

Un modelo de simulación del riego por surcos inundados

García Navarro, P.¹ (P), Sánchez García, A.¹, y Playán Jubillar, E.²

RESUMEN

El riego por surcos inundados consiste en asurcar una parcela de riego por inundación (un campo de forma cercana al cuadrado, de 0,5 a 5 ha, nivelada sin pendiente y sin escorrentía). Cuando se riega, el agua se distribuye a cada surco sin ninguna actuación de regulación por parte del regante. Este sistema de riego tiene un potencial de ahorro de agua frente al riego por inundación, aunque solo es factible en algunos cultivos. Hasta la fecha no se ha abordado la simulación del sistema de surcos inundados ni una comparación con el riego por inundación. En este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo numérico del riego por surcos inundados basado en la disposición mallada de una serie de canales unidimensionales que se conectan mediante puntos de bifurcación o confluencia. Los resultados del modelo confirman la potencial ventaja del riego por surcos inundados sobre el riego por inundación. Así, en un caso de estudio se redujo la dosis de riego en un 18% y se aumentó la uniformidad del riego en 2,8 puntos porcentuales. Para poder establecer con rigor la capacidad predictiva del modelo será necesaria una validación con estudios experimentales.

ABSTRACT

The level furrow irrigation system consists on furrowing a level-basin (a 0,5 to 5 ha squarish field, levelled to zero slope and surrounded by a dyke). The field is flooded from one or several points and water flows into each furrow without further farmer intervention. This irrigation system has been reported to have a potential for water conservation when compared with level basin irrigation. Level furrows, however, can only be applied in selected crops. The simulation of level furrow irrigation and its comparison with level basin irrigation have not been addressed in the past. In this work, we present the development of a

¹ Área de Mecánica de Fluidos. CPS, Universidad de Zaragoza, María de Luna 3, 50015 Zaragoza.

² Estación Experimental de Aula Dei, CSIC. Apdo. 202. 50080 Zaragoza.

numerical model for level furrow irrigation based on a network of one-dimensional channels connected by bifurcation or confluence points. Simulation results confirm the potential advantage of level furrow over level-basin irrigation. In a particular case study, introducing the level furrow system reduced the average irrigation dose by 18%, while irrigation uniformity increased by 2,8 points. Field experiments will be required to confirm these preliminary simulation results.

1) INTRODUCCIÓN. OBJETIVOS

En muchos lugares del mundo el riego por superficie es el sistema de riego más empleado, ocupando la inmensa mayoría de las tierras de regadío a nivel mundial. En zonas de clima semiárido con escasez de agua y un nivel tecnológico avanzado, como España o California, el riego por superficie todavía supera las dos terceras partes de la superficie de regadío (Hanson et al., 1995).

Uno de los mayores avances del riego por superficie en los últimos años ha sido la extensión del riego por inundación, que se caracteriza por regar parcelas de gran tamaño perfectamente niveladas, sin pendiente y rodeadas por un dique (Dedrick et al., 1978). Aunque el riego por inundación generalmente consigue eficiencias muy elevadas, en algunos casos particulares puede presentar bajas eficiencias por aplicar dosis de riego excesivas. En estas condiciones puede resultar dañino para el medio ambiente, ya que se utiliza más agua de la necesaria y se puede contaminar las aguas superficiales y subterráneas con importantes cantidades de sales, fertilizantes y agroquímicos. Una solución que se ha adoptado con frecuencia para resolver este problema consiste en asurcar el terreno de la parcela. Esta práctica constituye el sistema de riego por surcos inundados (Erie y Dedrick, 1979). El agua se introduce por una única toma y avanza por un canal de distribución perpendicular a los surcos. El riego avanza por los surcos a distintas velocidades, pero al llegar al extremo aguas abajo puede recircular a través de un segundo canal de distribución (Fig. 1). El confinamiento por medio de diques hace que el proceso de infiltración sea prácticamente estático una vez el agua cubre toda la superficie del campo (fase de vaciado).

Una de las herramientas en el diseño y la gestión de los sistemas de riego por superficie es la modelización matemática. El desarrollo de modelos matemáticos que describen la realidad física y la evolución de los métodos numéricos que permiten resolverlos satisfactoriamente, hacen que las simulaciones sean el complemento ideal a las técnicas experimentales. Esto es debido a la rapidez y versatilidad de los modelos. Además, la modelización es en general más accesible que la preparación de las instalaciones experimentales, resultando a su vez en una ventaja económica importante.

A pesar de la importancia del sistema de riego por surcos inundados, y de su implantación a nivel mundial, no se dispone hasta la fecha de ningún modelo que permita su simulación. En este trabajo se ha desarrollado un modelo para simular el riego por surcos inundados basado en una red mallada de canales abiertos (modelo RSI). El flujo de agua se supone unidimensional y marcadamente transitorio. Las ecuaciones utilizadas constituyen el modelo de aguas poco profundas de St. Venant y se resuelven numéricamente mediante métodos explícitos. Los métodos numéricos elegidos para resolver el modelo matemático son el método de las características y el método de las diferencias finitas. Utilizando el modelo propuesto, en este trabajo se realiza una comparación entre el riego por inundación y el riego por surcos inundados, con el objetivo de estimar la mejora de la eficiencia de riego obtenida por el asurcado de la parcela.

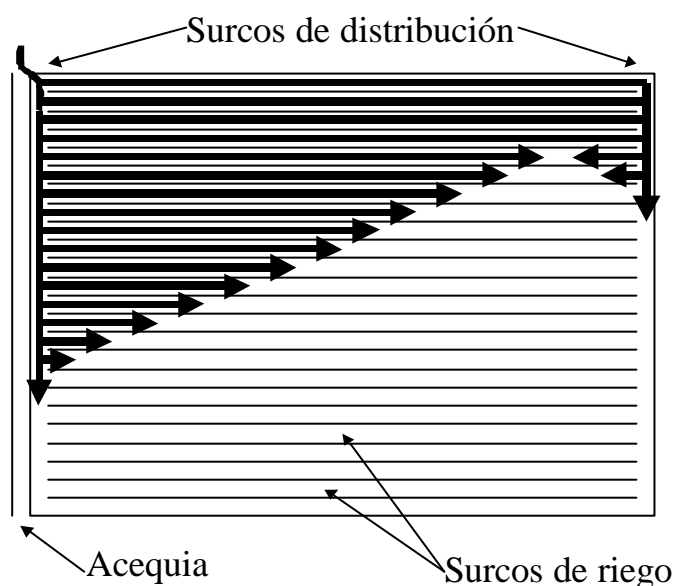


Figura 1. Esquema del sistema de riego por surcos inundados, detallando los surcos de riego y los surcos de distribución del agua de riego.

2) MATERIALES Y MÉTODOS

En los últimos veinte años se han utilizado modelos para simular el riego por superficie (Katopodes y Strelkoff, 1977; Singh y Bhallamundi, 1996; Walker y Skogerboe, 1987). Los modelos son útiles para reproducir la realidad a partir de una serie de simplificaciones y permiten resolver situaciones muy complejas. La simulación numérica permite la resolución de las ecuaciones diferenciales que definen un proceso físico mediante su discretización en relaciones algebraicas evaluadas en una serie de puntos representativos del dominio de estudio. La aplicación de ciertas hipótesis permite la utilización de modelos unidimensionales o bidimensionales para la resolución del flujo de agua de riego en parcelas.

Modelos unidimensionales del flujo en lámina libre

Las ecuaciones unidimensionales son aplicadas con rigor en situaciones en las que el flujo de agua de riego se puede considerar unidimensional, es decir, aquellas en las que el frente avanza en línea recta y se consideran despreciables los movimientos laterales del agua. Las ecuaciones que constituyen el modelo hidrodinámico unidimensional son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + i &= 0 \\ \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + (1 - Fr^2) \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{D_i}{gA} &= S_o - S_f \end{aligned} \quad (1)$$

Donde A es el área transversal mojada, Q es el caudal, i es la tasa de infiltración, g es la aceleración de la gravedad, Fr es el número de Froude, h es el calado del agua, D_i representa la pérdida de energía por infiltración, S_o es la pendiente del terreno (nula en este caso) y S_f es la pendiente de fricción.

La tasa de infiltración es la derivada temporal de la lámina de agua infiltrada, Z , que se calcula en función de tres parámetros, k , a y f_0 , que caracterizan el proceso de infiltración según la ecuación de Kostiakov-Lewis ($Z = kt^a + f_0t$). En esta ecuación la variable independiente es τ , que se define como el tiempo de oportunidad, correspondiente al tiempo que un determinado punto de cálculo lleva cubierto por agua.

Modelos bidimensionales

En ocasiones, el riego presenta características que impiden su simulación por medio de modelos unidimensionales. Esto sucede en casos de parcelas irregulares, cuando hay varios puntos de entrada de agua y, en general, cuando el flujo no se basa en corrientes paralelas. En estas situaciones se precisa de los modelos bidimensionales que introducen una nueva variable espacial a la resolución de las ecuaciones. Las ecuaciones se pueden escribir en función del calado (h) y dos componentes de la velocidad (u y v según el eje tomado):

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uh) + \frac{\partial}{\partial y}(vh) + i &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(uh) + \frac{\partial}{\partial x}(u^2h) + \frac{\partial}{\partial y}(uvh) + g \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^2}{2} \right) - gh(S_{0x} - S_{fx}) - D_{ix} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(vh) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2h) + \frac{\partial}{\partial x}(uvh) + g \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^2}{2} \right) - gh(S_{0y} - S_{fy}) - D_{iy} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

El modelo bidimensional B2D fue desarrollado por Playán et al. (1994a; 1994b), y está diseñado específicamente para la simulación del riego por inundación. Este modelo puede utilizar varios puntos simultáneos o sucesivos de entrada de agua. El programa permite definir la forma del campo y determinar el tipo, la localización y las características de los puntos de entrada de agua al mismo.

Modelo de red mallada para el riego por surcos inundados (RSI)

El modelo numérico desarrollado en este trabajo para la simulación de riego en surcos inundados se basa en una red mallada de canales abiertos por donde circula el agua. En los canales se hace la hipótesis de que circula un flujo unidimensional de agua marcadamente transitorio y modelizable mediante la ecuación 1. La unión de los surcos de distribución con los de riego da lugar a conexiones de dos o tres canales, según se hallen los surcos de riego en puntos extremos o intermedios de la parcela (Fig. 1).

La geometría de la parcela se introduce mediante el número de surcos de riego, el intervalo espacial Δx usado en la discretización de los surcos de riego y distribución, y el número de nodos de cada tipo de surco. En el modelo, la sección transversal de los surcos es trapezoidal. El proceso de infiltración ocurre tanto en los surcos de distribución como en los surcos de riego. Además de los datos geométricos y los parámetros de infiltración, los datos que caracterizan el problema son el caudal de riego aplicado y el coeficiente de rugosidad de Manning. Los parámetros numéricos más influyentes en el tiempo de cálculo y en la estabilidad y convergencia del método son el intervalo espacial Δx y el intervalo temporal Δt . Este último se controla a través de la condición de Courant-Friedrichs-Lewy, que permite definir un número adimensional CFL que gobierna la estabilidad numérica. En el programa se considera un CFL menor o igual que la unidad, fijo, y un Δt variable.

Una vez introducidos los datos que caracterizan el problema y el proceso de cálculo, el programa avanza la solución en la red de canales a partir de unos valores iniciales de caudal y calado nulos, correspondientes a un campo seco. La simulación del avance de agua en el sistema de surcos inundados se realiza mediante la aplicación del modelo hidrodinámico hasta que el agua cubre todos los nodos del dominio. En ese momento se corta el agua de riego y se aplica el método de Newton-Raphson para calcular el tiempo necesario para que se infiltre toda el agua. La aplicación de este método se basa en la suposición de que, una vez se ha cubierto de agua todo el terreno, el proceso de infiltración es prácticamente estático. Por tanto, a partir de este momento no es necesario aplicar un modelo de flujo transitorio.

Para la resolución en los puntos interiores se utilizó el esquema de McCormack (García-Navarro y Savirón, 1993). Se trata de un esquema explícito en diferencias finitas de segundo orden de precisión en espacio y tiempo que se caracteriza por su capacidad para tratar flujos que varían tanto lenta como rápidamente. El fundamento del método consiste en calcular la solución numérica de las variables en cada punto a partir de la información obtenida de los puntos vecinos en el paso temporal anterior.

Tanto el esquema de McCormack como otros métodos explícitos permiten avanzar la solución numérica un paso temporal en todos los puntos interiores del mallado a partir de la información procedente de los puntos vecinos. Sin embargo, esto no es aplicable para puntos situados en los extremos aguas arriba y aguas abajo ya que debido a su posición, tan sólo cuentan con puntos a la derecha o a la izquierda. En la simulación de flujo en canales abiertos existe un conjunto de situaciones donde no es posible la resolución mediante la aplicación de las ecuaciones de flujo estacionario de St. Venant. Una de ellas es la confluencia (o bifurcación) de corrientes. En la red de canales considerada nos encontramos por lo tanto con dos tipos de contorno: uno correspondiente al punto por el cual se introduce todo el caudal de agua de riego (entrada aguas arriba), y un segundo tipo que permite tratar las confluencias de dos o tres corrientes. Debido a su distinta naturaleza cada tipo requiere un tratamiento particular, aunque en todos los casos se siguió la teoría de las características (García-Navarro y Savirón, 1993).

3) RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Características del caso de estudio

Uno de los objetivos de este trabajo es comparar el riego por surcos inundados y el riego por inundación. Para ello, se realizaron simulaciones con el modelo desarrollado RSI y con el modelo bidimensional B2D. Se eligió un suelo de textura franco-arcillosa, con las características de infiltración correspondientes a la familia 0,50 ($k = 0,00320 \text{ m min}^{-a}$; $a = 0,504$; $f_0 = 0,000117 \text{ m min}^{-1}$). Es importante destacar que en este estudio se usó una misma ecuación de infiltración para tablares y para surcos inundados. Sin embargo, las diferencias en los procesos de infiltración en surcos y tablares hacen que en un mismo suelo los parámetros de infiltración puedan tomar valores diferentes en cada caso. Por otro lado, los parámetros de infiltración en surcos resultan ser dependientes del perímetro mojado del surco. Por todo esto, las conclusiones que se derivan de este caso de estudio deben de considerarse provisionales hasta que este tema se aborde con el debido rigor experimental.

Se eligió para el coeficiente de fricción de Manning un valor de 0,04, típico del riego por surcos y del riego en tablares con suelo sin vegetación (Walker y Skogerboe, 1987). Los

parámetros numéricos utilizados en la simulación unidimensional en el modelo RSI fueron un intervalo espacial Δx de 0,5 m y un CFL de 0,85. El calado umbral a partir del cual comienza el proceso de infiltración se fijó en 10^{-4} m. En todos los casos de estudio, estos parámetros aseguraron la estabilidad y convergencia del modelo.

Las simulaciones se llevaron a cabo en una parcela de 60 m de ancho por 90 m de largo. En el caso del modelo RSI los surcos de riego se dispusieron paralelos al lado de 60 m. Se utilizó una separación entre surcos de 1,5 m, por lo que se usaron 60 surcos de riego. Los valores de pendiente lateral y de base menor de los surcos de riego fueron de 0,6 y 0,13 m respectivamente. La base de los surcos de distribución se escogió cuatro veces la de los surcos de riego, es decir 0,52 m, y su talud es de 0,6, al igual que en los surcos de riego. El caudal unitario supuesto fue de 1 Ls^{-1} , por lo que se usó un caudal total de 60 Ls^{-1} tanto en RSI como en B2D.

Para evaluar la idoneidad de riego de los dos sistemas estudiados se utilizó la uniformidad de distribución. No resultó posible utilizar la eficiencia de distribución al no conocerse el valor de la dosis de riego objetivo. Por ello, se evaluó la capacidad de cada sistema para dar riegos ligeros por medio del parámetro dosis de riego media. Otros parámetros estudiados fueron el volumen de agua de riego, el tiempo de corte (coincidente con el tiempo de avance) y el tiempo de receso del agua, que comprende desde el inicio del riego hasta el momento en que el agua desaparece por completo de la superficie.

Resultados numéricos

Las figuras 2 y 3 muestran la distribución espacial del calado y de la lámina infiltrada (respectivamente) en la simulación del riego por surcos inundados. Se presentan los resultados para tiempos de 1 min y 45 min. Se muestran los resultados para surcos alternos desde el primero (S1) hasta el penúltimo (S29). Las figuras muestran cómo el modelo ha simulado el avance del agua en los surcos de riego, y la recirculación a través de los surcos de distribución.

Los resultados del caso base según el modelo B2D para riego por inundación y según el modelo desarrollado para surcos inundados se muestran en la Tabla 1. Se observa que la dosis media y el volumen aplicado son más bajos en el riego por surcos inundados que en el riego por inundación, al igual que sucede con el tiempo de corte y el tiempo de receso. La reducción de la dosis media es muy importante, del 18%. La uniformidad es mayor en surcos inundados que en inundación, aunque en este caso la diferencia es de 2,8 puntos porcentuales. Estos datos no permiten obtener conclusiones generales sobre la eficiencia de los dos sistemas de riego, ya que se trata de un caso particular. Un estudio exhaustivo de las condiciones de riego permitirá proporcionar conclusiones más sólidas.

Finalmente, en la figura 4 se muestran gráficas de curvas de nivel de la lámina infiltrada en el momento final según el modelo RSI y el modelo B2D. En líneas generales se observa que las dosis medias finales son mayores en el riego por inundación que en el riego por surcos inundados. Es importante hacer notar que la escala de colores utilizada es la misma en ambas figuras, lo que permite una adecuada comparación visual.

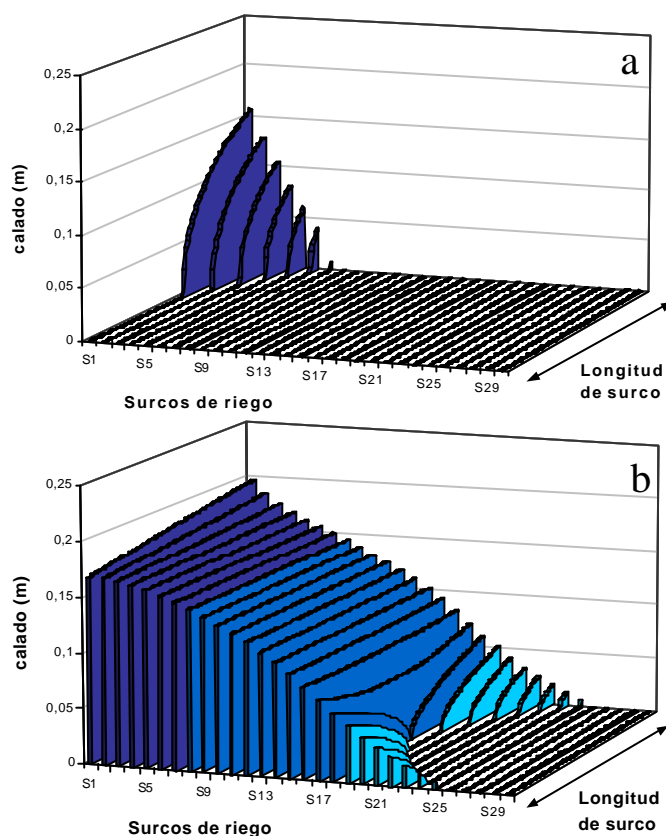


Figura 2. Evolución del calado para $t = 1$ min (a) y para $t = 45$ min (b).

Tabla 1. Resultados del caso base para los dos sistemas de riego.

Variable	Riego por inundación	Riego por surcos inundados
Volumen aplicado (m^3)	255,9	212,2
Dosis media (mm)	47,8	39,3
Tiempo de corte (min)	71,1	58,9
Tiempo de receso (min)	211	138
Uniformidad de Distribución (%)	82,9	85,7

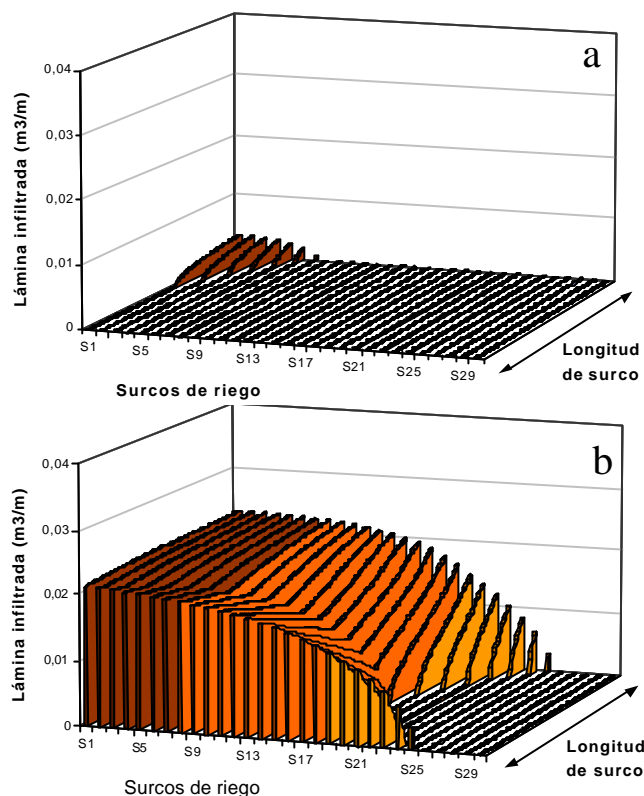


Figura 3. Evolución de la lámina infiltrada para $t = 1$ min (a) y para $t = 45$ min (b).

Otro aspecto importante es la diferente distribución espacial en los dos sistemas de riego. En el riego por surcos inundados se observa una cierta simetría a lo largo del campo a partir de los 20 m. Los valores máximos de lámina infiltrada se alcanzan en los extremos de cada surco de riego, debido a la recirculación del agua por los surcos de distribución. Los valores mínimos se alcanzan en los puntos intermedios de los surcos de riego. De nuevo se comprueba que las dosis medias disminuyen longitudinalmente según nos alejamos del punto de entrada del agua.

4) CONCLUSIONES

El modelo numérico desarrollado en este trabajo ha sido capaz de simular satisfactoriamente el riego por surcos inundados en una variedad de casos de estudio. El esquema de segundo orden de McCormack resultó conveniente para los puntos interiores incluso en la zona del frente de avance, que representa una discontinuidad y que habitualmente es una zona conflictiva. La estabilidad del modelo se aseguró mediante la elección de un CFL igual a 0,85.

La evaluación del modelo se realizó en base a la caracterización de un caso de estudio. En este caso se ha podido comprobar el potencial de ahorro de agua del sistema de

surcos inundados frente al riego por inundación. Sin embargo, para poder establecer su capacidad predictiva con rigor será necesaria la validación con estudios experimentales.

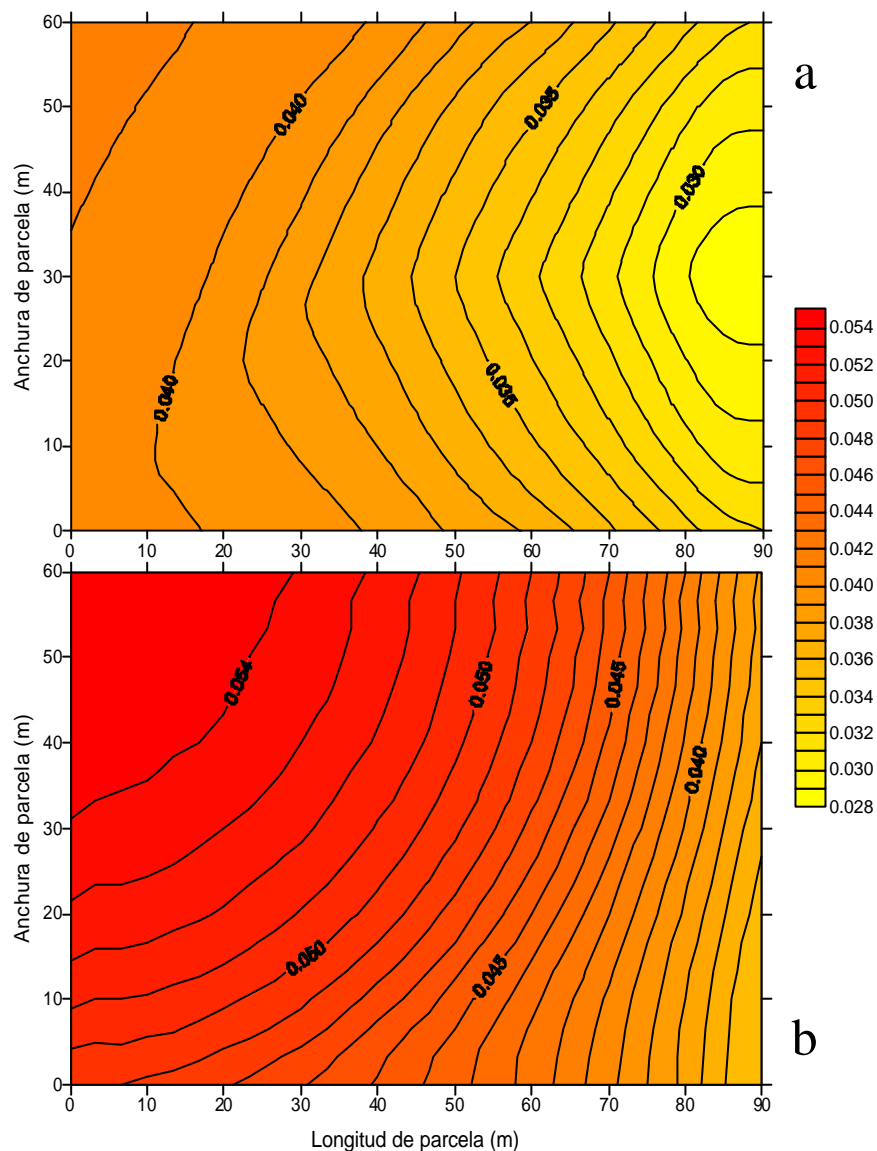


Figura 4. Distribución espacial de la lámina infiltrada (m) en riego por surcos inundados (a) y en riego por inundación (b).

5) BIBLIOGRAFÍA

- Dedrick, A. R., Replogle, J. A. and Erie, L. J., 1978. On-farm level-basin irrigation - save water and energy. *Civil Engineering*, 48(1):60-65.
- Erie, L. J. and Dedrick, A. R., 1979. Level basin irrigation: A method for conserving water and labor. *USDA Farmers' Bulletin*, 2261:23.

- García-Navarro, P. and Savirón, J. M., 1993. Numerical simulation of unsteady flow at open channel junctions. *J. Hydr. Res.*, 30:595-609.
- Hanson, B., Bowers, W., Davidoff, B., Kasapligil, D., Carvajal, A. and Bendixen, W., 1995. Field performance of microirrigation systems. In: *Microirrigation for a changing world: Conserving resources/Preserving the environment. Proc., Fifth Int'l. Microirrigation Congress.*, (Eds.) at Orlando, Florida. 986 pp.
- Katopodes, N. D. and Strelkoff, T., 1977. Hydrodynamics of border irrigation - complete model. *ASCE J. Irrig. Drain. Div.*, 103(IR3):309-323.
- Playán, E., Walker, W. R. and Merkley, G. P., 1994a. Two-dimensional simulation of basin irrigation. I: Theory. *ASCE J. Irrig. Drain. Div.*, 120(5):837-856.
- Playán, E., Walker, W. R. and Merkley, G. P., 1994b. Two-dimensional simulation of basin irrigation. II: Applications. *ASCE J. Irrig. Drain. Div.*, 120(5):857-870.
- Singh, V. and Bhallamundi, S. M., 1996. Complete hydrodynamic border-strip irrigation model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE*, 122(4):189-197.
- Walker, W. R. and Skogerboe, G. V., 1987. *Surface irrigation. Theory and practice.* Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 386 pp.