

MODELIZACIÓN DE FERTIRRIGACIÓN EN REDES DE SURCOS

Burquete, J.¹, Zapata, N.¹, García-Navarro, P.², Playán, E.¹, Maikaka, M.³

RESUMEN

El riego por surcos es uno de los sistemas más antiguos y más utilizados en el mundo. La simulación de la aplicación de fertilizantes disueltos en el agua (fertirrigación) en riego en redes de surcos es una herramienta que puede resultar muy útil para la optimización del riego. En este trabajo se presenta un modelo de simulación que incorpora las últimas novedades y refinamientos desarrollados en los últimos años tanto en los modelos de rozamiento, infiltración y difusión de solutos como en la resolución numérica y el tratamiento de las condiciones de contorno. Las propiedades matemáticas del modelo propuesto se demuestran en varios tests con solución analítica y en varios experimentos de fertirrigación en surcos. Además se presenta la aplicación del modelo para la optimización de la aplicación de fertilizante en fertirriego en surcos. La principal conclusión extraída es que con riego por surcos bien nivelados se puede lograr altas eficiencias y uniformidades de aplicación capaces de competir, para cultivos que se pueden adaptar a este sistema, con los más modernos sistemas de riego.

1.- INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS

La simulación de la aplicación de fertilizantes disueltos en el agua (fertirrigación) en riego en redes de surcos es una herramienta que puede resultar muy útil para la optimización del riego. Sin embargo presenta una serie de problemas que resultan en severas restricciones para su generalización. En este trabajo se presenta un modelo de simulación que trata de solucionar estos problemas:

1. introduciendo un modelo de infiltración que se ajusta a las variaciones del perímetro mojado que pueden producirse en los surcos durante el riego (Maikaka 2004);
2. usando un modelo de fricción, desarrollado a partir de una base teórica, que se adapta a diferentes tipos de flujo y usa un coeficiente de rozamiento absoluto y adimensional (Burquete y col. 2007);
3. adoptando una ecuación empírica para la estimación del coeficiente de difusión del soluto (Rutherford 1994); y
4. utilizando un método numérico de alto orden que equilibra los términos estacionarios (Burquete y García-Navarro 2001) y con tratamiento específico en las confluencias y en las condiciones de contorno (Burquete y col. 2006).

Para demostrar las propiedades matemáticas del modelo se ha simulado una rotura de presa ideal (sin pendiente ni rozamiento) con propagación de soluto que tiene solución analítica y una confluencia de canales con medidas experimentales de flujo en laboratorio. Además, se realizaron una serie de experimentos de riego con transporte de fertilizante cuyas medidas han sido utilizadas para demostrar la validez y aplicabilidad del modelo. Finalmente, se ha simulado una batería de diferentes aplicaciones de fertilizante para encontrar las estrategias óptimas de fertirrigación en una red de surcos.

¹ Suelo y Agua, Estación Experimental Aula Dei, CSIC, Zaragoza

² Mecánica de Fluidos, CPS, Universidad de Zaragoza

³ SERS Consulting

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo de Kostiakov es uno de los más ampliamente utilizado en los modelos bidimensionales de riego por superficie. Este modelo relaciona la profundidad de agua infiltrada con el tiempo de oportunidad de la siguiente forma:

$$Z = Kt^a \quad (1)$$

con Z la profundidad de lámina infiltrada, K la constante y a el exponente de Kostiakov. En riego por surcos, aparecen dos problemas para la aplicación de este modelo: la diferente dimensionalidad de la variable que caracteriza la infiltración (es un área infiltrada) y la infiltración no sólo depende del tiempo de oportunidad sino también del perímetro mojado del surco. Una manipulación algebraica nos ha permitido desarrollar un nuevo modelo de infiltración en surcos que introduce la dependencia con el perímetro mojado manteniendo además la dimensionalidad de los parámetros de Kostiakov (Maikaka 2004). La tasa de infiltración es la derivada de Z con respecto al tiempo, y se puede poner en función de Z despejando en (1):

$$i = \frac{dZ}{dt} = aKt^{a-1} = aK \left(\frac{Z}{K} \right)^{\frac{a-1}{a}} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta que en surcos tenemos un área infiltrada A_i , y que la tasa de infiltración debe ser proporcional al perímetro mojado P :

$$A_i = Pi = PaK \left(\frac{Z}{K} \right)^{\frac{a-1}{a}} = PaK \left(\frac{A_i}{KD} \right)^{\frac{a-1}{a}} \quad (3)$$

con D la distancia entre surcos.

Un reciente modelo teórico de rozamiento que usa un coeficiente de rozamiento absoluto y adimensional (Burguete y col. 2007), y que ya demostró una importante mejora en la caracterización de la fuerza de rozamiento en ríos y en riego en tablares frente al clásico modelo de Manning, ha sido también utilizado por primera vez en riego por surcos.

$$S_f = \frac{\varepsilon (b+1)^2 l^{2b} |Q| Q}{g \left\{ B_0 \left(H^{b+3/2} - \sqrt{H} l^{1+b} \right) + 2S \left[\frac{H^{b+5/2} - l^{b+5/2}}{b+5/2} - \frac{2}{3} l^{1+b} \left(H^{3/2} - l^{3/2} \right) \right] \right\}^2} \quad (4)$$

con S_f la pendiente de rozamiento, ε el coeficiente adimensional de resistencia aerodinámica, Q el caudal, B_0 la anchura del fondo del surco, S la pendiente lateral de las paredes del surco, l el tamaño característico de las rugosidades, g la constante de la gravedad, H el calado y b el exponente de ajuste del perfil de velocidades, que en flujos con alta rugosidad relativa, como es habitual en riegos por inundación, suele tomar valores en torno a $b \approx 0.25$. Además, se ha aplicado a la difusión del fertilizante la ecuación empírica que desarrolló Rutherford en transporte de soluto en ríos:

$$K_x = 10 \sqrt{PA |S_f|} \quad (5)$$

con K_x la constante de difusión y A el área transversal del agua.

Las ecuaciones transitorias de conservación de masa de agua y soluto, y la de conservación de momento lineal son resueltas utilizando un método de segundo orden TVD, aplicado ya con éxito a la simulación de flujos en ríos y canales (Burguete y García-Navarro 2001), cuya cuidadosa discretización garantiza la ausencia de oscilaciones numéricas y el equilibrio exacto de los términos en caso estacionario. Además se ha realizado un tratamiento específico de las condiciones de contorno (Burguete y col. 2006) y de las confluencias de surcos que garantiza la conservación exacta de las masas de agua y de fertilizante.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestra la comparación de los resultados obtenidos por el modelo en una rotura de presa ideal sin pendiente ni rozamiento con solución analítica. Puede comprobarse la superioridad del método usado en este trabajo.

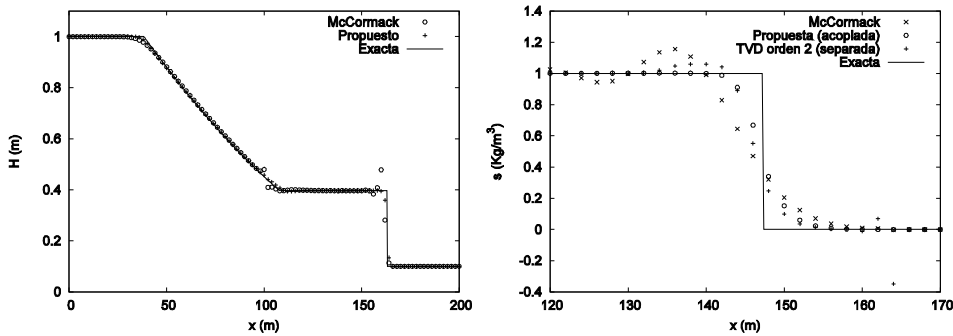


Figura 1. Comparación del calado y concentración de fertilizante analíticos frente a los simulados con el método propuesto en este trabajo y con dos métodos clásicos como el de McCormack y el TVD de segundo orden con discretización desacoplada en una rotura de presa ideal sin pendiente ni fricción.

En la figura 2 se muestra una comparación de las medidas y de los resultados obtenidos por el avance en el avance para 4 experimentos descritos de fertirrigación en surcos y en la propagación de fertilizante en uno de ellos.

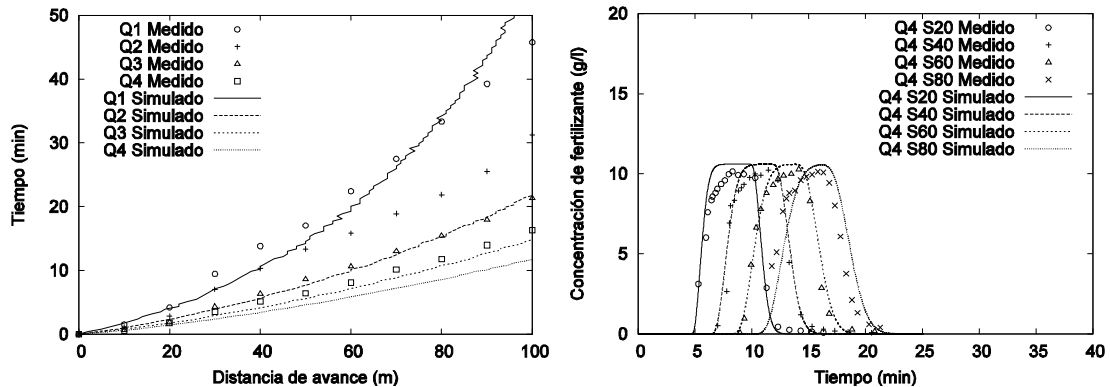


Figura 2. Medidas y resultados obtenidos en el avance del agua para 4 experimentos en campo de fertirrigación en surcos y evolución de la concentración de fertilizante en varios puntos de uno de estos experimentos.

A continuación vamos a realizar una simulación de fertirrigación en una red de 40 surcos bien nivelados de los que disponemos de resultados experimentales del avance del agua (Playán y col. 2004). Los surcos tenían 50 m de longitud y la distancia entre surcos era de 1,3 m. Se introdujo un caudal de 52 l/s durante 31 minutos. Se

introdujo en todas las simulaciones 180 Kg de un hipotético fertilizante soluble. En la figura 3 se muestra la uniformidad de fertilizante (UDF) simulada con diferentes tiempos de aplicación del fertilizante. Pueden distinguirse dos estrategias óptimas: aplicar de forma uniforme el fertilizante desde el inicio hasta casi el final de la entrada de agua (24 minutos); o aplicarlo de forma brusca a los 7 minutos del comienzo del riego. La primera estrategia es ligeramente mejor, logrando una uniformidad del 81% frente a la segunda que alcanza el 78%, sin embargo, esta última puede resultar más cómoda para el agricultor en aplicaciones prácticas. Cabe destacar que la simulación en ambos casos predice una mayor uniformidad que la del agua, que resultó del 72%.

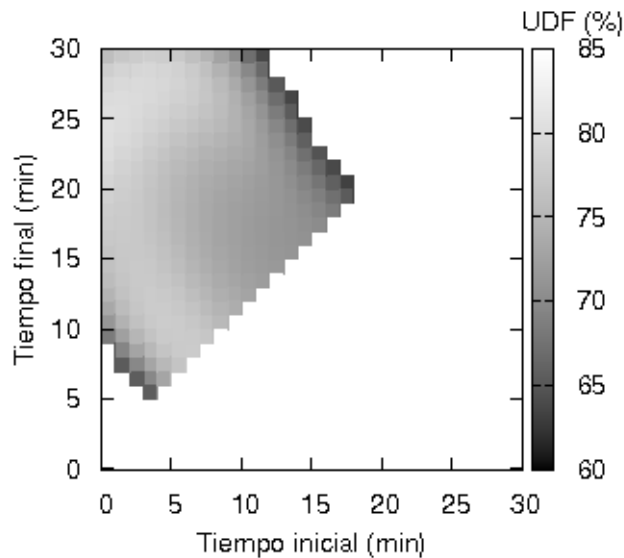


Figura 3. Uniformidad de distribución del fertilizante simulada en una red de 40 surcos en función de los tiempos de aplicación del fertilizante.

En la figura 4 se muestra la evolución del movimiento del fertilizante a través de la red de surcos en tres tiempos diferentes aplicándolo de forma brusca a los 7 minutos de iniciar el riego.

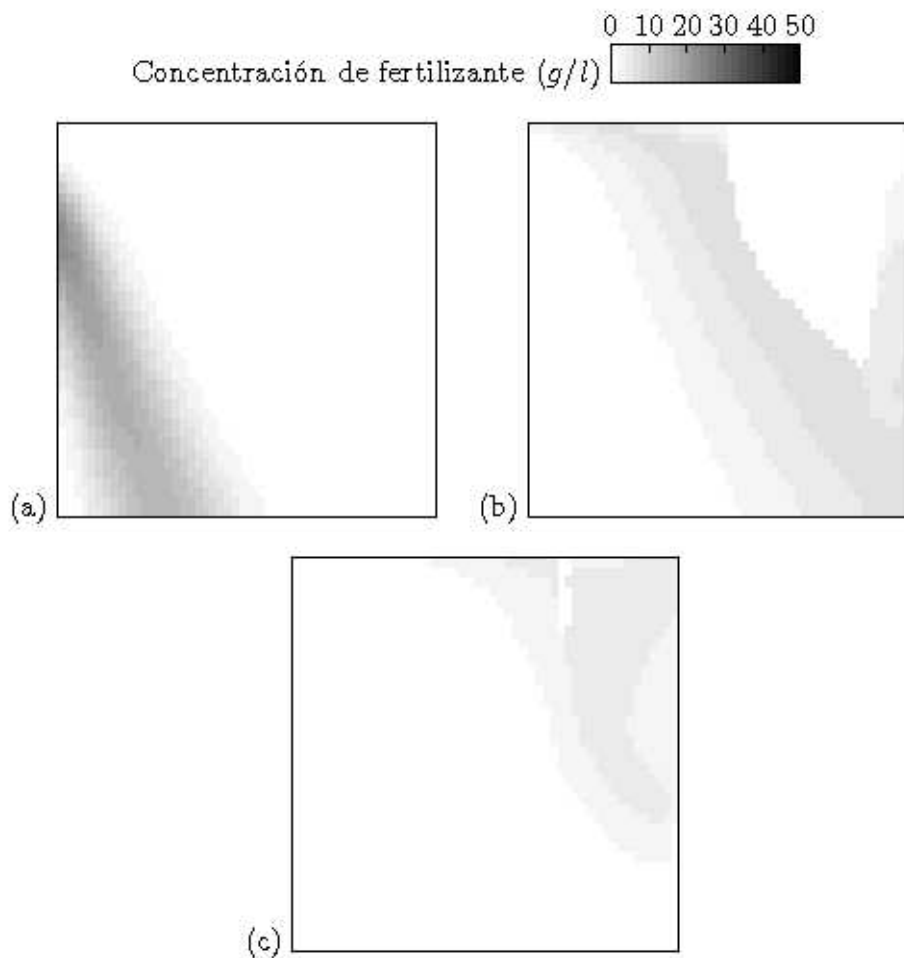


Figura 4. Mapa de la concentración de fertilizante en el agua superficial a los (a) 10 minutos, (b) 20 minutos y (c) 30 minutos de iniciar el riego. El fertilizante fue aplicado de forma brusca a los 7 minutos de iniciar el riego.

En la figura 5 se muestra finalmente unos mapas de la distribución del agua y del fertilizante infiltrados al terminar el riego simulados por el modelo. Se comprueba que la estrategia de echar el fertilizante bruscamente a los 7 minutos del inicio, aunque produce una alta uniformidad, puede producir acumulaciones locales del fertilizante.

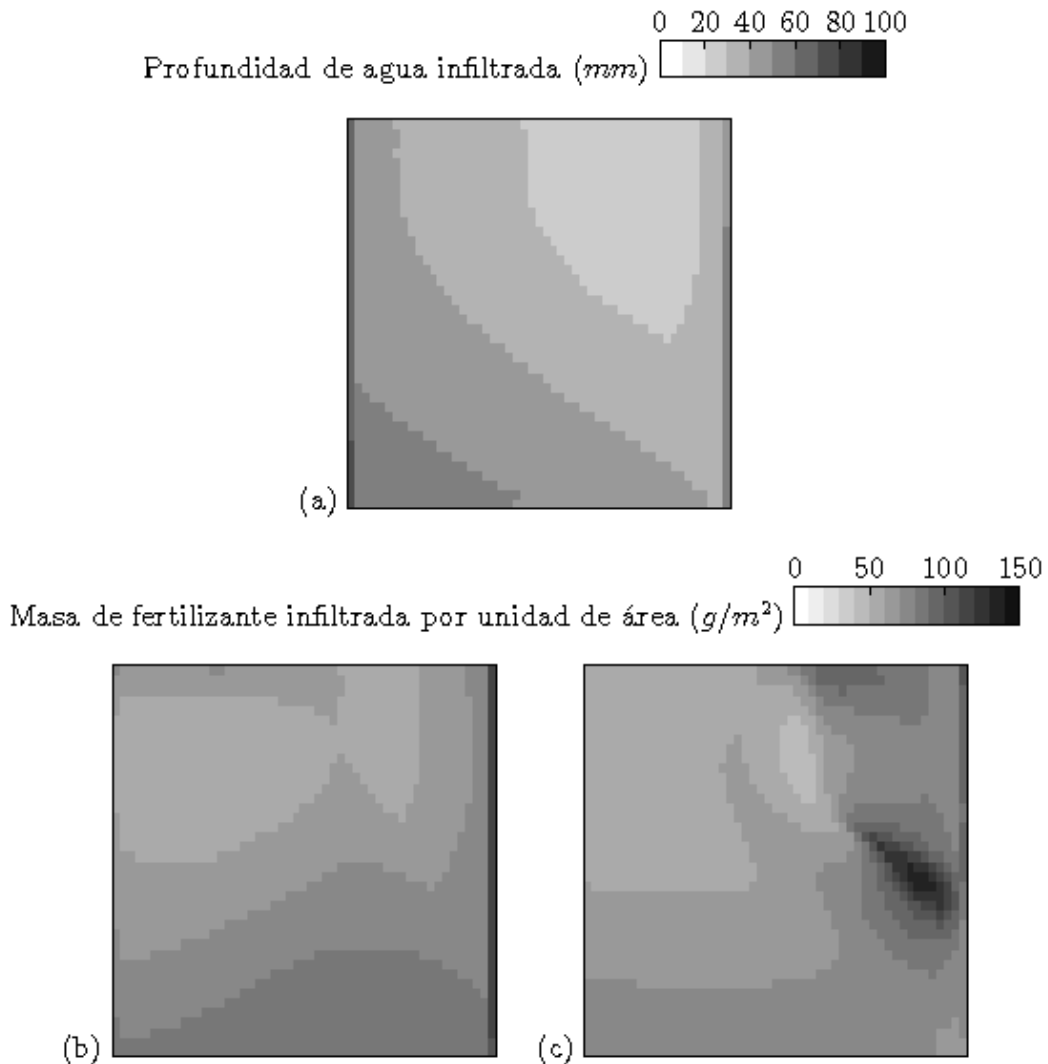


Figura 5. Simulación de (a) profundidad de agua y masa de fertilizante por unidad de área con las estrategias de entrada del fertilizante (b) uniforme desde el inicio hasta 24 minutos del comienzo del riego, (c) brusca a los 7 minutos del inicio del riego..

4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los nuevos modelos de rozamiento, infiltración y difusión de fertilizante utilizados en este trabajo, junto con los métodos numéricos usados para la resolución de las ecuaciones y sus condiciones de contorno, han supuesto una notable mejora de los resultados de la modelización del fertirriego en surcos. El modelo ha proporcionado resultados con una precisión y exactitud más que razonables en una serie de experimentos de fertirrigación realizados en campo para su validación y además ha permitido obtener dos procedimientos para optimizar la aplicación del fertilizante en un caso práctico de fertirriego en una red de surcos.

REFERENCIAS

- Burguete J., García-Navarro P., 2001. Efficient construction of high resolution TVD conservative schemes for equations with source terms. Application to shallow water flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 37(2), 209-248.
- Burguete J., García-Navarro P., Murillo J., 2006. Numerical boundary conditions for globally mass conservative methods to solve the shallow water equations and applied to river flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 51(6), 581-615.
- Burguete J., García-Navarro P., Murillo J., García-Palacín I., 2007. Análisis of the friction term in the one-dimensional shallow-water model. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering* 133(9): 1048-1063.
- Maikaka M., 2004. Modelos numéricos unidimensionales en riego por superficie. Tesis doctoral, Univesidad de Zaragoza.
- Playán E., Rodríguez J.A., García-Navarro P., 2004. Simulation model for level furrows I: simulation and field experiments. *ASCE Journal for Irrigation and Drainage Engineering* 130(2): 106-112.
- Rutherford J.C., 1994. River Mixing. John Wiley & Sons.