

## Evaluación de modelos de infiltración en riego por surcos en suelos ferralíticos

Ricardo Pérez Hernández

email: [auroraa@infomed.sld.cu](mailto:auroraa@infomed.sld.cu).

Ing., Dr. C., Instituto de Investigaciones de Ing. Agrícola. Ministerio de la Agricultura. Cuba.

Esequiel Rolando Jiménez Espinosa

email: [esequiel.jimenez@iprojaz.azcuba.cu](mailto:esequiel.jimenez@iprojaz.azcuba.cu)

Ing., MsC., Empresa de Ingeniería y Proyectos Azucareros,  
Grupo Azucarero Azcuba. La Habana, Cuba.

### RESUMEN

Se evalúan seis modelos empíricos de infiltración para seleccionar los mejores, empleando los indicadores de calidad del riego por surcos abiertos (eficiencias), según el comportamiento de las láminas de agua infiltradas. Esto se hace con datos de campo de trabajos precedentes. Los caudales evaluados fueron:  $Q_o = 1,25$  L/s y  $Q_o = 1,5$  L/s, en la Empresa Ceballos: tabaco y tomate y  $Q_o = 1,56$  L/s, en la Unidad Científico-Técnica, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, Alquizar, cultivo: papayo. El modelo de Kostiakov – Lewis y sus variantes fue el mejor. La fluctuación para eficiencias de almacenamiento y aplicación, fue:  $E_{alm} = 100 - 91,4$  % y  $E_{ap} = 66 - 53,3$  %. La línea de tendencia óptima para cada modelo fue del tipo potencial con  $R^2$  entre (1- 0,9963).

**Palabras clave:** eficiencia del riego, manejo del agua, modelos de infiltración.

## Evaluation of furrow irrigation infiltration models in ferrasol soils

### ABSTRACT

Field evaluations of six infiltration empiric models are presented, and selection of the best based on its effects upon the irrigation quality indicators (efficiencies), in relationship with the behavior of the soil water infiltration. This by means of creditable field evaluation data of precedent works. The evaluated inflows were  $Q_o = 1,25$  L/s and  $Q_o = 1,5$  L/s, in Ceballos: tobacco and tomato.  $Q_o = 1,56$  L/s, in the Technical Scientific Unit, Investigation Institute of Agriculture Engineering, Alquizar: papaya. The Kostiakov – Lewis model was the best, as well as its different variants. The storage and application efficiencies had the following behavior:  $E_{alm} = 100 - 91,4$  % and  $E_{ap} = 66 - 53,3$  %. Finally, for all models, the optimal tendency line was of potential type with  $R^2 = (1 - 0,9963)$ .

**Keywords:** irrigation efficiency, water management, infiltration models.

## INTRODUCCIÓN

Mediante la técnica de riego por surcos abiertos durante la fase de avance, el agua va disminuyendo su velocidad y caudal debido a la rugosidad del surco y su infiltración en el suelo, en relación con los espacios porosos interconectados, el grado de humedad antes del riego y las prácticas de labranza.

Holzappel et al. (1988), citado por Díaz (2001), comprobaron la dependencia de la infiltración con el perímetro mojado, así como su carácter bidimensional.

Kanya (2007) calificó como un desafío la determinación del comportamiento de la infiltración del agua en el riego por surcos, debido a la variabilidad en espacio y tiempo de las propiedades hidrofísicas del suelo, así como las posibilidades de variación de los tiempos de oportunidad. Por otra parte, se destaca la dependencia de la tasa de infiltración con el tiempo y con factores tales como la rugosidad, el área humedecida del surco y el perímetro mojado.

Existen muchas ecuaciones empíricas para describir la infiltración, pero ninguna ha sido capaz de abarcar la gran cantidad de factores asociados con el fenómeno. No obstante, la ecuación de Kostiaikov – Lewis, continúa siendo la más utilizada, requiriendo para la determinación de los parámetros  $K$  y  $a$ , de la aplicación del método de dos puntos de aproximación en la fase de avance (Elliot et al. 1983). Por otra parte, Shepard et al. (1993), propusieron el método de un punto de aproximación para predecir los parámetros de infiltración durante el tiempo de la fase de avance (utilizado en el modelo de Philip), enfatizando que el método no puede estimar con precisión el comportamiento de la distribución del agua a lo largo del surco por tiempo largo.

Por tanto, el objetivo del presente trabajo consistió en la evaluación de seis modelos empíricos de infiltración y selección de los mejores, a partir de los resultados de los indicadores de calidad del desempeño del riego por surcos (eficiencias), en dependencia del comportamiento de las láminas de agua infiltradas.

## DATOS DE CAMPO Y MODELOS EVALUADOS

Los parámetros del riego por surcos con flujo de agua continuo, se obtuvieron a partir de los resultados de evaluaciones de campo realizadas en condiciones de producción en los trabajos de Díaz (2001) y Abreu et al. (2005) en la provincia de Ciego de Ávila, y Pérez et al. (2010), en la provincia de Artemisa, todos en suelos ferralíticos rojos.

Los caudales evaluados fueron:  $Q_o = 1,25$  L/s y  $Q_o = 1,5$  L/s en la Empresa de cultivos varios Ceballos con cultivos de tabaco y tomate respectivamente, mientras que, para la Unidad Científico Técnica del Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola, en Alquizar, el caudal evaluado fue  $Q_o = 1,56$  L/s en el cultivo del papayo (tabla 1).

Los documentos normativos utilizados fueron: ASAE (2000) de la American Society of Agricultural Engineering y la norma cubana ramal del Ministerio de la Agricultura, NRAG (2016). Las magnitudes de  $Z_r$  (lámina de agua infiltrada requerida) en cada evaluación, fueron determinadas por los autores referidos mediante el método gravimétrico, en función de la humedad del perfil del suelo (0,30m) antes y después del evento de riego en distintos puntos de

la longitud de los surcos. Se incluyen la aplicación acertada de: perfilómetros y dispositivos hidrométricos, diseñados y construidos para esta técnica de riego.

También se determinaron los parámetros de Infiltración ( $K$ ,  $a$ ,  $f_0$ ) de la ecuación empírica de Kostiakov – Lewis, según el método de Elliot et al. (1983). El proceso de cálculo de las láminas de agua infiltradas en el surco, se llevó a efecto evaluando la ecuación de referencia para los tiempos de oportunidad del agua en cinco puntos de la longitud del surco (cabecera,  $\frac{1}{4} L$ ,  $\frac{1}{2} L$ ,  $\frac{3}{4} L$  y en el extremo inferior), propiciándose el cálculo de las eficiencias del riego para cada uno de los seis modelos a evaluar mediante programaciones en Excel, incluyendo además, al DIERIS (Diseño y Evaluación del Riego por Surcos) y los software SIRMUD y SIRMUD III. Dichos software se han reconocido por el Comité de Riego Drenaje y Medioambiente de la ASAE y por toda la comunidad científica internacional, como estándares para la evaluación, diseño y operación de la técnica de riego de referencia, destacándose el hecho común de incluir en su programación a la ecuación empírica de Kostiakov – Lewis, así como los métodos llamados Hidrodinámico, de Cero Inercia y de Ondas Cinemáticas.

Las determinaciones de las magnitudes de los caudales (L/s):  $Q$  (máximo no erosionable) y  $Q_0$  (mínimo), confirmaron la adecuada selección de los caudales ( $Q_0$ ) utilizados. En todos los casos se corroboraron las magnitudes de la velocidad del agua próxima a la cabecera del surco, resultando inferiores a la velocidad máxima admisible para dichos suelos. En la tabla 1, se presenta una caracterización general de los datos de campo asociados con las dos provincias citadas.

**Tabla 1. Datos de campo**

| PROVINCIA<br>LUGAR<br>CULTIVO<br>DATOS | Ciego de Ávila            |                           | Artemisa                |
|--|---------------------------|---------------------------|-------------------------|
|  | Ceballos<br>Tabaco<br># 1 | E. C. V.<br>Tomate<br># 2 | IAgric<br>Papayo<br># 3 |
| $Q_0$ (L/s)                            | 1,25                      | 1,5                       | 1,56                    |
| $S_0$ (m/m)                            | 0,0045                    | 0,0035                    | 0,0024                  |
| $E_{sp}$ (m)                           | 0,9                       | 0,9                       | 1,5                     |
| $L_s$ (m)                              | 86                        | 100                       | 130                     |
| $K$ (m <sup>3</sup> /m/min)            | 0,0081                    | 0,0101                    | 0,001578                |
| $a$                                    | 0,41                      | 0,36                      | 0,36                    |
| $f_0$ (m <sup>3</sup> /m/min)          | 0,000201                  | 0,000216                  | 0,000165                |
| $Z_{req.}$ (mm)                        | 35                        | 29                        | 43                      |
| $T_{av}$ (min)                         | 38                        | 40                        | 103                     |
| $T_{corte}$ (min)                      | 57                        | 50                        | 138                     |
| $T_m$ (min)                            | 27                        | 10                        | 35                      |

$Q_0$ : Caudal,  $S_0$ : pendiente,  $E_{sp}$ : espaciamento,  $L_s$ : longitud del surco,  $K$  y  $n$ : coeficientes de Kostiakov,  $f_0$ : velocidad de infiltración estabilizada,  $Z_{req.}$ : dosis de riego,  $T_{av}$ : tiempo de avance del agua,  $T_{corte}$ : tiempo de corte,  $T_m$ : tiempo de la fase de mojado

Para favorecer el ahorro del agua en el riego por surcos abiertos con flujo de agua continuo, se estableció una necesaria condicionante de manejo del agua para la fase de mojado (reducción del tiempo de infiltración en la cola de los surcos), contribuyéndose a la mitigación de los efectos negativos de la sequía agrícola en Cuba. Teniendo en cuenta lo anterior, para los suelos ferralíticos rojos de las regiones estudiadas, se estableció que la duración del tiempo de la fase de mojado ( $T_m$ ) será el 70% del tiempo de infiltración de la lámina de agua requerida ( $Z_r$ ). En resumen, se reducen las magnitudes de los tiempos de oportunidad en diferentes puntos de la longitud de los surcos, asociado con una disminución de los valores de las láminas de agua infiltradas, con incrementos favorables de las eficiencias del evento de riego. En la tabla 2 se resumen los modelos evaluados para cada uno de los caudales de referencia.

**Tabla 2. Modelos evaluados**

| No. del modelo | Denominación del Modelo  |
|----------------|--|
| 1              | Modelo de Kostiakov – Lewis.   |
| 2              | Modelo de Philip.  |
| 3              | Modelo del Soil Conservation Service, SCS 1992   |
| 4              | Modelo del Soil Conservation Service, SCS 1974   |
| 5              | Modelo de Kostiakov – Lewis, que incluye el efecto de la relación entre el perímetro mojado medio ( $PM$ ) y el espaciamiento entre surcos ( $Esp$ )               |
| 6              | Modelo de Kostiakov – Lewis, que incluye el efecto de la relación entre el perímetro mojado en un punto ( $Pmi$ ) de la longitud del surco y el promedio ( $PM$ ). |

Ecuaciones empíricas para cada modelo:

$$\text{Modelo 1:} \quad Z_i = \left[ (K \cdot t^a) + (f_0 \cdot t) \right] \quad (1)$$

donde:  $Z_i$ : lámina infiltrada ( $m^3/m$ ),  $K$ : coeficiente de Kostiakov ( $m^3/m/min$ ),  $t$ : tiempo de oportunidad (min),  $a$ : exponente de Kostiakov,  $f_0$ : velocidad de infiltración estabilizada ( $m^3/m/min$ ).

Dichos coeficientes fueron obtenidos mediante el método de balance del volumen de agua con dos puntos de aproximación en evaluaciones de campo, método de Elliot et. al. (1983).

$$\text{Modelo 2:} \quad Z_i = \left[ (S_1 \cdot t^{0.5}) + (A_1 \cdot t) \right] \quad (2)$$

donde:  $Z_i$ : lámina infiltrada ( $m^3/m$ ),  $t$ : tiempo de oportunidad (min),  $A_1$ : parámetro gravitacional ( $m^2/min$ ) y  $S_1$ : Sorbibilidad ( $m^3/m/min$ ).

$$\text{Modelo 3:} \quad Z_i = \left[ (K \cdot t^a) + (f_0 \cdot t) \right] \quad (3)$$

donde:  $Z_i$ : expresada en ( $m^3/m$ ) y  $t$ : tiempo de oportunidad (min)

Los coeficientes  $K$ ,  $a$ , y  $f_0$ , se obtuvieron a partir de tablas, tomándose como referencia el tipo de suelo de que se trate y ofreciendo valores estimados o tentativos para dichos coeficientes empíricos.

$$\text{Modelo 4: } Z_i = \left[ \left( \frac{A \cdot t^b + C}{1000} \right) \cdot Esp \right] \quad (4)$$

donde:  $Z_i$ : expresada en ( $m^3/m$ ),  $A$ : velocidad de infiltración ( $mm/min$ ),  $b$ : exponente adimensional,  $t$  = tiempo de oportunidad ( $min$ ),  $C$ : constante y  $Esp$ : espaciamiento entre surcos ( $m$ ).

Los valores de  $A$  y  $C$  se determinan a partir de tablas del Soil Conservation Service para dicho modelo.

$$\text{Modelo 5: } Z_i = \left[ (K \cdot t^a) + (f_0 \cdot t) \right] \cdot C \cdot (PM / Esp) \quad (5)$$

donde:  $Z_i$ : expresado en ( $m^3/m$ ),  $t$  =  $t$  oport. ( $min$ ),  $C$ : función del tipo suelo. También contiene la relación entre el perímetro mojado medio ( $PM$ ) y el espaciamiento entre surcos ( $Esp$ ).

$$\text{Modelo 6: } Z_i = K \cdot t^a \cdot \left( \frac{P_i}{P_m} \right)^\varphi + f_0 \cdot t \cdot \left( \frac{P_i}{P_m} \right) \quad (6)$$

donde,  $Z_i$ : se expresa en ( $m^3/m$ ), la ecuación contiene la relación entre  $P_i$ : perímetro mojado en un punto de  $L$  y  $P_m$ : el perímetro húmedo promedio y  $\varphi$  es función del exponente de Kostiakov y del coeficiente que depende de la geometría del surco.

## COMPARACION ENTRE LOS MODELOS

### Parámetros $f_0$ y $A_I$

En la tabla 3 se presentan los resultados iniciales obtenidos en la determinación de los parámetros de infiltración, modelos 1 y 2, según los métodos de Elliot et al. (1983) y Shepard et al. (1993), respectivamente. En general, los valores de los parámetros de infiltración  $a$  y  $K$  aumentan y decrecen con el incremento del contenido de agua en el suelo. Los parámetros fueron tomados de la tabla 1, excepto los valores de  $S_I$  y  $A_I$  que fueron calculados por los autores del presente trabajo.

Las variables más importantes para el diseño, evaluación y manejo del riego por surcos, son los parámetros de infiltración; luego cualquier anomalía en estos, puede complicar la situación causando imprecisión en sus predicciones. Por tanto, es esencial que la estimación de la infiltración se haga con métodos y modelos precisos, probados y evaluados con la mayor precisión posible (Kanya 2007).

Para los tres caudales evaluados (tabla 3), los resultados de  $A_I$  (modelo 2) fueron mayores que los de  $f_0$  (modelo 1). Análogamente, Kanya (2007) obtuvo resultados aún más contrastantes entre  $A_I$  y  $f_0$  (tabla 4). Conclusión:  $A_I \neq f_0$  lo cual contradice a Rodríguez et al. (2016).

**Tabla 3. Parámetros hidráulicos de campo e infiltración: Kostiakov – Lewis y Philip**

| $Q_0$<br>(L/s) | $A_0$<br>(m <sup>2</sup> ) | $Pm$<br>(m) | $Tm$<br>(min) | $K$<br>(m <sup>3</sup> /m/min) | $a$  | $f_0$<br>(m <sup>3</sup> /m/min) | $S_I$<br>(m <sup>3</sup> /m/min) | $A_I$<br>(m <sup>2</sup> /min) |
|----------------|----------------------------|-------------|---------------|--------------------------------|------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 1,25           | 0,0064                     | 0,473       | 27            | 0,0081                         | 0,41 | 0,00021                          | 0,00288                          | 0,00051                        |
| 1,5            | 0,0076                     | 0,475       | 10            | 0,0101                         | 0,36 | 0,000216                         | 0,00266                          | 0,00057                        |
| 1,56           | 0,012                      | 0,484       | 35            | 0,001578                       | 0,36 | 0,000165                         | 0,00479                          | 0,00035                        |

$K$ ,  $a$  y  $f_0$ - corresponden al modelo de Kostiakov – Lewis  
 $S_I$  y  $A_I$ - corresponden al modelo de Philip

**Tabla 4. Comparación de los métodos (modelos 1 y 2)**

| Métodos                | Parámetros       | $Q$ (L/s) |
|------------------------|------------------|-----------|
| Shepard et al. (1993)  | $A_I = 0,00045$  | 4,4       |
| Elliot et al. (1983)   | $f_0 = 0,00005$  |           |
| Shepard et al. (1993)  | $A_I = 0,000027$ | 2,01      |
| Elliot et al. (1983)   | $f_0 = 0,000086$ |           |
| [fuente: Kanya (2007)] |                  |           |

### Láminas de agua infiltrada, eficiencias de riego y estadígrafos

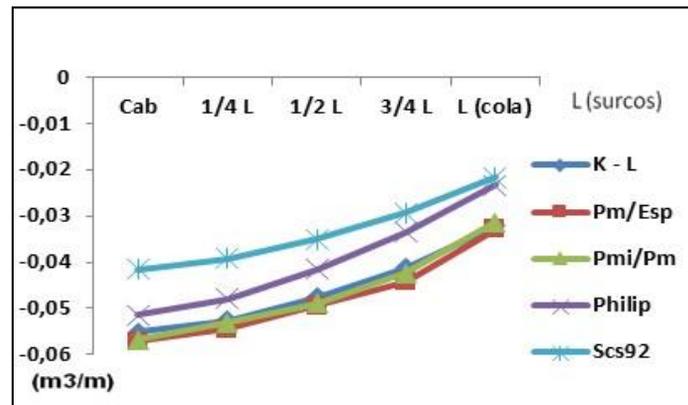
Respecto a los resultados obtenidos en la primera evaluación ( $Q_0 = 1,25$  L/s), se aprecia que los tiempos de avance, mojado y aplicación o corte, resultaron relativamente cortos debido a la longitud de los surcos y pendiente (tabla 1), lo cual favorece al modelo 2, coincidiendo con Shepard et al. (1993), respectivamente.

La figura 1 refleja los mejores comportamientos (magnitudes) de las láminas de agua infiltradas ( $Z_i$ ) en toda la longitud de los surcos, asociados con los modelos 1, 5 y 6 citados en la sección anterior (DATOS DE CAMPO Y MODELOS EVALUADOS), los cuales aparecen bastante solapados, hecho que se corresponde con Kanya (2007). Dichos modelos se asociaron con los mejores resultados, en cuanto a las eficiencias de almacenamiento, aplicación, distribución y uniformidad absoluta de la distribución del agua en los surcos (tabla 5).

El comportamiento de los modelos de Philip (modelo 2) y del SCS 1992 (modelo 3), fueron menos satisfactorios, y los incrementos de la eficiencia de aplicación oscilaron entre (18,6 - 15,3 - 13,7 %), correspondiéndose el valor mayor con los modelos 1, 5 y 6, mientras que los más bajos se asociaron con los modelos 2 y 3 (tabla 5).

La figura 2 brinda información relevante sobre el comportamiento de las láminas de agua infiltradas a lo largo del surco. Estas se determinaron en función de los respectivos tiempos de oportunidad en los puntos: cabecera,  $\frac{1}{4}$  L,  $\frac{1}{2}$  L,  $\frac{3}{4}$  L y cola del surco. Obviamente, los mayores valores se produjeron en la cabecera, y los más bajos, en el extremo aguas abajo. Posteriormente, se determinaron las líneas de tendencia de mejor ajuste de cada uno de los cuatro primeros modelos, evaluándose varios tipos de tendencia por modelo de infiltración, resultando óptima la potencial. La fluctuación de  $R^2$  se mantuvo entre 0,999 y 0,995, tabla 6. Las ecuaciones en

cuestión, permiten calcular con precisión y rapidez, las láminas de agua infiltradas en función de los respectivos tiempos de oportunidad.



Nota: Cab - cabecera del surco

Figura 1.  $Q = 1,25$  L/s. Láminas infiltradas vs longitud de los surcos

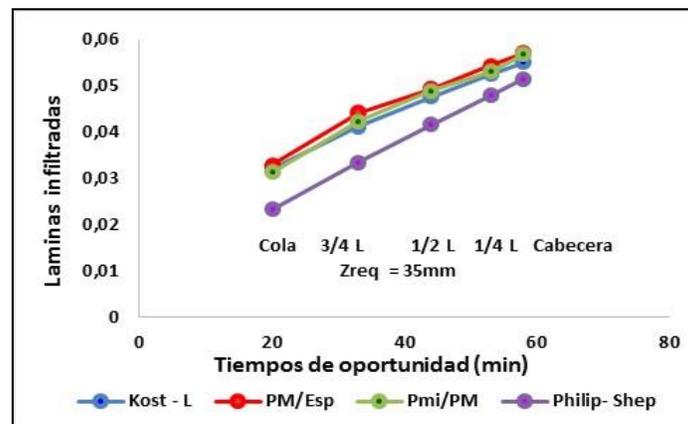


Figura 2. Láminas infiltradas vs tiempos de oportunidad

Tabla 5. Resultados de las Eficiencias del riego

| INDICADORES DE CALIDAD DEL RIEGO                            |            |             |             |           |             |             |
|---|------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| $Q_0 = 1,25$ L/s, $L = 86$ m, $Z_r = 35$ mm, $T_m = 27$ min |            |             |             |           |             |             |
| Modelos:  | 1. Kost-L. | 5. PM / Esp | 6. Pmi / PM | 2. Philip | 3. SCS 1992 | 4. SCS 1974 |
| $E_{alm}$ (%)   | 100        | 100         | 100         | 95        | 92,3        | < 50        |
| $E_{ap}$ (%)  | 63,6       | 63,6        | 63,6        | 60,3      | 58,7        | 40,5        |
| $E_d$ (%)   | 80,2       | 81          | 79,6        | 72        | 76,2        | 81,5        |
| $UAD$ (%)   | 70,4       | 69,1        | 67,6        | 59        | 64,7        | 72,7        |
| $PT$ (%)  | 36,4       | 36,4        | 36,4        | 39,7      | 41,3        | 59,5        |
| $\Delta E_{ap}$ (%)   | 18,6       | 18,6        | 18,6        | 15,3      | 13,7        | -           |

Observaciones:  $\Delta E_{ap}$  (%): incremento de las eficiencias de aplicación respecto al riego tradicional.  $PT$ : Pérdidas de agua Totales (%) =  $PPP + PES$ , calculadas como:  $(100 - E_{ap})$ . Para cada una de las ecuaciones analizadas (figuras 1 y 2), los mejores comportamientos se obtuvieron para ecuaciones de tipo potencial.

**Tabla 6. Estadígrafos y Líneas de tendencia**

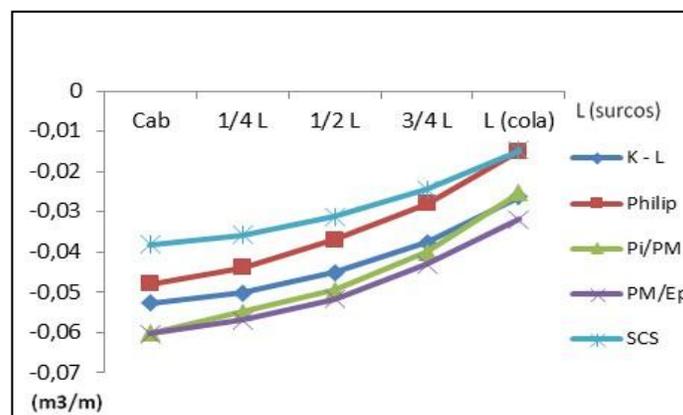
| ESTADÍGRAFOS ECUACIONES DE INFILTRACIÓN<br>( $Q_o = 1,25$ L/s) |                          |               |
|--|--------------------------|---------------|
| Ecuaciones   | Líneas de Tendencia      | $R^2$         |
| 1: Kost - Lewis  | $y = 0,0071.(x^{0,507})$ | $R^2 = 0,999$ |
| 6: Pmi / PM  | $y = 0,0061.(x^{0,550})$ | $R^2 = 0,997$ |
| 5: PM / Esp  | $y = 0,0072.(x^{0,510})$ | $R^2 = 0,995$ |
| 2: Philip  | $y = 0,0025.(x^{0,744})$ | $R^2 = 0,999$ |

En cuanto a los resultados de la segunda evaluación ( $Q_o = 1,5$  L/s), se observan analogías respecto a la evaluación anterior, los tiempos de avance, mojado y aplicación o corte, resultaron también relativamente cortos por las causas antes señaladas (tabla 1). Las figuras 3 y 4 revelaron comportamientos de las láminas de agua infiltradas similares a la evaluación anterior, con una tendencia de superioridad para los modelos 1, 5 y 6.

Se aprecia además, una subestimación de las magnitudes de las láminas de agua infiltradas con los modelos 2 y 3, así como sus respectivos efectos negativos sobre los resultados de los indicadores de calidad del desempeño del regadío (tabla 7).

Los tres incrementos mayores de la eficiencia de aplicación respecto al riego tradicional (con tiempo de mojado del 100%), fueron de 7,9 % para los modelos 1, 5 y 6, siendo del 3 % para el modelo 2 y aun menores para el modelo 3, mientras que los estadígrafos de infiltración (tabla 8), presentaron una línea de tendencia óptima del tipo potencial, con una fluctuación de  $R^2$  entre 1 y 0,9963. Por otra parte, se observaron semejanzas en cuanto a criterios y modelos (1. Kostiakov – Lewis y 2. Philip) en los reportes de Osuna y Padilla (1998).

Las ecuaciones presentadas para el caudal de 1,5 L/s, permiten calcular, con precisión y rapidez, las láminas de agua infiltradas en función de los respectivos tiempos de oportunidad.

**Figura 3.  $Q = 1,5$  L/s. Láminas de agua infiltradas ( $m^3/m$ )**

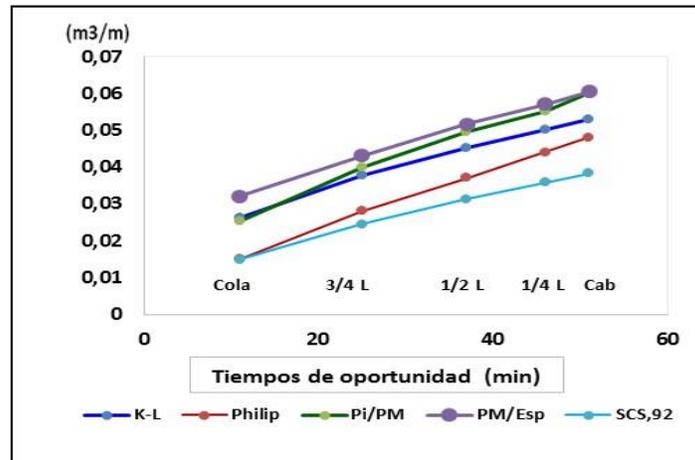


Figura 4. Láminas infiltradas vs tiempos de oportunidad

Tabla 7. Resultados de las Eficiencias del riego

| INDICADORES DE CALIDAD DEL RIEGO  |             |           |           |           |             |
|---|-------------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| $Q_0 = 1,5 \text{ L/s}, L = 100 \text{ m}, Z_r = 29 \text{ mm}, T_m = 10 \text{ min}$ |             |           |           |           |             |
| Modelos:  | 1. Kost - L | 6. PMi/PM | 5. PM/Esp | 2. Philip | 3. SCS 1992 |
| $E_{alm}$ (%)   | 100         | 100       | 99,6      | 91,6      | 91,4        |
| $E_{ap}$ (%)  | 58,3        | 58,3      | 58,3      | 53,4      | 53,3        |
| $E_d$ (%)   | 75,5        | 69,5      | 75,5      | 62        | 68          |
| $UAD$ (%)   | 62,2        | 55,7      | 62,2      | 44        | 51,4        |
| $PT$ (%)  | 41,7        | 41,7      | 41,7      | 46,6      | 46,7        |
| $\Delta E_{ap}$ (%)   | 7,9         | 7,9       | 7,9       | 3         | 1,7         |

Tabla 8. Estadígrafos de Infiltración

| ESTADÍGRAFOS ECUACIONES DE INFILTRACIÓN<br>( $Q_0 = 1,5 \text{ L/s}$ ) |                           |                |
|--|---------------------------|----------------|
| Ecuaciones   | Líneas de Tendencia       | R cuadrado     |
| 1. Kost - Lewis  | $y = 0,0089.(x^{0,4511})$ | $R^2 = 0,9995$ |
| 6. PMi / PM  | $y = 0,0067.(x^{0,5526})$ | $R^2 = 0,9988$ |
| 5. PM / Esp  | $y = 0,0118.(x^{0,4117})$ | $R^2 = 0,9963$ |
| 2. Philip  | $y = 0,0025.(x^{0,7533})$ | $R^2 = 0,999$  |
| 3. SCS 1992  | $y = 0,0034.(x^{0,6158})$ | $R^2 = 1,0$    |

Para la tercera evaluación ( $Q_0 = 1,56$  L/s) en la provincia de Artemisa, se observan para los tiempos de avance, mojado y aplicación o corte del agua, valores mayores que con los caudales anteriores, debido a una mayor longitud de surco y menor pendiente (tabla 1).

Además, se corroboró la misma tendencia de los casos precedentes en cuanto a los mejores resultados de las láminas de agua infiltradas con cada modelo, presentándose un mayor solapamiento entre los modelos 1, 5 y 6, reiterándose la subestimación de las láminas de agua infiltradas en toda la longitud del surco con el modelo 2 de Philip y más grave aún, con los del SCS, los cuales resultaron descalificados debido a los deficientes valores de las eficiencias de almacenamiento del agua en el suelo y de aplicación, (figura 5 y figura 6).

Se constata la dependencia de las eficiencias de riego, con el comportamiento de las láminas de agua infiltradas en el suelo a lo largo del surco.

Como resultado de lo anterior, se destacan para los modelos 1, 5 y 6, los mejores incrementos de la eficiencia de aplicación respecto al riego tradicional (6,6 – 5,6 %) y solo de un 1% para el modelo de Philip.

En sentido general, el modelo de Philip tendió a minimizar las magnitudes de las eficiencias de riego, incrementando las pérdidas de agua a un 39,6 % y más críticas aún, para los modelos 3 y 4 (tabla 9).

Por último, se reitera la línea de tendencia óptima tipo potencial para cada modelo, fluctuando  $R^2$  entre 1 y 0,998, (tabla 10) y análogamente a las evaluaciones precedentes, las ecuaciones presentadas permiten calcular con precisión y rapidez, las láminas de agua infiltradas en función de los respectivos tiempos de oportunidad.

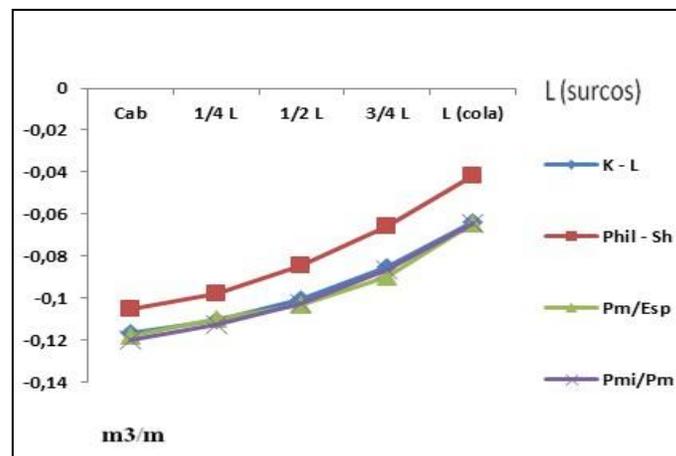


Figura 5.  $Q = 1,56$  L/s. Láminas de agua infiltradas ( $m^3/m$ )

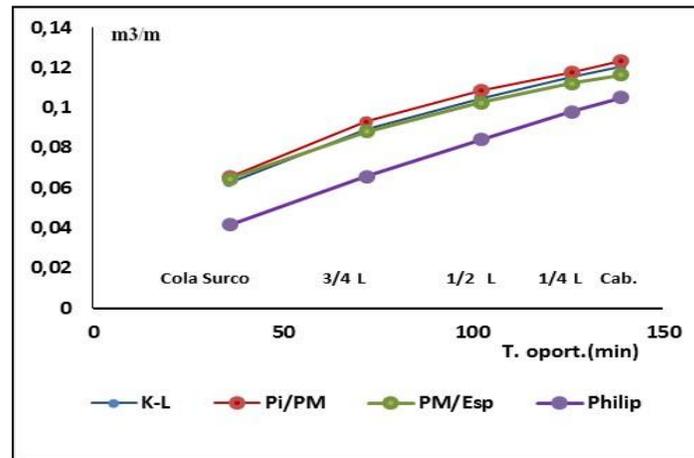


Figura 6. Láminas infiltradas vs tiempos de oportunidad

Tabla 9. Resultados de las Eficiencias del riego

| INDICADORES DE CALIDAD DEL RIEGO  |             |             |             |           |             |             |
|---|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|
| $Q_0 = 1,56 \text{ L/s}$ , $L = 130 \text{ m}$ , $Z_r = 43 \text{ mm}$ , $T_m = 35 \text{ min}$ |             |             |             |           |             |             |
| Modelos:  | 1. Kost - L | 5. PM / Esp | 6. PMi / PM | 2. Philip | 3. SCS 1992 | 4. SCS 1974 |
| $E_{alm}$ (%)   | 99,4        | 99          | 99          | 92,4      | 52,2        | 72,5        |
| $E_{ap}$ (%)  | 66          | 65          | 65          | 60,4      | 33,2        | 47,1        |
| $E_d$ (%)   | 78,2        | 78,2        | 80,7        | 68,1      | 72,6        | 74,1        |
| $UAD$ (%)   | 66,6        | 66,6        | 66          | 52,6      | 58,3        | 61,9        |
| $\Delta E_{ap}$ (%)   | 6,6         | 5,6         | 5,6         | 1         | -           | -           |
| $PT$ (%)  | 34          | 35          | 35          | 39,6      | 66,8        | 52,9        |

Tabla 10. Estadígrafos de Infiltración

| ESTADÍGRAFOS ECUACIONES DE INFILTRACIÓN |                            |               |
|---|----------------------------|---------------|
| $(Q_0 = 1,56 \text{ L/s})$              |                            |               |
| Ecuaciones                              | Línea de Tendencia         | $R^2$         |
| 1.Kost - Lewis                          | $Y = 0,011. (x^{0,4857})$  | $R^2 = 1$     |
| 6. PMi / PM                             | $Y = 0,0122.(x^{0,4706})$  | $R^2 = 0,998$ |
| 5. PM / Esp                             | $Y = 0,0134.(x^{0,4394})$  | $R^2 = 1$     |
| 2. Philip.                              | $Y = 0,0035. (x^{0,6871})$ | $R^2 = 0,999$ |

### Consideraciones importantes:

No resulta aconsejable utilizar el modelo de Philip, con parámetros determinados mediante regresión, para lograr bajos valores de  $A_l$  aun en tiempos largos de riego, Watson (1959) y Skaggs et al. (1969) citados por Osuna y Padilla (1998).

Bautista and Walker (2010) declararon la dificultad real del método de un punto de aproximación utilizado en el modelo de Philip, llegándose a la conclusión de que el mismo introduce serios errores en los resultados. Este hecho fue examinado por el Comité de Riego, Drenaje y Medioambiente, así como por el Instituto de Recursos Hídricos de ASCE, acorde con el estado actual de la ciencia para la determinación de las propiedades hidráulicas del suelo en el manejo y modelación del riego por surcos.

### CONCLUSIONES

- El objetivo del trabajo fue cumplimentado, resaltando la fiabilidad del modelo de infiltración de Kostiakov – Lewis (modelo 1) y de los otros dos modelos que lo incluyen: efecto de la relación entre el perímetro mojado medio y el espaciamiento entre surcos (modelo 5), así como el que relaciona el perímetro mojado en un punto de la longitud del surco con el promedio (modelo 6), corroborándose para las tres evaluaciones, la eficacia de la condicionante de manejo del agua establecida.
- Para los caudales evaluados mediante los modelos 1, 5 y 6, se obtuvieron los mejores rangos de fluctuación para las eficiencias de almacenamiento y aplicación,  $Q = 1,25$  L/s: ( $E_{alm} = 100$  % y  $E_{ap} = 63,6$  %),  $Q = 1,5$  L/s: ( $E_{alm} = 100 - 99,6$  % y  $E_{ap} = 58,3$  %),  $Q = 1,56$  L/s: ( $E_{alm} = 99,4 - 99$  % y  $E_{ap} = 66 - 65$  %); mientras que la eficiencia de distribución ( $E_d$ ) osciló entre (69,5 y 81%).
- Para cada caudal utilizando los modelos 1, 2, 5 y 6, la línea de tendencia óptima fue en todos los casos de tipo potencial, comprobándose su precisión y alcance para la predicción de las magnitudes de las láminas de agua infiltradas. Los rangos de fluctuación del coeficiente  $R^2$  fueron:  
 $Q_o = 1,25$  L/s: (0,995 – 0,999),  
 $Q_o = 1,5$  L/s: (0,9963 – 1) y  
 $Q_o = 1,56$  L/s: (0,998 – 1).

### REFERENCIAS

- Abreu E. O., Brown O., Rodríguez B., Bonet C., Cabrera S., García N. H., Barrios J. N. y González J.** (2005). "Manejo del agua en condiciones de flujo continuo e intermitente en el cultivo del tomate y cebolla. Su efecto sobre los rendimientos". Congreso Internacional de Riego y Drenaje. Cuba Riego. ISBN 959-7164-95-7. La Habana.
- ASAE** (2000). "Standard Evaluations of irrigations furrows ". American Society of Agricultural Engineering. EP419.1, DEC99. Logrado por el Comité de Riego Superficial, aprobado y reafirmado por el Comité Estándar División de Suelo y Agua. pp. 893-898, USA.

- Bautista E. and Walker W. R.** (2010). “Advances in estimation of parameters for surface irrigation modeling and management”. 5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings, Phoenix Convention Center, Phoenix, Arizona, USA IRR10-9643. (doi:10.13031/2013.35863). Extraído de: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=35863&t=2&redir=&redirType> en abril 2016.
- Díaz A.** (2001). “Evaluación, manejo y diseño del riego por pulsos para el cultivo del tabaco en un ferrasol”. Tesis presentada en opción al título de Máster en Riego y Drenaje., Universidad Agraria de La Habana–Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje del Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba.
- Elliot R. L., Walker W. R. and Skorboe G.** (1983). “Infiltration parameters from furrows irrigation advance data”. Transactions of the ASAE, 26 (6), 1726-1731 ISSN: 0733-9437. Michigan, USA.
- Kanya L.** (2007) “Toward real – time control of surface irrigation”. Philosophical Doctor Thesis. Univ. of Southern Queensland (USQ), Australia. Extraído de: <http://eprints.usq.edu.au/4109/> en enero 2016.
- NRAG** (2016). “Métodos para diseño y evaluación del riego por surcos abiertos con flujo continuo y manejo tradicional del agua”. Norma Ramal de Ingeniería Agrícola. Departamento independiente de Gestión de la Calidad. Ministerio de la Agricultura, La Habana, Cuba.
- Osuna E. S. y Padilla J. S.** (1998). “Estimación de la sorbilidad e infiltración usando datos de simulación de lluvia para 3 tipos de suelos de la zona semiárida de México.” Revista Terra, Vol. 16, No 4., E-ISSN 2395-8030, Universidad Autónoma del Estado de México, México DF. Extraído de: <http://chapingo.mx/terra/contenido/16/4/art293-302.pdf>, en marzo 2014.
- Pérez R., Jiménez E., Montero L., Sarmiento O. y Guzmán J.** (2010). “Resultados de diferentes alternativas de manejo del riego superficial tecnificado en el cultivo de la papaya maradol roja plantada con marco extradenso”. Revista Ingeniería Agrícola, Vol. 4, No. 2 (abril- mayo – junio), pp 10-14, ISSN 2326 -1545, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola. La Habana, Cuba.
- Rodríguez M., Santana M. y Brown M.** (2016). “Consistencia del modelo de infiltración de Philip respecto al de Kostiakov – Lewis en el riego superficial”. Revista Ingeniería Agrícola, Vol. 6, No2, pp. 8 – 13, ISSN – 2326 – 1545, Instituto de Investigaciones de Ingeniería Agrícola. La Habana, Cuba.
- Shepard J., Wallender R. W., Hopman J.** (1993). “One-point method for estimating furrow infiltration”. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), 36(2): 395-404, Michigan, USA EP419.2, December, doi: 10.13031/2013.28351. Extraído de: [www.asabe.org](http://www.asabe.org) en enero de 2017.