

Resultados del riego por surcos abiertos y cerrados, mediante la aplicación de condicionantes de manejo en caña de azúcar

Ricardo Pérez Hernández

email: auroraa@infomed.sld.cu

Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola. Ministerio de la Agricultura. La Habana, Cuba.

Esequiel Rolando Jiménez Espinosa

email: esequieljimenez79@gmail.com

Hydrometeorological Service. Ministry of Agriculture. Georgetown. Guyana.

José Luis Silveira Rivero

Dpto. de Riego y Drenaje. Empresa Azucarera Urbano Noris, Holguín, Cuba.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue “evaluar tres caudales y dosis de riego, en surcos abiertos y cerrados, para determinar los mejores indicadores de calidad del desempeño del riego, en vertisoles”. Las investigaciones se realizaron en el bloque 0-68, variedad Jaronú (60-5), área neta de 49.52ha, y pendiente 0,001m/m, en la Empresa Azucarera U. Noris en Holguín. Mediante el modelo de infiltración Kostiakov – Lewis, los caudales de 3.2, 4.3 y 5 L/s se evaluaron para dosis de riego de 35, 40 y 45 mm, aplicándose las condicionantes: “satisfacción parcial y total de la dosis de riego (Zr) aguas abajo”. Tanto para surcos abiertos como cerrados, se obtuvo una reducción significativa de los tiempos de infiltración, y unido a ello, mayores valores de eficiencias en el evento de riego.

Palabras claves: Investigaciones de campo, surcos abiertos y cerrados, y tiempo de infiltración reducido.

Irrigation results for open and closed furrows, by mean of two manege condition in sugar cane.

ABSTRACT

The objective of this work was “to evaluate three flows and doses of irrigation, in open and closed furrows, to determine the best indicators of quality of irrigation performance, in vertisols”. The investigations were carried out in block 0-68, Jaronú variety (60-5), net area of 49.52ha, and slope 0.001m/m, at the U. Noris Sugar Company in Holguín. Using the Kostiakov-Lewis infiltration model, flows of 3.2, 4.3 and 5 L/s were evaluated for irrigation doses of 35, 40 and 45 mm, applying the conditions: “partial and total satisfaction of the irrigation dose (Zr) downstream”. For both open and closed furrows, a significant reduction in infiltration times was obtained, and together with this, higher values of efficiencies in the irrigation event.

Key words: Field investigations, open and closed furrows, and time reduced infiltration.

INTRODUCCIÓN

Según (Martín, 1987), la caña de azúcar ha estado ligada a la economía de Cuba, y este país ha sido reconocido como una de las regiones más favorables para la producción de este cultivo, siendo el producto exportable durante muchos años. Además, la producción de azúcar en Cuba, representa un papel estratégico y básico para la economía nacional. Dicho autor, agregó que el riego y drenaje tienen un papel importante a partir de las experiencias y las condiciones cubanas, con alto potencial hidráulico en el país, así como, diferentes sistemas de regadío, unido al correcto manejo del riego y a su importancia económica.

Pereira et al. (2010), confirmaron que el riego superficial mantiene una relevante importancia en el desarrollo del regadío a escala mundial, ocupando un 80 % del total de las áreas irrigadas; además, por continuar siendo el método más apropiado para suelos llanos y pesados, manteniéndose económicamente rentable para muchos cultivos y sistemas de producción. Bautista et al. (2009), reportaron que el método de 2 puntos de aproximación, es una de las mejores técnicas para la determinación de los parámetros de infiltración, mediante datos obtenidos en evaluaciones de campo y balance de masa. Ello principalmente, por la simplicidad de datos y procedimientos matemáticos.

Por otra parte, (Guerrero et al., 2016) evaluaron 3 modelos de infiltración: Kostiakov, Kostiakov-Lewis y Philip, en surcos de 100m de longitud y espaciamientos de 0,8m en suelos arcillosos de Yara (Granma), reportando que el modelo de Kostiakov-Lewis ocupó el primer lugar conforme a los indicadores evaluados. Lo anterior, coincidió con los reportes de (Pérez et al., 2020), quienes evaluaron 5 modelos diferentes de infiltración para cada uno de los caudales utilizados, asociados a distintas longitudes de surcos y condicionantes de manejo para el tiempo de infiltración durante la fase de mojado.

El objetivo de la investigación es evaluar tres caudales y dosis de riego, en surcos abiertos y cerrados con longitudes de 350m, seleccionando los mejores a partir de la determinación de los indicadores de calidad del desempeño del riego (eficiencias), en suelos oscuros plásticos (vertisoles).

En el presente artículo, se abordan de forma comparativa estos resultados, aplicándose las condicionantes de manejo para el recurso agua; así como las respectivas comparaciones de los tiempos de infiltración reducidos, con los tiempos de infiltración normal (100%). Incluyéndose, las magnitudes de las eficiencias de riego asociadas a cada uno de los caudales evaluados y sus respectivas dosis de riego (Zr).

MATERIALES Y METODOS: DATOS GENERALES

Los datos se tomaron a partir de los trabajos de evaluaciones de campo realizadas en el bloque cañero de riego y drenaje parcelario (0 - 68), cepa caña planta, variedad Jaronú (60 – 5), área neta 49,52 ha y pendiente de 0,001 m/m, correspondiente a la empresa azucarera “Urbano Noris”, Holguín. En cada evaluación se regaron tres surcos simultáneamente, realizándose todas las mediciones en el surco central previamente estaquillado cada 20m. La toma de agua para el regadío fue desde un canal secundario, construido perpendicularmente a la dirección de los surcos (figura 1 y 2), utilizándose sifones semiflexibles de PVC y dos aforadores hidrométricos portátiles tipo Parshall (previamente calibrados), según: (Pérez, 2000) y (Pérez y Meneses, 2004).



Figura 1. Ceba de sifones



Figura 2. Canal secundario

En la tabla 1, se muestra el comportamiento de la humedad inicial media acumulada desde la superficie del suelo hasta el perfil de (0,4 – 0,5) m, antes del inicio del riego.

Tabla1. Humedades en el perfil del suelo

Distancia (m)	Cabecera: 0	80	160	240	350
Humedad (% p.s.s.)	59,1	58,6	58,4	58,1	55,7
H. media acumulada (% p.s.s.)	58				

Resultados de la determinación de la infiltración del agua en el suelo.

Método empleado, plazoleta de inundación: a) velocidad de infiltración instantánea (cm/h), b) media (mm/min), y c) lámina de infiltración media (mm).

$$a) I = 24,4 * t^{-0,7} \quad b) I_m = 13,55 * t^{-0,7} \quad c) hm = 13,55 * t^{0,3}$$

La fuente de abasto de agua fue la estación de bombeo “Veinte Rosas” ubicada en el rio Cauto, con un caudal real de 3,7m³/s y carga 30m. La conducción del agua hacia las áreas bajo riego se llevó a cabo mediante una red de canales, abasteciendo parte de las áreas cañeras de la empresa azucarera “Urbano Noris”, así como también a las empresas azucareras, “Cristino Naranjo” y “Antonio Maceo”. El suelo de la región se caracteriza por: alta fertilidad y alto contenido de arcilla montmorillonita, asociado a problemas de drenaje debido a su baja velocidad de infiltración de 1,23 cm/h, utilizándose una plazoleta de inundación (muestreos de humedad) y el método de aforo de entrada y salida, mediante los dispositivos hidrométricos anteriormente referidos.

Por otra parte, en ausencia prolongada de lluvias o riego, estos suelos llanos presentan en la superficie agrietamientos significativos y una coloración grisácea, la cual tiende a ser más oscura con el aumento de la profundidad. Al humedecerse, se hacen más negruzcos aumentando su plasticidad debido al tipo de arcilla, coincidiendo con los reportes de (Humbert, 1979). Sobre la base de los argumentos anteriores, los surcos de riego se construyeron con distanciamiento de 1,6m, acorde a los propósitos siguientes: a) un humedecimiento uniforme sin desbordamiento de agua, b) un perímetro mojado cuyos conos de humedad se solapan entre surcos contiguos. Respecto al perímetro mojado, (Walker and Kasilingan, 2004), afirmaron que la rugosidad relativa de los surcos puede ser observada aguas abajo, donde pueden existir secciones con diferentes dimensiones, afirmando que existen evidencias de que también varían la rugosidad y el perímetro húmedo.

Los caudales seleccionados fueron: (3,2, 4,3 y 5,0) L/s, para una longitud de surcos de 350m, evaluándose cada uno para dosis de riego de: (35, 40 y 45) mm, según la tabla 2. Se destaca la utilización de las variantes de riego por surcos (abiertos y cerrados), así como la condicionante correspondiente de manejo del agua.

Tabla 2. Datos de evaluaciones de campo

AREA DEL BLOQUE	BLOQUE # 0 – 68 (An = 49,52) ha		
	$Q_o = 3,2$ L/s	$Q_o = 4,3$ L/s	$Q_o = 5$ L/s
Q_{mne} y Q_{min} (L/s)	6,73 - 1,38	7,02 - 1,47	7,3 - 1,52
S_o (m/m)	0,001	0,001	0,001
Esp (m)	1,6	1,6	1,6
L_s (m)	350	350	350
K (m ³ /m/min)	0,0045	0,0069	0,00725
a	0,5	0,48	0,52
f_o (m ³ /m/min)	0,000127	0,00015	0,00013
$Z_{req.}$ (mm)	35 40 45	35 40 45	35 40 45
T_{av} (min)	102	100	97

Q_o : Caudal, S_o : pendiente, Esp : espaciamiento, L_s : longitud del surco, K y a : coeficientes de Kostiakov, f_o : velocidad de infiltración estabilizada, $Z_{req.}$: dosis de riego, T_{av} : tiempo de avance del agua, Q_{mne} : caudal máximo no erosionable, Q_{min} : caudal mínimo admisible.

Condicionante: satisfacción parcial de la dosis de riego (Z_r) en el extremo de los surcos (aguas abajo), mediante la reducción del tiempo de infiltración, de forma similar a los reportes de (Pérez et al., 2020).

En resumen, el tiempo de la fase de mojado (T_m) acorde al tipo de riego (surcos abiertos y cerrados) = (40 y 30) % respectivamente, del tiempo de infiltración de la lámina de agua requerida (Z_r).

Por otra parte, las magnitudes de las láminas de agua infiltradas (Z_i) en el perfil del suelo se determinaron en los puntos: cabecera, $\frac{1}{4}$ L, $\frac{1}{2}$ L, $\frac{3}{4}$ L, y L (extremo inferior o cola del surco aguas abajo). Ello en función de los respectivos tiempos de oportunidad del agua en los puntos referidos del surco central, lo cual propició:

La correcta representación de los tipos de comportamiento de las láminas de agua infiltradas, de forma gráfica por caudal evaluado [Laminas infiltradas vs tiempo de oportunidad].

La determinación de las magnitudes de los indicadores de calidad y desempeño del riego (eficiencias) para cada caudal evaluado.

NORMATIVAS VIGENTES

El modelo de infiltración utilizado fue: Kostiakov-Lewis, acorde a la Norma Ramal del Ministerio de la Agricultura, (NRAG, 2016). El proceso de cálculo para el diseño y evaluación de cada caudal, se realizó mediante: programaciones en Excel, DIERIS: “Diseño y Evaluación del Riego por Surcos (abiertos y cerrados)” el cual contiene las condicionantes de manejo del agua antes señaladas; el software SIRMUD II, reconocido por el Comité de Riego Drenaje y Medioambiente, como estándar para los trabajos de evaluación, diseño y operación, de las técnicas de riego citadas.

Consecuentemente, las determinaciones de las magnitudes de los caudales (L/s): Q_{mne} (máximo no erosionable) y Q (mínimo), confirmaron la adecuada selección de los caudales (Q_0) utilizados. En todos los casos, se corroboraron in situ las magnitudes de la velocidad del agua próxima a la cabecera del surco, cuyos resultados fueron inferiores a la velocidad máxima admisible.

Ecuacion de kostiakov – lewis. Datos de campo y eficiencias

Ecuación:
$$Z_i = [(K * t^a) + (f_0 * t)] \quad (1)$$

Donde, Z_i : lámina infiltrada (m^3/m), siendo K : coeficiente de Kostiakov ($m^3/m/min$) y t : tiempo de oportunidad (min), a : exponente de Kostiakov, f_0 : velocidad de infiltración estabilizada ($m^3/m/min$). Dichos coeficientes se obtuvieron mediante el método de balance del volumen de agua con dos puntos de aproximación en evaluaciones de campo.

En la tabla 3, se precisan los cálculos para la determinación de las eficiencias del evento de riego.

Tabla 3. Procedimientos de cálculo de las Eficiencias de Riego

EFICIENCIAS DEL RIEGO POR SURCOS
Eficiencia de Almacenamiento (%)
$E_{alm} = [Volumen\ almacenado / Volumen\ necesario] * 100$
Eficiencia de Aplicación (%)
$E_{ap} = [Volumen\ almacenado / Volumen\ aplicado] * 100$
Eficiencia de Distribución (%)
$E_d = [Lamina\ (Z_i)\ en\ (3/4L) / Lamina\ Media\ (Z_m)] * 100$
Uniformidad Absoluta de Distribución (%)
$UAD = [Lam.\ Infiltr.\ en\ la\ Cola\ (Z_c) / Lamina\ Media\ (Z_m)] * 100$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tiempos de avance, laminas de agua infiltradas, estadigrafos y eficiencias

La figura 3, brinda información relevante acerca de los comportamientos de las curvas de avance para cada uno de los caudales evaluados y tiempos respectivos, en diferentes puntos de la longitud de los surcos. Los tiempos de avance mayores para las estaciones ubicadas a lo largo de los surcos se correspondieron con el caudal de 3,2L/s con 102min, seguido del caudal de 4,3L/s con 100min; mientras que el caudal de 5L/s alcanzó el total de la longitud de los surcos (350m), en un tiempo de 97min.

En la tabla 4, se presentan las ecuaciones de los tiempos de avance (min) para dichos caudales, siendo L = longitud del surco (m). Para la ecuación tipo potencial: $T = a * L^b$ los coeficientes adimensionales a y b dependen del caudal aplicado, la pendiente y rugosidad de los surcos, así como de las características físicas del suelo, humedad y velocidad media de absorción del agua.

Las ecuaciones de referencia presentaron una tendencia óptima, con adecuados estadígrafos $R^2 = (1 - 0,99)$.

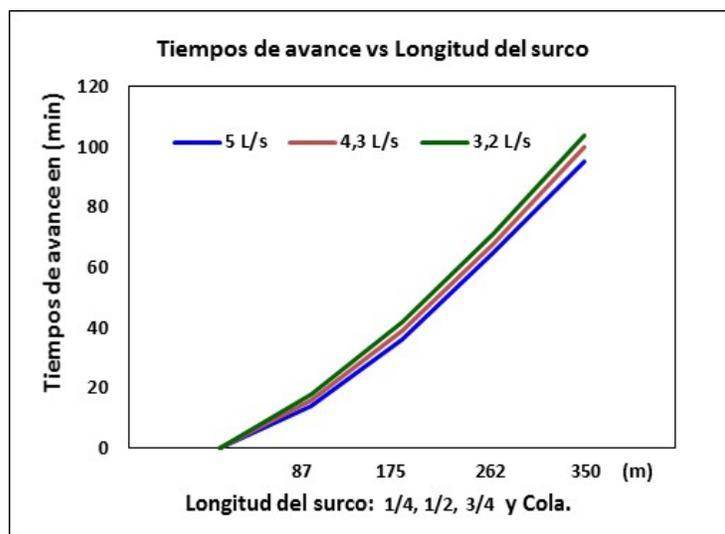


Figura 3. Curvas de avance para los 3 caudales evaluados

Los resultados de los tiempos de avance calculados para cada caudal mediante las ecuaciones de referencia, tienen una fuerte correlación con los tiempos tomados en el campo en 20 estaciones (estacas) equidistantes a lo largo de los surcos.

Tabla 4. Ecuaciones de tiempos de avance y resultados estadísticos.

Qo (L/s)	Ecuaciones de avance (min)	R ²
3,2	$T = 0,0390 * L^{1,344}$	1,0
4,3	$T = 0,0380 * L^{1,343}$	1,0
5,0	$T = 0,0378 * L^{1,34}$	0,99

Por su parte, en las tablas (5, 6 y 7), se muestran los respectivos comportamientos de los tiempos de oportunidad para los caudales evaluados y dosis de riego requeridas. Los mayores valores de los tiempos de oportunidad se presentaron en la cabecera, $\frac{1}{4} L$ y $\frac{1}{2} L$, reduciéndose estos a partir de $\frac{3}{4} L$, con valores menores en el extremo aguas abajo (cola de los surcos). Además, se comprobó la influencia del tamaño y agrietamiento de los poros del suelo durante el proceso de infiltración del agua, debido al caudal aplicado, en correspondencia con (Bautista and Schlegel, 2017), (Kanya, 2007) y (Pérez et al., 2000).

Las figuras (4, 5 y 6) muestran el comportamiento de las láminas de agua infiltradas mediante la ecuación de Kostiakov-Lewis, en función de los tiempos de oportunidad para las dosis de riego referidas por caudal evaluado, tablas (5, 6 y 7). Se destaca también, el aumento de las magnitudes de las láminas de agua infiltradas con el incremento de las dosis de riego.

Para la región, cultivo y suelos referidos, se requiere de un manejo eficiente del recurso hídrico dadas las condiciones de campo (topografía, infiltración y agrietamiento) de los suelos durante el periodo poco lluvioso, coincidiendo con (Strelkoff et al., 2009).

Por tanto, la selección de los caudales más aptos no tiene que estar asociada solamente a un adecuado tiempo de avance del agua, sino también, a la correcta minimización del tiempo de mojado (infiltración) aguas abajo; lo cual se asocia a tiempos de aplicación y oportunidad más satisfactorios, coincidiendo con (Pérez y Meneses, 2004), (Guerrero et al., 2016) y (Pérez et al., 2020).

Tabla 5. Tiempos de oportunidad (min), $Q_o = 3,2$ L/s

Dosis de riego	Cabecera	¼ Ls	½ Ls	¾ Ls	Cola
$Z_r = 35\text{mm}$	164	150	126	96	64
$Z_r = 40\text{mm}$	185	169	145	115	83
$Z_r = 45\text{mm}$	206	191	166	137	104

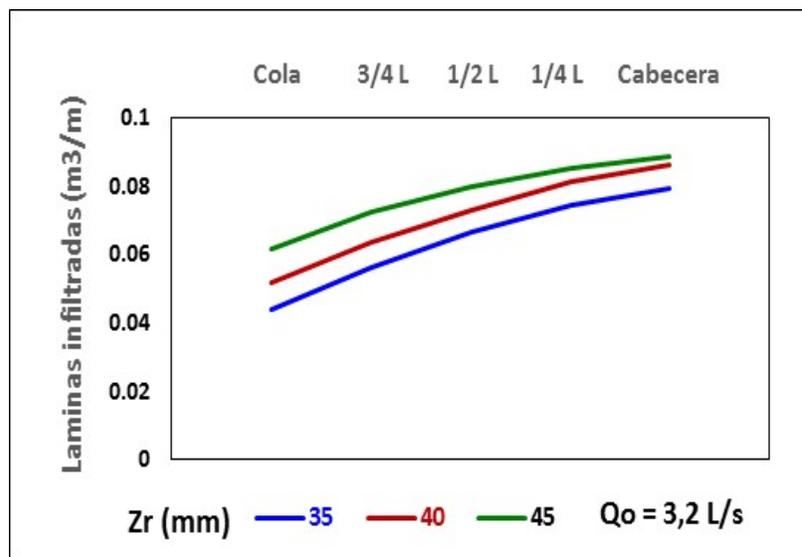


Figura 4. Láminas infiltradas en función de los tiempos de oportunidad

Tabla 6. Tiempos de oportunidad (min), $Q_o = 4,3$ L/s

Dosis de riego	Cabecera	¼ Ls	½ Ls	¾ Ls	Cola
$Z_r = 35\text{mm}$	134	118	94	66	34
$Z_r = 40\text{mm}$	144	128	104	76	44
$Z_r = 45\text{mm}$	155	140	116	87	55

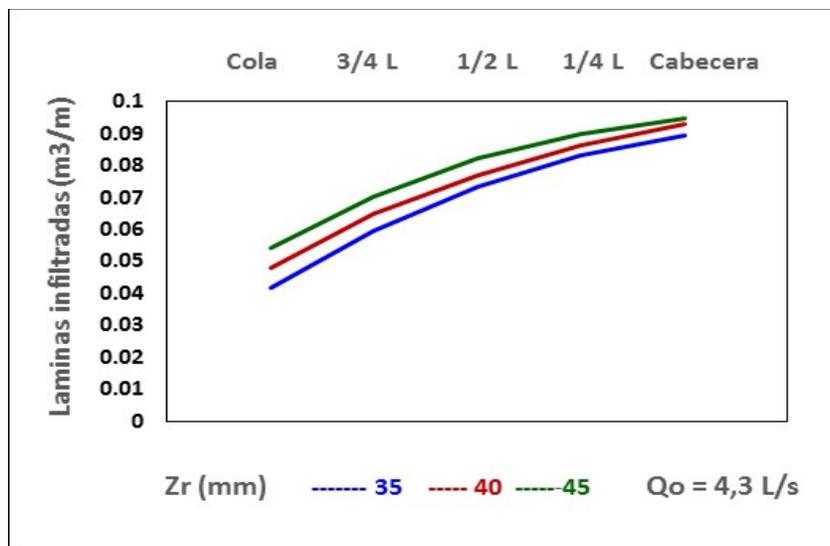


Figura 5. Láminas infiltradas en función de los tiempos de oportunidad

Tabla 7. Tiempos de oportunidad (min), $Q_o = 5,0$ L/s

Dosis de riego	Cabecera	¼ Ls	½ Ls	¾ Ls	Cola
$Z_r = 35$ mm	119	104	81	54	23
$Z_r = 40$ mm	125	110	87	60	29
$Z_r = 45$ mm	132	117	94	66	35

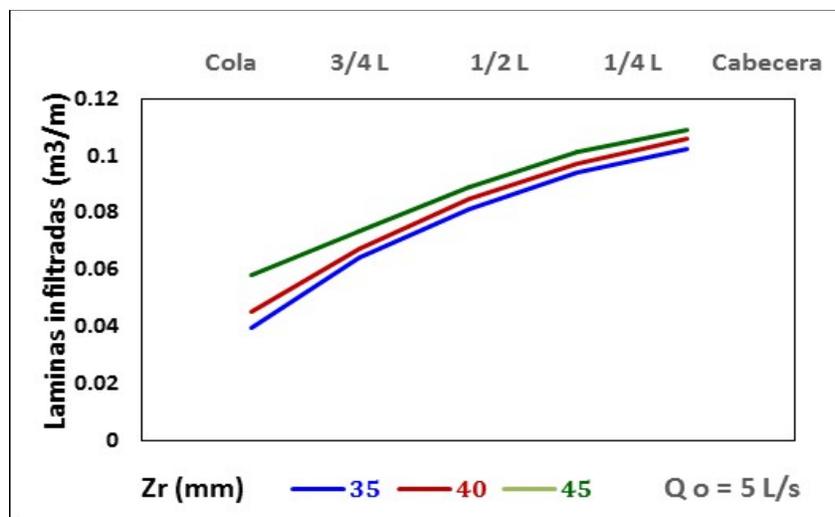


Figura 6. Láminas infiltradas en función de los tiempos de oportunidad

En la tabla 8, se muestran los estadígrafos del evento de infiltración del agua en dependencia del caudal y dosis de riego. Para los caudales (3,2 y 4,3) L/s y Z_r (35, 40 y 45) mm, se obtuvieron ecuaciones de tipo potencial con altos valores de coeficientes de determinación (R^2), los cuales fluctuaron entre (0,9957 y 0,9986), asociado el valor menor a: $Q_o = 4,3$ L/s y $Z_r = 45$ mm, mientras que el valor mayor para dicho caudal se correspondió con $Z_r = 40$ mm.

Para el caudal $Q_o = 3,2\text{L/s}$, las fluctuaciones de $R2$ fueron (0,9976 y 0,9986), asociado el valor menor a $Z_r = 35\text{mm}$ y el mayor a $Z_r = 45\text{mm}$. Por último, para $Q_o = 5\text{L/s}$, las ecuaciones fueron de tipo polinómica con elevados valores de coeficiente de determinación (0,9985 y 0,9998), asociándose el valor menor a $Z_r = 45\text{mm}$ y el mayor a las dosis de riego Z_r (35 y 40) mm, respectivamente. Ello guarda relación, con los reportes de (Pérez et al. ,2020).

Tabla 8. Ecuaciones de ajuste de infiltración por caudal y dosis de riego

Q_o (L/s)	Z_r (mm)	Lineas de tendencia de mejor ajuste	R^2
3,2	35	$Y = 0,0439 * X^{0,3745}$	0,9976
	40	$Y = 0,0515 * X^{0,3225}$	0,9985
	45	$Y = 0,0617 * X^{0,2304}$	0,9986
4,3	35	$Y = 0,423 * X^{0,4814}$	0,9965
	40	$Y = 0,485 * X^{0,4141}$	0,9986
	45	$Y = 0,0548 * X^{0,3512}$	0,9957
5,0	35	$Y = - 0,0027 * X^2 + 0,0319 * X + 0,0106$	0,9998
	40	$Y = - 0,0023 * X^2 + 0,0291 * X + 0,0185$	0,9998
	45	$Y = - 0,0013 * X^2 + 0,021 * X + 0,0378$	0,9985

En las tablas 9 y 10, se presentan los resultados de las eficiencias y pérdidas totales en (% y m^3) por caudal evaluado, dosis de riego (Z_r), y condicionantes establecidas para el tiempo de infiltración en surcos abiertos y cerrados. Además, se presentan las pérdidas de agua respecto al riego con tiempo de infiltración total (100%) en la cola de los surcos, facilitándose las comparaciones correspondientes.

Tabla 9. Eficiencias, pérdidas totales por caudal y dosis de riego (Z_r) en surcos abiertos. Condicionante: T.inf. (reducido) = (0,4 x T.inf. de Z_r) y comparación con Tinf. normal (100% de Z_r).

Dosis de Riego (mm)	$Z_r = 35\text{mm}$			$Z_r = 40\text{mm}$			$Z_r = 45\text{mm}$		
$Q(\text{L/s})$ / Efic. (%)	3,2	4,3	5,0	3,2	4,3	5,0	3,2	4,3	5,0
Efic. almacenamiento	96	98	94	95	96	94	96	94	94,3
Efic. aplicación	60,1	58	53	60,6	61,5	57	61,3	64	61,5
Efic. distribución	78	73,1	68	81,3	76	70,5	83,7	79	73
Unif.Abs.Distribución	68,6	60	52	73	65	56	77	69	60
T.inf. reducido (min)	62	31	20	81	41	26	102	53	33
Pérdidas Totales (%)	40,5	42	47,6	39,4	38,5	43	38,7	36	39,2
Pérdidas	13	14	18	14	14	16	15	14	15,3
Comparacion Efic. (%)	para: T.inf. (100%) de Z_r								
Efic. almacenamiento	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Efic. aplicación	42,6	40,8	43,1	41,5	40,3	45,1	40,1	39,2	46,3
Efic. distribución	87,5	85	76,6	89,7	87,4	79,4	91,3	89,3	82
Unif.Abs.Distribución	82,2	78,4	65,7	86,3	82	70	87,7	85	73,6
T.inf. Total (min)	155	78	45	202	104	58	256	132	73
Pérdidas Totales (%)	57,4	59,2	57	58,5	59,7	55	60	61	53,7

Por otra parte, en la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos con la variante de riego por surcos cerrados, incluyendo las eficiencias de riego y los tiempos de: aplicación (corte del agua), infiltración en la cola de los surcos y oportunidad en el inicio de estos.

Tabla 10. Eficiencias y láminas infiltradas por caudal y dosis de riego (Z_r) en surcos cerrados. Condicionante: T_{inf} . (reducido aguas abajo) = $(0,3 \times T_{inf}$. de Z_r).

Lam.Infiltradas (mm)	$Z_r = 35\text{mm}$			$Z_r = 40\text{mm}$			$Z_r = 45\text{mm}$		
$Q(\text{L/s}) / \text{Efic.} (\%)$	3,2	4,3	5,0	3,2	4,3	5,0	3,2	4,3	5,0
Efic. almacenamiento	98,5	99,3	100	97,4	98,3	99,7	97,2	97,5	98,4
Efic. aplicación	69	61,6	58,2	71,5	66,4	64	73,2	70	69,6
Unif.Abs.Distribución	76,3	73	69,6	78,6	75	71,1	81	77	72,6
T. de corte (min)	148	123	112	163	131	117	179	139	122
T.oport. cabecera (min)	153	128	117	167	135	121	183	144	126
T. Infilt. cola (min)	46	23	15	61	31	17	77	40	25
$L_1(\text{m})$, inicio charca	181	172	167	173	166	163	165	160	159
$Z_1(\text{m}^3/\text{m})$, Lam hasta L_1	0,0723	0,0831		0,0769	0,0863		0,0820	0,0898	0,1018
	0,0960			0,0990					
$Z_o(\text{m}^3/\text{m})$, Lam. cabecera	0,0756	0,0869		0,0800	0,0899		0,0848	0,0932	0,1060
	0,1006			0,1035					
$Z_c(\text{m}^3/\text{m})$, Lam inf. cola	0,0504	0,0546		0,0557	0,0586		0,0615	0,0630	0,0664
	0,0594			0,0629					

A lo anterior se agrega, la distancia a la cual se inicia la formación del agua acumulada en los surcos (L_1) y las láminas de agua infiltradas (Z_1 , Z_o y Z_c), expresadas en (m^3/m) en distintos puntos del surco central.

Los resultados obtenidos se pueden calificar de relevantes, para la técnica de riego por surcos.

Mediante la aplicación de $Q_o = 4,3\text{L/s}$, para $Z_r = 40\text{mm}$ y tiempo de infiltración reducido 53min, se obtuvo el siguiente comportamiento para las eficiencias que caracterizan la calidad del evento de riego:

$$E_{alm} = 96\%, E_{ap} = 64\%, E_d = 79\% \text{ y } UAD = 69\%$$

Evaluando el mismo caudal y dosis de riego, $Q = 4,3\text{L/s}$ y $Z_r = 40\text{mm}$ para el tiempo de infiltración (100% de Z_r) = 104min, se observa un ligero aumento (4%), para la eficiencia de almacenamiento (E_{alm}) respecto al tiempo de infiltración referido. Además, resultó muy significativo el incremento de 21,2% para la eficiencia de aplicación, asociada al tiempo de infiltración reducido de 41min; así como relevante también, fue la gran diferencia entre los tiempos de infiltración (41 y 104) min, a favor de la variante de riego con tiempo de mojado reducido en la cola de los surcos. Por último, las pérdidas de agua alcanzaron 38,5% para el riego en surcos abiertos mediante la condicionante establecida, y de 59,7% para el tiempo de infiltración = 100% de Z_r . Para dicho caudal y dosis de riego, con tiempo de infiltración = 104min, las eficiencias de riego fueron:

$$E_{alm} = 100\%, E_{ap} = 40,3\%, E_d = 87,4\% \text{ y } UAD = 82\%$$

Los altos valores correspondientes a las dos últimas eficiencias, se asocian al excesivo tiempo de infiltración en el extremo inferior de los surcos. Lo cual se refleja en las pérdidas del recurso agua (59,7%).

Los resultados más apropiados para la técnica de riego por surcos cerrados, se asociaron al caudal $Q = 4,3\text{L/s}$ y $Z_r = 40\text{mm}$, con T_{inf} . reducido = 31min. Las eficiencias de riego fueron:

$$E_{alm} = 98,3\%, E_{ap} = 66,4\% \text{ y } UAD = 75\%$$

Ello unido a una adecuada minimización de las pérdidas de agua, destacándose para cada caudal y dosis (Z_r), las distancias del humedecimiento desde la cabecera de los surcos hasta el punto de inicio de la charca L_1 (m), la lámina Z_l (m^3/m) correspondiente, y las respectivas láminas en la cabecera del surco Z_o y en la cola (aguas abajo) Z_c . Resultados muy satisfactorios en general, destacándose la magnitud de la eficiencia de aplicación, la cual supera a los obtenidos con la técnica de riego anterior.

CONCLUSIONES

Resultó relevante, la efectividad del modelo Kostiakov-Lewis para la predicción de las láminas de agua infiltradas en función de los tiempos de oportunidad. También resultaron favorecidas las eficiencias del evento de riego, siendo muy satisfactorias para tiempos de infiltración reducidos respecto al tradicional, tanto en surcos abiertos como cerrados.

Entre los beneficios asociados con las condicionantes de manejo, se destacan: reducción de los tiempos de oportunidad en la longitud de los surcos y de las magnitudes de las láminas de agua infiltradas durante el riego, destacándose también los valores de eficiencias de almacenamiento y aplicación. Surcos abiertos: Para $Z_r = 45\text{mm}$ y caudales (4,3 y 5) L/s, $E_{ap} = (64 \text{ y } 61,5) \%$ respectivamente, con tiempos de infiltración reducidos de (53 y 33) min. Las pérdidas de agua, fueron del (36 y 39,2) % para los caudales citados. Para el tiempo de infiltración 100% de Z_r , las pérdidas totales para dichos caudales fueron: (61 y 53,7) %.

Para surcos cerrados, los mejores resultados se asociaron a los caudales: (4,3 y 5) L/s para $Z_r = 45\text{mm}$, con $T_{inf.}$ reducido = (40 – 25) min, respectivamente. Los resultados obtenidos para las eficiencias de almacenamiento y aplicación fueron: $E_{alm} = 97,5\%$ y $E_{ap} = 69,6\%$. Resumiendo, los mejores comportamientos correspondieron a la técnica de riego mediante surcos cerrados.

REFERENCIAS

Bautista E., Clemmens A. J. and Strelkoff T. S. (2009). Structured application of the two-point method for infiltration parameter estimation in surface irrigation. *Journal Irrigation Drain. Engineers.* ASCE 135 (5), 566–578, USA.

Bautista E. and Schlegel J. L. (2017). A flexible system for estimation of infiltration and hydraulic resistance parameters in surface irrigation. *Trans. ASABE*, 60 (4), 1223 – 1234. 2017. American Society of Agricultural and Biological Engineers. ISSN 2151 – 0032, <https://doi.org/10.13031/trans.12117>, USA.

Guerrero A. M., Tornes N., Brown O. y Gómez Y. (2016). Evaluación de tres modelos en la estimación de la infiltración acumulada”. *Revista Ingeniería Agrícola*”, ISSN-2306-1545, E-ISSN-2227-8761, Vol. 6, No. 3, pp. 41-47, 2016, Cuba.

Kanya L. (2007). Toward real – time control of surface irrigation. PhD thesis. Univ. of Southern Queensland (USQ), Australia. Extraído de: <http://eprints.usq.edu.au/4109/> en: enero 2016 y 2019.

Martín J.R. (1987). La caña de azúcar en Cuba. Editorial Científico Técnica: La Habana, Cuba.

Pérez R., Jiménez E., y Silveira J. L. (2020). Evaluación de modelos de infiltración en riego por surcos, suelos oscuros plásticos. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, VOL. XLI, No. 1, Ene - Abr 2020, p. 43-55, ISSN 1815–591X, RNPS 2066, Cuba.

Pérez R. (2005). Riego Superficial, capítulo 4. *Manual Básico de Riego y Drenaje*. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje, ISSN: 959 – 249 – 176 – 7, pp. 39 – 46. La Habana, Cuba.

Pérez R. y Meneses J. (2004). Impactos de la evaluación del riego por surcos en el cultivo de la caña de azúcar. *Novena Convención Internacional y Feria de las Industrias Metalúrgicas, Mecanización y del Reciclaje. METÁNICA*, Palacio de Convenciones de La Habana, ISSN 1607-6281, La Habana, Cuba.

Pérez R. (2000). Eficiencia del riego por surcos. *CubaAzúcar*, Vol. XXIX, No 3, Julio – Septiembre del 2000, ISSN 0590 – 2916, pp. 60 – 63, Cuba.

Pereira S. L., De Juan V. J., Picornell M. R. y Tarjuelo J. M. (2010). El riego y sus tecnologías. Editado por: Centro Regional de Estudios del agua – Universidad de Castilla de la Mancha, ISBN: 13: 978-84-692-9979-1, Albacete, España.

Strelkoff T. S., Clemmens A. J. and Bautista E. (2009). Field properties in Surface Irrigation Management and Design. *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 135(5), October 1, 2009, ASCE, ISSN 0733 – 9437/2009 / 5 – 525 – 5261. USA.

Walker W. R. and Kasilingan B. (2004). Another look at wetted perimeter along irrigated furrows – modeling implications. *World water and Environmental Resources Congress (EWRI / ASCE)*, Reston, USA.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Contribución de los autores

Ricardo Pérez Hernández. <https://orcid.org/0000-0002-6240-0902>
Conducción de la investigación, procesamiento y análisis de datos. Redacción del manuscrito.

Esequiel Rolando Jiménez Espinosa. <https://orcid.org/0000-0003-0182-8099>
Procesamiento y análisis de los datos, búsqueda bibliográfica. Redacción del manuscrito.

José Luis Silveira Rivero.
Participación en las evaluaciones de campo que sustentan los resultados obtenidos.