

# ***SEMEJANZA HIDRODINÁMICA EN RIEGOS POR SUPERFICIE***

**L. Juana, A. Losada**  
E.T.S. Ingenieros Agrónomos  
Universidad Politécnica de Madrid

**RESUMEN:** Se justifican criterios de semejanza hidráulica que son aplicados a la generalización de resultados de simulaciones de riegos por superficie convencionales. Las ecuaciones generales de una corriente libre unidireccional son utilizadas para analizar el movimiento del agua en canteros con sección transversal cualquiera que reciben en cabeza un gasto constante durante un tiempo determinado. A partir de las aproximaciones de los métodos de inercia nula y de la onda cinemática, se definen parámetros adimensionales y se establecen relaciones gráficas entre los mismos. Se propone la utilización de estas relaciones gráficas con dos objetivos prácticos: en primer lugar, caracterizar la infiltración del suelo en un cantero, a partir de datos que pueden ser tomados experimentalmente durante el avance del agua sobre el mismo. En segundo lugar, seleccionar variables de proyecto y operación que optimicen resultados técnicos del riego.

## **INTRODUCCION**

Las variables que intervienen significativamente en el escurrimiento e infiltración del agua dentro un surco, o cantero con sección transversal cualquiera, son numerosas. Esto limita la utilidad de resultados experimentales de riegos por superficie, ya de obtención laboriosa. Por otra parte, en los últimos veinticinco años, el análisis de estos riegos ha experimentado un progreso importante gracias a avances en modelos de simulación que la informática y los métodos numéricos han hecho posibles (Walker y Skogerboe, 1987); sin embargo, su utilización práctica por parte de los técnicos de riego encuentra dificultades, y no ha sido suficientemente explotada.

La aplicación de programas de cálculo numérico para la integración de las ecuaciones diferenciales del riego por superficie permite describir el comportamiento que corresponde a casos particulares con condiciones iniciales y de límite especificadas. Mediante un barrido de variables de operación, pueden ser optimizadas decisiones de manejo del riego en tablares dados (Losada et al. 1990, Juana et al. 1991, Juana 1993). Los resultados, resumidos de forma gráfica en función de las variables de entrada, muestran el comportamiento del tablar para las condiciones de partida. Ahora bien, la especificidad de los resultados proporcionados adolece de campos de validez excesivamente limitados.

Los principios del análisis dimensional son aplicables al estudio de fenómenos abordados a partir de las ecuaciones diferenciales del movimiento en riegos por superficie (Strelkoff, 1985). Se obtienen así relaciones de semejanza, con una agrupación de variables y la

consiguiente reducción del número de parámetros que determinan el fenómeno de flujo considerado. Como consecuencia, se facilita la representación gráfica de resultados, es decir, del comportamiento cuantitativo de los riegos, en función de sus variables de proyecto y operación. Entre éstas, las condiciones del suelo. Los trabajos de Clemmens et al. (1981), sobre riego por inundación, a manta, representan un ejemplo de ello.

La complejidad para caracterizar el suelo en cuanto a su infiltración es una de las mayores dificultades para superar el desfase entre teoría y práctica. La simulación muestra la sensibilidad del avance del agua a la función de infiltración, pero los resultados de ensayos localizados en infiltrómetros no resultan adecuados para que el fenómeno simulado se identifique con el fenómeno real. La calibración de modelos pretende un mejor nivel de información. Como consecuencia, es preferible utilizar los datos del avance para estimar la función de infiltración, mejor que actuar de forma inversa (Clemmens 1991, FAO 1989).

En la actualidad, se mantiene el interés por el desarrollo de métodos prácticos y económicos que justifiquen una extrapolación de resultados. Este es el objetivo general del presente trabajo y, a tal efecto, se estudian criterios de semejanza que son aplicados a resultados obtenidos con programas de integración de las ecuaciones diferenciales desarrollados por Juana (1993). Se muestra que el alcance de resultados tanto analíticos como experimentales tiene una generalidad que supera los límites estrictos de los planteamientos de partida. Por una parte, propone una expresión gráfica para relacionar resultados del avance con los parámetros de la expresión de infiltración de Kostikov. Con la determinación de estos parámetros, el modelo queda calibrado. Por otra

parte, propone gráficos que resumen numerosas simulaciones ya realizadas y seleccionadas con objetivos específicos. El técnico de riego los puede utilizar para seleccionar las alternativas de decisión más favorables.

**RIEGO POR SUPERFICIE. FUNDAMENTOS ANALÍTICOS DE LA SEMEJANZA**

Los riegos por superficie pueden ser aplicados a manta, sobre canteros con solera plana, o por surcos. La complejidad geométrica de la sección transversal de estos últimos les imprime un carácter de cierta generalidad. Así, el riego unidireccional a manta de canteros planos representa un movimiento bidimensional que puede ser interpretado como el caso particular de surcos muy anchos. Por otra parte, el riego de canteros asurcados es el resultado de integrar el riego de sus surcos. De todo ello, se deriva el interés de analizar el riego de un surco individual, con una sección transversal cualquiera. La tierra a nivel caracterizará a su riego por inundación, y la tierra en pendiente a su riego por escurrimiento libre.

Al aplicar un gasto  $q_0$  dado en cabeza de un surco, el agua avanza y, a su vez, se infiltra. A la distancia  $x$  de cabeza, la sección transversal ( $t$ ) del surco ocupada por la comente de agua representa el volumen almacenado

en superficie, por unidad de longitud de surco. En cuanto al perímetro mojado  $p$ , representa el área de la sección que da paso al agua que se infiltra, también por unidad de longitud de surco. Finalmente, el agua infiltrada en ese plano transversal representa un área  $z$  que mide el volumen infiltrado en la unidad de longitud de surco correspondiente.

Cuando llega al final del surco, el frente de avance del agua puede encontrar una salida libre a escorredero. Se producen así pérdidas por escorrentía evitables con un caballón terminal. Una vez que se corta la entrada del gasto  $q_0$  la infiltración y, en su caso, la escorrentía contribuyen a que se agote el agua superficial en el surco. Tras el agotamiento, la distribución del agua  $z$  infiltrada en el suelo materializa el resultado del riego. Este puede ser descrito como una lámina de agua cuya extensión es la dominada por el surco y cuyo espesor estaría determinado por la relación  $H$  entre  $z$  y la separación  $s$  entre surcos. Evidentemente, el valor  $z$  varía con la distancia  $x$  a la cabeza del surco, mientras que  $s$  es constante. La lámina de riego es pues una función  $H(x)$  cuya distribución, comparada con el objetivo de la lámina requerida, en general, con un espesor  $H_r$  uniforme, determina la calidad de la aplicación (ver Figura 1). El valor  $H_r$  está determinado por las necesidades de evapotranspiración y lavado para el período entre riegos.

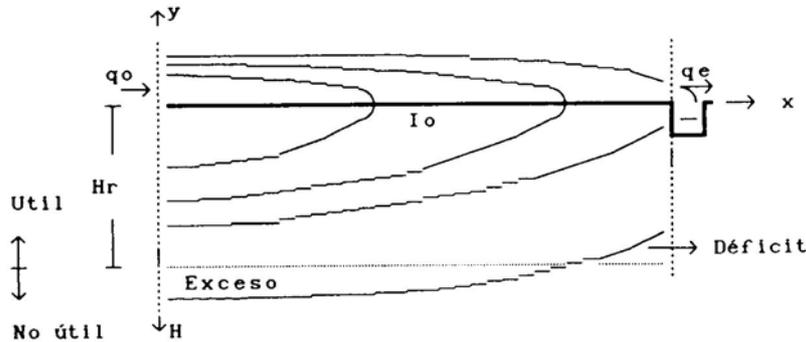


Figura 1. Desarrollo del riego y distribución final del agua aplicada

La comparación entre el espesor infiltrado que no llega a sobrepasar  $H_r$ , el déficit en una fracción de surco en la que no se llega a satisfacer ese requerimiento, el espesor medio infiltrado  $H$  y la lámina bruta  $H_b$  aplicada, determina coeficientes de rendimiento  $R_a$ , de déficit  $C_e$  y de escorrentía  $C_r$  que informan sobre dicha calidad (Losada et al, 1990).

**Variables y parámetros que caracterizan el riego**

Entre las variables que intervienen en el desarrollo de una operación de riego, conviene diferenciar las que

caracterizan geoméricamente el surco y las que describen cináticamente la corriente de agua, además de otras que condicionan el rozamiento y la infiltración en la superficie de suelo cubierta por el agua. Cuando se fija el valor de las que tienen el carácter de variable independiente, el resultado del riego queda determinado.

La complejidad y variabilidad de las condiciones del suelo, así como la de sus efectos en procesos como la infiltración, requiere la utilización de parámetros que representan condiciones macroscópicas medias y cuya determinación será, en general, empírica.

-caracterización geométrica del surco:

$L$ : longitud.

$I_0(x)$ : pendiente de la solera a la distancia  $x$  de cabeza.  
En general,  $I_0 = \text{cte}$ .

$B(y,x)$ : Todas las características hidráulicas (geométricas) de una sección transversal de surco, simétrica respecto a la vertical que pasa por el eje hidráulico, quedan determinadas conociendo la anchura de la superficie libre  $B$ , en función del calado  $y$ . Es el caso de la sección  $w$ , del perímetro mojado  $p$ , y del radio hidráulico  $R$ . En general,  $B(y)$ , independiente de  $x$ , se ajusta a una función potencial, con dos parámetros  $(c,M)$ :

$$B = c y^M \quad (1.1)$$

El valor cero del exponente  $M$  define formas rectangulares y el valor unidad las triangulares. En general, las secciones trapeciales quedan aceptablemente ajustadas por valores de  $M$  intermedios.

La sección  $\omega$  toma el valor dado por:

$$\omega = \int_0^y B dy = \frac{B y}{M + 1} \quad (1.2)$$

En cuanto al perímetro  $p$ , puede calcularse integrando numéricamente la relación:

$$\left(\frac{dp}{2}\right)^2 = \left(\frac{dB}{2}\right)^2 + dy^2 \quad (1.3)$$

-resistencia al avance (pendiente motriz):

$I(y,q,x)$ : es función de condiciones de flujo y de punto.  
En general, se utiliza una expresión  $I(y,q)$ , de régimen uniforme, con el parámetro de aspereza de la ecuación adoptada. Al aceptar la fórmula empírica de Manning, se tiene:

$$I = \left(\frac{q n}{\omega R^{2/3}}\right)^2 \quad (1.4)$$

donde el parámetro  $n$  es el coeficiente de aspereza.

-infiltración:

$\frac{\partial z}{\partial t}(y,x,t)$ : variación del área  $z$  de la sección infiltrada, por unidad de tiempo, en función de las condiciones del flujo, punto e instante. Normalmente, en cada distancia  $x$  se considera función del perímetro mojado  $p$  (función a su vez del calado  $y$ ) y del tiempo de contacto  $t_c$  (tiempo transcurrido desde el instante en que el frente de

agua alcanzó la distancia considerada). Si se utiliza la expresión de Kostiaikov, aparecen los parámetros empíricos  $k$  y  $a$ , y dicha función queda como sigue:

$$z = p k t_c^a \quad (1.5)$$

Ya se indicó que el área  $z$  de la sección infiltrada puede referirse a la lámina  $H$ , dividiendo por la separación  $s$  entre surcos:

$$H = z/s \quad (1.6)$$

-condiciones iniciales:

$y(x_0,t_0)$ ,  $q(x_0,t_0)$ : calado y gasto en cada sección transversal del surco, al iniciarse el riego. Normalmente, el surco estaría inicialmente vacío.

-condiciones de límite:

$q(0,t)$ : gasto entrante en función del tiempo. Frecuentemente, su valor es:

$$q(0,t) = q_0, \text{ para } t < t_{ar}$$

$$q(0,t) = 0, \text{ para } t > t_{ar}$$

$\left(\frac{dq}{d\omega}\right)_{(0,t)}$ : relación, en cabeza, entre gasto y sección. Frecuentemente,  $dq = 0$

$\left(\frac{dq}{d\omega}\right)_{(L,t)}$ : idem para cola. Frecuentemente, se considera bien salida impedida,  $dq = 0$ , bien salida libre. En ambos casos, no se introduce ningún parámetro adicional.

Aplicado el riego durante un tiempo dado  $t = t_{ar}$ , un resultado genérico  $H$  es función de los valores seleccionados para las otras variables y parámetros independientes enunciados:

$$f(H, q_0, t_{ar}, L, c, M, I_0, n, k, a, \dots) = 0 \quad (2)$$

$H$  puede ser el tiempo de avance  $t_a$  hasta que el frente de agua llega a un punto determinado, a una distancia  $x_a$  de la cabeza del surco, o el tiempo de receso en dicho punto, es decir, el que transcurre hasta que desaparece el agua que lo cubre; o el área  $z$  de la sección de agua infiltrada en el suelo, a la distancia  $x$  de cabeza en un instante  $t$ . También podría ser una relación en la que intervenga alguna de dichas variables, como la lámina media aplicada  $H$  un coeficiente de uniformidad  $C_u$  o, incluso, si suponemos que el sistema suelo-cultivo requiere una lámina  $H_r$ , el rendimiento de aplicación  $R_a$  o el coeficiente de déficit  $C_d$ .

Debe quedar patente que la caracterización que antecede corresponde a una realidad simplificada. Bajo las condiciones que el modelo planteado considera, las diferencias entre la lámina aplicada en dos puntos de un cantero dependerá únicamente de las variaciones de

las condiciones del flujo que ha habido en ambos puntos. En la realidad, hay más condiciones de variación no controladas. Toda causa de variación aleatoria no considerada desde un punto de vista estadístico disminuye la esperanza matemática del resultado, es decir, da lugar a menos uniformidad con la consiguiente disminución del rendimiento y aumento del déficit. Entre causas de variación no controladas, pueden existir diferencias de características de infiltración y aspereza de unos puntos a otros, de gasto entrante en cada surco y de almacenamiento en superficie, por mala explanación. En general, no son consideradas por los modelos y, en particular, no son consideradas aquí. Hay que observar, no obstante, que pueden ser significativas, sobre todo cuando las causas de variación hidráulica son poco importantes (Juana, 1993). Por tanto, los resultados del presente trabajo deben ser considerados como propios de las situaciones que convienen a un buen proyecto hidráulico, es decir, aquellas en que dicha variación no hidráulica sea poco significativa. Requisito necesario para un buen resultado de riego, pero no suficiente.

**Ecuaciones del flujo superficial. Semejanza**

El cumplimiento de los principios de conservación de la materia, o de continuidad, y de la cantidad de movimiento, a lo largo del cauce unidimensional filtrante del surco, se expresa por las ecuaciones de Saint-Venant, cuya integración permite determinar la velocidad media  $u$  y el calado  $y$ , o bien, el gasto o caudal  $q$  y el área  $co$  de la sección transversal del flujo superficial, a la distancia  $x$  a la cabeza del surco, en el instante  $t$ . Junto a las variables enunciadas, se caracteriza el movimiento con las variables siguientes:  $B$ , que designa la anchura de la superficie libre  $I$ , la pendiente motriz, o de pérdidas de energía ;  $I_0$  la pendiente topográfica del surco y  $g$ , la aceleración de la gravedad. También interviene el número de Froude,  $F$  determinado por la relación:

$$F^2 = \frac{q^2 / \omega^2}{g \omega / B}$$

Las ecuaciones mencionadas se escriben como sigue:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \tag{3.1}$$

$$\frac{1}{\omega g} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{2q}{\omega^2 g} \frac{\partial q}{\partial x} + (1 - F^2) \frac{1}{B} \frac{\partial \omega}{\partial x} = I_0 - I \tag{3.2}$$

Para facilitar la integración de las ecuaciones diferenciales, es frecuente la utilización de hipótesis simplificadoras. En la mayor parte de las situaciones reales de riego, un gasto entrante constante en un surco con pendiente suave produce un flujo lento donde los dos primeros términos de la ecuación (3.2) y  $F^2$  pueden despreciarse frente al resto de los sumandos (hipótesis

del modelo de inercia nula **MIN** propuesta por Strelkoff y Katopodes, 1977). Cuando la pendiente es importante, puede despreciarse también el tercer término, por lo que resulta  $I = I_0$  (hipótesis del modelo de la onda cinemática **MOC**).

Conocidas las condiciones iniciales y de límite y las variables y parámetros que caracterizan el riego (tratadas en el apartado anterior), pueden integrarse las ecuaciones (3), para obtener el resultado del riego aplicado.

La generalización de resultados se justifica con la aplicación de criterios de semejanza. Por analogía con la teoría de modelos, ésta es aquí establecida entre una situación de flujo, a la que llamaremos prototipo, que identificaremos con el subíndice  $p$ , y otra, a la que llamaremos modelo, que será identificada con el subíndice  $m$ . Cada valor de una variable en la primera es el producto del valor de la variable homóloga en el modelo por la constante, o escala de paso. Ésta será identificada con mayúscula y con el subíndice  $e$ . Se tendrá pues:

$$x_p = x_m \cdot X_e ; t_p = t_m \cdot T_e ;$$

$$q_p = q_m Q_e ; \omega_p = \omega_m \cdot W_e ; \dots$$

En función de los valores de las variables del modelo, las ecuaciones del prototipo son las que siguen:

$$\begin{aligned} \frac{Q_e}{X_e} \frac{\partial q_m}{\partial x_m} + \frac{W_e}{T_e} \frac{\partial \omega_m}{\partial t_m} \frac{Z_e}{T_e} \frac{\partial z_m}{\partial t_m} &= 0 \\ \frac{Q_e}{W_e G_e T_e} \frac{1}{\omega_m G_m} + \frac{\partial q_m}{\partial t_m} + \frac{Q_e^2}{W_e^2 G_e X_e} \frac{2q_m}{\omega_m^2 g_m} \frac{\partial q_m}{\partial x_m} + \\ + \frac{W_e}{B_e X_e} (1 - F_e^2 F_m^2) \frac{1}{B_m} \frac{\partial \omega_m}{\omega_m^2 g_m} &= (I_{om} - I_m) \end{aligned}$$

La forma de las ecuaciones puede ser simplificada, y se obtiene:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \Pi_1 \frac{\partial \omega}{\partial t} + \Pi_1 \Pi_2 \frac{\partial z}{\partial t} = 0 \tag{4.1}$$

$$\frac{1}{\omega g} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{\Pi_1} \frac{2q}{\omega^2 g} \frac{\partial q}{\partial x} +$$

$$\Pi_4 \left( 1 - \frac{F^2}{\Pi_1 \Pi_4} \right) \frac{1}{B} \frac{\partial \omega}{\partial x} = \Pi_4 \Pi_3 (I_0 - I)$$

En la forma expresada, ha sido omitido el subíndice  $m$  y se han utilizado los símbolos que siguen:

$$\Pi_1 = \frac{W_e X_e}{T_e Q_e} \tag{5.1}$$

$$\Pi_2 = \frac{Z_e}{W_e} \tag{5.2}$$

$$\Pi_3 = I_e \frac{X_e B_e}{W_e} \quad (5.3)$$

$$\Pi_4 = \frac{G_e T_e W_e^2}{Q_e B_e X_e} \quad (5.4)$$

Se observa la relación lineal entre  $\mathbf{F}$ ,  $\Pi_1$  y  $\Pi_4$ . También hay que señalar que, bajo las hipótesis del **MIN**, no será necesario considerar a  $\Pi_4$  y, bajo las del **MOC**, a  $\Pi_3$ .

Aplicando análoga sustitución a las variables y parámetros que caracterizan el riego, se tiene en primer lugar, en relación con la forma del surco:

$$B = \Pi_5 c y^M \quad \text{con: } \Pi_5 = \frac{C_e Y_e^M}{B_e} \quad (5.5)$$

$$\omega = \Pi_6 \frac{By}{M+1} \quad \text{con: } \Pi_6 = \frac{B_e Y_e}{W_e} \quad (5.6)$$

$$\left(\frac{dp}{2}\right)^2 = \Pi_7^2 \left(\frac{db}{2}\right)^2 + \Pi_8^2 dy^2$$

$$\text{con: } \Pi_7 = B_e / P_e \quad (5.7)$$

$$\Pi_8 = Y_e / P_e \quad (5.8)$$

Por otra parte, al adoptar la expresión de Manning:

$$I = \Pi_9 \left(\frac{qn}{\omega R^{2/3}}\right)^2 \quad \text{con: } \Pi_9 \left(\frac{Q_e N_e}{W_e R_e^{2/3}}\right)^2 \frac{1}{I_e} \quad (5.9)$$

Asimismo, al adoptar la relación de Kostiakov:

$$z = \Pi_{10} p k t_c^a \quad \text{con: } \Pi_{10} = P_e K_e T_e^a / Z_e \quad (5.10)$$

Finalmente, al considerar la definición de lámina:

$$H = \Pi_{11} z / s \quad \text{con: } \Pi_{11} = Z_e / (S_e H_e) \quad (5.11)$$

El planteamiento es equivalente a la adimensionalización de las ecuaciones del flujo, sustituyendo cada variable por el producto de un valor adimensional de la misma y un valor característico, o constante de referencia. En este caso, las variables de las expresiones (4.1) y (4.2) serían adimensionales y los parámetros  $\Pi_i$  serían relaciones entre las variables de referencia correspondientes, características del caso de riego considerado.

### Relaciones entre escalas

El valor unidad para todos los  $\Pi_i$ , definidos implica que los fenómenos de flujo, en modelo y prototipo, se rigen por las mismas ecuaciones diferenciales, con las mismas condiciones iniciales y de límite. Las corrientes en uno u otro caso son semejantes.

$$\Pi_i = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, 11) \quad (6-i)$$

Satisfechas estas once relaciones, cualquier solución a las ecuaciones (3), con las condiciones iniciales y de límite consideradas, puede entonces generalizarse a otra posible situación que cumpla los requisitos impuestos. Cabe interpretar que, con  $i=1$ , se hace referencia a la ecuación de continuidad; con  $i=2$ , a las secciones superficial e infiltrada; con  $i=3$ , a la pendiente topográfica; con  $i=4$ , al número de Froude; con  $i=5, 6, 7$  y  $8$ , a la función de forma; con  $i=9$ , a la fórmula de Manning; con  $i=10$ , a la expresión de Kostiakov y con  $i=11$  a la lámina de riego.

Es posible simplificar, reduciendo escalas y número de relaciones. Interesa mantener únicamente las escalas de los parámetros y variables que caracterizan el riego, dado que son los datos de entrada al modelo. De conformidad con los supuestos de partida, las escalas de los exponentes  $a$  y  $M$  deben ser la unidad. En cuanto a las variables que definen la forma de la sección transversal, ésta queda caracterizada por  $Y_e$  y  $C_e$ ; ahora bien, dadas las relaciones (6.5), (6.7) y (6.8), es decir  $\Pi_5 = \Pi_7 = \Pi_8 = 1$ , se deduce:

$$C_e = Y_e^{1-M} \quad (7)$$

Por lo tanto, para relacionar las variables de la sección transversal del flujo superficial, únicamente se necesita hacer referencia a la escala  $Y_e$ . Por otra parte, puesto que  $\Pi_2 = 1$ , coinciden las escalas de las secciones transversales superficial e infiltrada, y no es necesario considerar tampoco  $Z_e$ , ya que será función también de  $Y_e$ . Por lo que respecta a  $H_e$ , se relaciona también con  $Y_e$ , a través de la escala de separación de los surcos  $S_e$ .  $Y_e$ , en lugar de  $H_e$ , puede pues representar la relación entre láminas requeridas, para determinar resultados de riego como los descritos por los coeficientes  $R_a$ ,  $C_d$  y  $C_e$ . Se dejarán entonces ocho escalas:  $Q_e$ ,  $T_e$ ,  $Y_e$ ,  $X_e$ ,  $I_e$ ,  $N_e$ ,  $K_e$  y  $G_e$ . Éstas deben cumplir cinco relaciones, que pueden expresarse como sigue:

$$\begin{array}{lll} T_e Q_e = Y_e^2 X_e & \text{impuesta por:} & \Pi_1 = 1 \\ Y_e = I_e X_e & // & \Pi_3 = 1 \\ Q_e X_e = G_e T_e Y_e^3 & // & \Pi_4 = 1 \\ I_e^{1/2} Y_e^{8/3} = Q_e N_e & // & \Pi_9 = 1 \\ Y_e = K_e T_e^a & // & \Pi_{10} = 1 \end{array}$$

Tomando logaritmos en estas expresiones, resulta un sistema lineal de cinco ecuaciones que relacionan las ocho escalas enunciadas. Éstas pueden, por tanto, generalizarse, en función de tres escalas cualesquiera, siempre que el determinante de la matriz del sistema correspondiente sea distinto de cero. La matriz ampliada es:

	$Q_e$	$T_e$	$Y_e$	$X_e$	$I_e$	$K_e$	$N_e$	$G_e$
$\Pi_1$	-1	-1	2	1	0	0	0	0
$\Pi_3$	0	0	1	-1	-1	0	0	0
$\Pi_4$	-1	1	3	-1	0	0	0	1
$\Pi_9$	-1	0	8/3	0	1/2	0	-1	0
$\Pi_{10}$	0	$a$	-1	0	0	1	0	0

Utilizando el **MIN**, no es necesario introducir la aceleración de la gravedad  $g$ , y no ha lugar a  $G_e$ , pero tampoco es necesario considerar la relación  $\Pi_4 = 1$ . Como resultado, las escalas pueden también ponerse en función de tres de ellas, pero el hecho de que  $G_e$  desaparezca supone, en la práctica, un grado de generalización más que en el modelo completo. La matriz sería:

	$Q_e$	$T_e$	$Y_e$	$X_e$	$I_e$	$K_e$	$N_e$
$\Pi_1$	-1	-1	2	1	0	0	0
$\Pi_3$	0	0	1	-1	-1	0	0
$\Pi_9$	-1	0	8/3	0	1/2	0	-1
$\Pi_{10}$	0	$a$	-1	0	0	1	0

Utilizando el **MOC** y dividiendo por  $I_e$  los términos de la ecuación (4.2), se obtiene que las dos variables  $I_0$  y  $n$  pueden reducirse solo a una,  $\sqrt{I_0/\mu}$  la que llamaremos  $In$ . Dado que no es necesario considerar la relación  $\Pi_3 = 1$ , las ecuaciones pueden ponerse en función de tres escalas ; pero, dado que  $In$  puede desdoblarse en  $I_0$  y  $n$ , al incluir la escala de  $In$  como independiente, se tendrían cuatro escalas originales independientes, lo que representa una mayor posibilidad de generalización. La matriz sería:

	$Q_e$	$T_e$	$Y_e$	$X_e$	$In_e$	$K_e$
$\Pi_1$	-1	-1	2	1	0	0
$\Pi_9$	-1	0	8/3	0	1	0
$\Pi_{10}$	0	$a$	-1	0	0	1

Se hace destacar que la semejanza completa en las ecuaciones utilizadas no implica la semejanza completa entre situaciones de flujo real. Esto es debido a efectos de escala causados por la insuficiente adecuación de parámetros allí introducidos que no representan a plena satisfacción dichas situaciones.

Caso de no ser constantes algunos de los valores así considerados, es aconsejable expresarlos como funciones que permitan aproximarlos haciendo intervenir pocos parámetros; ahora bien, las relaciones empleadas a este efecto, a veces, no están bien determinadas. La falta de calidad de este tipo de planteamientos puede significar limitaciones a la solución de integración, y aquí radica

uno de los aspectos más delicados de la solución racional a los riegos por superficie. Esta cuestión queda de manifiesto al observar que las relaciones de apoyo de infiltración y de pérdidas de carga, que describen fenómenos hidráulicos cuya complejidad es notable, utilizan funciones que hacen intervenir parámetros con un carácter marcadamente empírico.

**Estudio de canteros con sección transversal dada**

La ecuación (1.3) genera las relaciones (6.7) y (6.8). Limita así las correspondientes aplicaciones de semejanza. En efecto, a la forma común del surco corresponde una escala  $C_e = 1$  y, de conformidad con (7), también se tiene  $Y_e = 1$ . Por otra parte, dado que  $S_e = 1$ , al sustituir en las relaciones (7), resulta también  $H_e = 1$ . En consecuencia, se reduce el campo de utilización de la semejanza entre diferentes criterios de riego. Este no se refiere al caso de que la sección sea triangular ( $M = 1$ ), pues  $C_e = 1$  no implica que  $Y_e = 1$ . Tampoco, al de una sección suficientemente ancha como para que sea representativo un derrame plano, que sería descrito haciendo referencia a la unidad de ancho, cuyo calado y aproxima el perímetro  $p$ , no habiendo lugar a la relación (1.3).

En cualquier caso, el inconveniente apuntado se salva adoptando formulaciones matemáticas aproximadas. Así, en la práctica, para la determinación de coeficientes de forma en los modelos hidrodinámicos, es aconsejable, con posterioridad a la determinación numérica de  $p$  a partir de (1.3), ajustarlo a una función potencial del tipo:

$$p = c_p \omega^{M_p} \tag{8}$$

Estos parámetros  $C_p$  y  $M_p$  serán los mismos en surcos modelo y prototipo, si éstos tienen la misma forma en el rango de valores ( $p, \omega$ ) utilizado para hacer el ajuste dado por la relación (8). Determinados sus valores, el perímetro viene determinado por esta relación, y no por la integración deducida de (1.3). Como consecuencia, haciendo referencia a las variables del modelo, se tiene:

$$p = \Pi_{12} c_p \omega^{M_p} \quad \text{con:} \quad \Pi_{12} = \frac{C_{pe} W_e^{M_p}}{P_e} \tag{9}$$

Para el caso considerado, las condiciones de semejanza se simplifican, pues las expresiones (6.7) y (6.8) desaparecen. En su lugar, queda  $\Pi_{12} = 1$ , es decir:

$$P_e = C_{pe} W_e^{M_p} \tag{10}$$

Bajo esta semejanza, dado que  $C_e = C_{pe} - S_e = 1$ , se cumplen las siguientes relaciones entre las escalas de las magnitudes referidas a las secciones superficial e infiltrada:

$$Z_e = W_e = H_e = Y_e^{M+1} = P_e^{1/M_p} \tag{11}$$

Al igual que en el apartado anterior, para definir las escalas de la sección, aparte de los exponentes, se

necesita una escala  $Y_e$  que, en este caso, se sustituirá por  $H_e$ . Las relaciones de las ocho escalas correspondientes serán ahora:

$$\begin{aligned}
 T_e Q_e &= H_e X_e & \text{impuesta por: } \Pi_1 &= 1 \\
 H_e^{1/(M+1)} &= I_e X_e & // \Pi_3 &= 1 \\
 Q_e X_e &= G_e T_e H_e^{3/(M+1)} & // \Pi_4 &= 1 \\
 I_e^{1/2} H_e^{(5-2Mp)/3} &= Q_e N_e & // \Pi_9 &= 1 \\
 H_e^{1-Mp} &= K_e T_e^a & // \Pi_{10} &= 1
 \end{aligned}$$

El grado de generalización resulta análogo, siendo la matriz ampliada del sistema:

	$Q_e$	$T_e$	$H_e$	$X_e$	$I_e$	$K_e$	$N_e$	$G_e$
$\Pi_1$	-1	-1	1	1	0	0	0	0
$\Pi_3$	0	0	$\alpha$	-1	-1	0	0	1
$\Pi_4$	-1	1	$3\alpha$	-1	0	0	0	1
$\Pi_9$	-1	0	$\beta$	0	1/2	0	-1	0
$\Pi_{10}$	0	$a$	$-\gamma$	0	0	1	0	0

donde:

$$\begin{aligned}
 \alpha &= 1/(M+1) \\
 \beta &= (5-2M_p)/3 \\
 \gamma &= (1-M_p)
 \end{aligned}$$

Procediendo de forma análoga al apartado anterior, tenemos las relaciones propias de las simplificaciones MIN o MOC. Conviene hacer notar que estas relaciones

pueden ser utilizadas también para el riego a manta en canteros anchos, referidas a la unidad de anchura. En este caso, los exponentes  $M$  y  $M_p$  toman el valor real cero. riegos por superficie Conviene apuntar una vía alternativa al tratamiento que se ha dado al problema planteado: integrando las ecuaciones (4.1) y (4.2), para una serie de valores de  $\Pi_i$  distintos de la unidad, se provoca el efecto de conseguir un rango de escalas de  $H_e$  distintas de la unidad.

**APLICACIÓN AL RIEGO A NIVEL, O POR INUNDACIÓN**

El riego por inundación se aplica a canteros a nivel, es decir, con pendiente longitudinal  $I_e$  nula. En consecuencia, hay libertad en la escala de la pendiente, lo que ofrece un grado más de generalización. Por otra parte, en las situaciones normales de riego, la aproximación del MIN presenta soluciones análogas a las del modelo completo y, puesto que, además, permite otro grado más de generalización, se justifica que dicho método sea aquí utilizado.

**Fase de avance. Caracterización de la infiltración**

La relación  $t_a(x)$  entre tiempo y distancia describe el avance. Las variables independientes que lo determinan son:

$q_0$  gasto aplicado  
 $n, k, a, c, M$  parámetros característicos del surco

Al simular con valores fijos  $q_0 - k - n = 1$ , a cada conjunto de valores del exponente de infiltración  $a$  y de los parámetros de forma de surco  $(c, M)$  corresponden sendas curvas de tiempos de avance, de volumen superficial e infiltrado, etc., en función de la distancia al frente de avance. Por otra parte, las escalas dependientes fundamentales  $(T_e, H_e, X_e, I_e)$ , así como las dependientes, o derivadas, pueden ponerse en función de  $Q_e, K_p$  y  $N_e$ .

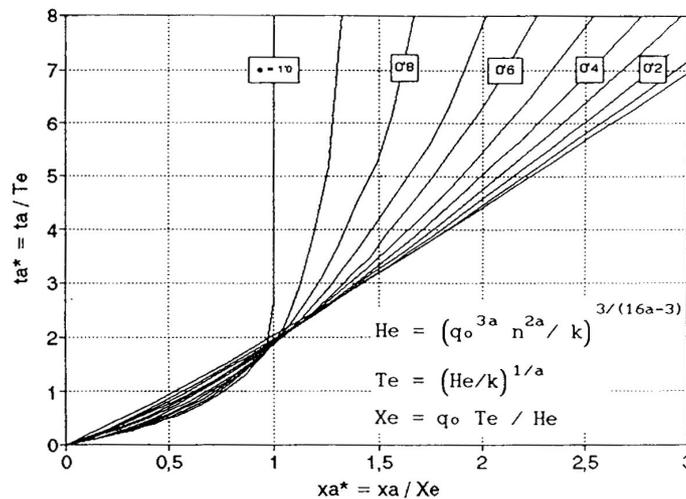


Figura 2a. Avance en riego a manta por inundación. Hipótesis MIN

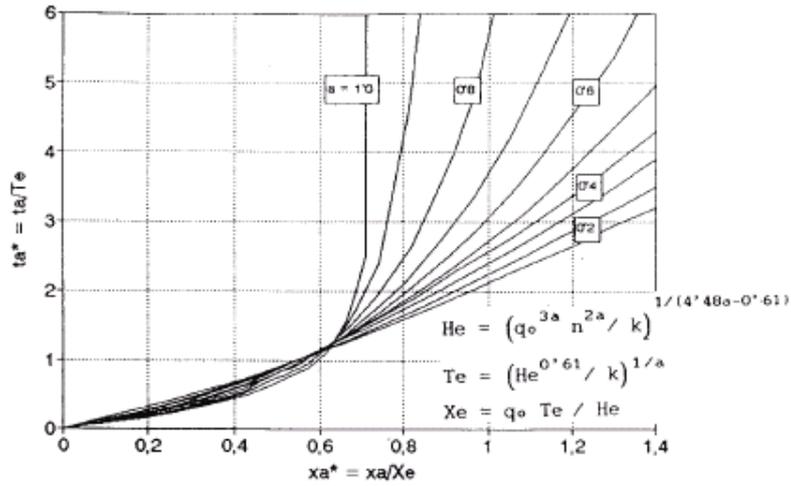


Figura 2b. Avance en riego por surcos a nivel con la sección transversal considerada. Hipótesis MIN.

Por tanto, las curvas referidas pueden ser transformadas para obtener las correspondientes a cualquier valor de  $q_0$ ,  $k$ ,  $n$ : basta multiplicar los valores representados por sus escalas correspondientes. Para el caso de riegos a manta en canchales de inundación,  $c = 1$ ,  $M = 0$ , y la Figura 2a puede utilizarse para obtener la correspondencia entre los tiempos de avance  $t_a$  y las distancias  $x_a$ , para cualquier valor de  $a$ . De forma análoga, la Figura 2b puede ser utilizada para surcos a nivel con sección transversal definida por los coeficientes  $c = 1,5$ ,  $M = 0,5$ .

La versatilidad de uso de las relaciones propuestas puede ser ilustrada al considerar la difícil caracterización de riegos por superficie a partir de parámetros de infiltración evaluados en puntos concretos, con cilindros infiltrométricos. En efecto, la variabilidad espacial de los suelos representa un factor de complejidad de

importancia, y el comportamiento global del canchero no está representado por los valores así obtenidos. Las figuras anteriores muestran un comportamiento diferencial, en función del exponente  $a$ . La fase de avance puede pues ser utilizada para discriminar dicho exponente y, como consecuencia, caracterizar globalmente el surco, en cuanto a la infiltración. Este objetivo puede abordarse por superposición de datos experimentales; sin embargo, dado que se desconoce  $k$  y  $a$ , la solución debe aproximarse por fases sucesivas.

La determinación de los valores tanto de  $k$  como de  $a$  se facilita representando los tiempos de avance para dos distancias genéricas. De esta manera, conocidos el gasto entrante  $q_n$ , el coeficiente de aspereza  $n$  y los tiempos de avance correspondientes, la solución se obtiene por intersección de las correspondientes curvas.

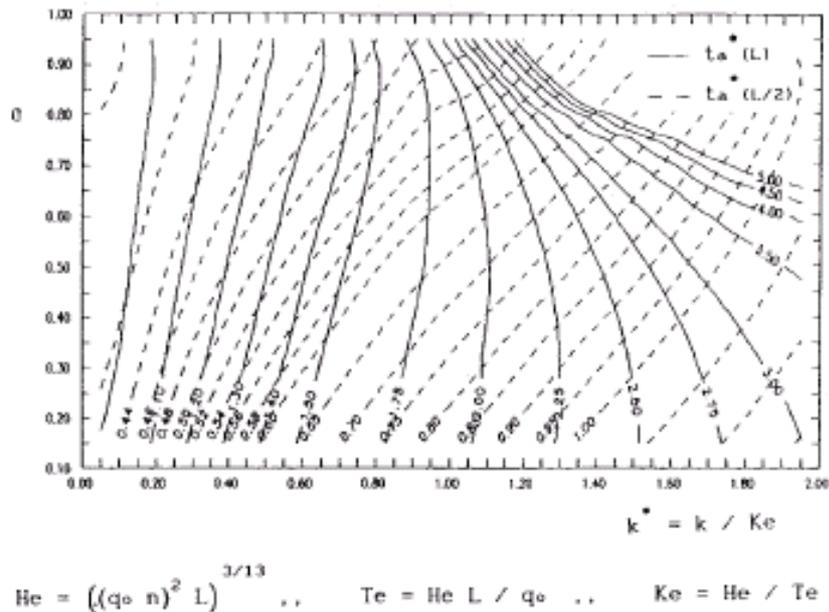


Figura 3a. Tiempos de avance hasta  $L$  y  $L/2$ , en riego a manta por inundación, en función de los parámetros de infiltración. Hipótesis del MIN.

Así, la Figura 3 muestra los tiempos necesarios para alcanzar una distancia cualquiera  $L$  y la mitad de la misma.

Para ilustrar una posible utilización de la Figura 3, consideremos un ensayo de campo en un cantero de longitud  $L = 150$  m y anchura  $B = 20$  m, a cuyo suelo corresponde un coeficiente de Manning  $n = 0,1$  y en cabeza del cual se aplica un gasto  $q_n = 50$  l/s. Resultan tiempos de avance  $t_a(L/2) = 42$  min y  $t_a(L) = 120$  min. Puesto que los diagramas de la figura corresponden a  $q_u = 1, n - 1, L - 1$ , se tienen las siguientes escalas de paso:

$$H_e = [(q_0 n)_2 L]^{3/13} = \left[ \left( \frac{0,005}{20} 0,1 \right)^2 150 \right]^{3/13} = 0,0691$$

$$T_e = H_e L / q_0 = 0,0691 \times 150 / 0,0520 = 4.148$$

En consecuencia, a los tiempos de avance obtenidos corresponden los valores siguientes:

$$t_a^*(L/2) = \frac{t_a(L/2)}{T_e} = 42 \times 60 / 4.148 = 0,61$$

$$t_a^*(L) = \frac{t_a(L)}{T_e} = 120 \times 60 / 4.148 = 1,74$$

El punto de corte de las curvas correspondientes para ambos tiempos determina a  $a = 0,67$ ,  $k'' = 0,66$ . A este último valor corresponde al valor de  $k$  que sigue:

$$\begin{aligned} k &= k^* K_e = k^* H_e / T_e^a = \\ &= 0,66 \times 6,91 / (4.148 / 3.600)^{0,67} = \\ &= 4,15 \quad \text{cm} / h^a \end{aligned}$$

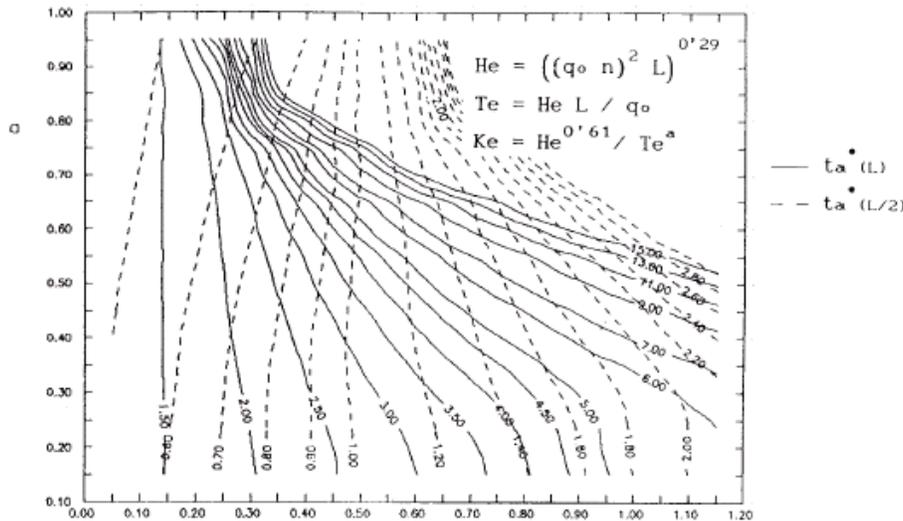


Figura 3b. Tiempos de avance hasta  $L$  y  $L/2$ , en riego por surcos a nivel, en función de los parámetros de infiltración. Hipótesis del MIN.

Los coeficientes así determinados hacen coincidir en los dos puntos utilizados la curva de avance de la simulación y la del ensayo. Como consecuencia, este procedimiento proporcionaría, en principio, una buena concordancia entre las curvas de avance simulada y observada. Conviene tener presente, no obstante, que el valor del coeficiente de aspereza de Manning  $n$  tiene una incidencia significativa en la determinación de los coeficientes de infiltración. Por esto, puede ser útil detectar un valor de  $n$  mal seleccionado. Esto puede hacerse mediante un contraste entre los valores reales y estimados de otras variables, tales como calados o tiempos de receso. Lamentablemente, la determinación experimental de éstas no es tampoco lo precisa que sería de desear.

**Selección de criterios de aplicación y proyecto**

En este tipo de riego, un caballón terminal impide el escurrimiento en cola y hace posible la inundación del surco. Cuando se corta el servicio, tras un tiempo de aplicación de riego  $t_{ar}$ , el agua durmiente se infiltra poco a poco y, dado que la pendiente es nula, la curva de receso es prácticamente horizontal. Como consecuencia, las diferencias de tiempo de contacto se deben a las diferencias de tiempo de avance y, por tanto, toda modificación de variables que tienda a disminuir estas últimas traerá consigo un riego más uniforme. Este mejor resultado técnico facilita un rendimiento más alto, para un mismo déficit. Dicho comportamiento permite extraer una conclusión de interés general: el

rendimiento de aplicación aumenta al modificar, en un sentido, la variable en estudio. Ahora bien, a medida que dicho rendimiento mejora, su sensibilidad disminuye

progresivamente (Juana, 1993). La Figura 4 muestra la tendencia que corresponde a diversas características.

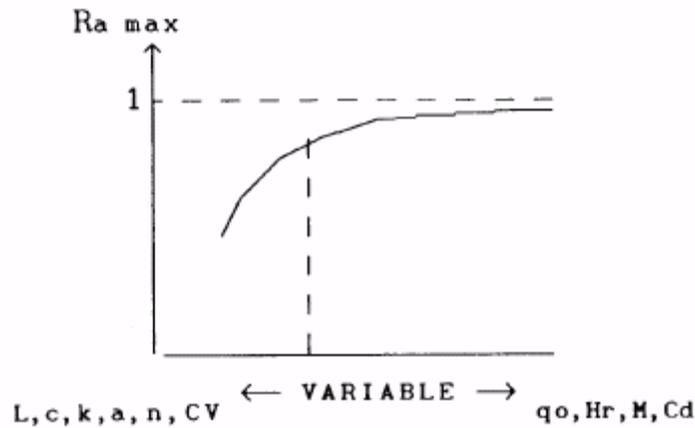


Figura 4. Respuesta del rendimiento de aplicación en riego por inundación, al modificar una variable o parámetro.

El resultado de un riego se materializa en la distribución final de agua en el surco. Las variables consideradas anteriormente, en la fase de avance, no son suficientes para determinarlo. Además, es necesario considerar el tiempo de aplicación de riego  $t_{ar}$  y la longitud  $L$  del surco. Para evaluar la adecuación de todas ellas, es necesario comparar la distribución de la lámina infiltrada así obtenida con la lámina requerida  $H_r$  (objetivo del riego). Caso de imponer un déficit dado, (lógicamente, mayor o igual a cero), sólo será necesario definir una de

las dos variables anteriores ( $t_{ar}$   $L$ ). En efecto, para una longitud  $L$ , solamente habrá un tiempo de aplicación de riego  $t_{ar}$ , que cumpla dicho requisito. En tal caso, considerando, por ejemplo, como escalas independientes la terna  $(H_e, N_e, K_p)$ , puede representarse el  $R_a$  en diagrama adimensional  $L^* - q^*$  para cada exponente de infiltración  $a$ , forma del surco  $(c, M)$  y déficit  $C_d$ . El gráfico correspondiente, es útil para seleccionar tanto el riego a proyectar como futuras aplicaciones (ver Figura 5).

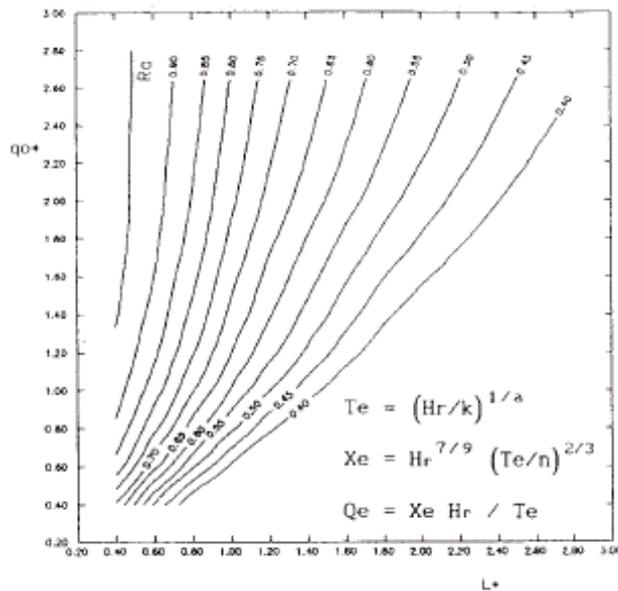


Figura 5a. Rendimiento de riego por inundación, a manta, para  $C_d = 0,03$ ,  $a = 0,7$ . Aproximación MIN.

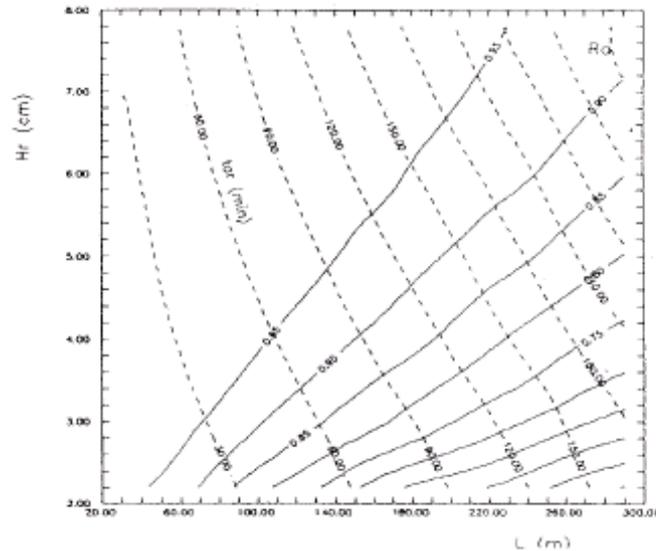


Figura 5b. Rendimiento de riego por surcos a nivel,  $a = 0,5$  y  $C_d = 0,03$ ,  $q_u = 1$  l/s,  $k = 6,5$  cm/h",  $n = 0,04$  (SI).

La Figura 5b puede ser adimensionalizada, pero conviene observar que, gracias a la semejanza, ya puede ser utilizada, en la forma dimensional con que se presenta, para estimar resultados de riegos en principio no contemplados. A modo de ejemplo, se estudia la aplicación de una lámina  $H_r = 40$  mm a un suelo caracterizado por  $n = 0,06$ ,  $k = 8$  cm/h<sup>a</sup> y  $a = 0,5$ ,

configurado en surcos separados cada  $s = 0,8$  m, cuya longitud es  $L = 150$  m y cuya sección transversal se ajusta a los parámetros  $c = 1,5$ ,  $M = 0,5$ . El gasto unitario será de  $q_u = 1,25$  l/s. Se pretende estimar el tiempo de aplicación de riego  $t_{ar}$  y el rendimiento de aplicación  $R_a$  que pueden corresponder a un déficit  $C_d = 0,03$ . Asimismo, sugerir criterios para mejorar el rendimiento.

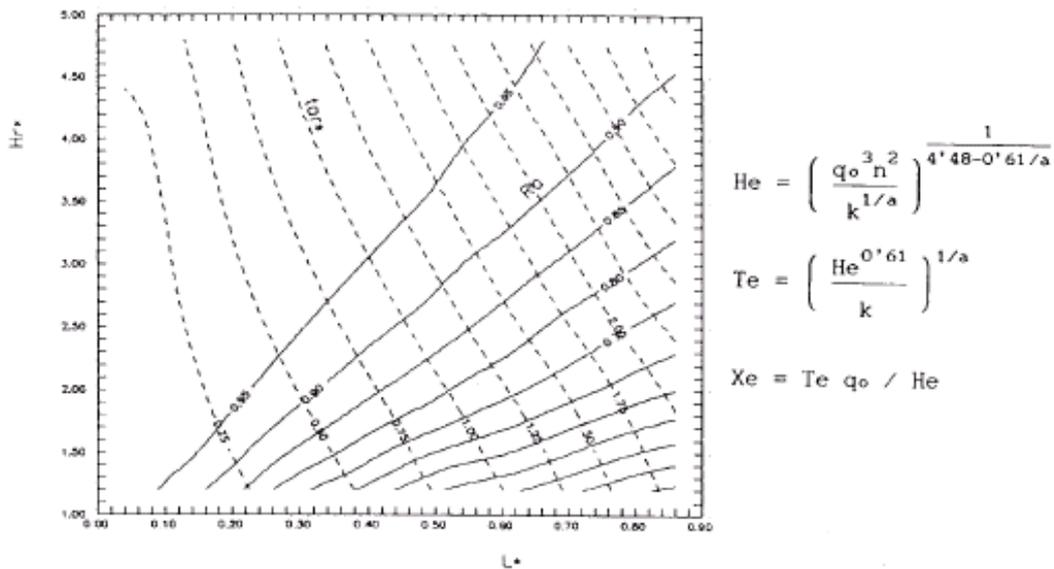


Figura 5c. Rendimiento de riego por surcos a nivel,  $a = 0,5$   $C_d = 0,03$ . Aproximación MIN.

Las variables en los ejes de la Figura 5b pueden ser adimensionalizadas dividiendo sus valores por los que siguen:

$$H_e = \left( \frac{q_0^3 n^2}{k^{1/a}} \right)^{\frac{1}{2\beta+\alpha+1-\gamma/a}} = \left( \frac{0,001^3 \cdot 0,04^2}{0,065^2 / 3600} \right)^{\frac{1}{4,48-0,61/0,5}} = 0,0159 \text{ m}$$

$$T_e = \left( \frac{H_e^\gamma}{k} \right)^{1/a} = \frac{0,0159^{0,61/0,5}}{0,065^2 / 3.600} = 5.438 \text{ s}$$

$$X_e = \frac{T_e q_0}{H_e} = \frac{5.438 \times 0,001}{0,0159} = 342,5 \text{ m}$$

La Figura 5c muestra que la forma del diagrama adimensional resultante es idéntica a la del diagrama dimensional. Para responder al caso planteado, calcularíamos los valores característicos correspondientes a las nuevas variables independientes. En el caso considerado, éstas son:

$$H_e' = 0,0172 \text{ m}$$

$$T_e' = 3948 \text{ s}$$

$$X_e' = 286,9 \text{ m}$$

En el diagrama adimensional entramos con los valores:

$$L^* = 150 / 286,9 = 0,52$$

$$H_r^* = 40 / 17,2 = 2,33$$

En el punto de corte, se obtiene el rendimiento buscado,  $R_a = 0,84$ . El tiempo de aplicación puede obtenerse a través del  $t_{ar}^*$ , multiplicando por  $T_e$  o, mejor, aplicando la relación de balance volumétrico que sigue:

$$\begin{aligned} t_{ar} &= \frac{H_r (1 - C_d) L s}{q_0 R_a} = \\ &= \frac{0,040 \times (1 - 0,03) \times 150 \times 0,8}{0,00125 \times 0,84} = \\ &= 4434 \text{ s} \approx 74 \text{ min} \end{aligned}$$

Como procedimiento alternativo al de adimensionalizar el diagrama, se obtendría el punto homólogo en la Figura 5b, con las siguientes escalas de paso:

$$H_e'' = \left( \frac{q_e^3 n_e^2}{k_e^{1/a}} \right)^{\frac{1}{2\beta+\alpha+1-\gamma/a}} = H_e' / H_e = 1,0833$$

$$T_e'' = \left( \frac{H_e^\gamma}{K_e} \right)^{1/a} \quad T_e' / T_e = 0,726$$

$$X_e'' = \frac{T_e'' q_e}{H_e''} = X_e' / X_e = 0,838$$

Considerando a la Figura 5b como propia del modelo, tenemos:

$$L_m = L_p / X_e'' = 150 / 0,838 = 179 \text{ m}$$

$$H_{rm} = H_{rp} / H_e'' = 40 / 1,0833 = 36,9 \text{ mm}$$

En el gráfico, se obtiene un rendimiento de aplicación  $R_a = 0,84$  y un tiempo de aplicación  $t_{arp} = t_{arm} T_e'' = 74 \text{ min}$ .

La Figura 5c es adecuada para estudiar un tablar con canteros de distintas longitudes donde el sistema de distribución aplica láminas diferentes con un gasto por surco fijo. Si el gasto unitario por surco fuese una variable a determinar, bien para proyecto bien para operación, sería preferible, en la adimensionalización de la Figura 5b, no haber considerado independiente a  $q_0$ , sino a  $H_r$  o a  $L$ . En el primer caso, fija  $H_r$  resulta un diagrama similar al de la Figura 5a, muy adecuado para proyecto para seleccionar gastos y longitudes. En el segundo caso, fija  $L$ , resulta un diagrama idóneo para seleccionar la operación de riego. En ambos casos, aunque se produce una transformación en la forma de las curvas, se están representando los mismos resultados, y los casos planteados pueden resolverse con la Figura 5c, si bien de forma iterativa, más laboriosa.

Conviene observar, finalmente, que ciertas restricciones pueden ser sustituidas por otras, por lo que, de hecho, se dispone de mayor generalidad. Así, a partir de las relaciones de semejanza establecidas en el apartado *Relaciones entre escalas*, datos del avance o de resultados de riego pueden ser transformados para prever resultados en surcos con coeficientes  $c$  distintos de 1,5. Obviamente, al establecer la semejanza, aparecerán las nuevas restricciones (de lámina, de gasto, u otras).

### APLICACIÓN AL RIEGO CON PENDIENTE, POR ESCURRIMIENTO LIBRE

Como se comentó en el apartado anterior, una pendiente  $I_0$  distinta de cero puede representar un grado menos de generalización. Con el objeto de no perderlo, puede considerarse que una pendiente suficientemente pequeña puede ser despreciada, por comparación con la pendiente motriz; o, alternativamente, si es suficientemente grande, considerar a ambas aproximadamente iguales. En el primer caso, es decir, con  $I_0 \ll I$ , serían de aplicación los planteamientos en el apartado anterior Fase de avance. Caracterización de la Infiltración. El segundo caso, es decir, con  $I \approx I_0$ , se corresponde con la aproximación de la onda cinemática, y el grado de generalización también se mantiene.

**Fase de avance. Caracterización de la infiltración**

Los parámetros independientes son:

- $q_0$  gasto aplicado
- $I_0, n, k, a, c, M$  características del surco

Las escalas  $T_e, H_e, X_e$  e  $I_e$  pueden ponerse en función de  $Q_e, K_e$  y  $n_e$ , con la aproximación del **MIN**. Como consecuencia, para un exponente de infiltración  $a$ , una relación de pendientes  $I_e$  y una forma de surco dada ( $c, M$ ), resulta una curva adimensional única para el avance (ver Figura 6). Asimismo, podrían obtenerse una curva única para el hidrograma en cada sección, una curva única para el volumen superficial e infiltrado, etc.

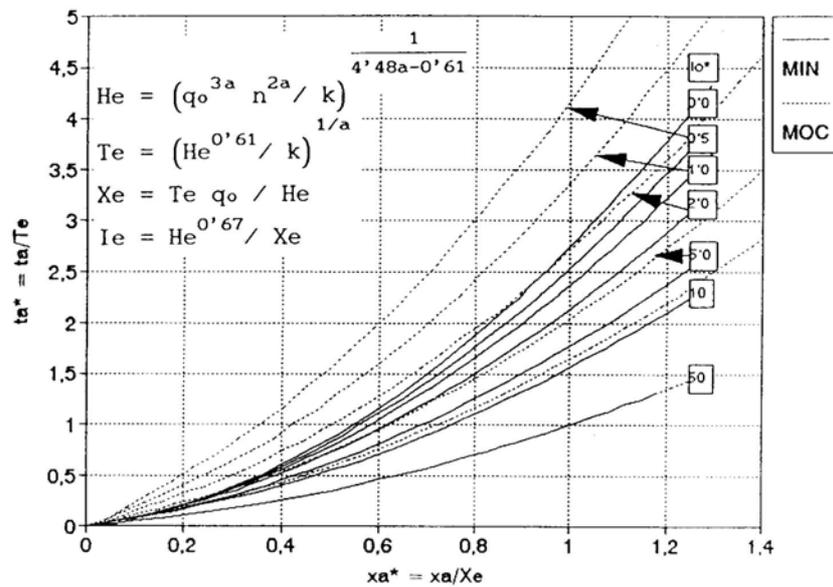


Figura 6a. Avance en riego por escurrimiento en surcos con  $a = 0,5$ . Comparación de las aproximaciones **MIN** y **MOC**.

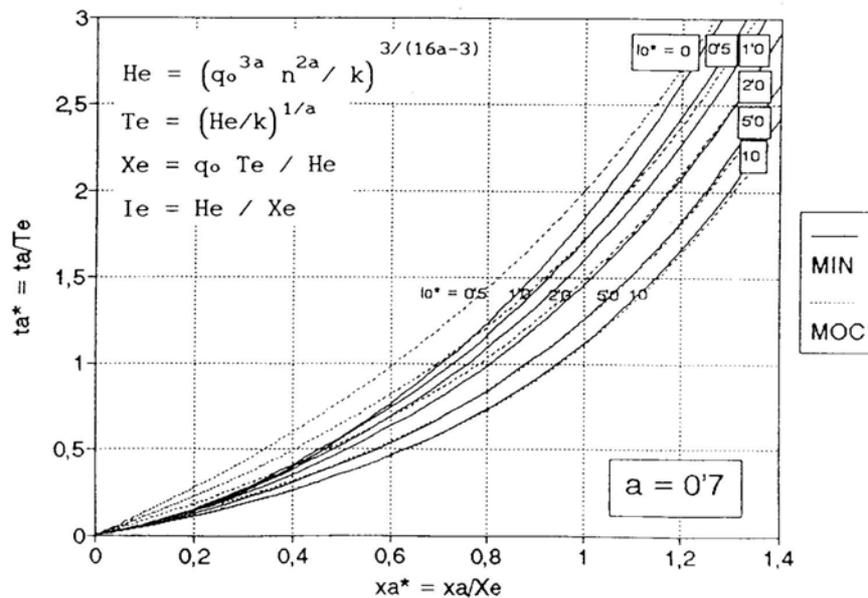


Figura 6b. Avance en riego a manta por escurrimiento,  $a = 0,7$ . Comparación de las aproximaciones **MIN** y **MOC**.

Al considerar el **MOC**, podríamos generalizar también la pendiente  $I_0$ : la curva en la figura 7 sirve

así para cualquier  $q_0, n, k, I_0$  con las hipótesis del **MOC**.

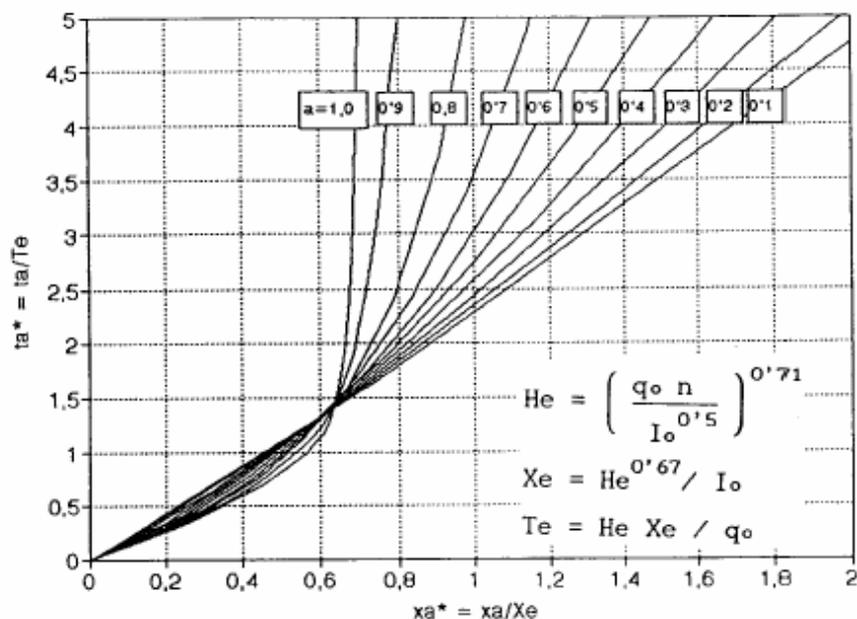


Figura 7a. Avance de riego por eacurrimiento en surcos. Aproximación MOC.

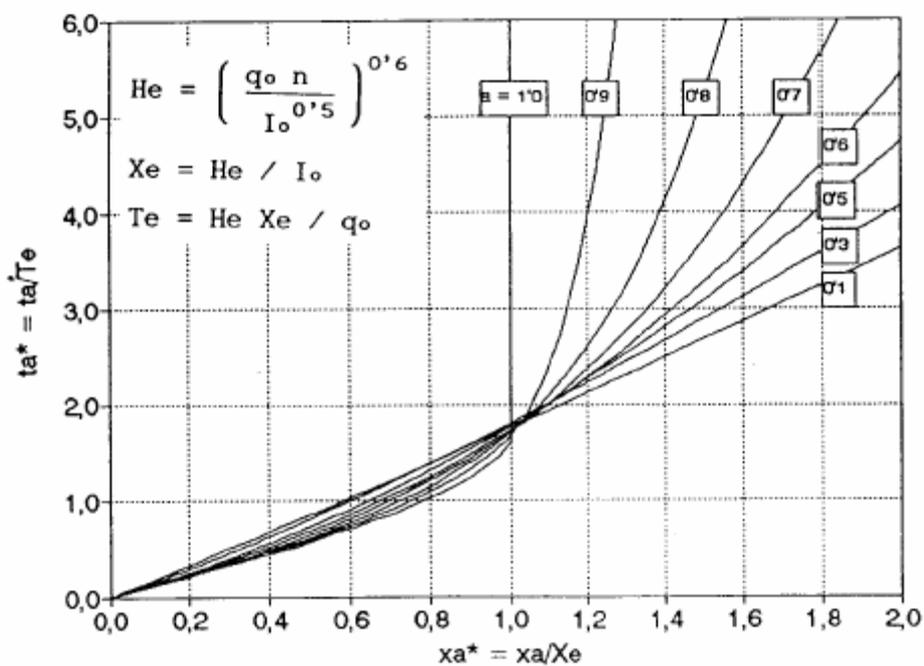


Figura 7b. Avance en riego a manta por escurrimiento. Aproximación MOC.

Con el fin de estimar las pendientes a partir de las que se puede considerar la aproximación del MOC, en la misma Figura 6 se comparan los resultados de esta última aproximación con los del MIN.

Las Figuras 7 también pueden transformarse para obtener los coeficientes de infiltración a partir de dos puntos del avance. Considerando  $X_e = x_a^*$ , cada punto  $(x_e^*, t_a^*, a)$  de la figura 7 se corresponde con su homólogo  $(k_e^*, a, t_a^*(L) - [(x_a^*)_a, a, t_a^*/X_a^*])$  en la Figura 8.

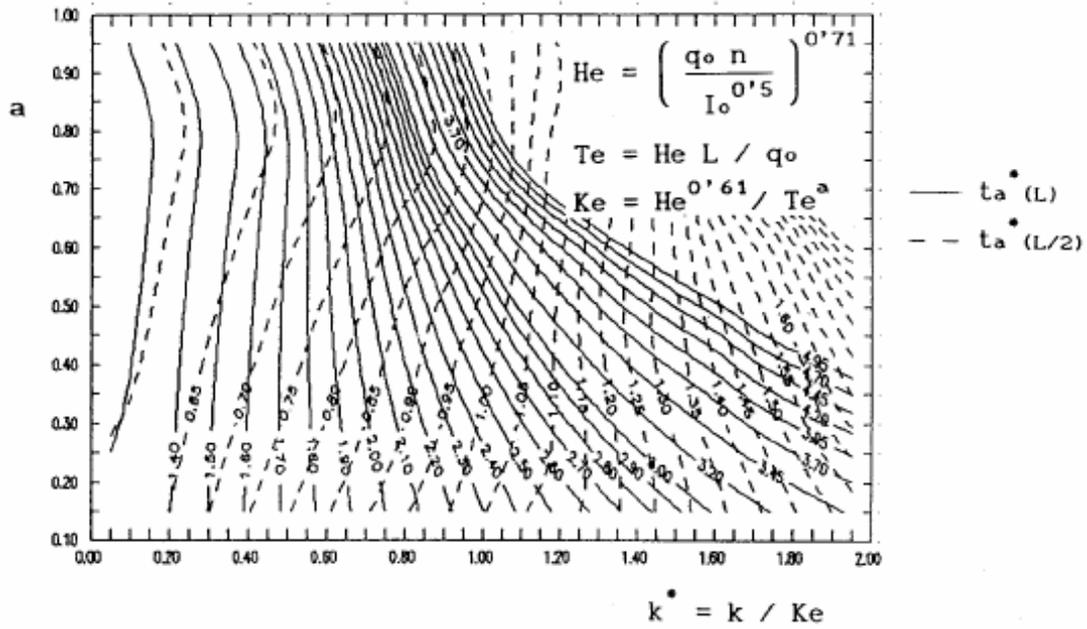


Figura 8a. Diagrama adimensional del tiempo de avance hasta  $L$  v  $L/2$  en función de los parámetros de infiltración. Ecurrimiento en surcos. Aproximación MOC.

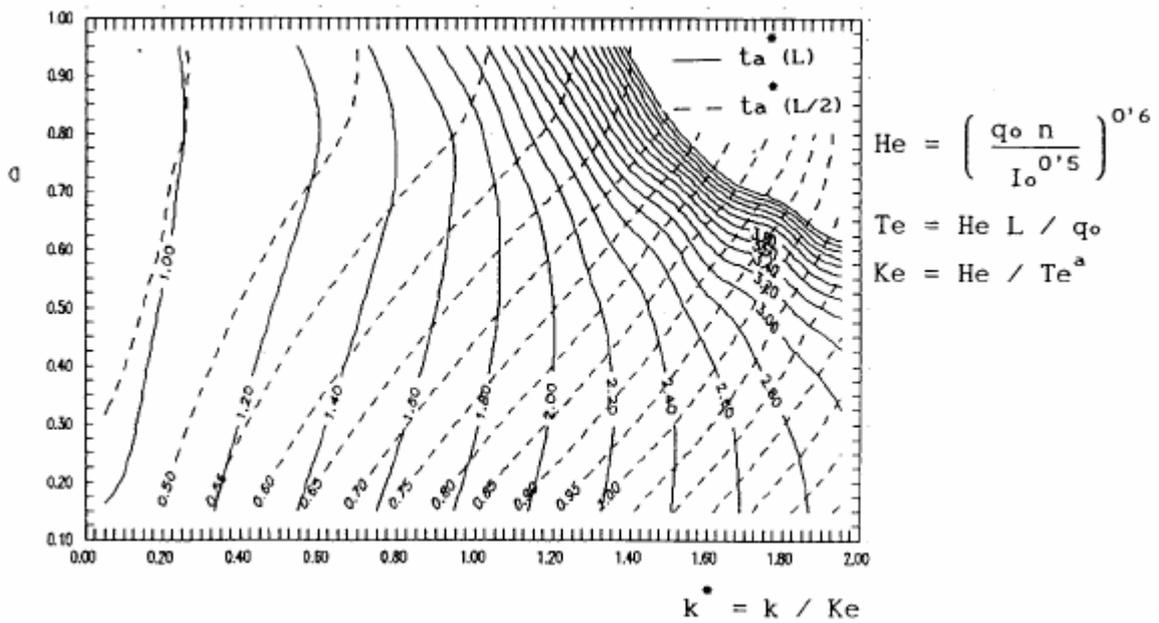


Figura 8b. Diagrama adimensional del tiempo de avance hasta  $L$  v  $L/2$  en función de los parámetros de infiltración. Ecurrimiento a manta. Aproximación MOC.

Con la aproximación del MIN, se puede aplicar un procedimiento similar, pero el grado de libertad

perdido obliga a tomar la longitud  $L$  que corresponda a la  $L^*$  representada (Figura 9).

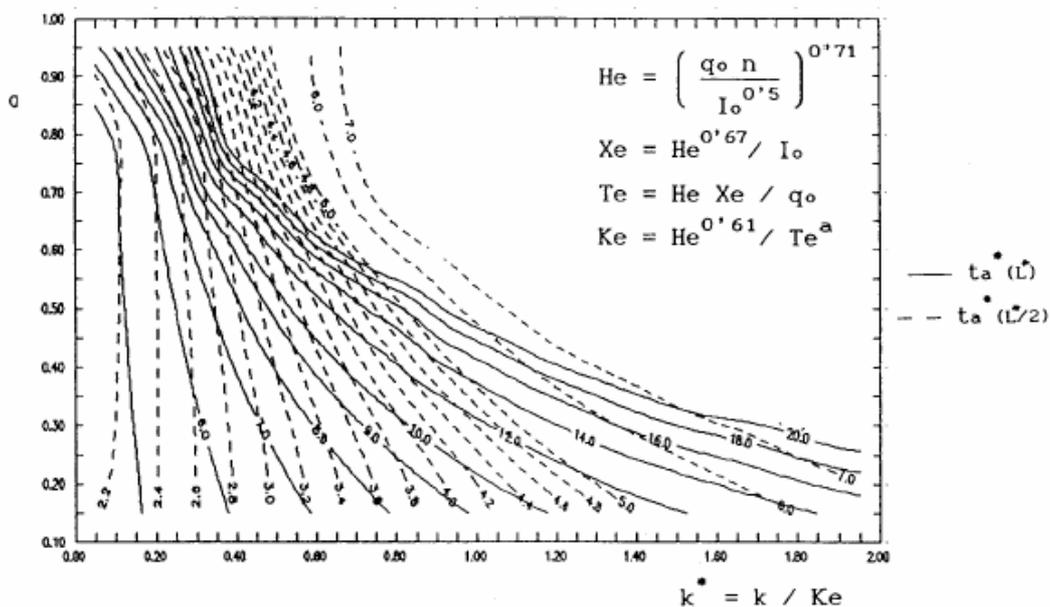


Figura 9a. Diagrama adimensional del tiempo de avance hasta  $L^*$  v  $L'/2$  en función de los parámetros de infiltración. E scorrimento en surcos. Aproximación MIN,  $L^* = 3,58$ .

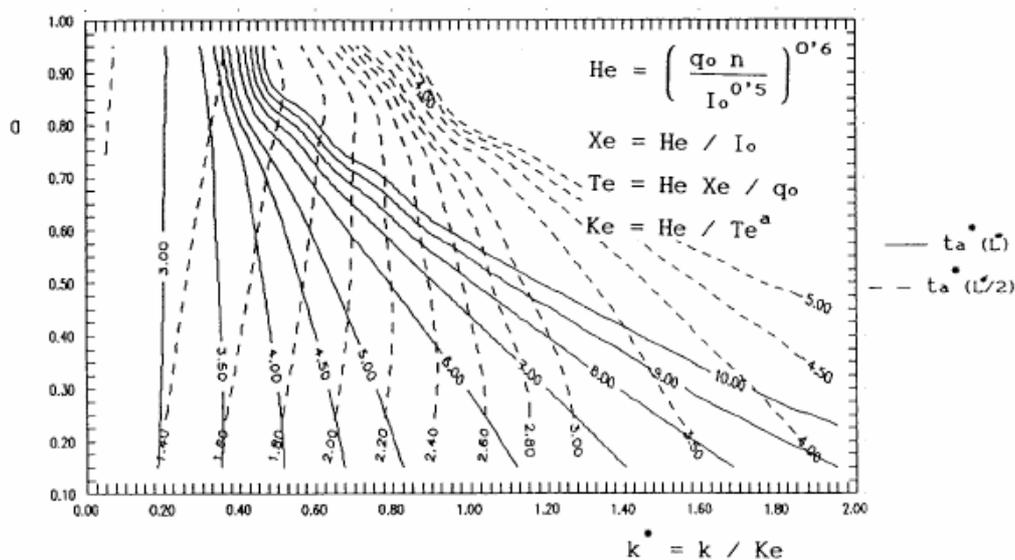


Figura 9b. Diagrama adimensional del tiempo de avance hasta  $L$  y  $L'/2$  en función de los parámetros de infiltración. E scorrimento a manta. Aproximación MIN,  $L^* = 2,75$ .

A modo de ejemplo, consideremos un ensayo en surco con sección transversal dada por  $c = 1,5$  y  $M = 0,5$ , pendiente longitudinal media  $I_0 = 0,0008$  y en el que se aplica un gasto  $q_0 = 1$  l/s. Se estima un coeficiente de Manning  $n = 0,06$ . Suponiendo las hipótesis del MIN, dadas las variables independientes  $n, I_0, q_0$  resultan los siguientes valores característicos:

$$H_e = \left( \frac{q_0 n}{I_0^{0,67}} \right)^{0,71} = \left( \frac{0,001 \times 0,06}{0,0008^{0,5}} \right)^{0,71} = 0,01264 \text{ m}$$

$$X_e = \frac{H_e^{0,67}}{I_0} = \frac{0,01264^{0,67}}{0,0008} = 67,8 \text{ m}$$

$$T_e = \frac{H_e X_e}{q_0} = \frac{0,01264 \times 67,8}{0,001} = 858 \text{ s}$$

Para utilizar la Figura 9a, la longitud de trabajo debe ser:

$$L = L^* X_e = 3,582 \times 67,8 \approx 243 \text{ m}$$

Por tanto, se hace necesario medir los tiempos de avance en el ensayo hasta las distancias  $L$  y  $L/2$ , con  $L = 243$  m. Supongamos que dichos tiempos resultan ser 64 y 184 min, respectivamente. El valor de  $a$  se obtiene en la intersección de las curvas:

$$t_a^*(L/2) = \frac{64 \times 60}{858} \approx 4,5$$

$$t_a^*(L) = \frac{184 \times 60}{858} = 13$$

Resulta:

$$a \approx 0,45$$

$$k^* \approx 0,79$$

El valor de  $k$  correspondiente, se obtiene como sigue:

$$k = k^* K_e = k^* \frac{H_e^{0,61}}{T_e^a} = 0,79 \frac{0,01264^{0,61}}{858^{0,45}} = 0,0026 \text{ m/s}^a = 10,5 \text{ cm/h}^a$$

Con el fin de comparar, se acepta la hipótesis del **MOC**. A partir de la longitud característica  $L = X_e = 243$ , los valores característicos serían:

$$H_e = \left( \frac{q_o n}{I_o^{0,5}} \right)^{0,71} = \left( \frac{0,001 \times 0,06}{0,0008^{0,5}} \right)^{0,71} = 0,01264 \text{ m}$$

$$T_e = \frac{H_e X_e}{q_o} = \frac{0,01264 \times 243}{0,001} = 3.070 \text{ s}$$

Entrando en la Figura 8a, con:

$$t_a^*(L) = \frac{184 \times 60}{3.070} = 3,60$$

$$t_a^*(L/2) = \frac{64 \times 60}{3.070} = 1,25$$

se obtiene:

$$a \approx 0,45$$

$$k^* \approx 1,37$$

El valor de  $k$  correspondiente es:

$$k = k^* K_e = k^* \frac{H_e^{0,61}}{T_e^a} = 1,37 \frac{0,01264^{0,61}}{3.070^{0,45}} = 0,0026 \text{ m/s}^a = 10,2 \text{ cm/h}^a$$

Se comprueba con el ejemplo considerado que las diferencias son poco significativas.

Lógicamente, en el caso de que la pendiente sea muy pequeña, al considerarla nula, pueden utilizarse las curvas mostradas en el apartado anterior, relativo al riego a nivel, con las hipótesis del **MIN**.

### Selección de criterios de aplicación y proyecto

En este tipo de riego es frecuente tener una salida libre a escurrido, por lo que a las pérdidas de agua por filtración, en profundidad, hay que añadir las de escurrido, en cola. La modificación de las variables en el sentido que mejoraban el resultado en riego por inundación, ahora en riego por escurrido, sólo tienden a mejorar la uniformidad. Por tanto, un riego uniforme bien elegido tiene pequeñas pérdidas en profundidad pero grandes por escurrido, y viceversa. El rendimiento de aplicación presenta así un valor óptimo para un valor intermedio de la variable en estudio (Figura 10). La sensibilidad del rendimiento es diferente a un lado y otro del óptimo, siendo menos sensible y, por tanto, preferible, el lado donde se producen más pérdidas por escurrido (Juana 1993).

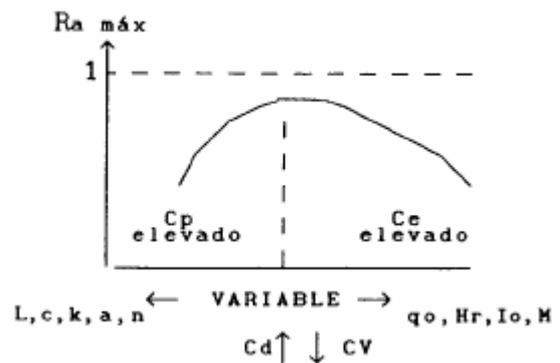


Figura 10. Tendencia del rendimiento de aplicación en riego por escurrido, al modificar una variable o parámetro de entrada.

El punto de máximo rendimiento puede ser determinado para cada déficit. Así, de forma simplificada, suponiendo que el flujo en cola quedase condicionado por una prolongación indefinida del surco, la lámina  $H_r$  y la longitud  $L$  que optimiza una aplicación dada por  $q_o$  y  $t_{ar}$  con un rendimiento máximo para cada déficit, puede obtenerse a través de la siguiente relación (ver Figura 11):

$$\frac{dH_r}{dL} = -\frac{H_r}{L} = -\frac{H_m}{x}$$

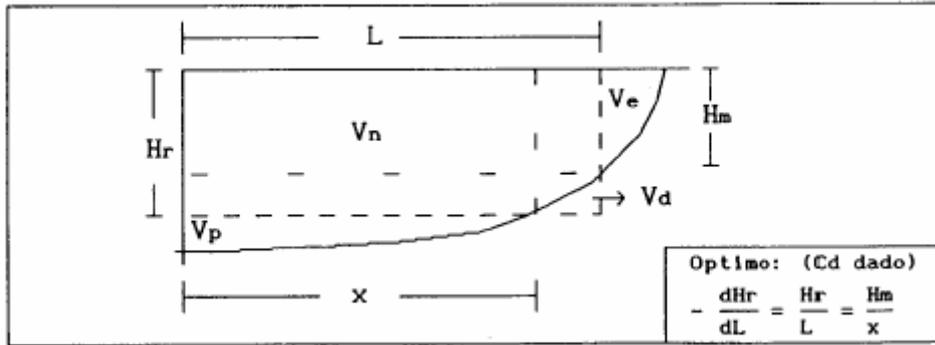


Figura 11. Longitud y lámina que optimizarían una aplicación  $(q_{at})$ , en riego por escurrimiento.

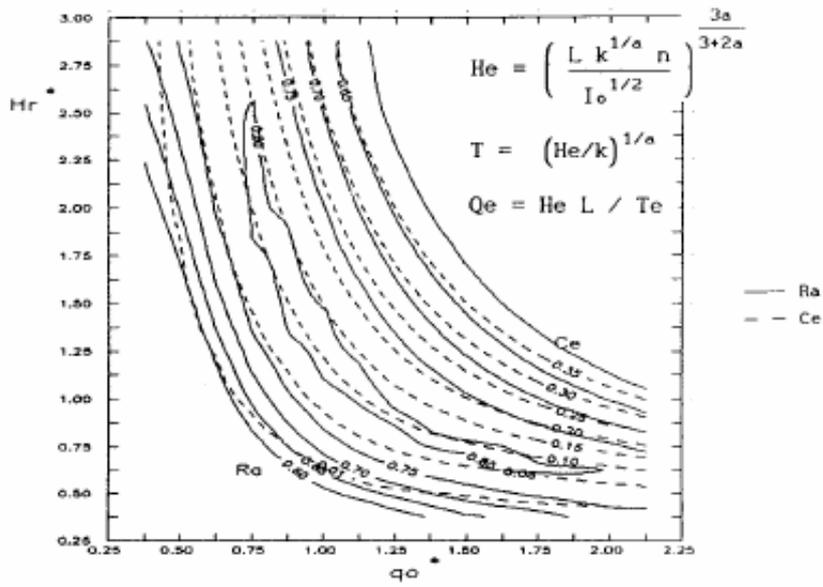


Figura 12a. Diagrama de operación para el riego por escurrimiento en cancheros,  $a = 0,7$ ,  $C_d = 0,03$ . Aproximación MOC.

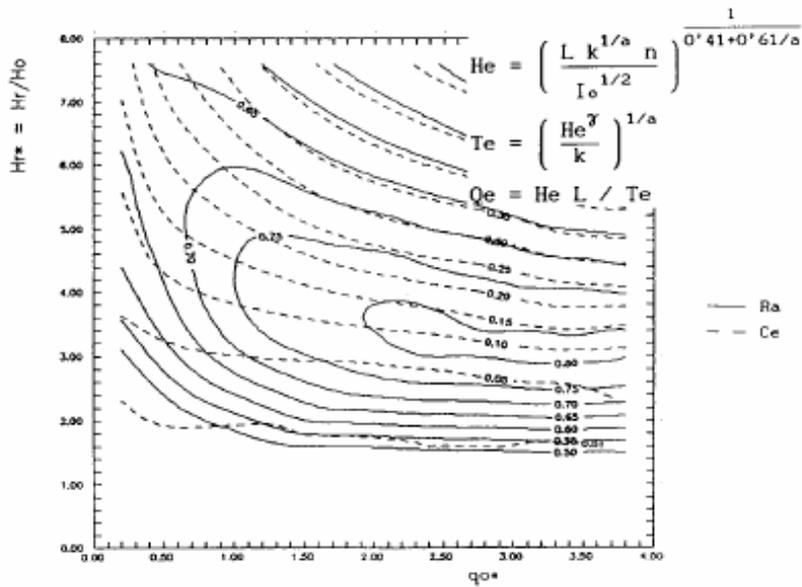


Figura 12b. Diagrama de operación para el riego por escurrimiento en surcos  $a = 0,5$ ,  $C_d = 0,03$ . Aproximación MOC.

Lógicamente, el planteamiento más real es el contrario, es decir, determinar la aplicación óptima para cada longitud y lámina concretas. Puede abordarse con un proceso iterativo, lo que requiere más tiempo de cálculo. Las diferencias, sin embargo, no suelen ser grandes. Aquí se ha seguido el primer planteamiento para obtener una aproximación inicial para el segundo.

Considerando el **MOC** y, como escalas independientes, la terna  $X_e, I_e, K_e$ , puede representarse el  $R_o$  en diagrama adimensional  $H_r - q_0$ , para un exponente de infiltración  $a$ ,

una forma de surco ( $c, M$ ), y cada déficit  $C_d$  (ver Figura 12). Si se representan solamente los óptimos puede generalizarse para cualquier déficit o para cualquier  $a$  (ver Figura 13).

Considerando el **MIN** y, como escalas independientes, la terna  $N_e, I_e, K_e$ , puede representarse, en el gráfico adimensional  $H_r, -q_0$ , la  $L$  que produce el  $R_a$  máximo para un exponente de infiltración  $a$  una forma de surco ( $c, M$ ) y un déficit  $C_d$  (Figura 14).

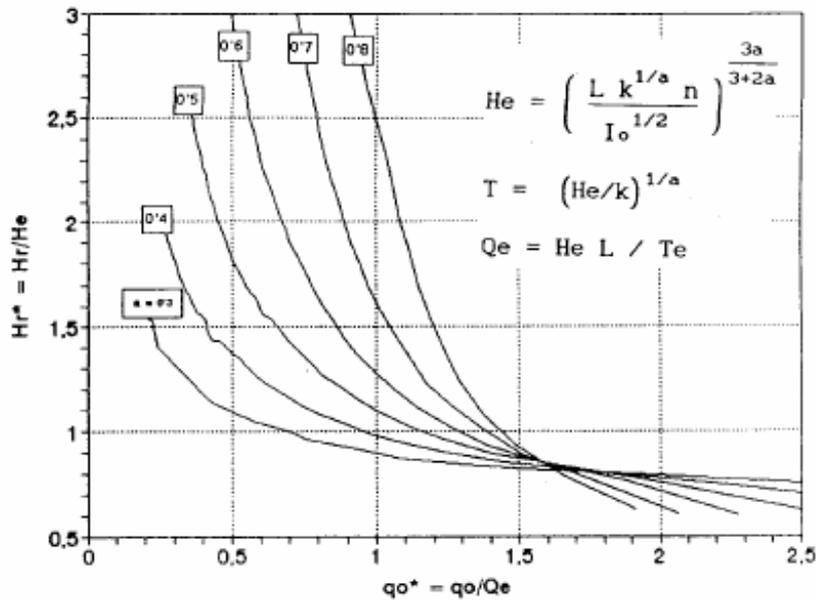


Figura 13a, Aplicación de máximo rendimiento en riego por escurrimiento a manta,  $C_d = 0,03$ . Aproximación **MOC**.

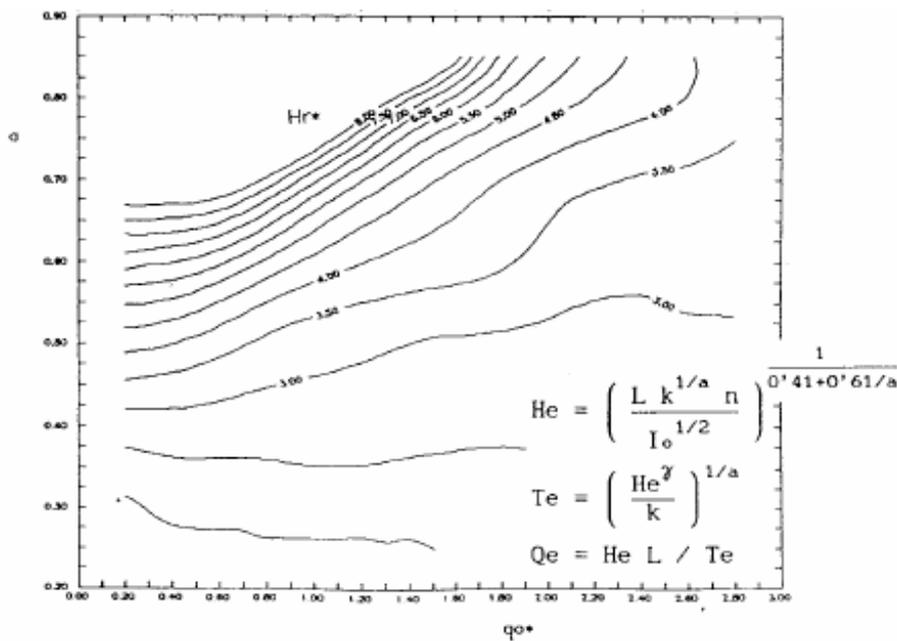


Figura 13b, Aplicación de máximo rendimiento, riego por escurrimiento en surcos,  $C_d = 0,03$ . Aproximación **MOC**.

En las Figuras 13 y 14, se observan además los límites superiores al rendimiento del riego por escurrimiento con salida libre. Su interés estriba en que motivan a algunos regantes a cambiar de método, poniendo un caballón terminal, recortando la modulación, implantando riego por pulsaciones.

A modo de ejemplo, supongamos un tablar de surcos de

características similares al apartado anterior ( $a = 0,5, k = 10 \text{ cm/h}^a, n = 0,06 \text{ (SI)}, I_o = 0,0015, s = 0,8$ ), con longitud  $L = 200 \text{ m}$  y ancho  $B = 40 \text{ m}$ . Se desea elegir el gasto  $q_o$  y el tiempo de riego  $t_w$ , durante el que se debe aplicar dicho gasto para conseguir una lámina  $H_r = 40 \text{ mm}$ . Así mismo, se desea conocer las posibles actuaciones que mejoren futuras aplicaciones.

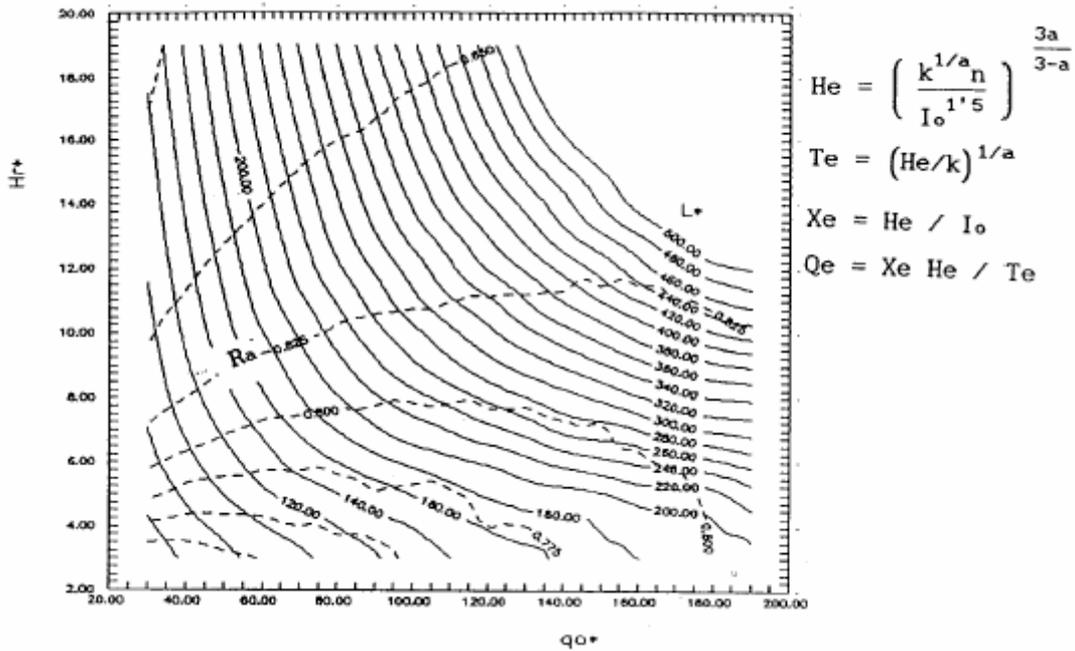


Figura 14a. Aplicación de máximo rendimiento en riego por escurrimiento a manta,  $a = 0,7, C_d = 0,03$ . Aproximación MIN.

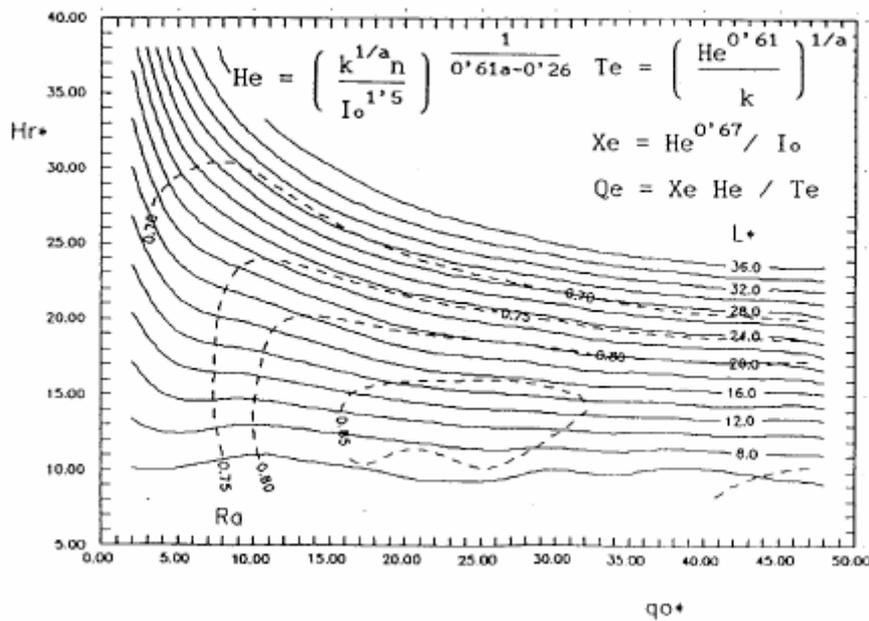


Figura 14b. Aplicación de máximo rendimiento en riego por escurrimiento en surcos,  $a = 0,7, C_d = 0,03$ . Aproximación MIN.

Considerando el **MOC** y las variables independientes  $L$ ,  $n$ ,  $k$ ,  $I_0$  los valores característicos resultan ser los siguientes:

$$H_e = \left( \frac{L k^{1/a} n}{I_0^{1/2}} \right)^{\frac{1}{\beta-1-\gamma/a}} =$$

$$= \left( \frac{200 \times 0,1^{1/0,5} / 3.600 \times 0,006}{0,0015^{1/2}} \right)^{\frac{1}{1,41-1+0,61/0,5}} = 13 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$T_e = \left( \frac{H_r^\gamma}{k} \right)^{1/a} = 1.809 \text{ s}$$

$$Q_e = \frac{H_e L}{T_e} = 1.44 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

Entrando en la figura 12b con  $H_r^* = 40/13,05 = 3,06$ , se observa que dicha lámina requiere un gasto  $q_o^* = 1$  (equivalente a  $q_o$  de 1,5 l/s) para obtener un rendimiento de aplicación  $R_a$  en torno 0,7. Alcanzar rendimientos del 0,75 a 0,80 obligaría a aplicar gastos  $q_o^*$  en torno a 1,4 y 2,1 (es decir,  $q_o$  entre 2 y 3 l/s), respectivamente. El rendimiento máximo, en torno a 0,83, se produce para gastos mayores, pero el riesgo de erosión puede desaconsejar superar los valores citados. De adoptarse el gasto unitario  $q_o = 2,0$  l/s, el gasto total  $Q_o$  aplicar en el cantero sería:

$$Q_o = q_o B / s = 2,0 \times 40 / 0,8 = 100 \text{ l/s}$$

El rendimiento obtenido estaría en torno a 0,75, con un déficit  $C_d$ , - 0,03 y un coeficiente de escorrentía  $C_e = 0,06$ . El tiempo de aplicación de riego y el volumen de escorrentía se determinan por balance volumétrico:

$$t_{ar} = \frac{H_r (1 - C_d) L B}{Q_o} = 3.104 \text{ s} = 52 \text{ min}$$

$$V_e = C_e V_b = C_e t_{ar} Q_o = 18,6 \text{ m}^3$$

En el supuesto de disminuir el gasto, sin reducir el rendimiento, habría que disminuir la longitud o aumentar la lámina. Una lámina  $H_r^* = 4$  ( $H_r = 50$  mm) permite el mismo rendimiento con un gasto unitario  $q_o \approx 1,5$  l/s. De la misma forma, si reducimos la longitud a la mitad,  $L = 100$  m, los valores característicos pasan a ser los que siguen:

$$H_e = 8,52 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$T_e = 1.076 \text{ s}$$

$$Q_e = 0,79 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

Al entrar con  $H_r^* = 40/8,52 = 4,69$ , vemos que el mismo

rendimiento corresponde también a un gasto  $q_o^*$  próximo a la unidad, pero ahora le corresponde un gasto unitario de  $q_o = 0,8$  l/s.

Considerando el **MIN** y las variables independientes  $n$ ,  $k$ ,  $I_0$  los valores característicos resultan ser los siguientes:

$$H_e = \left( \frac{k^{1/a} n}{I_0^{3/2}} \right)^{\frac{1}{\beta-1+\gamma/a-\alpha}} = 2,247 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$T_e = \left( \frac{H_e^\gamma}{k} \right)^{1/a} = 212 \text{ s}$$

$$X_e H_e^\alpha / I_0 = 11,44 \text{ m}$$

$$Q_e = \frac{H_e X_e}{T_e} = 0,121 \times 10^{-3} \text{ m}^3 / \text{s}$$

Resultan, para los valores iniciales de  $L$  y  $H_r$ , los valores de  $L$  y  $H_r^*$  que siguen:

$$L^* = L / X_e = 200 / 11,44 = 17,5$$

$$H_r^* = H_r / H_e = 17,8$$

Entrando en la Figura 14b se observa, en primer lugar, que dicha longitud y lámina se cortan para un gasto  $q_o \approx 20$  ( $q_o \approx 2,5$  l/s), gasto que produciría un rendimiento máximo en torno a 0,82, para un déficit  $C_d = 0,03$ . Manteniendo la longitud, el óptimo corresponde a un gasto  $q_o \approx 10$  ( $q_o \approx 1,2$  l/s) para una lámina  $H_r^* \approx 22$  ( $H_r = 50$  mm). Manteniendo la lámina, para el mismo gasto, se obtiene una longitud  $L^* \approx 14$ , es decir,  $L \approx 160$  m. En ambos casos el rendimiento baja hasta un valor ligeramente inferior a 0,8.

## CONCLUSIONES

Se demuestra que la semejanza ofrece un notable potencial para generalizar resultados de riego por superficie, tanto simulados como experimentales. Dado lo laborioso y costoso de la obtención de estos últimos, los criterios aplicados tienen interés práctico y económico. Se justifican diagramas que muestran relaciones con las que el ingeniero puede orientar sus decisiones de proyecto sobre capacidad de acequias de servicio y sobre la organización de tablares. También pueden asistir técnicamente a agentes extensionistas en sus decisiones sobre manejo de un sistema de riego dado.

## AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer a la Fundación Nicomedes García Gómez el apoyo financiero para la realización de este trabajo.

**BIBLIOGRAFIA**

Clemmens, A.J. 1991. "Direct Solution to Surface Irrigation Advance Inverse Problem". J. Irrig. Drain. Div. ASCE. 117(4):578-595.

Clemmens, A.J., T. Strelkoff y A.R. Dedrick. 1981. "Development of solutions for Level-Basin Design". J. Irrig. Drain. Engin. ASCE. 107(IR3):265-279.

FAO. 1989. "Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems". Irrigation and Drainage Paper 45. Roma.

Juana, L., A. Losada y E. Hernández. 1991. "Utilización de los modelos matemáticos como ayuda al manejo y proyectos de sistemas de riego por superficie". III Simposio sobre el agua en Andalucía. Córdoba.

Juana, L. 1993. "Sensibilidad del riego por superficie a variables y parámetros de proyecto y operación". Tesis Doctoral, no publicada, E.T.S.I. Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.

Losada A., L. Juana y J. Roldan. 1990. "Operation diagrams for irrigation management". Agricultural Water Management. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam. 18(1990) 289-300.

Strelkoff, T. 1985. "Dimensionless Formulation of Furrow Irrigation". J. Irrig. Drain. Engin. ASCE. 111(4):380-394.

Strelkoff, T. y N.D. Katopodes. 1977. "Border Irrigation Hydraulics with Zero-Inertia". J. Irrig. Drain. Div. ASCE. 103(IR3):325-342.

Walker, W.R. y G.V. Skogerboe. 1987. "Surface Irrigation. Theory and Practice". Prentice-Hall, INC., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

**NOTACION EMPLEADA**

- $a$  Exponente del tiempo en expresión de infiltración. Subíndice para el avance.
- $B$  Anchura superficial de la corriente.
- $c$  Coeficiente en la definición de la anchura de la sección.
- $C_d$  Coeficiente de déficit. Relación entre déficit medio y la lámina requerida.
- $C_r$  Coeficiente de escorrentía.
- $CV$  Coeficiente de variación estadístico.
- $d$  Operador diferencial.
- $e$  Exponente genérico en una función potencial. Subíndice que indica escorrentía. En estudios de semejanza, agregada al final de una variable, indica su escala o variable característica.
- $g$  Aceleración gravitatoria.
- $H$  Lámina o altura de riego aplicada.
- $H$  Lámina media infiltrada.

- $H_o$  Altura bruta aplicada.
- $H_r$  Altura requerida.
- $I$  Pendiente motriz.
- $I_o$  Pendiente de la rasante.
- $k$  Coeficiente en expresión de infiltración.
- $L$  Longitud del cantero o surco.
- $M$  Exponente en la definición de la anchura de la sección.
- MIN** Modelo de inercia nula.
- MOC** Modelo de onda cinemática.
- $n$  Coeficiente de aspereza de **MANNING**.
- $o$  Subíndice relativo a la sección de cabeza.
- $p$  Perímetro mojado. Subíndice para expresión de ajuste del perímetro mojado.
- $q$  Gasto unitario, por cada unidad de ancho, en canteros, o por surco.
- $Q$  Gasto o caudal.
- $R_a$  Rendimiento de aplicación. Relación entre lámina neta, o útil, y lámina bruta.
- $t$  Tiempo.
- $t_{ar}$  Tiempo de aplicación del riego.
- $t_c$  Tiempo de contacto
- $W_e$  Valor característico o escala de  $\omega$ .
- $x$  Distancia desde cabeza.
- $y$  Calado.
- $z$  Sección transversal infiltrada.
- $\alpha$  Variable auxiliar.
- $\beta$  Variable auxiliar.
- $\gamma$  Variable auxiliar.
- Peso específico,
- $\mu$  Densidad.
- $\omega$  Sección transversal de la corriente superficial. Subíndice para indicar dicha sección.
- $\partial$  Operador derivada parcial.
- $\propto$  Indicador de proporcionalidad.
- $\approx$  Valor aproximado.
- $*$  Supraíndice que indica adimensionalidad.