

DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN UNIDADES DE RIEGO POR GOTEO SUBSUPERFICIAL

*L. Rodríguez Sinobas¹, M. Gil Rodríguez¹, R. Sánchez Calvo¹,
A. Losada Villasante¹, G. Castañón Lion¹, L. Juana Sirgado¹, J. Benitez Buelga¹ y F.V.
Laguna Peñuelas¹*

¹Grupo de Investigación Hidráulica del Riego de la Universidad Politécnica de Madrid.
Ciudad Universitaria, 28040 Madrid.

Resumen

Cada vez es mayor la superficie dedicada al riego por goteo subsuperficial dado que el agua requerida por los cultivos puede ser aplicada con menor dotación que con otros métodos, ya que se reduce la evaporación y también las pérdidas de agua y fertilizantes por filtración profunda. Una de las diferencias con el riego por goteo tradicional es que el desagüe del emisor puede ser afectado por las características hidrofísicas del suelo. En este trabajo se estudia el comportamiento de dos unidades de este método de riego, una con emisores no compensantes y otra con compensantes, colocadas en suelo franco. Se realizaron tres evaluaciones de campo, con riegos de más de 70 minutos, y se observó que el suelo afectaba al caudal de todos los ramales de riego en las dos unidades. En los primeros 10-15 minutos del riego se producía una disminución del caudal acusada y, posteriormente, más gradual. La reducción en la unidad compensante osciló entre el 5 al 15 %, y del 2 al 6 % en la no compensante.

El caudal de entrada fue muy similar entre los ramales de la unidad no compensante en cambio, tuvo mayor variación en la compensante. En ésta, se observó que los emisores todavía no habían alcanzado plena capacidad reguladora al final de la aplicación del agua por lo que no serían recomendables para este método de riego.

La predicción de la distribución del agua se ha realizado con un programa de simulación específico para este método de riego considerando suelo uniforme y calibrando sus resultados con las medidas de los ramales tomadas en campo. Para caracterizar las propiedades hidrofísicas del suelo se consideraron valores representativos, dados por otros autores, para este tipo de suelo. El coeficiente de variación del caudal de la unidad no compensante fue buena ($< 0,08$) y los resultados del riego, considerando la lámina requerida del primer cuartil, fueron también buenos.

Abstract

The lands irrigated by subsurface drip irrigation SDI have increased over the last decade. Evaporation and deep percolation are reduced with this irrigation method thus, crop water requirements can be met with less water than by other methods. One difference with surface irrigation is the decrease in the dripper flow rate as a result of overpressure generated in the soil at the discharge point. This will, due to the impact of soil hydrophysical features, possibly result in less uniform irrigation. In this paper the performance of subsurface irrigation units in the field is evaluated. Two SDI units with two different emitters (one pressure-compensating and the other non-compensating) were selected. Each has seven laterals 50 m long with emitters spaced every 30 cm. Evaluations were assessed at

three different days and irrigation was applied over 70 min in all of them. In all laterals inlet over the irrigation volume was recorded with a volume meter and, inlet and tail pressures were simultaneously recorded in four alternative laterals at the same time.

Emitter discharge is affected by soil properties. The discharge variation on the compensating emitter was higher than the regular emitter. Its elastomer might suffer fatigue while it is being held under pressure. The inlet flow between laterals of the non-regulated unit was similar however, variability was observed in the regulated unit. Prediction of water application was made by a Matlab program that was calibrated with experimental data considering uniform soil. Uniformity indexes were good ($CVq < 0,08$) as well as irrigation results.

1. Introducción, Objetivos

Entre las diferencias entre el riego por goteo subsuperficial GS y el superficial destacan: la de tener unidades malladas, en vez de ramificadas, y la de que el caudal q del emisor depende de sus características hidráulicas y de las características hidrofísicas del suelo. Las primeras determinan la ecuación de gasto del emisor [1]:

$$q = k \cdot h^x \quad [1]$$

donde: h es la altura de presión en el punto de inserción del emisor y, k y x son constantes de ajuste.

Si se considera además el coeficiente de variación de manufactura y uso del emisor CV_m , la ec. [1] se transforma en:

$$q = k \cdot h^x \left(1 + u \cdot CV_m \right) \quad [2]$$

donde u es una variable aleatoria con distribución normal tipificada $N(0,1)$.

El movimiento del agua en riego subsuperficial se estudia considerando al emisor como una fuente puntual enterrada con caudal continuo alrededor de la cual se desarrolla una zona saturada, con presión positiva. Philip (1992) desarrolló una solución aproximada de la distribución de presiones alrededor de una fuente esférica subsuperficial, para lo cual igualó el flujo de la región saturada que rodea la cavidad con el estimado para la zona subsaturada. Shani y Or (1995) utilizaron la solución de Philip y relacionaron la presión generada en el suelo h_s con las propiedades hidráulicas del suelo y el caudal de la fuente q_f a partir de la expresión siguiente:

$$h_s = \left(\frac{2 - \alpha \cdot r_o}{8 \cdot \pi \cdot K_s \cdot r_o} \right) \cdot q_f \cdot \frac{1}{\alpha} \quad [3]$$

con K_s = conductividad hidráulica del suelo en saturación, r_o = radio de la cavidad esférica y α = parámetro de ajuste de la expresión de Gardner (1958) de la conductividad hidráulica K en subsaturación, con $K = K_s \cdot e^{-(\alpha \cdot \psi)}$, donde ψ representa el potencial matricial del suelo.

La aproximación [3] se cumple cuando:

$$q_f \leq \frac{4 \cdot \pi \cdot K_s}{5 \cdot \alpha^2}$$

De producirse la sobrepresión h_s alrededor del emisor, la ec. [2] se transforma en

$$q = k \cdot (h_0 - h_s) \quad [4]$$

y, si se incluye la variación de manufactura y uso del emisor, se obtiene:

$$q = k \cdot (h_0 - h_s) \cdot (1 + u \cdot CV_m) \quad [5]$$

Cuando la capacidad de infiltración del suelo en el punto de desagüe limita al caudal del emisor, se producen allí presiones superiores a la atmosférica. El gradiente de presión entre el agua en el interior del emisor y el punto de desagüe disminuirá, reduciéndose también el gasto del emisor según las ec. [4] y [5].

La presión en el punto de desagüe h_s ha sido medida en emisores aislados, en varios modelos de emisores compensantes y no compensantes, (Shani et al. 1996; Gil et al. 2008) Se observó que aumentaba, de forma acusada, durante los primeros 10 ó 15 min y luego se estabilizaba. En suelos donde la infiltración es menor que el caudal del emisor la diferencia de presiones a través del emisor disminuye y, por tanto, también su descarga atendiendo a la ec. [4].

Shani et al. 1996 observaron una disminución del caudal del 10% al 50%, correspondiendo la mayor reducción al suelo con poros finos y a emisores con mayor caudal. En sus conclusiones aconsejan utilizar modelos de emisores compensantes en suelos con K_s pequeña mientras que en suelos con K_s grande los dos tipos de emisores podrían dar resultados similares.

Gil et al. 2008 observaron que la variabilidad del caudal de los emisores no compensantes en el riego subsuperficial, prácticamente, coincide con los del superficial en suelos arenosos homogéneos. En ellos, la variabilidad de la sobrepresión en el suelo es pequeña. Por el contrario, en suelos francos la variabilidad en la sobrepresión es mayor, lo que podría producir una variabilidad del caudal menor que en el riego superficial.

Warrick y Shany 1996 determinaron los coeficientes de uniformidad de la aplicación del agua en un ramal de goteo para el que, en los puntos del suelo donde estaban colocados los emisores, se determinaron los valores de conductividad hidráulica y parámetro α a partir de un semivariograma. En su estudio no se consideró ni la variabilidad hidráulica del ramal ni la variabilidad de manufactura del emisor. Los resultados mostraron variaciones de gasto máximas de un 30% que correspondieron a valores del coeficiente de variación del gasto CV desde 0,07 hasta 0,19.

Lazarovitch et al. 2006 también simularon la distribución del agua en un ramal de riego subsuperficial con una altura de presión en cabeza $h_0 = 2$ mca pero, al contrario que en el estudio precedente, se estudió la variabilidad hidráulica del ramal considerando la expresión de Darcy-Weisbach para el cálculo de pérdidas de carga. Los resultados muestran que CV aumenta al aumentar el caudal del emisor, obteniéndose valores de CV = 0,014, 0,036 y 0,08 para caudales del emisor de 2, 4 y 8 L/h, y para una variabilidad espacial de las condiciones de suelo fijadas.

Rodríguez Sinobas et al. 2008 observaron que el caudal de ramales de GS, enterrados en un suelo franco, se redujo a lo largo del tiempo de riego aplicado (30 min) siendo la reducción más acusada en los primeros 10 min, por lo que la tendencia concuerda con la observada en emisores aislados. La reducción fue mayor en el emisor compensante (del 6 % al 13 %) que en el no compensante (del 2,5% al 7%), lo que difiere de las observaciones realizadas con emisores aislados por otros autores. En las simulaciones

realizadas, calibradas con las medidas del caudal del ramal y de la presión en cabeza y cola del ramal en campo, observaron que el coeficiente de variación del caudal era similar ó mejoraba al obtenido en el riego superficial.

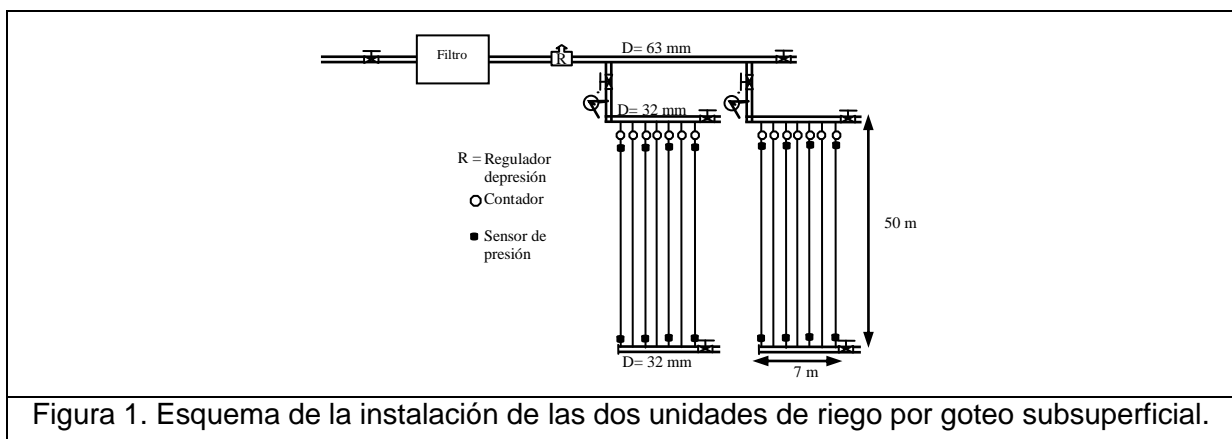
El efecto de h_s condiciona el manejo del sistema de riego. Su programación y la dosis a aplicar en cada riego suelen calcularse considerando el caudal nominal del emisor, por lo que la disminución del caudal aplicado al principio del riego puede afectarles. La confirmación de los resultados observados por los autores anteriores podría desaconsejar el uso de éste método de riego en diferentes modelos de emisores, dada su mala uniformidad. Incluso en situaciones de campo, aceptando dichos valores, el tiempo de riego debería ser aumentado para compensar la disminución de caudal medio del ramal.

Asimismo, la uniformidad de la distribución del agua en una unidad de riego subsuperficial ha sido abordada con simulaciones numéricas. Las situaciones simuladas muestran que la uniformidad de la aplicación del agua disminuye, pero no hay ningún estudio experimental que confirme los resultados obtenidos.

Los objetivos de este trabajo son: observar el comportamiento de unidades de riego GS con emisores compensantes y no compensantes; predecir su distribución de agua y estimar la uniformidad de la aplicación del agua y resultados del riego. Asimismo, se intenta dar recomendaciones para la selección de modelos de emisores y/o variables de manejo como el tiempo de aplicación del riego.

2. Materiales y Métodos

Se han medido en campo dos unidades de GS una de ellas con emisores de riego integrados compensantes (C) y la otra con no compensantes (NC) instaladas hace dos años. Las características hidráulicas de los emisores: ecuación de gasto y coeficientes de variación de manufactura fueron obtenidos en mesa de ensayos de goteo mientras que su longitud equivalente en el punto de inserción del emisor se obtuvo en ensayos con ramales (ver Tabla 1). Cada unidad estaba compuesta por 7 ramales, de 50 m de longitud, enterrados a 30 cm de profundidad en un suelo franco. La separación entre ramales fue 1 m y la de los emisores 30 cm. El esquema de la instalación se detalla en la Figura 1.



El riego se aplicó durante, al menos, 70 minutos y se llevaron a cabo tres evaluaciones de campo en diferentes días. Cada día se evaluaban las dos unidades y las alturas de presión medias en cabeza de la unidad H_0 estuvieron comprendidas en un intervalo de 10 a 15,5 mca. En cada evaluación se midieron el caudal en cada ramal y la presión en cabeza y cola de los ramales colocados en las posiciones 1, 3, 5 y 7 con sensores de presión. El caudal se

determinó a partir del volumen registrado en contadores volumétricos tipo Woltman con caudal nominal 1,5 m³/h y lectura mínima de 0,1 L. Para un error de lectura máximo del 1% se estimó que la diferencia entre lecturas debía ser superior a 20 L. Tanto los siete contadores como los ocho sensores de presión utilizados en la evaluación de cada unidad fueron calibrados en laboratorio antes de su utilización en campo.

La caracterización hidráulica de los emisores se llevó a cabo en mesa de ensayo de gotero y en ramales de riego superficial y se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Caracterización hidráulica de emisores.

	k (L/h)/mca ^x	x	CV_m	q_n (L/h)	l_e (m)
A	1,20	0,49	0,058	3,73	0,76
B	3,40	0,02	0,032	3,58	0,76

Nota: q_n = caudal nominal del emisor y l_e = longitud equivalente en el punto de inserción del emisor.

El gasto del emisor se ha determinado con la ecuación [5] y la uniformidad de la distribución de agua se determina con un coeficiente de variación CV .

$$CV = \frac{\sigma_q}{\bar{q}} \quad [6]$$

donde: σ_q es la desviación estándar del caudal y \bar{q} es el caudal medio.

El valor de h_s ha sido calculado con la ecuación [3] con $K_s = 2,89 \cdot 10^{-6}$ m/s y $\alpha = 12,9$ m⁻¹ sugeridos por Carsel y Parrish (1988) para suelos francos.

Finalmente, se ha determinado los resultados del riego (rendimiento de aplicación R_a , coeficiente de déficit C_d y lámina de filtración profunda C_p) de la unidad de riego NC. Para lo cual se ha considerado una lámina requerida calculada como la correspondiente al primer cuartil de los volúmenes de la muestra formada por los caudales de los cuatro ramales simulados.

3. Resultados y Discusión

El valor medio del caudal del ramal Q , de la altura de presión en cabeza de cada ramal h_0 y sus pérdidas de carga h_f se muestra en la Tabla 2 para las tres evaluaciones realizadas. La presión en cabeza de la unidad H_0 varió a lo largo del riego en varias de las evaluaciones por lo que el coeficiente de variación de la altura de presión en cabeza del ramal CV_{h_0} y del caudal CV_Q es mayor, sobre todo, en el modelo NC.

Las pérdidas de carga en la tubería porta-ramales no superaron los 0,5 m, por lo que, prácticamente, la presión en cabeza de cada ramal es similar. Las pérdidas de carga en la tubería de limpia fueron ligeramente más pequeñas que las anteriores por lo que las alturas de presión en cola de los ramales son también similares.

En la Figura 2 se observa como Q disminuye en todos los ramales de las dos unidades durante el riego. La disminución fue más acusada en los primeros 10 a 15 minutos y, posteriormente y después disminuye de forma gradual. Este comportamiento es similar al obtenido la primera vez que se evaluaron los ramales hace dos años y pone de manifiesto que la sobrepresión en el punto de desagüe del emisor h_s aumenta al principio del riego y

luego se mantiene, tal como se había medido en emisores aislados (Shani et al. 1996 y Gil et al. 2008).

La variación de caudal estuvo comprendida dentro de los intervalos del 2 al 6 % y del 5 al 15 %, en los emisores NC y C, respectivamente. La diferencia entre las medidas del volumen de contador, en todos los casos, fueron mayores a 20 L por lo que el error de lectura estimado será inferior al 2%.

Tabla 2. Valores medios y coeficientes de variación de: caudal, altura de presión y pérdidas de carga en cada ramal de las unidades GS .

	NO COMPENSANTES							COMPENSANTES						
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
02/07/2009														
Q (L/h)	545,2	529,6	531,9	532,7	530,1	536,4	530,8	624,5	751,1	661,9	719,7	652,5	627,9	616,0
CV	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,02
h ₀ (mca)	10,59		10,23		10,13		10,20	10,03		9,52		9,68		9,61
CV	0,078		0,078		0,075		0,075	0,02		0,03		0,10		0,11
hf (mca)	2,88		2,56		2,39		2,78	4,37		4,12		4,07		4,26
CV	0,10		0,10		0,45		0,09	0,21		0,23		0,31		0,17
07/07/2009														
Q (L/h)	666,0	646,5	647,1	647,1	640,5	648,8	644,1	747,6	804,8	813,3	747,9	683,4	688,9	650,7
CV	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,04	0,06	0,07	0,06	0,03	0,03	0,02
h ₀ (mca)	11,33		11,08		11,09		11,05	15,35		14,94		15,15		15,05
CV	0,30		0,30		0,29		0,28	0,13		0,15		0,25		0,25
hf (mca)	2,96		2,75		2,74		2,97	5,68		5,43		5,54		5,60
CV	0,36		0,36		0,43		0,32	0,06		0,04		0,07		0,07
20/07/2009														
Q (L/h)	676,7	656,0	661,6	654,5	650,4	656,7	654,7	645,3	700,7	659,7	633,8	618,5	615,5	607,6
CV	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,28	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
h ₀ (mca)	15,36		14,95		14,88		14,85	11,04		10,80		11,02		10,96
CV	0,22		0,22		0,23		0,21	0,09		0,09		0,13		0,13
hf (mca)	4,43		3,91		3,85		4,05	4,68		4,60		4,72		4,84
CV	0,35		0,24		0,43		0,23	0,10		0,10		0,13		0,10

Nota: R1= ramal 1, R2= ramal 2, R3= ramal 3, R4= ramal 4, R5= ramal 5, R6= ramal 6 y R7= ramal 7.

Los resultados muestran que el suelo afecta al caudal de los dos emisores, sobre todo al modelo C. Para comprobar el efecto de su regulación se tomó una muestra de 24 emisores nuevos y se les hizo trabajar a las mismas presiones, en mesa de ensayos de goteros y sus resultados se muestra en la Figura 3. En los primeros 70 minutos se observa una disminución del caudal del 2,7 % y 3,6 % con $h_0= 10,2$ mca y $h_0= 14,8$ mca, respectivamente. Asimismo, el caudal se estabiliza antes en la presión mayor.

Cabe pensar que el comportamiento de dichos emisores en campo y en laboratorio sería similar y que durante el tiempo de riego (70 minutos), la variación de caudal observada en campo sería similar aunque desde luego, en el ramal, dada la variación hidráulica, los emisores no trabajan todos a la misma presión. Sin embargo el comportamiento en campo de los 166 emisores de cada ramal, para presiones similares y mismo tiempo de operación,

muestra una mayor variación del caudal. Esto apuntaría a que en campo se manifiesta algún efecto relacionado con las propiedades del suelo que no se observa cuando el emisor está colocado en superficie.

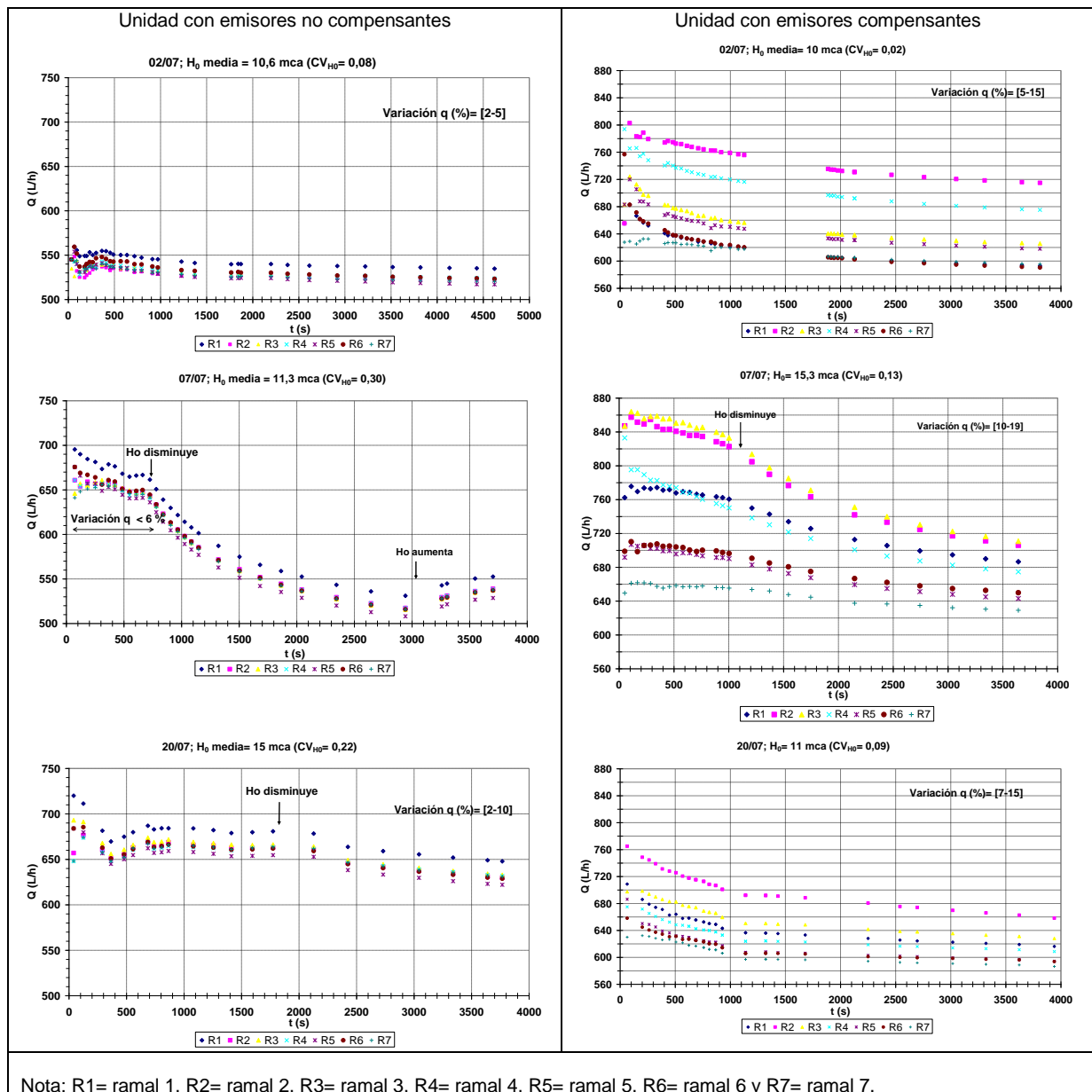


Figura 2. Evolución del caudal medio de los ramales Q en unidades de riego por goteo subsuperficial durante el riego.

Por otra parte, en la Figura 2 se observa como los ramales de la unidad NC tienen caudales en cabeza parecidos, con un coeficiente de variación menor a 0,013. Sin embargo, los de la unidad C mostraron mayor variabilidad en todas las evaluaciones realizadas con un coeficiente de variación menor a 0,085. En la Figura 4 se muestra la evolución de Q en los ramales 1 y 3 de la unidad C en los tres riegos. En ella se observa la diferencia de caudal entre la altura de presión media de 15 mca y las otras dos de 10 y 11 mca. Este comportamiento indica que no ha alcanzado plena capacidad reguladora.

Los resultados evidencian el efecto del suelo en los dos emisores estudiados, lo que contradice las observaciones realizadas en emisores aislados (Shani et al. 1996; Gil et al.

2008) en las que el caudal de los emisores compensantes no disminuía en el tiempo si no se rebasaba la presión del límite inferior de compensación. Por lo que no tendría un valor general la recomendación, dada por estos autores, de seleccionar modelos compensantes en el proyecto de riego por goteo subsuperficial en suelos francos y arcillosos. Por otra parte, el tiempo de operación para aplicar una misma lámina de riego en estas unidades GS será mayor que el en las superficiales.

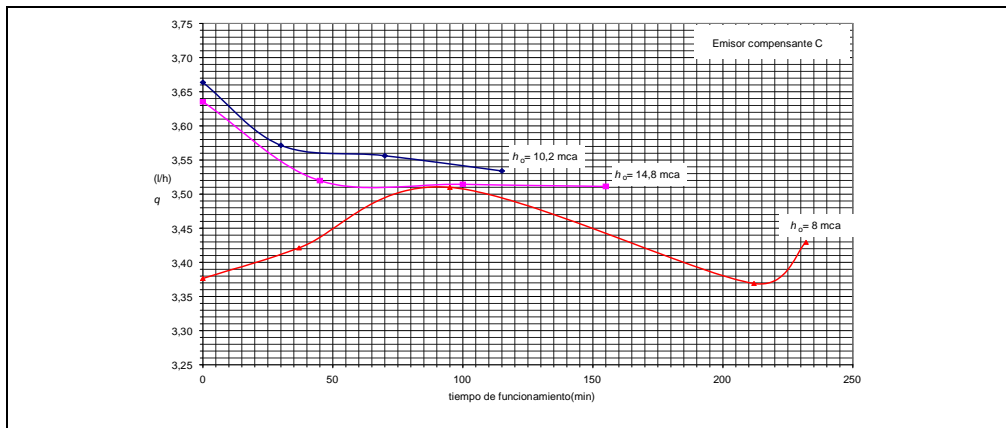


Figura 3. Variación del caudal medio q en una muestra de 24 emisores compensantes C con el tiempo de funcionamiento.

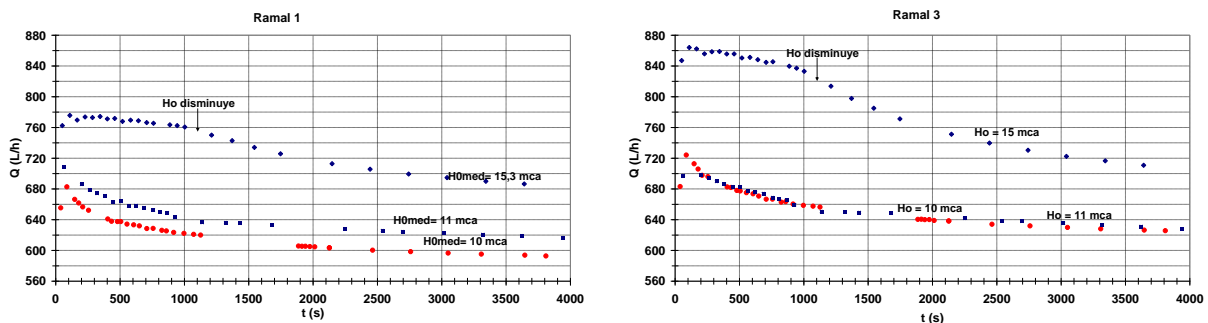


Figura 4. Evolución del caudal durante el riego en dos ramales de la unidad compensante.

Los resultados de la estimación de la distribución del agua en los ramales de la unidad NC, considerando suelo uniforme (ver Tabla 3 y Figura 5) predicen, relativamente bien, los resultados experimentales. La calibración se ha realizado mediante el ajuste de las presiones en cola del ramal y su caudal en cabeza, para ello se ha supuesto un r_0 constante en cada emisor. La sobrepresión \bar{h}_s varía desde 0,45 a 1,02 mca y, dado que la conductividad hidráulica del suelo es pequeña, \bar{r}_0 es grande (de 0,02 a 0,04 m).

La uniformidad de aplicación del agua en todas las evaluaciones y en todos los ramales fue buena. Se estimaron valores de CV desde 0,068 a 0,076 que se corresponden con valores del coeficiente de uniformidad de Christiansen mayor de 92. Los resultados de riego fueron también buenos con rendimiento de aplicación del agua $R_a = 0,91$, coeficiente de déficit $C_d = 0,003$ y lámina de filtración profunda $C_p = 0,081$.

Al disminuir el gasto por el efecto del suelo los tiempos de aplicación del riego serían mayores que los aplicados en unidades superficiales. Para su cálculo, debería considerarse la reducción del caudal prevista en el suelo.

Tabla 3. Comparación entre las estimaciones e la distribución del agua y las observaciones de campo (m) realizadas en ramales de la unidad no compensante en suelo franco uniforme.

	02-jul				07-jul				20-jul			
	R1	R3	R5	R7	R1	R3	R5	R7	R1	R3	R5	R7
le	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
r ₀	0,023	0,020	0,021	0,020	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,033	0,023	0,025
h ₀	10,59	10,23	10,13	10,20	11,33	11,08	11,08	11,03	15,36	14,95	14,88	14,85
h _L	7,78	7,55	7,46	7,53	8,23	8,04	8,03	8,01	11,28	11,01	11,04	11,01
Q	539	527	524	526	571	565	565	566	667	655	644	648
h _{s,m}	0,85	0,97	0,93	0,97	0,41	0,41	0,41	0,41	0,49	0,63	1,02	0,93
CV _{hs}	0,076	0,074	0,076	0,078	0,085	0,088	0,086	0,094	0,081	0,082	0,075	0,083
CV _q	0,070	0,068	0,070	0,071	0,071	0,074	0,072	0,079	0,070	0,073	0,070	0,076
h _{L,m}	7,71	7,67	7,75	7,24	8,36	8,33	8,38	8,07	10,93	11,04	11,05	10,81
Q _m	545	531	530	530	616	597	592	595	676	661	650	654

Nota: R1= ramal 1, R3= ramal 3, R5= ramal 5 y R7= ramal 7.

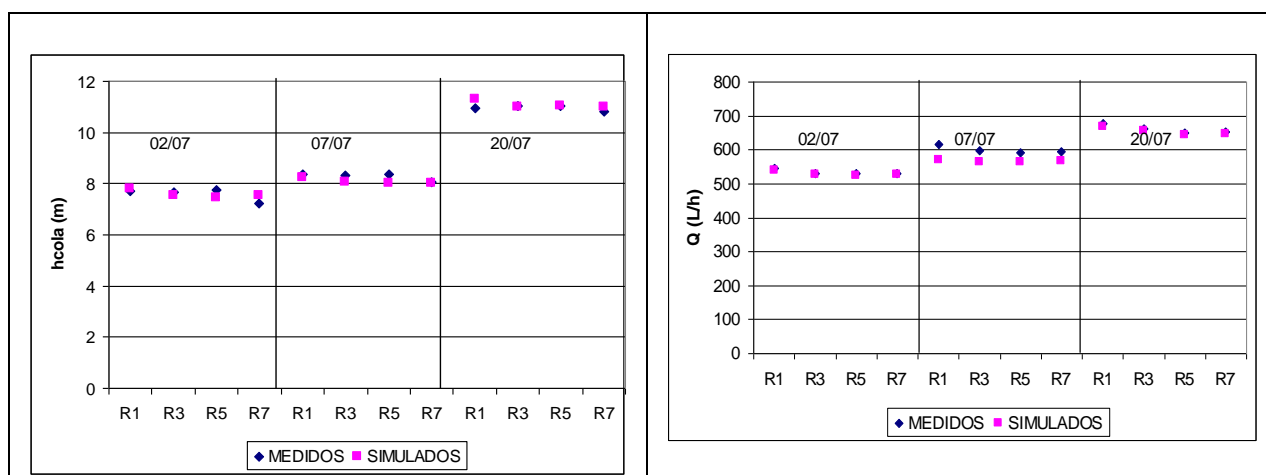


Figura 5. Comparación entre valores simulados y medidas de campo en la unidad NC.

4. Conclusiones y Recomendaciones

El suelo franco del estudio afecta al caudal de los emisores de los dos modelos de emisor estudiados. El caudal de todos los ramales, tanto de la unidad con el emisor compensante como la del no compensante, disminuye durante el riego. La reducción es más acusada en los primeros 10 a 15 minutos y, posteriormente, disminuye de forma gradual por lo que la tendencia concuerda con la observada en emisores aislados. La reducción en el ramal compensante (del 5 % al 19 %) es mayor que la del no compensante (del 2 % al 6%) lo que difiere de las observaciones realizadas con emisores aislados por otros autores. Esta variación se mantiene después de dos años de instalación.

Los ramales de la unidad de riego con emisor compensante muestran mayor variabilidad del caudal que la del modelo no compensante el cual no parece mostrar plena capacidad reguladora durante el tiempo de aplicación del riego de las evaluaciones (mayor a 70 minutos).

La utilización del programa de simulación de unidades GS es una herramienta útil para predecir la distribución del agua en la unidad y determinar, con ella, índices de uniformidad y resultados del riego. Se requiere su calibración con medidas de: caudal y alturas de presión en cabeza y/o cola de diferentes ramales durante la evaluación de campo así como, las

características hidrofísicas del suelo. Por otra parte, también puede ayudar a la toma de decisiones del manejo del riego.

5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) por su apoyo a través del proyecto AGL2008-00153. Asimismo, desean agradecer la colaboración del Centro de Tecnología del Regadío (CENTER) por su apoyo en el desarrollo experimental.

6. Bibliografía

- Carsel, R.F., Parrish, R.S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.* 24: 755-769.
- Gardner, W.R. 1958. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Science* 85: 228-232.
- Gil, M., Rodríguez-Sinobas, L., Juana, L., Sánchez, R., Losada, A. 2008. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils. Effect on water application uniformity. *Irrigation Science*. (Springer) (26): 451-458.
- Lazarovitch, N., Shani, U., Thompson T.L., A.W. Warrick. 2006. Soil hydraulic properties affecting discharge uniformity of gravity-fed subsurface drip irrigation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132: 531-536.
- Philip, J.R. 1992. "What happens near a quasi-linear point source?" *Water Resour. Res.* 28:47-52.
- Rodríguez-Sinobas, L., M. Gil, Juana y R. Sánchez. 2010. Water distribution in Laterals and Units of Subsurface drip irrigation. I: Simulation. *J.Irrig. and Drain. Eng.* 135(6): 721-28.
- Rodríguez-Sinobas, L., M. Gil, Juana y R. Sánchez. 2010. Water distribution in Laterals and Units of Subsurface drip irrigation. II: Field evaluation. *J.Irrig. and Drain. Eng.* 135(6): 729-38.
- Shani, U., Xue, S., Gordin-Katz, R., Warrick, A.W.. 1996. "Soil-limiting flow from subsurface emitters. I: Pressure measurements". *J. Irrig. Drain. Engin.* ASCE. 122(5): 291-295.
- Warrick, A.W., Shani U. 1996. "Soil-limiting flow from subsurface emitters. II: Effect on uniformity". *J. Irrig. Drain. Eng.* ASCE. 122(5): 296-300.