

Influencia de la geometría del laberinto de los goteros en su atascamiento

Influence of dripper labyrinth geometry on clogging behavior

Rafael Reyes-Requena ^{a1}, José Roldán-Cañas ^{a2}, María Fátima Moreno-Pérez ^{b*}

^aEscuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Dto. de Agronomía, Campus de Rabanales, 14071. Córdoba, España.

^bEscuela Politécnica Superior de Belmez, Universidad de Córdoba, Dto. de Agronomía, 14240. Córdoba, España.

E-mail: ^{a1} rafaelreyesr@hotmail.com, ^{a2} jroldan@uco.es, ^b mfatima@uco.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 24/07/2025

Aceptado: 16/10/2025

Publicado: 31/10/2025

Citar como: Reyes-Requena, R., Roldán-Cañas, J., & Moreno-Pérez, M.F. 2025. Influence of dripper labyrinth geometry on clogging behavior. *Ingeniería del agua*, 29(4), 280-295. <https://doi.org/10.4995/ia.2025.24372>

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo principal el estudio de la geometría de los laberintos de los goteros y su incidencia en su atascamiento buscando la mejor combinación entre variables hidráulicas y geométricas. El ensayo se ha llevado a cabo en un invernadero experimental usando 20 goteros. El agua de riego utilizada era residual depurada mediante un tratamiento terciario. Se han definido nuevos números adimensionales que incluyen parámetros geométricos e hidráulicos y mediante análisis dimensional se han establecido correlaciones con cuatro índices de atascamiento. El ajuste se ha comprobado usando el error cuadrático medio normalizado y los goteros se han agrupado según su comportamiento hidráulico (compensantes, no compensantes) y según su inserción (pinchados, interlínea, integrados). El buen ajuste obtenido da validez al procedimiento seguido, luego, es posible determinar con gran precisión los índices de atascamiento conociendo únicamente los parámetros de la geometría del gotero, así como las variables hidráulicas.

Palabras clave | Obstrucción goteros; geometría laberinto; análisis dimensional; índices de atascamiento.

ABSTRACT

The main objective of this work is to study the geometry of dripper labyrinths and its impact on clogging, seeking the best combination of hydraulic and geometric variables. The test was conducted in an experimental greenhouse using 20 drippers. The irrigation water used was wastewater treated using tertiary treatment. New dimensionless numbers have been defined that include geometric and hydraulic parameters and correlations with four clogging indices have been established through dimensional analysis. The fit was checked using the normalized mean square error and the drippers were grouped according to their hydraulic behavior (compensating, non-compensating) and according to their insertion (on-line, interline, in-line). The good fit obtained validates the procedure followed. It is then possible to determine the clogging indices with great precision, knowing only the parameters of the dripper geometry, as well as the hydraulic variables.

Key words | Clogging of drippers; labyrinth geometry; dimensional analysis; clogging indices.

INTRODUCCIÓN

Desde su aparición con carácter extensivo allá por la década de los setenta del siglo pasado, el riego por goteo o riego localizado no ha dejado de crecer en todo el mundo. Un claro ejemplo se encuentra en España donde este tipo de riego supuso en 2023 el 57.63 % (2 140 233 ha) de la superficie total en riego con un incremento del 10.75% en los últimos diez años, y, en particular, en la región de Andalucía, sur de España, donde se sitúa este estudio, ya son 879 800 ha las que se riegan de este modo lo que supone un 84.44 % del total regado (ESYRCE, 2023a).

La calidad del agua es fundamental en el proceso de obturación de los goteros (Zhou *et al.*, 2017b), aunque no es el único factor como demuestran Baeza y Contreras (2020) que encuentran también otras causas que tienen efectos sobre su atascamiento como el tipo de inserción del gotero en el lateral y el carácter compensante o no de los emisores.

El uso de aguas residuales urbanas regeneradas es frecuente como recurso alternativo en zonas con escasez hídrica como ocurre en el área donde se han llevado a cabo los experimentos. La calidad química de este tipo de aguas es buena pero no sucede lo mismo con su calidad física y biológica mucho peor que la de las aguas subterráneas (Li *et al.*, 2009, Li *et al.*, 2019). En efecto, el uso de estas aguas ha provocado un aumento de las obturaciones a consecuencia, por un lado, de la mayor cantidad de sólidos transportados en suspensión y, por otro lado, de la acumulación de biomasa en el interior de tuberías y emisores (Pei *et al.*, 2014). En cualquier caso, el uso de aguas residuales tratadas produce siempre incrustaciones (*fouling*) biológicas en los sistemas de riego por goteo (Tarchitzky *et al.*, 2013).

Un problema añadido que fomenta la obturación es la aplicación de los fertilizantes junto al agua de riego (Zhou *et al.*, 2019a), lo que resulta inevitable en riego por goteo. Los fertilizantes nutren a los microorganismos que se multiplican con mayor rapidez (Ravina *et al.*, 1997). En el caso de riego con aguas salinas, la aplicación de fertilizantes fosfatados aumenta el riesgo de atascamiento de los goteros (Wang *et al.*, 2020; Muhammad *et al.*, 2021).

Las labores de mantenimiento pueden ayudar a reducir los niveles de atascamiento. Por ejemplo, labores periódicas de lavado de laterales de riego que ayudan a mejorar los índices de atascamiento de los goteros (Li *et al.*, 2015; Han *et al.*, 2018), mantenimiento del pH de la solución de riego en valores determinados para evitar la formación de precipitados (Katz *et al.* 2014; Contreras *et al.*, 2016, Song *et al.*, 2017) o un post-riego de corta duración sin fertilizante para retirar la solución nutritiva de los ramales (Baeza *et al.*, 2019).

En cuanto a la influencia de la geometría del laberinto de los goteros en el atascamiento, y en contra de lo que se podría pensar a primera vista, las variables a considerar no son solo geométricas sino también hidráulicas como las pérdidas de carga, la velocidad y el esfuerzo tangencial de rozamiento (Oliver *et al.*, 2014). Estos últimos autores encuentran que cuantos menores sean las fuerzas hidrodinámicas mayor era la propensión de los goteros a obstruirse. En efecto, el movimiento del agua en el laberinto se ve afectado tanto por fuerzas de inercia y por fuerzas viscosas como por sus características geométricas lo que ha orientado a diversos autores a hacer el estudio del fenómeno del atascamiento mediante el análisis dimensional (Li *et al.*, 2006, Zhou *et al.*, 2017a, Zhou *et al.*, 2019b).

Oliveira *et al.* (2020) han encontrado que las regiones donde se produce el mayor depósito de partículas eran zonas de vórtices, con mayor turbulencia, situadas en los primeros deflectores de los laberintos de los goteros. Un mayor avance en este sentido ha sido dado por Yang *et al.* (2020) que además optimizan la estructura del canal de paso disminuyendo la probabilidad de atascamiento y demostrando que la estructura de la punta del diente en el laberinto juega un papel esencial en la disipación de energía dentro del emisor.

Zhou *et al.* (2017a) encuentran que los goteros cilíndricos son más sensibles al atascamiento que los goteros planos o de pastilla. Sin embargo, los resultados de Lili *et al.* (2016) sugieren que los emisores cilíndricos deberían usarse con aguas salinas y caudales más grandes. Baeza y Contreras (2020) obtienen que los goteros no compensantes son menos sensibles al atascamiento que los goteros compensantes principalmente cuando el agua sea de más baja calidad y cuando los goteros se instalen on-line.

Este estudio se localiza en las afueras de la ciudad de Almería, sureste de Andalucía, España, una zona semiárida con una precipitación media anual de 200 mm considerando el periodo 1981-2010 (Agencia Estatal de Meteorología, 2020) en cuya provincia se concentra, sin embargo, 34 309 ha de invernaderos que representan el 44.03% de la superficie de invernaderos de España y el 56.15% de Andalucía (ESYRCE, 2023b).

El número de goteros diferentes estudiados en cada caso, que en nuestro caso es de 20, es también importante por cuando si este es pequeño es más difícil obtener resultados con gran generalidad. En ese sentido, la mayoría de los autores han trabajado con menos de 10 emisores salvo Zhou *et al.* (2017a) que trabaja con 14 emisores y Zhou *et al.* (2019b) que, aunque solo analiza ocho emisores, utiliza los datos de los laberintos de los goteros publicados por otros autores.

El objetivo principal de este trabajo ha sido el estudio de la geometría de los laberintos de los goteros y su incidencia en su atascamiento buscando la mejor combinación entre variables hidráulicas y geométricas para reducir la obstrucción de los goteros. Por ello, en este artículo se ha trabajado en tres nuevas líneas, en primer lugar, definir nuevos parámetros geométricos más precisos y, a partir de ellos, nuevos números adimensionales, en segundo lugar, incluir parámetros hidráulicos y, en tercer lugar, establecer correlaciones directas con los índices de atascamiento más usuales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ensayos experimentales

El ensayo fue llevado a cabo en un invernadero de experimentación donde se estudió el comportamiento de los goteros utilizando agua residual depurada de origen urbano. Previamente, los goteros fueron probados en un banco de ensayos para obtener el coeficiente de variación y la curva de gasto del emisor. El banco se diseñó siguiendo la norma UNE 68-075-86 y adaptado a la ISO 9261:2004, ya que, cumple con las especificaciones dadas por dicha norma ISO en el apartado de precisión de los dispositivos de medida del banco de ensayos y de filtración del agua (Figura 1). Dicho banco cuenta con tres partes diferenciadas: la primera es el depósito de almacenamiento de agua para la realización del ensayo, la segunda, es la bomba acoplada a un variador de frecuencia y, la tercera, una instalación hidráulica que suministra agua hasta los ramales y emisores evaluados. El agua utilizada era de tipo desalada y tratada mediante alguicida, siendo filtrada a su entrada cada vez que entraba al circuito donde se encontraban los emisores analizados mediante un filtro de malla de acero inoxidable de 120 mesh. La tubería portarramales, donde se encontraban conectados los emisores, formaba un circuito en forma de malla que permitía una distribución de presiones uniforme en todos los emisores evaluados. En total podían conectarse 5 ramales (un ramal por cada par de enganches). En dicha tubería portarramales se encontraban dos manómetros analógicos, usados para la lectura de la presión de funcionamiento de los emisores, de rango de la medida de 0-400 kPa y error ± 1 kPa. La temperatura ambiente de la estancia donde se encontraba el banco de ensayos estaba regulada a 25°C en todas las mediciones y se controlaba que la temperatura del agua fuera de $23^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$. Y, por último, la recogida de los volúmenes se realizó con probeta de 500 mL de capacidad con una precisión ± 2.5 mL, exceptuando los modelos 2 y 16 en los que se utilizaron una probeta de $250 \text{ mL} \pm 1.0 \text{ mL}$. La metodología del ensayo ha sido descrita en detalle por Reyes-Requena *et al.* (2019).

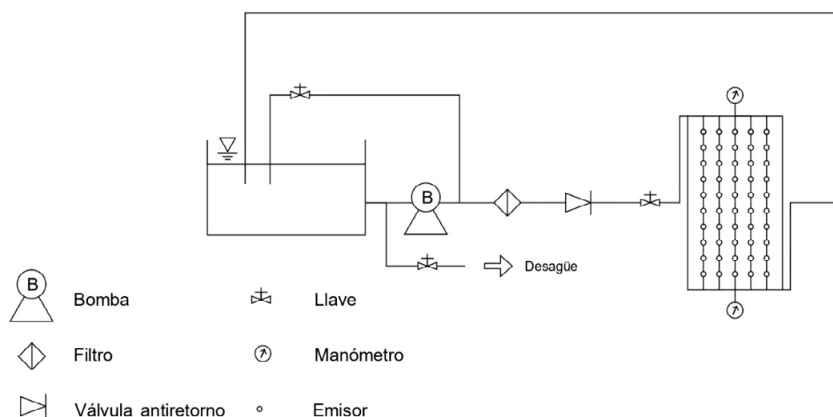


Figura 1 | Esquema del banco de ensayos (tomado de Reyes-Requena *et al.*, 2019).

Los ensayos tuvieron lugar en el Centro de La Cañada del Instituto de Investigación y Formación Agraria de Andalucía, situado en el municipio de Almería al sureste de España (36° 50' 7.0" N, 2° 24' 11.8" O).

Los emisores analizados fueron un total de 20 de 10 fabricantes distintos y caudales comprendidos entre 2.0 y 4.0 l/h. El tipo de inserción del emisor con la tubería se distribuye de la siguiente forma: 6 pinchados, 5 interlínea y 9 integrados. Dependiendo del funcionamiento hidráulico del gotero, 8 son compensantes y 12 no compensantes. Solo uno de los emisores es antidrenante (n° 7). Sus características vienen reflejadas en la Tabla 1. Estos emisores fueron seleccionados por su buen comportamiento obtenido de un estudio anterior (Baeza y Contreras, 2020) que analizaba 38 emisores recomendados por fabricantes para su uso con agua residual, y, concretamente, en el sector de la horticultura almeriense.

El experimento en condiciones de campo se llevó a cabo en un invernadero de plástico tipo multitúnel de 1440 m². Las dimensiones del invernadero eran de 45 m de largo por 32 de ancho. La altura máxima del invernadero era de 5 m y la más baja de 3.5 m. Existe un pasillo central de 2 m de anchura que divide al invernadero en dos zonas, norte y sur. El sistema de riego estaba dividido en cuatro sectores, dos en la zona norte, y otras dos, en la zona sur. En este ensayo, se utilizaron tres sectores, uno para cada tratamiento, encontrándose dos en el sur y uno en el norte.

Cada sector poseía una válvula reductora de presión que regulaba la presión de funcionamiento establecida en el ensayo, que, en este caso, es de 100 kPa. También para comprobar que el ensayo trabajaba a la presión especificada existían cinco manómetros distribuidos a lo largo de la tubería portarramales. En la Figura 2 se muestra el diagrama con la distribución de los tratamientos y repeticiones, además, de los elementos de la red de riego dentro del invernadero experimental.

Tabla 1 | Características de los goteros analizados.

N° emisor	Fabricante	Caudal nominal (l/h)	Tipo de emisor [*]	Exponente del caudal (x)	Coefficiente de caudal (k)	Coefficiente de variación del fabricante
1	A	3.7	NCP	0.418	0.390	1.70
2	B	2.0	CP	0.067	3.110	18.10
3	C	3.0	NCIT	0.566	0.230	2.17
4	D	4.0	NCIT	0.586	0.220	2.23
5	E	3.0	CP	-0.020	3.310	2.11
6	C	3.5	NCP	0.517	0.300	5.20
7	E	3.0	CP	-0.028	3.410	2.60
8	A	3.4	NCP	0.474	0.330	5.00
9	F	3.0	NCIT	0.572	0.200	3.00
10	G	3.0	NCIT	0.529	0.260	1.60
11	H	3.8	CI	0.071	2.490	3.80
12	C	3.0	NCIT	0.260	0.558	4.40
13	I	3.2	NCIT	0.494	0.360	3.70
14	G	4.0	NCIT	0.523	0.340	2.30
15	A	4.0	CI	0.083	2.940	1.70
16	H	2.2	CI	0.024	2.210	2.90
17	F	3.6	CI	0.143	1.930	2.80
18	E	3.5	CI	0.129	1.960	2.00
19	J	2.5	NCI	0.511	0.220	1.62
20	E	4.0	NCI	0.509	0.360	2.80

^{*}CP: Compensantes pinchados; NCP: No compensantes pinchados; NCIT: No compensantes interlínea; CI: Compensantes integrados; NCI: No compensantes integrados.

El ensayo comenzó a funcionar el 16 de noviembre de 2018 y terminó el 29 de marzo de 2019, regando un total de 84 días. Durante la semana, se regaba consecutivamente de lunes a viernes, sin incluir sábados y festivos. El pulso de riego diario era de 30 minutos, por lo que, el riego total fue de 42 horas.

El agua de riego utilizada era del tipo residual procedente de la ciudad de Almería, sureste de España, a través de la comunidad de regantes “Las Cuatro Vegas”. El agua era depurada mediante un tratamiento terciario consistente en la aplicación de cloratos, en este caso, hipoclorito sódico, seguido de un tratamiento de ozono. El agua residual depurada fue analizada al final del ensayo de riego y sus parámetros se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 | Parámetros medios presentes en el agua de riego.

Parámetros	Campaña de riego
Sólidos en suspensión (mg L^{-1})	12.5
Conductividad Eléctrica (dS m^{-1})	2.94
<i>E.coli</i> (u.f.c. 100 mL^{-1})	45.5
Coliformes totales (u.f.c. 100 mL^{-1})	349
pH	7.6
Turbidez (U.N.T.)	17.13
Cloro libre residual ($\text{mg Cl}_2 \text{ L}^{-1}$)	<0.05

Se realizó un diseño experimental que estaba formado por dos factores, uno el tratamiento de riego y, otro, los emisores de riego. En cada uno de los tratamientos de riego se establecieron bloques que contenían el total de los emisores analizados, estos bloques se repiten tres veces por cada uno de los tratamientos de riego. La unidad experimental era la línea de riego o ramal. En consecuencia, el diseño experimental era un bifactorial 20×3 en bloques, con dos factores, tipo de emisor (20) y tratamientos de riego (3), y tres repeticiones. La distribución en planta de los tratamientos y repeticiones se muestra en la Figura 2.

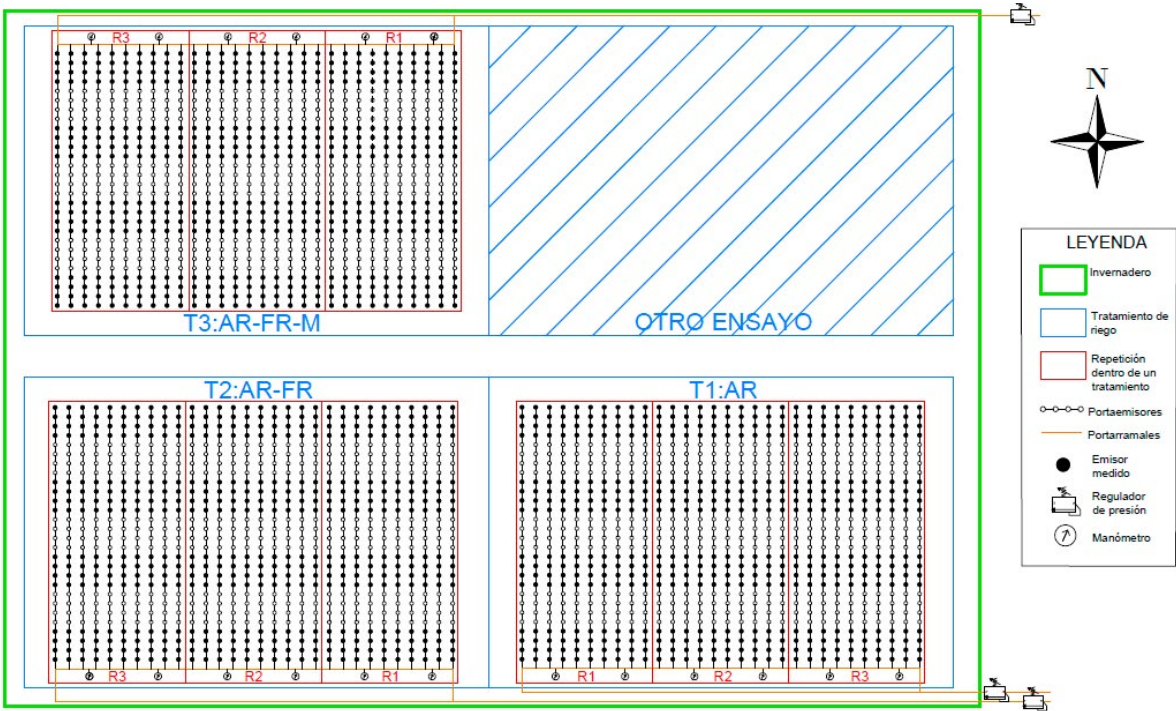


Figura 2 | Diagrama con la distribución de los tratamientos y repeticiones en el invernadero. Representación de la red de riego.

Respecto a los tratamientos de riego, éstos fueron tres: AR (Agua Regenerada), AR-FR (Agua regenerada + fertilización con solución iónica estándar) y AR-FR-M (Agua regenerada + fertilización iónica estándar + mantenimiento). El primer tratamiento (AR), se regó con agua residual depurada sin realizar ninguna otra acción. El segundo (AR-FR), se regó con agua residual depurada y se fertilizó con una solución iónica estándar utilizada para el cultivo del tomate. Y, por último, el tratamiento AR-FR-M era igual al anterior, y, además, añadiendo unas labores de mantenimiento: mantenimiento del pH de la solución de riego en 5.5 para evitar la aparición de precipitados en la red de riego; post-riego sin fertilizantes de 2 minutos al final del pulso de riego para que la tubería y los emisores de riego se limpien de la solución nutritiva; apertura mensual de los tapones finales de los ramales de riegos durante varios segundos.

Para el estudio de la uniformidad y de la obturación se realizaron medidas periódicas de los volúmenes emitidos por todas las unidades experimentales objeto de estudio. Se realizaron una medida inicial, una intermedia y otra final. La unidad experimental, que era una línea o ramal de riego, estaba formada por 32 emisores, de los cuales solamente se tomaba medida de 16. Se hacían 4 medidas por posición, siendo la primera, al comienzo, la segunda y tercera, a $\frac{2}{4}$ y $\frac{3}{4}$ del ramal, respectivamente, y, la última, al final del ramal. Esto da un total de 16 muestras por ramal. El tiempo de recogida de los volúmenes fue de 3 minutos.

Influencia de los parámetros geométricos e hidráulicos del laberinto del emisor en la calidad del riego

En este trabajo, nuestro interés se ha centrado fundamentalmente en el estudio de la geometría de los laberintos de los goteros y en su incidencia en su atascamiento. Las características hidráulicas de los laberintos de los emisores pueden afectar la acumulación de microorganismos y la estructura de las biopelículas (Yan *et al.*, 2009). También se ha trabajado con un mayor número de goteros diferentes lo que seguramente pueda servir para establecer relaciones claras entre la geometría del laberinto y el nivel de atascamiento. Asimismo, se han considerado otras variables geométricas que dan origen a números adimensionales distintos a los habitualmente usados. También, se han incluido en el análisis dimensional variables hidráulicas que afectan al movimiento del agua a través del laberinto de los goteros (Oliveira *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020).

Para tener mayores pérdidas de carga durante el paso del agua dentro del gotero se recurren a diversos procedimientos entre los que destacan un mayor recorrido con un desplazamiento en zigzag del agua, una sección de paso reducida o la interposición de obstáculos tales como estructuras dentadas (Lili *et al.*, 2016). A igualdad de caída de presión a lo largo del gotero, como es nuestro caso, un recorrido del agua más intrincado supone un menor caudal emitido.

La influencia de la geometría en el desempeño anti-atascamiento de los goteros ha sido estudiada por diversos autores (Lv *et al.*, 2024, más recientemente). Entre los parámetros geométricos, una variable habitualmente usada es la longitud del recorrido real del agua a su paso por el laberinto, L_i (Zhou *et al.*, 2016; Han *et al.*, 2018), pero con solo esta medida no tenemos en cuenta si los ángulos que describe el agua al circular por los pliegues del laberinto son más cerrados o abiertos lo que tiene una gran influencia en las pérdidas de carga. Una forma de tener en cuenta lo anterior es relacionar L_i con la longitud del laberinto L_e , de modo que cuanto menor sea la relación (L_e/L_i) los pliegues del laberinto son más cerrados y, en consecuencia, las pérdidas de carga son mayores.

Otras variables geométricas también muy empleadas son la altura, h , y la anchura del laberinto, w (Yan *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2017a). Una forma de tener en cuenta el efecto combinado de ambas es calculando el radio hidráulico, R , cociente entre el área de la sección transversal, A , y el perímetro, P , que, suponiendo una sección rectangular, se obtiene como se indica en la Ecuación (1).

$$R = \frac{h \cdot w}{2 \cdot (w + h)} \quad (1)$$

donde h es la altura de la sección transversal del laberinto y w la anchura.

Como variable hidráulica se ha elegido el caudal, Q , o la velocidad, U . También hay que considerar las propiedades del fluido con mayor importancia en el proceso, que son la densidad, ρ , y la viscosidad dinámica, μ .

En la Tabla 3 se muestran las dimensiones más características del laberinto de los goteros usados en este ensayo.

Tabla 3 | Características geométricas de los emisores. *CP: Compensantes pinchados; NCP: No compensantes pinchados; NCIT: No compensantes interlinea; CI: Compensantes integrados; NCI: No compensantes integrados.

Nº y tipo de emisor*	Longitud laberinto emisor (L _e , cm)	Longitud recorrido real agua (L _p , cm)	Altura (h, cm)	Anchura (w, cm)	Radio hidráulico (R, cm)	L _e /L _i	R/L _i
1 NCP	11.89	24.23	0.110	0.154	0.0329	0.49	1.36·10 ⁻³
2 CP	7.53	12.93	0.075	0.120	0.0269	0.58	2.08·10 ⁻³
3 NCIT	27.62	31.08	0.150	0.114	0.0323	0.89	1.04·10 ⁻³
4 NCIT	20.15	47.21	0.070	0.182	0.0253	0.42	5.36·10 ⁻⁴
5 CP	3.68	3.90	0.100	0.120	0.0273	0.94	7.00·10 ⁻³
6 NCP	10.87	12.00	0.085	0.111	0.0241	0.91	2.01·10 ⁻³
7 CP	12.26	20.55	0.167	0.172	0.0423	0.60	2.05·10 ⁻³
8 NCP	4.10	7.38	0.075	0.082	0.0196	0.77	2.65·10 ⁻³
9 NCIT	8.34	10.88	0.070	0.125	0.0225	0.77	2.06·10 ⁻³
10 NCIT	11.33	43.68	0.149	0.149	0.0361	0.26	8.26·10 ⁻³
11 CI	4.56	7.96	0.175	0.134	0.0380	0.57	4.77·10 ⁻³
12 NCIT	57.00	63.55	0.115	0.146	0.0322	0.90	5.07·10 ⁻⁴
13 NCIT	54.36	65.03	0.095	0.143	0.0285	0.84	4.48·10 ⁻⁴
14 NCIT	11.23	13.97	0.090	0.115	0.0252	0.80	1.80·10 ⁻³
15 CI	0.93	1.54	0.139	0.139	0.0349	0.60	2.26·10 ⁻²
16 CI	2.26	3.79	0.110	0.125	0.0292	0.60	7.70·10 ⁻³
17 CI	5.63	7.29	0.100	0.131	0.0283	0.77	3.88·10 ⁻³
18 CI	2.34	4.02	0.225	0.199	0.0528	0.58	1.31·10 ⁻³
19 NCI	2.18	2.71	0.110	0.110	0.0262	0.80	9.67·10 ⁻³
20 NCI	3.38	5.94	0.145	0.128	0.0340	0.57	5.72·10 ⁻³

La variación de relación de caudales (Dra) es el índice más usado para medir el atascamiento en la literatura (Muniz *et al.*, 2022; Hou *et al.*, 2024a). Otros autores utilizan simultáneamente Dra y CU (coeficiente de uniformidad) (Wang *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2025; Zaiyu *et al.*, 2025). Mattar *et al.* (2020) trabajan con el q_{var} y el CV en tanto que Yan *et al.*, (2009) usa solo DU (coeficiente de uniformidad de distribución). Liu *et al.* (2019) utilizan (CU) y la uniformidad estadística (Us). Baeza y Contreras (2020) trabajaron con el coeficiente de uniformidad de distribución (DU). En nuestro caso se ha trabajado con cuatro de ellos: Dra; CU; Us; y DU.

El procedimiento seguido para cada uno de los índices se repite, cambiando las variables en cada caso:

Variación de la relación de caudales (Dra)

Se parte de la Ecuación (2) donde q_i^t es el caudal del emisor i al cabo de t horas desde el comienzo del ensayo, q_i^0 es el caudal del mismo gotero en el inicio del ensayo, calculado a partir de su ecuación de gasto obtenida en el banco de ensayos (Tabla 1) para la presión de trabajo del emisor (100 kPa), ambos en L/h, y n es el número total de emisores por ramal.

$$Dra(\%) = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{q_i^t}{q_i^0} \right)}{n} \cdot 100 \quad (2)$$

Aplicando el teorema II de Vaschy-Buckingham (Langhaar, 1980) a las variables mencionadas, mostradas en la Ecuación (3), y calculando las variables $\overline{q^t}$ y $\overline{q^0}$ utilizando las Ecuaciones (4) y (5), respectivamente, se obtiene la Ecuación (6) de cuatro parámetros adimensionales. Despejando Dra en la Ecuación (6) se obtiene la Ecuación (7).

$$f\left(Le, Li, R, \overline{q^t}, \overline{q^0}, \rho, \mu\right) = 0 \quad (3)$$

$$\overline{q^t} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^t}{n} \quad (4)$$

$$\overline{q^0} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i^0}{n} = q^0 \quad (5)$$

$$\Pi_{Dra}\left(\frac{L_e}{L_i}, \frac{R}{L_i}, Dra, \mathbb{R}\right) = 0 \quad (6)$$

$$Dra = \Pi'_{Dra}\left(\frac{L_e}{L_i}, \frac{R}{L_i}, \mathbb{R}\right) \quad (7)$$

donde $\mathbb{R}$ es el número de Reynolds calculado como $(U \cdot R)/(\mu/\rho)$, siendo $U=U_t=\overline{q^t}/(h \cdot w)$

Usando los datos experimentales para calcular los términos adimensionales independientes, la Ecuación (7) se ajusta mediante un modelo potencial multivariado, obteniéndose la Ecuación (8).

$$Dra = \alpha_{Dra} \cdot \left(\frac{L_e}{L_i}\right)^{\alpha_1} \cdot \left(\frac{R}{L_i}\right)^{\alpha_2} \cdot \mathbb{R}^{\alpha_3} \quad (8)$$

Coefficiente de uniformidad (CU)

Se parte de la ecuación (9)

$$CU(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i^t - \overline{q^t}|}{(n \cdot \overline{q^t})}\right) \quad (9)$$

Aplicando el teorema Π de Vaschy-Buckingham a las variables mencionadas, tal como se muestra en la Ecuación (10), y calculando la variable $\overline{q^t}$ utilizando la Ecuación (4), se obtiene la Ecuación (11) de cuatro parámetros adimensionales. Despejando CU en la Ecuación (11) se obtiene la Ecuación (12).

$$f(L_e, L_i, R, \overline{q^t}, n, \rho, \mu) = 0 \quad (10)$$

$$\Pi_{CU}\left(\frac{L_e}{L_i}, \frac{R}{L_i}, CU, \mathbb{R}\right) = 0 \quad (11)$$

$$CU = \Pi'_{CU}\left(\frac{L_e}{L_i}, \frac{R}{L_i}, \mathbb{R}\right) \quad (12)$$

Usando los datos experimentales para calcular los términos adimensionales independientes, la Ecuación (12) se ajusta mediante un modelo potencial multivariado obteniéndose la Ecuación (13).

$$CU = \beta_{CU} \cdot \left(\frac{L_e}{L_i}\right)^{\beta_1} \cdot \left(\frac{R}{L_i}\right)^{\beta_2} \cdot \mathbb{R}^{\beta_3} \quad (13)$$

Uniformidad estadística (Us)

Partimos de la Ecuación (14) donde v_{qt} es el coeficiente de variación de los caudales en el tiempo t y S_{qt} su desviación típica.

$$Us(\%) = 100 \cdot \left(1 - V_{qt}\right) = 100 \cdot \left(1 - \frac{S_{qt}}{\overline{q^t}}\right) \quad (14)$$

Aplicando el teorema Π de Vaschy-Buckingham a las variables mencionadas, tal como se muestra en la Ecuación (15), y calculando la variable $\overline{q^t}$ utilizando la Ecuación (4), se obtiene la Ecuación (16) de cuatro parámetros adimensionales. Despejando Us en la Ecuación (16) se obtiene la Ecuación (17).

$$f(L_e, L_i, R, \overline{q^t}, S_{qt}, \rho, \mu) = 0 \quad (15)$$

$$\Pi_{Us}(\frac{L_e}{L_i}, \frac{R}{L_i}, Us, \mathbb{R}) = 0 \quad (16)$$

$$Us = \delta_{Us} \cdot \left(\frac{L_e}{L_i}\right)^{\delta_1} \cdot \left(\frac{R}{L_i}\right)^{\delta_2} \cdot \mathbb{R}^{\delta_3} \quad (17)$$

Coefficiente de uniformidad de distribución (DU)

Se parte de la Ecuación (18)

$$DU(\%) = \frac{\overline{q_{25\%}^t}}{\overline{q^t}} \cdot 100 \quad (18)$$

donde: $\overline{q_{25\%}^t}$ es el caudal medio del 25% de los emisores con el caudal más bajo ($L \cdot h^{-1}$)

Aplicando el teorema de Vaschy-Buckingham a la Ecuación (19) resulta la Ecuación (20). Despejando DU en la Ecuación (20) se obtiene la Ecuación (21).

$$f(L_e, L_i, R, \overline{q^t}, S_{qt}, \rho, \mu) = 0 \quad (19)$$

$$\Pi_{DU}(\frac{L_e}{L_i}, \frac{R}{L_i}, DU, \mathbb{R}) = 0 \quad (20)$$

$$DU = \lambda_{DU} \cdot \left(\frac{L_i}{L_e}\right)^{\lambda_1} \cdot \left(\frac{L_i}{R}\right)^{\lambda_2} \cdot \mathbb{R}^{\lambda_3} \quad (21)$$

Para validar las Ecuaciones (8), (13), (17) y (21) se ha usado el índice de la raíz del error cuadrático medio (RMSE) (Mattar and Alamoud, 2015; Mattar *et al.*, 2020) cuya expresión se desarrolla en la Ecuación (22).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (22)$$

donde P_i son los valores estimados, O_i son los valores medidos y n el número total de datos.

La evaluación del RMSE puede compararse con la desviación estándar de los datos medidos (σ_o), siendo la siguiente forma de evaluar:

- Si $RMSE < \sigma_o$; el modelo es aceptable, ya que el error es menor que la variabilidad natural de los datos.
- Si $RMSE > \sigma_o$; el modelo no aceptable, porque predice peor que la variabilidad de los datos

Este tipo de ajuste proporciona información sobre la eficacia del modelo teniendo en cuenta la variabilidad de los datos observados.

Para comparar varios modelos dentro de una misma clasificación, hemos recurrido a usar el error cuadrático medio normalizado (NRMSE), que se calcula mediante la Ecuación (23). Un valor NRMSE más bajo indica un mejor ajuste entre las predicciones del modelo y los datos observados, lo que sugiere una mayor precisión y fiabilidad en el rendimiento del modelo.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\sigma_o} \quad (23)$$

RESULTADOS

Los valores medios de los índices de atascamiento descritos en las Ecuaciones (2, 9, 14 y 18) según el comportamiento hidráulico (no compensante y compensante) de la muestra de goteros vienen dados en la Tabla 4 e igualmente según el tipo de inserción (integrado, interlínea y pinchado) en la Tabla 5.

El valor de los términos adimensionales independientes D_{ra} , CU , Us y DU aplicando el teorema Π de Vaschy-Buckingham según viene dado en las expresiones (8, 13, 17, 21) se da en la Tabla 4 según el comportamiento hidráulico y en la Tabla 5 según el tipo de inserción. Junto a los términos adimensionales obtenidos por los modelos potenciales multivariados se han calculado los valores de ajuste de estos modelos mediante el RMSE, la desviación típica y el NRMSE, encontrándose los valores de ajuste de ambas clasificaciones también en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4 | Valores de los coeficientes de ajuste de los índices de atascamiento (D_{ra} , CU , Us y DU) según el tipo de comportamiento hidráulico (No compensante y Compensante) mediante el modelo potencial multivariado. Además, se incluye el ajuste del modelo dimensional mediante el RMSE, la desviación típica estándar (σ) y el NRMSE. Tratamientos. 1: AR; 2: AR-FR; 3: AR-FR-M.

NO COMPENSANTE										COMPENSANTE								
Modelo potencial multivariado					Valores de ajuste					Modelo potencial multivariado					Valores de ajuste			
Dra																		
Tto.	Dra (%)	$\mathbb{R}$	α_{Dra}	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	RMSE	σ	NRMSE	Dra (%)	$\mathbb{R}$	α_{Dra}	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	RMSE	σ	NRMSE
1	100.0	183.7	191.9	−0.029	0.030	−0.095	4.3	5.5	0.79	103.2	170.2	720.4	0.441	0.031	−0.312	5.8	9.3	0.63
2	97.3	185.6	85.1	−0.067	0.031	0.054	5.2	6.5	0.80	102.4	170.7	556.4	0.358	0.070	−0.229	7.0	10.1	0.70
3	99.6	185.4	124.6	−0.032	0.039	0.003	5.7	7.1	0.80	102.6	170.8	666.8	0.467	0.050	−0.276	5.2	9.0	0.57
CU																		
Tto.	CU (%)	$\mathbb{R}$	β_{CU}	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	RMSE	σ	NRMSE	CU (%)	$\mathbb{R}$	β_{CU}	$\beta 1$	$\beta 2$	$\beta 3$	RMSE	σ	NRMSE
1	95.5	191.0	137.5	0.007	0.001	−0.068	1.7	2.1	0.83	95.8	170.2	104.5	0.010	0.024	0.009	1.5	2.4	0.64
2	95.9	194.7	102.1	−0.014	0.005	−0.007	2.4	2.1	1.13	95.3	170.7	98.6	0.009	0.041	0.036	1.5	3.5	0.43
3	96.9	191.0	78.0	−0.006	−0.012	0.026	1.0	1.5	0.67	97.1	170.8	107.2	0.018	0.010	−0.007	0.9	1.2	0.77
Us																		
Tto.	Us (%)	$\mathbb{R}$	δ_{Us}	$\delta 1$	$\delta 2$	$\delta 3$	RMSE	σ	NRMSE	Us (%)	$\mathbb{R}$	δ_{Us}	$\delta 1$	$\delta 2$	$\delta 3$	RMSE	σ	NRMSE
1	92.6	191.0	226.2	0.028	0.004	−0.164	4.1	4.9	0.84	94.0	170.2	98.9	0.000	0.039	0.030	2.5	3.9	0.65
2	94.7	194.7	136.8	−0.003	0.005	−0.065	4.0	3.1	1.30	92.5	170.7	89.7	0.016	0.065	0.075	2.0	5.5	0.36
3	96.3	191.0	84.6	0.010	−0.013	0.009	1.1	1.7	0.68	95.8	170.8	118.2	0.050	0.015	−0.022	1.7	2.1	0.79
DU																		
Tto.	DU (%)	$\mathbb{R}$	λ_{DU}	$\lambda 1$	$\lambda 2$	$\lambda 3$	RMSE	σ	NRMSE	DU (%)	$\mathbb{R}$	λ_{DU}	$\lambda 1$	$\lambda 2$	$\lambda 3$	RMSE	σ	NRMSE
1	93.2	191.0	236.9	0.028	−0.001	−0.177	3.3	4.3	0.76	94.5	191.0	101.9	0.011	0.024	0.012	1.0	2.1	0.49
2	93.8	194.7	168.6	0.002	0.004	−0.106	5.0	5.1	0.99	94.0	194.7	95.7	0.002	0.043	0.042	0.9	3.5	0.27
3	96.2	191.0	95.9	0.012	−0.011	−0.012	1.2	1.6	0.73	96.2	191.0	108.1	0.020	0.009	−0.012	0.9	1.1	0.80

Los valores de los términos adimensionales independientes del índice D_{ra} nos muestran una constante $\alpha_{D_{ra}}$ de un valor medio de 134 en los goteros no compensantes y de 648 en goteros compensantes, bastante superior en estos últimos. Los exponentes adimensionales (α_1 , α_2 y α_3) en los goteros no compensantes presentan un valor entre -0.095 y 0.054. En el caso de los goteros compensantes, los exponentes eran más elevados, con valor entre -0.312 y 0.467. La constante y exponentes de los modelos de los goteros compensantes presentaban valores mucho mayores. En el caso de los modelos potenciales según el tipo de inserción, la constante media en los goteros integrados, interlínea y pinchados fue de 725, 371 y 458, respectivamente, sobresaliendo en valor la constante de los goteros integrados. Los exponentes variaban de -0.495 a 0.269 en los goteros integrados, de -0.320 a 0.084 en los goteros interlínea y de -0.340 a 0.224 en los goteros pinchados, teniendo un rango mayor los goteros integrados. Con respecto a la bondad de los modelos matemáticos calculados para el índice D_{ra} según su comportamiento hidráulico, hubo mejores valores del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) de los modelos compensantes que de los no compensantes. Con respecto al tipo de inserción, observamos mejor comportamiento en los emisores interlínea seguidos de los integrados y los pinchado.

Con respecto al índice del Coeficiente de Uniformidad (CU), el coeficiente adimensional (β_{CU}) del modelo potencial en el gotero no compensante y compensante nos dio un valor de 105.9 y 103.4, respectivamente, ambos muy similares. Los exponentes

adimensionales (β_1 , β_2 y β_3) en los goteros no compensantes presentaban un valor de -0.068 a 0.026 y en los goteros compensantes de -0.07 a 0.024 , rango mayor de los exponentes en los no compensantes. Dentro de la clasificación según el tipo de inserción, las constantes de los modelos de los goteros integrados, interlínea y pinchado fue de 95, 534 y 253, respectivamente. En este caso, la constante fue bastante mayor en el grupo de los goteros interlínea. Concerniente a los exponentes encontramos valores de -0.057 a 0.023 en los goteros integrados, de -0.362 a 0.354 en los goteros interlínea y de -0.050 a 0.071 en los goteros pinchados, rango de los exponentes mayor en los goteros interlínea. Los valores del NRMSE obtenidos de los modelos potenciales del índice CU según el comportamiento hidráulico y para el tipo de inserción mostraban un mayor ajuste en los modelos compensantes y mejor ajuste en los modelos interlínea seguidos de integrado y pinchado.

Tabla 5 | Valores de los coeficientes de ajuste de los índices de atascamiento (Dra, CU, Us y DU) según el tipo de inserción del gotero (Integrado, Interlínea y Pinchado) mediante el modelo potencial multivariado. Además, se incluye el ajuste del modelo dimensional mediante el RMSE y la desviación típica estándar (σ). Tratamientos. 1: AR; 2: AR-FR; 3: AR-FR-M.

Dra										CU								
Modelo potencial multivariado					Valores de ajuste					Modelo potencial multivariado					Valores de ajuste			
INTEGRADO										INTEGRADO								
Tto.	Dra (%)	R	α_{Dra}	α_1	α_2	α_3	RMSE	σ	NRMSE	CU (%)	R	β_{CU}	β_1	β_2	β_3	RMSE	σ	NRMSE
1	101.0	193.4	772.8	-0.007	-0.105	-0.495	4.2	7.8	0.53	96.0	193.4	89.5	-0.033	0.023	0.034	0.7	1.6	0.47
2	101.3	196.9	638.9	-0.031	-0.134	-0.488	3.2	7.2	0.44	97.1	196.9	106.0	0.003	-0.003	-0.020	0.4	0.5	0.76
3	103.8	194.6	770.5	0.269	-0.067	-0.430	3.7	7.6	0.48	96.9	194.6	88.4	-0.057	-0.017	-0.004	0.9	1.3	0.67
INTERLÍNEA										INTERLÍNEA								
Tto.	Dra (%)	R	α_{Dra}	α_1	α_2	α_3	RMSE	σ	NRMSE	CU (%)	R	β_{CU}	β_1	β_2	β_3	RMSE	σ	NRMSE
1	96.6	166.8	779.4	0.038	0.059	-0.320	0.2	4.0	0.05	95.9	166.8	417.0	0.049	-0.055	-0.362	1.4	1.9	0.71
2	93.0	168.4	141.1	-0.059	0.084	0.034	0.7	4.5	0.15	95.3	168.4	22.1	-0.051	0.051	0.354	0.7	2.2	0.31
3	97.6	163.7	191.7	-0.004	0.029	-0.092	1.2	2.3	0.53	97.6	163.7	94.6	0.006	-0.001	0.006	0.0	0.4	0.12
PINCHADO										PINCHADO								
Tto.	Dra (%)	R	α_{Dra}	α_1	α_2	α_3	RMSE	σ	NRMSE	CU (%)	R	β_{CU}	β_1	β_2	β_3	RMSE	σ	NRMSE
1	100.0	183.7	533.4	-0.243	0.194	-0.119	4.6	9.4	0.49	94.8	183.7	84.8	0.048	-0.014	0.009	2.5	3.0	0.86
2	97.3	185.6	450.2	-0.249	0.224	-0.056	6.2	11.4	0.55	94.1	185.6	61.7	0.071	-0.022	0.061	2.8	3.8	0.73
3	99.6	185.4	389.2	-0.340	0.235	-0.018	3.4	10.2	0.34	96.5	185.4	106.0	-0.050	0.020	0.001	1.4	1.8	0.77
Us										DU								
Modelo potencial multivariado					Valores de ajuste					Modelo potencial multivariado					Valores de ajuste			
INTEGRADO										INTEGRADO								
Tto.	Us (%)	R	δ_{Us}	δ_1	δ_2	δ_3	RMSE	σ	NRMSE	DU (%)	R	λ_{DU}	λ_1	λ_2	λ_3	RMSE	σ	NRMSE
1	94.2	193.4	70.5	-0.067	0.054	0.105	2.3	3.7	0.61	94.2	193.4	83.6	-0.058	0.037	0.055	1.8	2.9	0.60
2	95.6	196.9	126.8	-0.004	-0.020	-0.075	0.7	1.2	0.59	96.1	196.9	114.4	0.016	-0.005	-0.038	0.6	0.9	0.74
3	95.8	194.6	96.9	-0.049	-0.026	-0.031	1.0	1.5	0.66	96.0	194.6	97.5	-0.038	-0.020	-0.027	1.0	1.4	0.75
INTERLÍNEA										INTERLÍNEA								
Tto.	Us (%)	R	δ_{Us}	δ_1	δ_2	δ_3	RMSE	σ	NRMSE	DU (%)	R	λ_{DU}	λ_1	λ_2	λ_3	RMSE	σ	NRMSE
1	93.5	166.8	4097.1	0.129	-0.111	-0.886	2.9	4.3	0.66	94.5	166.8	965.5	0.079	-0.078	-0.559	2.0	2.8	0.69
2	94.7	168.4	13.9	-0.049	0.144	0.576	0.3	2.7	0.10	93.8	168.4	12.7	-0.069	0.080	0.497	1.2	3.0	0.40
3	96.8	163.7	80.7	0.007	0.000	0.036	0.1	0.7	0.14	96.8	163.7	104.7	0.011	-0.004	-0.020	0.0	0.5	0.06
PINCHADO										PINCHADO								
Tto.	Us (%)	R	δ_{Us}	δ_1	δ_2	δ_3	RMSE	σ	NRMSE	DU (%)	R	λ_{DU}	λ_1	λ_2	λ_3	RMSE	σ	NRMSE
1	91.4	183.7	87.8	0.118	-0.034	-0.023	4.9	5.7	0.85	92.4	183.7	105.9	0.133	-0.036	-0.058	4.1	5.3	0.78
2	90.9	185.6	38.4	0.129	-0.042	0.128	4.0	6.2	0.65	91.1	185.6	78.8	0.190	-0.056	-0.022	5.4	6.8	0.80
3	95.8	185.4	79.2	0.059	-0.023	0.015	2.2	2.7	0.82	96.1	185.4	90.2	0.059	-0.024	-0.011	1.7	2.3	0.76

Para el índice de atascamiento de Uniformidad estadística (Us), hemos obtenido una constante adimensional (δ_{Us}) de valor igual a 149 y 102 en los goteros no compensantes y compensantes, respectivamente, y unos exponentes adimensionales (δ_1 , δ_2 , y δ_3) comprendidos entre -0.164 y 0.028 en los goteros no compensantes y -0.022 a 0.075 en los goteros compensantes, de rango mayor en los no compensantes. Con respecto al tipo de inserción, la constante tuvo un valor medio en los goteros integrados de 1397, en los goteros interlínea de 197 y en los goteros pinchado de 205. Salió un valor muy elevado en la constante del modelo interlínea en el tratamiento AR-FR. Los exponentes tuvieron valores comprendidos de -0.075 a 0.054 en los goteros integrados, de

−0.886 a 0.144 en los goteros interlínea y en los goteros pinchados de −0.034 a 0.128, teniendo mayor rango de valores los modelos del gotero integrado. Analizando los ajustes de los modelos mediante el NRMSE tuvieron mejor comportamiento los modelos de los goteros compensantes que los no compensantes según su comportamiento hidráulico. En el caso del tipo de inserción, el mejor ajuste lo encontramos en los modelos interlínea seguido del integrado y del pinchado.

Los modelos del índice del Coeficiente de uniformidad de distribución (DU) tuvieron unos términos adimensionales según la clasificación de su comportamiento hidráulico con una constante (λ_{DU}) de 167 y 102 en los goteros no compensantes y compensantes, respectivamente, de nuevo mayor en los goteros no compensantes, y, unos exponentes adimensionales (λ_1 , λ_2 y λ_3) en los goteros no compensantes de −0.177 a 0.028, en los goteros compensantes de −0.012 a 0.043, siendo mayor el rango de los valores de los exponentes en los goteros no compensantes. En el caso de la clasificación según el tipo de inserción, la constante de los goteros integrados, interlínea y pinchados fue de 99, 361 y 92, respectivamente, y los exponentes de cada grupo fueron en los goteros integrados de −0.058 a 0.055, en los goteros interlínea de −0.0559 a 0.080 y en los goteros pinchado de −0.058 a 0.059. Los valores del ajuste mediante el NRMSE de los modelos nos mostraron mejor comportamiento en los goteros compensantes según la clasificación del comportamiento hidráulico. Para los modelos según el tipo de inserción, volvimos a encontrar mejor conducta en los goteros interlínea seguidos de los integrados y pinchados.

Los términos adimensionales independientes del modelo potencial multivariado obtenidos según la clasificación de su comportamiento hidráulico tuvieron una constante mayor en todos los índices de atascamiento para los goteros no compensantes, e, igualmente, los exponentes obtenidos en los goteros no compensantes tuvieron mayor valor en términos absolutos. Analizando los términos adimensionales obtenidos según la clasificación del tipo de inserción, la constante del modelo tuvo mayor valor en los índices D_{ra} y U_s para los goteros integrados y en los índices CU y DU para los goteros interlínea. En el caso de los exponentes, el rango mayor en términos absolutos ocurrió en los goteros integrados para el índice D_{ra} y en los goteros interlínea para los índices CU, U_s y DU.

DISCUSIÓN

Se observa que, en todos los índices de ambas clasificaciones, comportamiento hidráulico y tipo de inserción, los valores son superiores a 90% por lo que el grado de atascamiento que han alcanzado los goteros durante su funcionamiento fue bastante aceptable y que todos los índices son útiles para determinar el grado de atascamiento. Hay que indicar que algunos valores del índice de variación de la relación de caudales (D_{ra}) son superiores a 100, lo que indica que emitieron más agua que el caudal nominal medido en el banco de ensayo, lo cual no debería ocurrir. Aparte de posibles errores experimentales, esto puede deberse también a que la temperatura alcanzada dentro del invernadero experimental en todas las tomas de medida de caudales era superior a 25 °C provocando dilataciones en el material analizado, y, sin embargo, la temperatura en el banco de ensayo se mantuvo constante a esa temperatura. Por otro lado, en las Tablas 3 y 4 se ha proporcionado también el número de Reynolds medio tomando valores entre 160-200 en todos los casos, por lo que en todo momento el flujo de agua que circulaba por los goteros tenía un régimen laminar y es, por tanto, sensible a la temperatura.

La bondad de los modelos obtenida mediante el cálculo del NRMSE según el comportamiento hidráulico nos indica que el ajuste fue mejor para los cuatro índices de atascamiento (D_{ra} , CU, U_s y DU) en los goteros compensantes. También indicamos que la desviación estándar tuvo mayor valor que el RMSE en todos los casos, exceptuando dos casos correspondientes a los índices CU y U_s en el tratamiento AR-FR dentro de los emisores no compensantes. Que el ajuste del grupo de emisores no compensante haya sido menor indicaba mayor sensibilidad a la obturación. Este mayor atascamiento en los goteros no compensantes puede deberse al circuito interno del gotero, ya que, la relación R/L_i (radio hidráulico/longitud del recorrido real del agua) de los goteros no compensantes tiene un valor bastante menor ($2.4 \cdot 10^{-3}$ frente a $5.8 \cdot 10^{-3}$ de los compensantes). Este parámetro adimensional es similar al usado por Hou *et al.* (2024a) que relaciona la raíz cuadrada del área con la longitud, aunque el radio hidráulico es más completo. En la clasificación según el comportamiento hidráulico tenemos un radio hidráulico de $2.8 \cdot 10^{-4}$ cm en los goteros no compensantes y de $3.67 \cdot 10^{-4}$ cm para los goteros compensantes. Si analizamos el recorrido real del agua en ambos grupos, obtenemos un L_i de 26.34 cm en los goteros no compensantes y 10.07 cm en los goteros compensantes. A mayor radio hidráulico mayor sección de paso, por lo que, la posibilidad de que se queden partículas depositadas dentro del circuito del emisor es menor. Si

el agua dentro del gotero tiene más longitud que recorrer, el flujo de agua perderá más energía por rozamiento quedando depositadas con más facilidad las partículas sólidas contenidas en el agua (Lv *et al.*, 2024). La constante L_c/L_i nos indica si los pliegues son más cerrados o abiertos. En este caso, el valor de ambos grupos es muy similar (0.6893 no compensante y 0.6634 compensante), por lo que, la sinuosidad de los pliegues es bastante pareja. Aunque este resultado no coincide con las conclusiones experimentales de Baeza y Contreras (2020), este mayor atascamiento en los goteros no compensantes está plenamente justificado en nuestro caso por cuanto puede deberse a las dimensiones del gotero compensante al tener mayor radio hidráulico y menor longitud real recorrida por el agua (Du *et al.*, 2022). Respecto al tipo tratamiento de riego, observamos que el ajuste del modelo es mejor en el tratamiento AR-FR-M, en ambos tipos de goteros (no compensante y compensante). Como ya se ha dicho, este tratamiento hace un mantenimiento, mediante la apertura periódica de los extremos finales, riego final sin fertilizante y mantenimiento del pH para evitar la precipitación de la solución iónica, que ayuda a reducir la obturación (Ma *et al.*, 2024b). Por este motivo, el modelo matemático planteado con el tratamiento AR-FR-M se comportó mejor.

En cuanto al tipo de inserción, el ajuste de los modelos potenciales multivariados para los cuatro índices de atascamiento (Dra, CU, Us y DU) ha sido mejor en los goteros cuya inserción es interlínea. Esto puede ser debido a la relación R/L_i explicada con anterioridad, ya que, la razón (L_c/L_i) es muy similar entre los tres tipos de goteros (integrado 0.691, interlínea 0.662 y pinchado 0.680). La relación R/L_i tiene un valor de $6.7 \cdot 10^{-4}$ en los goteros interlínea frente a $2.9 \cdot 10^{-3}$ del pinchado y $6.1 \cdot 10^{-3}$, debiendo obtener mejor resultado en los goteros que tienen mayor relación de R/L_i , que, en este caso, sería el gotero pinchado si seguimos el razonamiento anterior. Si analizamos el radio hidráulico de los tres tipos de goteros es muy similar (integrado $3.2 \cdot 10^{-4}$ cm; interlínea $3.1 \cdot 10^{-4}$ cm; pinchado $3.0 \cdot 10^{-4}$ cm), sin embargo, la longitud real que recorre el agua (L_i) es mucho mayor en los goteros interlínea (50.11 cm) frente a los pinchados (13.91 cm) e integrados (6.97 cm) lo que va en contra del razonamiento anterior, ya que, a mayor longitud mayor probabilidad de atascamiento (Muniz *et al.*, 2022; Hou *et al.*, 2024b). Sin embargo, como se observa en la Tabla 2, los goteros interlínea con mayor L_i (números 3, 12 y 13) tiene una relación L_c/L_i muy próxima a la unidad, es decir, son longitudes rectas con muy pocos pliegues lo que justifica el resultado obtenido y, además, está en consonancia con los resultados alcanzados por Ma *et al.* (2024a) que demuestran la acumulación de biopelículas en filos y esquinas que, prácticamente, no existen en nuestro caso. El tratamiento AR-FR-M presentó en la mayoría de los casos mejor ajuste que el resto de los tratamientos. Igualmente se justifica por las tareas de mantenimiento empleados en este tratamiento de riego (Li *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

En este trabajo se han definido unos parámetros geométricos más precisos que han servido para calcular nuevos números adimensionales que han incluido, además, parámetros hidráulicos en su ecuación. Aplicando el análisis dimensional ha sido posible establecer correlaciones con índices de atascamiento. En este caso, se han utilizado los resultados obtenidos para la variación de la relación de caudales (Dra), el coeficiente de uniformidad (CU), la uniformidad estadística (Us) y el coeficiente de uniformidad de distribución (DU).

El ajuste obtenido, usando el error cuadrático medio normalizado para su cuantificación, es bastante bueno lo que da validez al procedimiento seguido. De esta forma, es posible determinar con gran precisión los índices de atascamiento esperables conociendo únicamente los parámetros que conforman la geometría del gotero, así como las variables hidráulicas del movimiento del agua dentro de estos. Con una relación baja de R/L_i se han obtenido mejores ajustes del modelo en los goteros compensantes según su comportamiento hidráulico, debido a un mayor radio hidráulico y menor recorrido del agua. Los modelos matemáticos planteados según el tipo de inserción han funcionado mejor en los goteros interlínea debido a su menor sinuosidad, es decir, tramos más rectos, aunque el recorrido del agua era mayor.

El tratamiento de riego contribuyó de manera directa al ajuste del modelo en las dos clasificaciones planteadas, tanto en la compensación de presiones como el tipo de inserción del gotero, haciendo que el ajuste sea mejor para el tratamiento AR-FR-M que lleva aparejado más medidas de mantenimiento para evitar el atascamiento.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA), en el marco del proyecto *Gestión sostenible del regadío de la agricultura intensiva de Andalucía* con código RTA2015-00029-C02-02.

REFERENCIAS

- Agencia Estatal de Meteorología. 2020. (<http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=63250&k=and>). Visited page December 11, 2020.
- Baeza, R., Contreras, J.I. 2020. Evaluation of thirty-eight models of drippers using reclaimed water: effect on distribution uniformity and emitter clogging. *Water*, 12, 1463, <https://doi.org/10.3390/w12051463>
- Baeza-Cano, R., Contreras-París, J.I., Cánovas-Fernández, G., Alonso-López, F., Reyes-Requena, R., Roldán-Cañas, J., Moreno-Pérez, M.F. 2019. Riego localizado con aguas regeneradas: influencia del fertirriego y de las labores de mantenimiento en la uniformidad del agua. *VI Jornadas de Ingeniería del Agua*, Toledo (España). <http://www.jia2019.es/>
- Contreras-París, J.I., López-Segura, J.G., Trujillo-Delgado, J., Alonso-López, F., Baeza-Cano, R. 2016. Influencia de la fertirrigación con agua regenerada y las labores de mantenimiento en la uniformidad de riego. *XXXIV Congreso nacional de Riegos*. Sevilla, España
- Du, P., Li, Z., Wang, C., Ma, J. 2022. Analysis of the influence of the channel layout and size on the hydraulic performance of emitters. *Agriculture*, 12, 541, <https://doi.org/10.3390/agriculture12040541>
- ESYRCE. 2020a. *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos. Informe sobre regadíos en España*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. (In Spanish)
- ESYRCE. 2020b. *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. (In Spanish)
- Han, S., Li, Y., Xu, F., Sun, D., Feng, J., Liu, Z., Wu, R., Wang, Z. 2018. Effect of lateral flushing on emitter clogging under drip irrigation with yellow river water and suitable method. *Irrigation and Drainage*, 67, 199-209, <https://doi.org/10.1002/ird.2193>
- Hou, P., Liu, L., Tahir, M., Li, Y., Wang, X., Shi, N., Xiao, Y., Ma, C., Li, Y. 2024a. Effect of fertilization on emitter clogging in drip irrigation using high sediment water: Perspective of sediment discharge capacity. *Agricultural Water Management*, 294, 108723, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108723>
- Hou, P., Puig-Bargués, J., Liu, L., Xiao, Y., Zhou, B., Li, Y. 2024b. New anti-clogging perspective by discharging sediment from drip irrigation emitters with high-sediment loaded water. *Irrigation Science*, 42, 645-656, <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00884-5>
- Katz, S., Dosoretz, C., Chen, Y., Tarchizky, J. 2014. Fouling formation and chemical control in drip irrigation systems using treated wastewater. *Irrigation Science*, 32, 459-469, <https://doi.org/10.1007/s00271-014-0442-4>
- Langhaar, H.L. 1980. *Dimensional analysis and theory of models*. Robert E. Krieger publishing company. Huntington, New York (Original edition, 1951. John Wiley).
- Li, Y.K., Yang, P.L., Ren, S.M., Xu, T.W. 2006. Hydraulic characterizations of tortuous flow in path drip irrigation emitter. *Journal of Hydrodynamics*, 18(4), 449-457. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(06\)60119-4](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(06)60119-4)
- Li, J., Chen, L., Li, Y. 2009. Comparison of clogging in drip emitters during application of sewage effluent and groundwater. *Trans. ASABE*, 52(4), 1203-1211. <https://doi.org/10.13031/2013.27797>
- Li, Y., Song, P., Pei, Y., Feng, J. 2015. Effects of lateral flushing on emitter clogging and biofilm components in drip irrigation systems with reclaimed water. *Irrigation Science*, 33, 235-245, <https://doi.org/10.1007/s00271-015-0462-8>.

- Li, N., Kang, Y., Li, X., Wan, S., Zhang, C., Wang, X. 2019. Lateral flushing with fresh water reduced emitter clogging in drip irrigation with treated effluent. *Irrigation Science*, 37, 627-635, <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00637-3>.
- Lili, Z., Yang, P., Ren, S., Li, Y., Liu, Y., Xia, Y. 2016. Chemical clogging of emitters and evaluation of their suitability for saline water drip irrigation. *Irrigation and Drainage*, 65, 439-450, <https://doi.org/10.1002/ird.1972>.
- Liu, Z., Xiao, Y., Li, Y., Zhou, B., Feng, J., Han, S., Muhammad, T. 2019. Influence of operating pressure on emitter anti-clogging performance of drip irrigation system with high-sediment water. *Agricultural Water Management*, 213, 174-184. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.017>
- Lv, C., Niu, W., Du, Y., Sun, J., Dong, A., Wu, M., Mu, F., Zhu, J., Siddique, K.H.M. 2024. A meta-analysis of labyrinth channel emitter clogging characteristics under Yellow river water drip tape irrigation. *Agricultural Water Management*, 291(2024), 108634, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108634>.
- Ma, C., Li, M., Hou, P., Wang, Y., Sun, Z., Li, Y. Xiao, Y., Li, Y. 2024a. Biofilm dynamic changes in drip irrigation emitter flow channels using reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 291, 108624, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108624>.
- Ma, C., Jiang, C., Li, Y., Shi, N., Liu, S., Hu, X., Liu, Z., Sun, Z., Muhammad, T. 2024b. Effect of lateral flushing on emitter clogging in drip irrigation using high-sediment water. *Agricultural Water Management*, 293, 108702, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108702>.
- Mattar, M.A., Alamoud, A.I., Al-Othman, A., Elansary, H.O., Farah, A.H. 2020. Hydraulic performance of labyrinth-channel emitters: experimental study, ANN, and GEP modeling. *Irrigation Science*, 38, 1-16, <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00647-1>.
- Mattar, M.A., Alamoud, A.I. 2015. Artificial neural networks for estimating the hydraulic performance of labyrinth-channel emitters. *Computers and Electronics in Agriculture*, 114, 189-201, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.04.007>.
- Muhammad, T., Zhou, B., Liu, Z., Chen, X., Li, Y. 2021. Effects of phosphorus-fertigation on emitter clogging in drip irrigation system with saline water. *Agricultural Water Management*, 243, 106392, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106392>.
- Muniz, G.L., Camargo, A.P., Signorelli, F., Bertran, C.A., Pereira, D.J.S., Frizzzone, J.A. 2022. Influence of suspended solid particles on calcium carbonate fouling in dripper labyrinths. *Agricultural Water Management*, 273, 107890, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107890>.
- Oliveira, F.C., Lavanholi, R., Camargo, A.P., Ait-Mouheb, N., Frizzzone, J.A., Tomas, S., Molle, B. 2020. Clogging of drippers caused by suspensions of kaolinite and montmorillonite clays. *Irrigation Science*, 38, 65-75, <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00652-4>.
- Oliver, M.M.H., Hewa, G.A., Pezzaniti, D. 2014. Bio-fouling of subsurface type drip emitters applying reclaimed water under medium soil thermal variation. *Agricultural Water Management*, 133, 12-23, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.10.014>.
- Pei, Y., Li, Y., Liu, Y., Zhou, B., Shi, Z., Jiang, Y. 2014. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation. *Irrigation Science*, 32, 141-157, <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0420-2>.
- Ravina, I., Paz, E., Sofer, Z., Marcu, A., Schischa, A., Sagi, G., Yechialy, Z., Lev, Y. 1997. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent. *Agricultural Water Management*, 33, 127-137. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(96\)01286-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(96)01286-3)
- Reyes-Requena, R., Baeza-Cano, R., Cánovas-Fernández, G., López-Segura, J.G., Roldán-Cañas, J., Moreno-Pérez, M.F. 2019. Determinación en laboratorio de las características hidráulica de una selección de dieciséis modelos comerciales de emisores de riego localizado. *VI Jornadas de Ingeniería del Agua*, Toledo (España) <http://www.jia2019.es/>
- Song, P., Li, Y., Zhou, B., Zhou, C., Zhang, Z., Li, J. 2017. Controlling mechanism of chlorination on emitter bio-clogging for drip irrigation using reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 184, 36-45, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.017>.
- Tarchitzky, J., Rimón, A., Kenig, E., Dosoretz, C.G., Chen, Y. 2013. Biological and chemical fouling in drip irrigation systems utilizing treated wastewater. *Irrigation Science*, 31, 1277-1288, <https://doi.org/10.1007/s00271-013-0406-0>.

- Wang, Z., Yang, X., Li, J. 2020. Effect of phosphorus-coupled nitrogen fertigation on clogging in drip emitters when applying saline water. *Irrigation Science*, 38, 337-351, <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00675-2>.
- Wang, C., Li, Z., Ma, J. 2021. Influence of emitter structure on its hydraulic performance based on the vortex. *Agriculture*, 11: 508, <https://doi.org/10.3390/agriculture11060508>.
- Wang, H., Hu, X., Wang, W., Ma, X. 2025. Main influence indicators and regulatory pathways of emitter clogging and physical and chemical combination factors. *Agricultural Water Management*, 310, 109383. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109383>.
- Yan, D., Bai, Z., Rowan, M., Gu, L., Ren, S., Yang, P. 2009. Biofilm structure and its influence on clogging in drip irrigation emitters distributing reclaimed wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, 21, 834-841, [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62349-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62349-9).
- Yang, B., Wang, J., Zhang, Y., Wang, H., Ma, X., Mo, Y. 2020. Anti-clogging performance optimization for dentiform labyrinth emitters. *Irrigation Science*, 38, 275-285, <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00671-6>.
- Zaiyu, L., Yan, M., Hao, G., Shihong, G., Yanqun, Z., Guangyong, L., Feng, W. 2025. The hydraulic performance and clogging characteristics of a subsurface drip irrigation system operating for five years in the North China plain. *Agricultural Water Management*, 307, 109217, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109217>.
- Zhou, B., Li, Y., Song, P., Xu, Z., Bralts, V. 2016. A kinetic model for biofilm growth inside non-PC emitters under reclaimed water drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 168, 23-34, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.01.007>.
- Zhou, B., Li, Y., Song, P., Zhou, Y., Yu, Y., Bralts, V. 2017a. Anti-clogging evaluation for drip irrigation emitters using reclaimed water. *Irrigation Science*, 35(3), 181-192, <https://doi.org/10.1007/s00271-016-0530-8>.
- Zhou, B., Wang, T., Li, Y., Bralts, V. 2017b. Effects of microbial community variation on bio-clogging in drip irrigation emitters using reclaimed water. *Agricultural Water Management*, 194, 139-149, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.09.006>.
- Zhou, H., Li, Y., Xiao, Y., Liu, Z. 2019a. Different operation patterns on mineral components of emitters clogging substances in drip phosphorus fertigation system. *Irrigation Science*, 37, 691-707, <https://doi.org/10.1007/s00271-019-00643-5>.
- Zhou, B., Zhou, H., Puig-Bargués, J., Li, Y. 2019b. Using an anti-clogging relative index (CRI) to assess emitters rapidly for drip irrigation systems with multiple low-quality water sources. *Agricultural Water Management*, 221, 270-278, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.025>.