrus. The objective of the present study is to develop new mathematical expressions for the calculation of head loss and pressure head in central pivots configured for citrus irrigation. The equations of these two hydraulic parameters are presented, which guarantee sufficient precision, validated by field measurements.

Keywords: citrus, irrigation, centre pivot irrigation, agricultural hydraulics.

INTRODUCCIÓN

El riego de los cítricos (*Citrus* spp.) contribuye a obtener cosechas rentables ya que determina su precocidad productiva, controla el desarrollo vegetativo, la floración, el cuajado y la calidad de los frutos (Albrigo *et al.*, 2019). La máquina de pivote central es una técnica que desde hace más de 20 años se emplea mundialmente en el riego de los cítricos. Varios autores hicieron referencias a su amplia utilización en Sudáfrica Zanini *et al.* (1998), en el nordeste de Brasil Coelho *et al.* (2006) y en Zimbabue Albani y Palentini (2016). En Cuba su empleo todavía

es incipiente; en 2016 se implementó una experiencia piloto en áreas de la Empresa Agropecuaria “Jiguaní”, donde se adaptó una máquina en uso para el riego de 32 ha de cítricos Fernández-Hung *et al.* (2019) y recientemente se instaló una nueva para fomentar otras 32 ha.

Una guía de Valmont Irrigation (2019) refiere dos posibles ubicaciones de las boquillas pulverizadoras para el riego de plantaciones de cítricos con máquinas de pivote central: una por encima y otra por debajo del follaje. Por razones fitosanitarias y para minimizar la reducción de la eficiencia de aplicación debido a las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento,

*Autor para correspondencia: Kaddiel Fernández Hung, e-mail: kfdezh@gmail.com

Recibido: 13/01/2024

Aceptado: 05/09/2024

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

CONTRIBUCIONES DE AUTORES: **Conceptualización:** K. Fernández, P. Vargas. **Conservación de datos:** J. C. Armas, A. Méndez. **Análisis formal:** K. Fernández, P. Vargas. **Investigación:** K. Fernández, P. Vargas, J. C. Armas. **Metodología:** K. Fernández. **Supervisión:** P. Vargas., K. Fernández. **Validación:** K. Fernández, P. Vargas. **Redacción - borrador inicial:** K. Fernández, P. Vargas. **Redacción - revisión y edición:** K. Fernández, P. Vargas, A. Méndez.

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

se prefiere aplicar el riego por debajo de la copa de los árboles, justo sobre el sistema radicular, en franjas de suelo que representan anillos circulares concéntricos (Figura 1). Estas particularidades marcan las diferencias con respecto al riego de otros cultivos de cobertura completa y condicionan el cálculo de los parámetros técnico-operacionales de la máquina de riego configurada para cítricos.

Un estudio previo remarcó que las expresiones matemáticas de los parámetros técnico-operacionales que se concibieron para los pivotes centrales que riegan a cobertura completa, cuando se aplican en los que están configurados para el riego de cítricos, no ofrecen resultados suficientemente precisos que contribuyan con el uso eficiente del agua (Fernández-Hung *et al.*, 2022). La disposición particular que tienen las boquillas pulverizadoras tiene incidencia, además, en la pérdida de carga y en la distribución de la carga de presión que se produce en la tubería principal de la máquina de riego. Con ello, el cálculo de las variables hidráulicas que determinan, por ejemplo, la selección del equipo de bombeo y las propias boquillas, resultan de escasa confiabilidad.

Para el cálculo de la pérdida de carga en la tubería principal de los pivotes centrales se han empleado tres enfoques diferentes: Sumando las pérdidas de carga parciales, tramo a tramo Kincaid & Heermann (1970); por medio de un factor de fricción, que se puede determinar a partir de una solución analítica teórica Chu & Moe (1972); Seyedzadeh *et al.* (2021), a través de una solución numérica compleja Reddy & Apolayo (1988); Scaloppi & Allen (1993); Anwar, (2000); Valiantzas & Dercas (2005); Tabuada (2014) o como resultado de un análisis de regresión no lineal Keller & Bliesner (1990); y mediante modelos numéricos de simulación hidráulica (Baptista *et al.*, 2019a; 2019b; 2020).

La determinación de la carga de presión a lo largo de la tubería principal está vinculada al cálculo de la pérdida de carga. En el primer y tercer enfoque para calcular la pérdida de carga, la carga de presión en las salidas se obtiene de forma directa (Kincaid y Heermann, 1970; Baptista *et al.*, 2019a; 2019b; 2020). Unos investigadores propusieron su cálculo a partir del factor de distribución de la pérdida de carga Chu & Moe (1972); Keller & Bliesner (1990); Scaloppi & Allen (1993); Anwar (2000); Seyedzadeh *et al.* (2021), y otros lo incluyeron en el propio cálculo

de la pérdida de carga (Valiantzas y Dercas, 2005; Tabuada, 2014).

Los métodos para calcular la pérdida de carga y la carga de presión, mediante los factores de fricción y de distribución, consideran que el riego se efectúa a cobertura completa y, por tanto, no representan la configuración que adoptan los pivotes centrales para el riego de cítricos. El método que calcula la pérdida de carga y la carga de presión tramo a tramo es excesivamente laborioso y el que utiliza modelos de simulación hidráulica, requiere de conocimientos avanzados en el manejo del software. Aunque estos últimos métodos representan cualquier configuración de la máquina de riego y son los más precisos, su adopción en la práctica es muy limitada. Por tanto, el objetivo del presente estudio es desarrollar dos expresiones matemáticas sencillas y suficientemente precisas para calcular la pérdida de carga y la distribución de la carga de presión en los pivotes centrales configurados para el riego de cítricos, mediante el análisis de regresión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación de la pérdida de carga

La pérdida de carga en el lateral se determinó a partir del denominado factor de fricción, F , propuesto por Chu & Moe, (1972), con la siguiente expresión genérica:

$$F = \frac{(h_o - h_R)}{h_m} \quad (1)$$

donde h_o es la carga de presión en el pivote (m); h_R , la carga de presión en el extremo final del lateral y h_m , la pérdida de carga ficticia con el flujo en extremidad (m).

El término $(h_o - h_R)$, que representa la pérdida de carga en el lateral, se obtiene de (1) para lo que se requiere la variable F , que se determinó por medio de un análisis de regresión con el paquete estadístico STATGRAPHICS. Para ello, mediante el teorema P de Buckingham, las variables que intervienen en el análisis se definieron y organizaron en los siguientes números adimensionales P: $P_1 = F$; $P_2 = N$ y $P_3 = Q$ ($n D$)⁻¹. La relación funcional entre estos términos se expresa matemáticamente como:

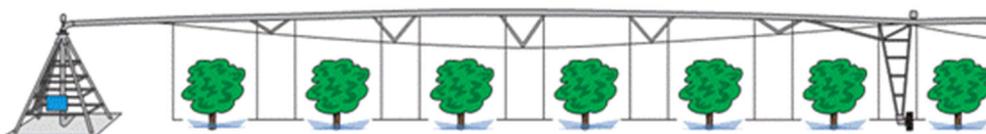


FIGURA 1. Configuración de los pivotes centrales para el riego de cítricos.

$$\mathcal{F}(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = \mathcal{F}\left(F, N, \frac{Q}{vD}\right) = 0 \quad (2)$$

de donde:

$$F = \frac{(h_o - h_R)}{h_m} = f\left(N, \frac{Q}{vD}\right) \quad (3)$$

en la que N es el número de emisores (adimensional); Q , el caudal de entrada a la máquina ($L s^{-1}$); D , diámetro interior del lateral (mm) y n , la viscosidad cinemática del agua a $20^\circ C$ ($10^{-6} m^2 s^{-1}$).

Los valores de las variables hidráulicas h_o , h_R y h_m , se obtuvieron haciendo uso del modelo numérico de simulación hidráulica implementado en el software EPANET 2. Para ello se concibió un diseño factorial del tipo 3^2 ; es decir, de dos factores con tres niveles cada uno [Melo et al. \(2020\)](#), de la forma que se presenta en la siguiente Tabla:

TABLA 1. Configuración del diseño factorial

Factores	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
N	64	132	270
$\frac{Q}{vD}$	$6.2 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^5$

En la [Figura 2](#) se muestra, como ejemplo, uno de los tres modelos numéricos de simulación de los pivotes de riego que corresponden a cada nivel del diseño factorial: bajo, medio y alto, así como su modelo equivalente con gasto en extremidad.

Estos modelos representan tres equipos con longitudes $R = 200, 404$ y 818 m, que resultaron del número de emisores $N = 64, 132$ y 270 , respectivamente, y su esquema de análisis se aprecia en la [Figura 3](#).

Determinación de la distribución de la carga de presión

La distribución de la carga de presión a lo largo de la tubería principal se calculó mediante el factor de distribución, H , que también propusieron [Chu & Moe, \(1972\)](#):

$$H = \frac{(h_r - h_R)}{(h_o - h_R)} \quad (4)$$

donde h_r , es la carga de presión en los puntos sobre la tubería principal ubicados a las distancias r del pivote (m) y $(h_o - h_R)$ es el mismo parámetro que en (1).

La expresión de cálculo de H se obtuvo mediante un análisis de regresión entre los parámetros adimensionales $P_3 = Q (n D)^{-1}$, $P_4 = H$ y $P_5 = r/R$, auxiliado por el paquete estadístico STATGRAPHICS según la relación funcional siguiente:

$$H = \frac{(h_r - h_R)}{(h_o - h_R)} = f\left(\frac{r}{R}, \frac{Q}{vD}\right) \quad (5)$$

donde r es la distancia desde el pivote de la máquina hasta cada punto de descarga (m) y R , la longitud de la máquina (m). Las variables h_o , h_R y h_m se obtuvieron de los mismos tres modelos de simulación numéricos anteriores.

Validación de las ecuaciones propuestas

Para validar las ecuaciones propuestas se estableció como indicador el error porcentual absoluto medio, $MAPE$, de la carga hidráulica a lo largo de la tubería principal que consolida los valores la carga de presión y la pérdida de carga. Se calculó del siguiente modo:

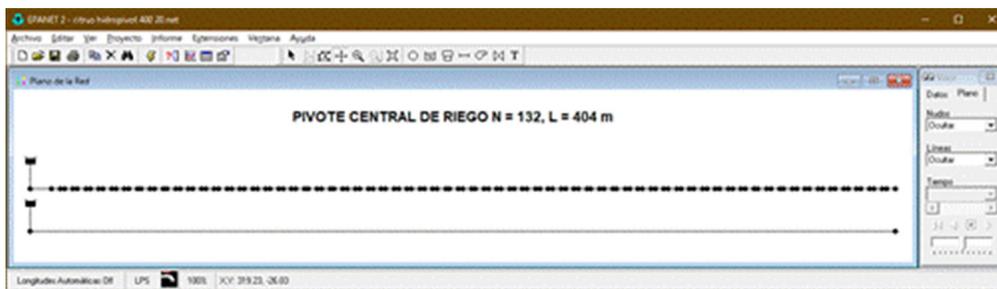


FIGURA 2. Ejemplo de modelo de pivote central en el software EPANET 2.

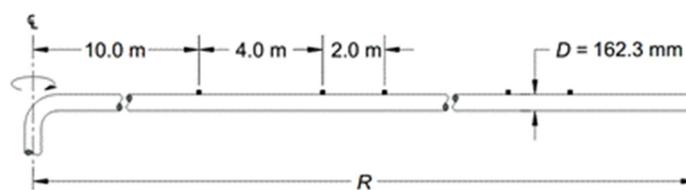


FIGURA 3. Esquema de análisis de la modelación de los pivotes centrales.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum \left(\left| \frac{Y_i - \hat{Y}}{Y_i} \right| \right) 100\% \quad (6)$$

donde Y_i es el valor de la carga de presión medido, \hat{Y} , el valor estimado y n es el número de mediciones. Si el valor resultante de $MAPE \leq 1 \dots 2\%$, entonces las expresiones modelan con suficiente precisión la pérdida de carga y la carga de presión que se produce en la tubería principal de la máquina de riego.

Las mediciones se realizaron en la máquina de pivote central que recientemente se instaló en áreas de la Empresa Agropecuaria “Jiguaní”, prevista para el riego de 32 ha de cítricos que se fomentarán (Figura 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pérdida de carga

En la Tabla 2 se recogen los valores de F calculados a partir de las variables hidráulicas h_o , h_R y h_m , que se obtuvieron con el modelo numérico de simulación implementado en el software EPANET 2. Se observa que, en el rango que se analiza ($64 \leq N \leq 270$), F es solamente función de N y no del número adimensional $Q (n D)^{-1}$. Esto normalmente sucede en el flujo de fluidos a presión por tuberías con números de Reynolds, R_e , elevados. Téngase presente que $Q (n D)^{-1} \propto R_e$.

TABLA 2. Valores calculados de F

N	$Q (n D)^{-1}$		
	$6.2 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^5$	$1.8 \cdot 10^5$
64	0.553	0.553	0.553
132	0.550	0.550	0.550
270	0.549	0.549	0.549

Para explicar la relación funcional entre F y N , se adoptó el modelo matemático que se muestra a continuación:

$$F = 0.548 + \frac{0.322}{N} \quad (7)$$

Con los parámetros estadísticos fundamentales siguientes:

- Coeficiente de correlación, R : 0.98
- Coeficiente de determinación, R^2 : 96.1%
- Error estándar de la estimación: 0.000367
- Error medio absoluto: 0.000299

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica el 96.1% de la variabilidad en F ; el coeficiente de correlación igual a 0.98, indica una relación relativamente fuerte entre las variables y el error estándar de la estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.000367, con el que se construyen los límites de predicción.

En el modelo propuesto, se observa que cuando $N \Rightarrow \infty$, $F = 0.548$. Este es justamente el valor de F , para el exponente de la velocidad igual a 1.852 de la ecuación de Hazen-Williams para las pérdidas de carga, mostrado en la Figura 5 como una recta horizontal ($F_{Ch\&M}$). En la propia figura se aprecia que los nuevos valores de F son mayores que $F_{Ch\&M} = 0.548$ e inferiores a los que, en forma curvilínea, obtuvieron Keller & Bliesner (1990) ($F_{K\&B}$).

Véase también que frente a una amplia variación de N se presenta un pequeño cambio de F . Por tanto, siguiendo el mismo razonamiento de (Keller & Bliesner 1990), que propusieron un valor constante de $F_{K\&B} = 0.555$, alternativamente a (7) se puede utilizar el valor de $F = 0.551$ con un margen de error de $\pm 0.3\%$. Si se utilizara el valor de $F_{K\&B} = 0.555$, se cometería un error máximo del 1%.

Así, para pivotes centrales configurados para el riego de cítricos, utilizando la ecuación de Hazen-Williams, dado que las condiciones de flujo normales en el equipo se encuentran dentro de sus límites de validez, la ecuación de pérdida de carga, H_F , en el lateral es la siguiente:

$$H_F = F \cdot 1.217 \cdot 10^{10} \frac{R Q_e^{1.852}}{C^{1.852} D^{4.87}} \pm \Delta Z \quad (8)$$

Si se considera que $F = 0.551$ y $C = 120 \dots 130$, entonces:

$$H_F = 9 \cdot 10^5 R \frac{Q_e^{1.852}}{D^{4.87}} \pm \Delta Z \quad (9)$$

en las que F es el factor de fricción (adimensional); C , coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams; R ,



FIGURA 4. Máquina de pivote central para el riego de cítricos.

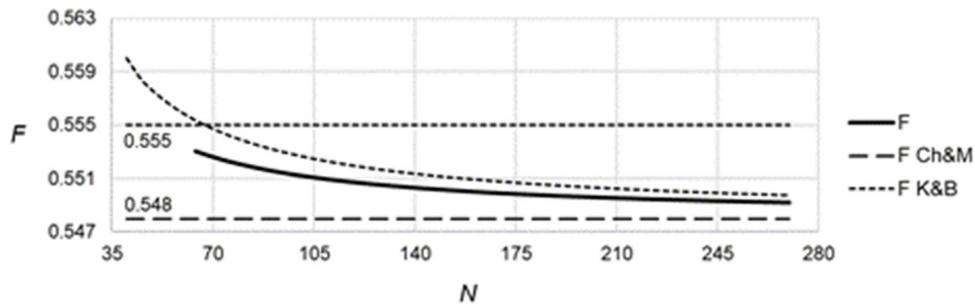


FIGURA 5. Variación de F con N.

la longitud total (m); Q_e , la capacidad efectiva de la máquina ($L s^{-1}$); D , el diámetro interior de la tubería (mm) y DZ , la diferencia máxima de carga de posición, positiva o negativa (m).

Distribución de la carga de presión

En la [Tabla 3](#) se muestra una selección de los 1 407 valores de H calculados a partir de las variables hidráulicas h_o , h_R y h_r , que también se obtuvieron con el modelo numérico de simulación hidráulica implementado en el software EPANET 2.

El análisis de regresión múltiple que se realizó para definir la influencia de las tres variables independientes $\frac{r}{R}$, N y $Q (n D)^{-1}$ sobre el parámetro dependiente H , resultó que las dos últimas no tienen un impacto estadísticamente significativo, para un nivel de confianza igual o superior al 95%. Como consecuencia, para el rango de valores analizados, H solamente es dependiente de $\frac{r}{R}$.

Así, a partir de un análisis de regresión polinomial, que involucra a $\frac{r}{R}$ y potencias de $\frac{r}{R}$, se determinó que el orden apropiado máximo del polinomio de ajuste es 6; no obstante, sobre la base de un análisis de selección del modelo de regresión, se adoptó un modelo de orden 5 que tiene igual coeficiente de determinación ajustado, R^2_{adj} , hasta la milésima cifra significativa, donde H es función de las variables $\frac{r}{R}$, $(\frac{r}{R})^2$, ..., $(\frac{r}{R})^5$. De ese modo, para un nivel de confianza igual o superior al 95%, el polinomio de mejor ajuste que resulta es:

$$H = 1 - 1.82\left(\frac{r}{R}\right) + 1.13\left(\frac{r}{R}\right)^3 - 0.31\left(\frac{r}{R}\right)^5 \quad (10)$$

Con los siguientes parámetros estadísticos principales:

- Coeficiente de correlación, R: 1.0000
- Coeficiente de determinación, R^2 : 99.9997%
- Coeficiente de determinación ajustado, R^2_{adj} : 99.9997%
- Error estándar de la estimación: 0.000516

Rescribiendo (9), se tiene que:

$$H = 1 - 1.82\left[\left(\frac{r}{R}\right) - 0.62\left(\frac{r}{R}\right)^3 + 0.17\left(\frac{r}{R}\right)^5\right] \quad (11)$$

Resultó que (11) es parecida a la siguiente forma de la ecuación que propusieron [Chu & Moe, \(1972\)](#), con pequeñas discrepancias en el valor de los coeficientes de las variables independientes:

$$H = 1 - 1.88\left[\left(\frac{r}{R}\right) - 0.66\left(\frac{r}{R}\right)^3 + 0.20\left(\frac{r}{R}\right)^5\right] \quad (12)$$

La diferencia máxima entre los resultados de ambas ecuaciones es de 15 mm, que representa un -5.2% de error.

Finalmente, para las máquinas de pivote central configuradas para el riego de cítricos, la ecuación de la carga de presión, h_r , en cada salida sobre la tubería principal, ubicadas a una distancia r del pivote, es la siguiente:

TABLA 3. Valores calculados de H

N	Q (n D) ⁻¹	r/R				
		0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
64	6.2 · 10 ⁴	1.000	0.564	0.223	0.039	0.000
	1.2 · 10 ⁵	1.000	0.563	0.222	0.039	0.000
	1.8 · 10 ⁵	1.000	0.563	0.222	0.039	0.000
132	6.2 · 10 ⁴	1.000	0.562	0.221	0.038	0.000
	1.2 · 10 ⁵	1.000	0.562	0.221	0.038	0.000
	1.8 · 10 ⁵	1.000	0.562	0.221	0.038	0.000
270	6.2 · 10 ⁴	1.000	0.562	0.220	0.037	0.000
	1.2 · 10 ⁵	1.000	0.562	0.220	0.037	0.000
	1.8 · 10 ⁵	1.000	0.562	0.220	0.037	0.000

$$h_r = 9 \cdot 10^5 R \frac{Q_e^{1.852}}{D^{4.87}} \left\{ 1 - 1.82 \left[\left(\frac{r}{R} \right) - 0.62 \left(\frac{r}{R} \right)^3 + 0.17 \left(\frac{r}{R} \right)^5 \right] \right\} + h_R \pm \Delta Z_{(R-r)} \quad (13)$$

Validación de las ecuaciones propuestas

En la [Figura 6](#) se puede observar que los puntos de medición de la carga hidráulica se ubican a ambos lados de la curva que representan sus valores calculados. La dispersión de estos puntos con relación a la curva se atribuye a las diferencias que pueden existir en las condiciones de rugosidad (coeficiente C de Hazen-Williams y pérdida de carga locales no previstas) y, fundamentalmente, a la apreciación del instrumento de medición de la presión (manómetro de glicerina), que introduce un error de ± 0.51 m. No obstante, las desviaciones son relativamente pequeñas. El cálculo del error porcentual medio absoluto, MAPE, produce un valor de 0.49%. Esta cifra, menor que 1 ... 2%, indica que las ecuaciones propuestas tienen excelente precisión.

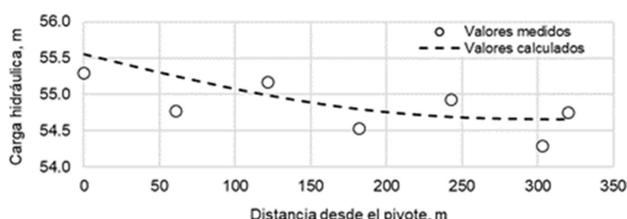


FIGURA 6. Carga hidráulica calculadas y medidas.

Igualmente, en el gráfico de dispersión que se presenta en la [Figura 7](#), se observa correspondencia entre los valores de carga hidráulica calculadas y medidas.

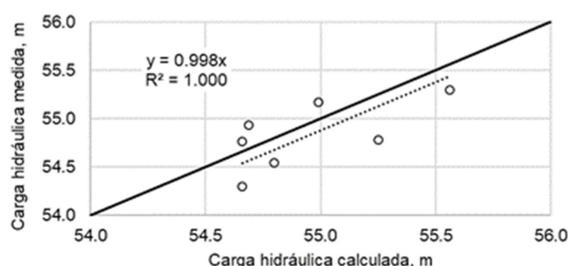


FIGURA 7. Dispersión de los valores de carga hidráulica calculadas y medidas.

CONCLUSIONES

- Se presenta el desarrollo de las expresiones matemáticas para para calcular la pérdida de carga y la distribución de la carga de presión en los pivotes centrales configurados para el riego de plantaciones de cítricos.

- El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica el 96.1% de la variabilidad en F ; el coeficiente de correlación igual a 0.98, indica una relación relativamente fuerte entre las variables y el error estándar de la estimación muestra que la desviación estándar de los residuos es 0.000367
- En el modelo propuesto, se observa que cuando $N \rightarrow \infty$, $F = 0.548$. Este es justamente el valor de F , para el exponente de la velocidad igual a 1.852
- El cálculo del error porcentual medio absoluto, MAPE, produce un valor de 0.49%. Esta cifra, menor que 1...2%, indica que las ecuaciones propuestas tienen excelente precisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBANI, L.; PALENTINI, L.: *Country Case Study. Working to Zero Hunger: Zimbabwe*, [en línea], Ed. CESVI, Bergamo, Italy, 14 p., 2016, Disponible en: <https://www.cesvi.eu/wp-content/uploads/2017/01/Country-Case-Study-Zimbabwe.pdf>.
- ALBRIGO, L.G.; STELINSKI, L.L.; TIMMER, L.W.: *Citrus*, no. solc. SB369 .A572 2019, ser. Crop production science in horticulture, no. ser. 29, Ed. CABI, Second ed., Boston, MA, 314 p., 2019, ISBN: 978-1-84593-815-4.
- ANWAR, A.A.: “Correction Factors for Center Pivots with End Guns”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(2): 113-118, 2000, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2000\)126:2\(113\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2000)126:2(113))
- BAPTISTA, V.B. da S.; COLOMBO, A.; BARBOSA, B.D.S.; ALVARENGA, L.A.; DIOTTO, A.V.: “Pressure Distribution on Center Pivot Lateral Lines: Analytical Models Compared to EPANET 2.0”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(8): 04020025, 2020, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001488](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001488)
- BAPTISTA, V.B. da S.; COLOMBO, A.; TEIXEIRA, T.H.B.; SANTOS, P.A.B. dos; DIOTTO, A.V.; FARIA, L.C.: “Influência do canhão final na distribuição de pressão e vazão da linha lateral de um pivô central”, *IRRIGA*, 1(1): 8-17, 2019a, ISSN: 1808-8546, DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v1n1p8-17>, Disponible en: <https://revi.stas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3901>.
- BAPTISTA, V.B. da S.; CÔRCOLES, J.I.; COLOMBO, A.; MORENO, M.Á.: “Feasibility of the Use of Variable Speed Drives in Center Pivot Systems Installed in Plots with Variable Topography”, *Water*, 11(10): 2192, 2019b, ISSN: 2073-4441, DOI: <https://doi.org/10.3390/w1102192>, Disponible en: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/10/2192>.

- CHU, S.T.; MOE, D.L.: “Hydraulics of a Center Pivot System”, *Transactions of the ASAE*, 15(5): 894-0896, St. Joseph, MI, 1972, ISSN: 0001-2351, DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.38034>, Disponible en: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=38034&t=3>.
- COELHO, E.; COELHO FILHO, M.; SIMÕES, W.; COELHO, Y.: “Irrigation for citrus in the northeast of Brazil”, *Laranja*, 27(2): 297-320, 2006.
- FERNÁNDEZ-HUNG, K.; FUENTES-ELÍAS, I.; FAJARDO-NÚÑEZ, D.; MARTÍNEZ-MATAMOROS, J.; ROSABAL-MOJENA, R.; ÁLVAREZ-ARÉVALO, E.; GUEVARA-PÉREZ, D.: “Manejo del riego con máquina de pivote central en plantaciones jóvenes de cítricos de la Empresa Agropecuaria “Jiguani””, *CitriFrut*, 36(2): 26-38, 2019, ISSN: 1607-5072.
- FERNÁNDEZ-HUNG, K.; VARGAS-RODRÍGUEZ, P.; CUETO-RODRÍGUEZ, J.R.; BROWN-MANRIQUE, O.N.: “Capacity of center pivot systems and emitter discharges for citrus irrigation. A case study”, *INGE CUC*, 18(1): 105-113, 2022, ISSN: 2382-4700, DOI: <https://doi.org/10.17981/ingecuc.18.1.2022.09>, Disponible en: <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/4123>.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D.: *Sprinkle and trickle irrigation*, Ed. Springer Science and Business Media, New York, USA, 652 p., 1990, ISBN: 978-1-4757-1425-8.
- KINCAID, D.C.; HEERMANN, D.F.: “Pressure Distribution on a Center-Pivot Sprinkler Irrigation System”, *Transactions of the ASAE*, 13(5): 556-0558, St. Joseph, MI, 1970, ISSN: 0001-2351, DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.38662>, Disponible en: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=38662&t=3>.
- MELO, O.O.; LÓPEZ, L.A.; MELO, S.E.: *Diseño de Experimentos. Métodos y Aplicaciones.*, Ed. Universidad Nacional de Colombia, Segunda ed., Bogotá, 675 p., 2020, ISBN: 978-958-701-815-8.
- REDDY, J.M.; APOLAYO, H.: “Friction Correction Factor For Center-Pivot Irrigation Systems”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 114(1): 183-185, 1988, ISSN: 0733-9437, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1988\)114:1\(183\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1988)114:1(183)), Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%281988%29114%3A1%28183%29>.
- SCALOPPI, E.J.; ALLEN, R.G.: “Hydraulics of Center-Pivot Laterals”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119(3): 554-567, 1993, ISSN: 0733-9437, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:3\(554\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:3(554)), Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%281993%29119%3A3%28554%29>.
- SEYEDZADEH, A.; PANAH, A.; MAROUFPOOR, E.; LIAGHAT, A.: “Analytical Head Loss Equation of Center-Pivot Irrigation System”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 147(7): 06021004, 2021, ISSN: 1943-4774, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001588](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001588), Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001588>.
- TABUADA, M.A.: “Friction Head Loss in Center-Pivot Laterals with Single Diameter and Multidiameter”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(10): 04014033, 2014, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000755](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000755), Disponible en: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000755](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000755).
- VALIANTZAS, J.D.; DERCAS, N.: “Hydraulic Analysis of Multidiameter Center-Pivot Sprinkler Laterals”, *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(2): 137-146, 2005, ISSN: 0733-9437, DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:2\(137\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:2(137)), Disponible en: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9437%282005%29131%3A2%28137%29>.
- VALMONT IRRIGATION: *Orchard Planning*, [en línea], Ed. Valmont Industries, Inc., Valley, NE 68064, USA, 2019, Disponible en: https://az276020.vo.msecnd.net/valmontproduction/docs/librariesprovider120/soluciones-para-cultivos-y-granjas/sp1039-0819-orchard-planning-brochure_low_spreads.pdf?sfvrsn=d21a1139_4.
- ZANINI, J.R.; PAVANI, L.C.; DA SILVA, J.A.A.: *Irrigação em Citros*, Ed. FUNEP, Jaboticabal, 35 p., 1998.

Kaddiel Fernández Hung, Ingeniero Hidráulico, Máster en Ingeniería Hidráulica, Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias, Especialista en Investigaciones, Innovación y Desarrollo, Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical, Grupo de Difusión Tecnológica de Contramaestre, Contramaestre, Santiago de Cuba, Cuba.

Pável Vargas Rodríguez, Ingeniero en Riego y Drenaje, Especialista en Fomento de Tierras y Aguas para el Regadío, Máster en Ingeniería de Regadíos, Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias, Profesor Titular, Universidad de Oriente, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba. e-mail: vargasrodriguezpavel963@gmail.com

Jorge Carlos Armas Baño, Jorge Carlos Armas Baño, Ingeniero Hidráulico, Doctorando del Programa Ciencias Técnicas Agropecuaria de la Universidad de Ciego de Ávila Máximo Gómez Báez (UNICA), Universidad de Oriente, Facultad de Construcciones, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Santiago de Cuba, Cuba. e-mail: jorgecarlosarmasbano@gmail.com

Alberto Méndez Jocik, Ingeniero en Riego y Drenaje, Doctor en Ciencias Técnicas Agropecuarias, Especialista Principal de Diseño, Ingeniería y Consultoría, Empresa Nacional de Proyectos e Ingeniería, Plaza, La Habana, Cuba. e-mail: joc4263@gmail.com.

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