

Caracterización hidráulica del riego por goteo en campo

Hydraulic characterization of field drip irrigation

Chamba, D. ^{a1}, Zubelzu, S. ^{a2}, Juana, L. ^{a3}

^aUniversidad Politécnica de Madrid, (UPM), Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB), Avenida Puerta del Hierro 2, Ciudad Universitaria, 28040 Madrid, España.

E-mail: ^{a1} diego.chambaz@alumnos.upm.es, ^{a2} sergio.zubelzu@upm.es, ^{a3} luis.juana@upm.es

Recibido: 10/08/2019

Aceptado: 29/11/2019

Publicado: 31/01/2020

Citar como: Chamba, D., Zubelzu, S., Juana, L. (2020). Hydraulic characterization of field drip irrigation. *Ingeniería del agua*, 24(1), 31-47. <https://doi.org/10.4995/la.2020.12205>

RESUMEN

Se analizan y proponen métodos de evaluación para determinar en campo la ecuación en gasto del emisor, las pérdidas de carga en ramales y porta-ramal y la uniformidad de distribución. Se han ensayado con ocho ramales y una unidad en campo a diferentes presiones. Los resultados muestran que es posible determinar la curva de gasto y coeficiente de variación de manufactura con una precisión similar a la del método normalizado, pudiendo ser más representativa en la instalación real. En cuanto a la caracterización de pérdidas, la longitud equivalente presentó valores más independientes del caudal que el coeficiente K que multiplica al sumando cinético. En unidades, y ramales, es posible observar el efecto de la presión de entrada en la uniformidad y, así, seleccionarla considerando también el coste de energía. Se concluye que los métodos propuestos permiten caracterizar la respuesta hidráulica de ramales, porta-ramales y del riego de la unidad.

Palabras clave | evaluación del riego por goteo; ecuación de descarga; pérdidas de carga; uniformidad.

ABSTRACT

Evaluation methods are analysed and proposed to determine in the field the emitter's discharge equation, the head loss in laterals and submains pipe and distribution uniformity. Eight laterals dripline and one unit in the field at different pressures have been tested. The results shown that it is possible to determine the discharge curve and the manufacturing coefficient of variation with an accuracy similar to that of the standardised method, being able to be more representative that in the real facility. Concerning the head losses, the equivalent length presented values more independent of the flow than coefficient K that multiplies the kinematic term. The effect of the inlet pressure on the uniformity in the units and in the laterals was observed and, therefore, the operating pressure can be selected also considering the cost of energy. In conclusion, the proposed methods allow to characterise the hydraulic response of laterals, submain and the irrigation of the unit.

Key words | drip irrigation evaluation; emitter discharge; head loss; uniformity.

INTRODUCCIÓN

Un aspecto de interés es conocer las características hidráulicas actuales de la unidad de riego por goteo, que en su momento fueron consideradas para el diseño y/o estimadas en laboratorio (Chamba et al., 2019a). Merriam y Keller (1978) propusieron un método sencillo y práctico de evaluación en campo, que ha sido muy utilizado y que, con pequeñas modificaciones, fue adaptado en la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO (1986). En él, se seleccionan cuatro ramales (colocados a $y=0$, $L_r/3$, $2L_r/3$ y L_r (m), L_r es la longitud del porta-ramal), y dentro de cada ramal se seleccionan a su vez otras cuatro ubicaciones ($y=0$, $L/3$, $2L/3$ y L (m), L longitud del ramal). En cada uno de los puntos seleccionado en los ramales, se miden dos goteros contiguos cuyos caudales se promedian y con los 16 valores resultantes se obtienen los índices de uniformidad deseados. Asimismo, Bralts y Kesner (1983), con las modificaciones posteriores de Bralts et al. (1987), recogidas en la American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASAE (1998), presentan un planteamiento estadístico con 18 localizaciones al azar, sin duda la aleatoriedad de los puntos a seleccionar tiene aspectos positivos, no obstante, no parece razonable desaprovechar el conocimiento que se tiene del comportamiento hidráulico de las unidades de riego por goteo que, y con el mismo esfuerzo, mejorar la calidad de la evaluación.

En este sentido, Juana et al. (2007) proponen la selección de los puntos con objeto de que representen adecuadamente en términos de presión media y varianza a la unidad, aspecto no garantizado con las ubicaciones propuestas por Merriam y Keller (1978). En su propuesta, al igual proponen 16 ubicaciones y, en cada una de ellas, se miden dos goteros, para estimar el coeficiente de variación de manufactura en unidades con goteros no compensantes. Además, miden las presiones en los extremos de la unidad y un procedimiento para la caracterización hidráulica. Por otra parte, los ensayos normalizados, ISO (2004), para determinar la curva de gasto, establecen unas condiciones en las que el caudal en las tuberías es muy reducido si se compara con las condiciones de trabajo en campo. Es por ello, que, si la entrada no es aerodinámica, en algunos goteros, puede producirse una separación del flujo del contorno que reduzca la presión a la entrada del agua en el gotero, ver Figura 1, lo que ocasionaría un menor caudal desaguado en goteros no compensantes o una incorrecta determinación del rango de compensación en los autocompensantes (Juana et al., 2002a). En este caso, los ensayos en ramales reproducirían mejor el posterior funcionamiento en campo que los ensayos normalizados.

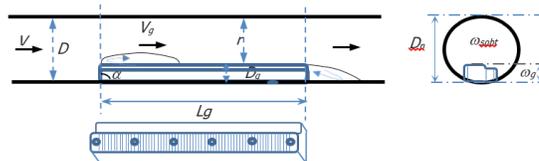


Figura 1 | Esquema de las secciones longitudinal y transversal de emisor, muestra la separación y contracción del flujo ocasionada por la presencia del gotero.

En lo que se refiere a las pérdidas de carga localizadas, el ensayo de ramales más largos o cortos que los instalados puede asimismo condicionar unas diferencias en la separación, si el mayor o menor flujo condiciona una mayor o menor contracción del flujo, lo que implicaría una sobreestimación o la subestimación de las pérdidas locales. Si bien, el efecto es poco importante en la mayor parte de las ocasiones, puede verse acentuado en el caso de obturar los goteros, como hace la norma americana ANSI-ASAE S553, (ASAE, 1998). La salida del agua puede reducir la separación y, por tanto, reducir las pérdidas de carga localizadas, algunas evidencias fueron observadas por Lorenzo y Juana (2010) y en Benítez y Juana, (2012), si bien, el efecto se calificó de poco significativo. Por otro parte, autores como Palau-Salvador et al. (2006); Provenzano et al. (2014), proponen, además, determinar las pérdidas locales en función de las características geométricas y número de emisores instalados en un ramal.

Cabe, por tanto, aceptar ensayos en unidades de campo que permitan de forma eficiente determinar los aspectos mencionados, los que serían convenientes para determinar el estado y la evolución de los parámetros con la finalidad de tomar decisiones sobre la aplicación de los riegos o la sustitución de las instalaciones. El problema es que en el campo no siempre se dispone de la flexibilidad que se tiene en laboratorio para modificar las variables. Esta situación, seguramente, puede resolverse realizando ensayos “ad hoc”, pero sus resultados estarían demasiado condicionados por las instalaciones. Por lo que es de interés, concebir ensayos que puedan realizarse en la mayor parte de las instalaciones y, de establecer y seleccionar métodos para su interpretación.

Por ello, se analizaron y propusieron métodos de evaluación que determinen en campo las características hidráulicas de los emisores y de las tuberías de un sistema de riego por goteo. Como consecuencia, el objetivo general de este estudio fue evaluar procedimientos que permitan caracterizar hidráulicamente el comportamiento de goteros, ramales y tubería porta-ramales en unidades de riego por goteo en campo. Como objetivos específicos se plantearon: (1) Determinar en laboratorio la curva de gasto del gotero y el coeficiente de variación de manufactura en ensayos de ramales y comparar los resultados con los obtenidos en los ensayos normalizados ISO. (2) Determinar y caracterizar en laboratorio las pérdidas de carga totales y las localizadas con los parámetros de longitud equivalente l_e y del coeficiente K . (3) Determinar experimentalmente en campo la uniformidad de riego, la curva de gasto y el coeficiente de variación de manufactura de goteros y los parámetros característicos de las pérdidas de carga total y localizadas en una unidad de riego.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ensayos en laboratorio

Caracterización de emisores

La Tabla 1 muestra las características hidráulicas y geométricas de ocho modelos de tuberías y emisores de goteo (cuatro autocompensantes y cuatro no compensantes) ensayados en el laboratorio, se puede observar las imágenes de la sección transversal y longitudinal del emisor, el valor del diámetro nominal D_n , la separación entre emisores s , el caudal nominal q_n , el espesor de la tubería e , el valor promedio del diámetro interno D_i y la sección de flujo ω_i de la tubería; así como las dimensiones de los goteros, longitud L_g , ancho a_g , profundidad h_g y la sección ocupada por el gotero ω_g . Las cifras de color azul indica los valores dados por el fabricante y de color negro los valores medios medidos.

Tabla 1 | Características hidráulicas y geométricas de los modelos de emisores analizados.

Tipo	ID	Sección transversal / longitudinal	Dimensiones de la tubería				Dimensiones del Gotero					
			D_n mm	s m	q_n L/h	e mm	D_i mm	ω_i mm ²	L_g mm	a_g mm	h_g mm	ω_g mm ²
Autocompensante	A		16.00	0.75	2.30	1.02	14.01	153.9	43.8	10.8	6.8	62.0
	A2		16.00	0.50	1.60	1.03	14.06	153.9	43.8	10.9	6.8	63.6
	B		16.20	0.50	1.00	1.00	14.17	158.4	21.1	10.2	5.5	57.7
	B2		16.00	0.60	1.60	1.00	14.12	158.4	21.1	10.2	5.5	54.7
No compensante	C		16.00	0.75	2.15	0.94	14.12	158.4	43.7	11.0	2.6	30.2
	C2		16.00	0.50	1.55	0.97	14.07	158.4	43.7	11.1	2.8	30.2
	D		16.20	0.30	1.50	1.01	14.15	158.4	44.4	7.2	3.2	24.2
	D2		16.00	0.20	1.00	0.90	13.95	158.4	44.4	7.2	3.2	24.3

Siguiendo un procedimiento similar al estandarizado establecido en la ISO (2004), se obtuvo la curva característica del caudal y el coeficiente de variación de manufactura CV_m , evaluando una muestra de 24 emisores de cada ramal, en la mesa de ensayos de goteros, ver Figura 2. En ella, una bomba impulsa el agua a una tubería que alimenta a cuatro tramos de tubería con goteros por sus dos extremos, para garantizar una distribución más homogénea de presiones. Se realizaron en total 20 ensayos, diez ensayos aumentando la presión de 1 a 25 m, y otros diez ensayos disminuyendo de 25 a 1 m, los valores de presión evaluados fueron $h_0 = 1, 2, 3, 4, 5, 7.5, 10, 15, 20$ y 25 m).

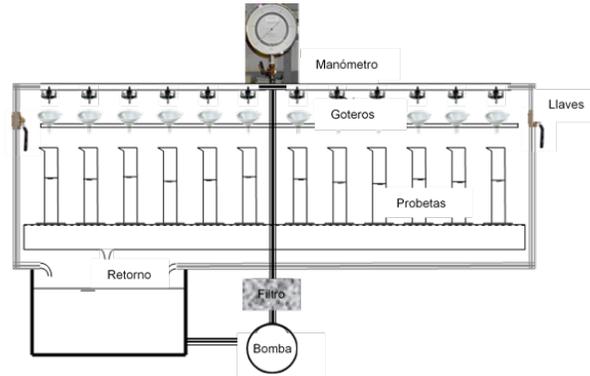


Figura 2 | Esquema de la mesa de ensayo de goteros.

Ensayos de pérdidas de carga en ramales

Para la determinación de los parámetros de pérdida de carga longitudinales y localizadas, se ensayaron en 100 m de longitud de cada modelo de tubería, tendidos a nivel, mostrados en la Tabla 1. Para estos experimentos, se utilizó el banco de ramales, compuesto por una bomba equipada con convertidor de frecuencia que permitió establecer las condiciones de presión y flujo, el esquema de la instalación experimental se presenta en la Figura 3. En todos los ensayos se midió el caudal entrante al ramal, con un contador de flujo digital (modelo CZ 2000-3M, 1 pulgada). Y, cuando correspondía, se midió el caudal en cola con contadores de flujo analógicos (modelo M150, 1/2 pulgada). En ambos casos se midieron el flujo entre 1 y 2 min. Todos los contadores de flujo fueron contrastados entre sí, colocados en serie y con mediciones volumétricas.

Tanto para la presión al inicio y al final del ramal, y como para la diferencia entre ellos, que representa las pérdidas de carga entre ambos puntos, se emplearon manómetros digitales (modelos 2083P y 2082P, precisión $\pm 0.15\%$). En algunos ensayos, para estimar el coeficiente de variación de manufactura, se midió el volumen desaguado en 25 goteros, agrupado en cinco emisores consecutivos localizados en cinco distancias a $x/L = 0.084, 0.313, 0.5, 0.687$ and 0.916 , que de acuerdo con Juana et al. (2007), tendrían el mismo valor medio y la misma varianza que el del conjunto del ramal.

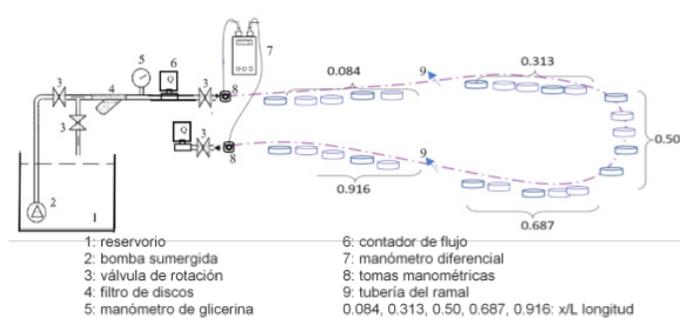


Figura 3 | Instalación para el ensayo de ramales.

Los ensayos consistieron en: *Experimento 1*: con presiones en cabeza crecientes y decrecientes, en el caso de goteros autocompensantes, se diferenciaron los ensayos entre las presiones que se encontraban dentro del rango de compensación y por debajo del rango. *Experimento 2*: diferentes presiones en cabeza, pero con salida de caudal por el extremo final del ramal abierto.

Experimento 3: determinación del CV_m con la medición de caudal en 25 emisores. A continuación, en la Tabla 2 se detallan los experimentos realizados, tanto para emisores autocompensantes y para no compensantes.

Tabla 2 | Experimentos realizados en laboratorio con los ramales.

Ramales autocompensantes			Ramales no compensantes		
ID	Número y detalle de ensayo	Rango de presión en m (m.c.a)	ID	Número y detalle de ensayo	Rango de presión en m (m.c.a)
A	28 ensayos en el rango de compensación	$5.6 < h < 40.2$	C	30 ensayos con presión creciente	$2.0 < h < 23.3$
	17 ensayos por debajo del rango	$0.6 < h < 5.6$		30 ensayos con presión decreciente	$0.4 < h < 23.4$
	10 ensayos con caudal de salida en cola	$9.3 < h < 12.3$		4 ensayos para determinar el CV_m	$8.1 < h < 12.3$
	5 ensayos para CV_m	$9.8 < h < 11.9$			
A2	11 ensayos, rango compensación creciente	$4.9 < h < 27.1$	C2	10 ensayos con presión creciente	$5.4 < h < 24.0$
	10 ensayos, rango compensación decreciente	$4.8 < h < 24.2$		11 ensayos con presión decreciente	$2.1 < h < 21.2$
	10 ensayos, caudal de salida en cola	$9.7 < h < 22.6$		5 ensayos para determinar el CV_m	$6.3 < h < 19.2$
	8 ensayos para CV_m	$10.5 < h < 15.9$			
B	32 ensayos en el rango de compensación	$5.1 < h < 31.8$	D	18 ensayos con presión creciente	$0.3 < h < 26.0$
	6 ensayos por debajo del rango	$2.5 < h < 5.08$		18 ensayos con presión decreciente	$0.3 < h < 25.9$
	9 ensayos con caudal de salida en cola	$11.0 < h < 27.2$		7 ensayos para determinar el CV_m	$13.1 < h < 17.9$
	2 ensayos para determinar el CV_m	$9.6 < h < 11.0$			
B2	23 ensayos en el rango de compensación	$6.8 < h < 33.0$	D2	13 ensayos con presión creciente	$5.1 < h < 31.7$
	5 ensayos por debajo del rango	$1.5 < h < 5.2$		15 ensayos con presión decreciente	$0.4 < h < 28.8$
	8 ensayos con caudal de salida en cola	$5.1 < h < 15.27$		5 ensayos para determinar el CV_m	$5.3 < h < 10.5$
	4 ensayos para determinar el CV_m	$6.0 < h < 13.6$			

Para estimar el coeficiente de fricción K y la longitud equivalente le de los emisores por la forma geométrica que se producen en la inserción de los emisores a lo largo de los ramales, se utilizaron los procedimientos recomendado por Juana et al. (2002a), que se basan en la derivación del teorema de Belanger (o la ecuación de Borda). Primero se midieron los diámetros externos De (mm) de cada tubería en puntos diferentes en los dos ejes ortogonales, horizontal y vertical, con un calibrador digital con precisión de ± 0.01 mm, para evitar errores sistemáticos, se midieron cinco veces, considerando así el valor promedio. De la misma forma, se midieron las dimensiones del diámetro interno Di (mm) y el grosor de la tubería e (mm). Para obtener las dimensiones en la sección transversal de la tubería y del emisor, se procedió a realizar cortes transversales de la tubería con goteros y se procedió a escanear en una resolución 250 dpi y se calculó su superficie con la ayuda del programa AutoCAD19. En la Figura 4 se puede observar una muestra del proceso, y en la Tabla 1, se mostró las medidas de los goteros.

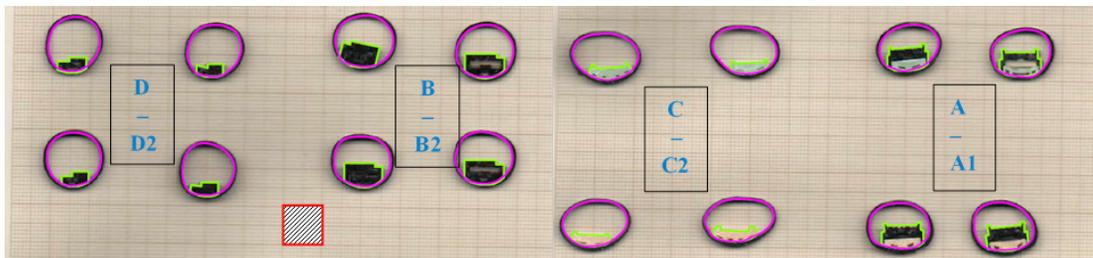


Figura 4 | Determinación del área obstruida, vista transversal de los emisores.

Ensayos en campo

Los ensayos fueron llevados en el campo de prácticas de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas (ETSIAAB-UPM), coordenadas $40^{\circ}26'33.2''N$, $3^{\circ}43'43.5''W$. Se evaluó una unidad de riego ya establecida, con

cultivo de vid, la instalación de riego está compuesta por una tubería porta-ramales de PE de 50 mm de diámetro exterior (40.4 mm de diámetro interior) que alimenta a un conjunto de 17 ramales, separados cada 2.5 m, que totalizan 42.5 m de longitud, si bien, tiene al final un tramo ciego de 29.5 m, para futuras ampliaciones, donde se localiza su extremo. Los ramales en la unidad tienen una longitud de 44 m, diámetro exterior de 16 mm, con goteros integrados autocompensantes de $q=2.3$ L/h, con una separación entre goteros de 0.50 m. Para toda la unidad se realizó un levantamiento topográfico de nivel específico de los puntos más representativos de la unidad, ver Figura 5.

La tubería porta-ramal se conecta a la estación de bombeo general a través de un hidrante. En cabeza se instalaron un manómetro de glicerina (0-6 bar, $\pm 0.4\%$) y una toma manométrica para un manómetro digital, un caudalímetro (modelo M-40, Q_n 10 m³/h) para controlar la presión y caudal de entrada, H_0 y Q_0 . Igualmente, se instalaron elementos similares en la cola del porta-ramal. Además, en cola de los ramales seleccionados para el estudio, se instalaron puntos de medida para manómetros digitales y caudalímetros (modelo M150, Q_n 3 m³/h). Los manómetros digitales empleados en todas las medidas fueron los mismos (modelos 2083P y 2082P, precisión $\pm 0.15\%$).

Los puntos de ubicados en el porta-ramal ($y/L_t=0.102, 0.407, 0.593$ y 0.898) y de los ramales ($x/L=0.102, 0.407, 0.593$ y 0.898) fueron seleccionados de acuerdo con Juana et al. (2007). El caudal de dos emisores consecutivos se midió en cada punto del ramal para poder determinar el coeficiente de variación de manufactura.

En la unidad se realizaron once pruebas experimentales dentro del rango de presión de compensación y se midieron 32 emisores para obtener los parámetros hidráulicos y la uniformidad del riego. Se llevaron a cabo doce experimentos adicionales: tres con el extremo descendente del porta-ramal y ramales cerrados, tres con el extremo del porta-ramal abierto, y seis con los ramales seleccionados abiertos.

Como se indicó anteriormente, la caracterización hidráulica del porta-ramal tuvo una serie de limitaciones debido a que la presión de entrada de la inserción del ramal no se pudo medir fácilmente. Para abordar esto, se midió la presión en cabeza aguas arriba y aguas abajo del porta-ramal y, por lo tanto, se estimó la pérdida de carga producida por la inserción de ramal a través de una rutina de optimización que minimiza las diferencias entre los valores estimados y medidos.

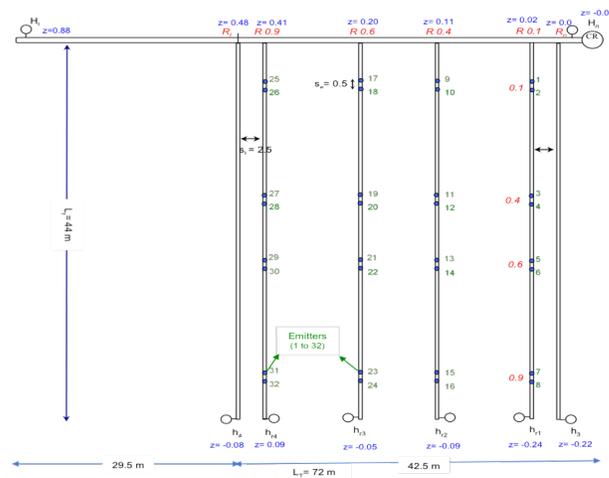


Figura 5 | Esquema de la unidad de riego ensayada en campo.

Métodos propuestos y expresiones utilizadas

Para la caracterización hidráulica de los emisores, ramales, porta-ramal y para la unidad, se utilizaron cálculos iterativos, para secciones consecutivas, o bien el procedimiento “tramo por tramo” y bien, las expresiones clásicas de aproximación utilizadas (Wu y Gitlin, 1975; Wu et al., 1979; Juana et al., 2002b, 2007; Lorenzo y Juana, 2010).

Para el estudio de las pérdidas de carga, como es frecuente, se ha seleccionado la expresión de Blasius, por la pequeña aspereza del polietileno y los pequeños diámetros de las tuberías hacen que no se supere el número de Reynolds 10^5 , hasta el que tiene su zona de validez. Por otra parte, la consideración del posible régimen laminar en el extremo del ramal no tiene efectos prácticos, Benitez y Juana (2012). De esta forma, la pendiente motriz I , o pérdidas de carga por unidad de longitud, en una sección de diámetro interior D por la que circula un caudal Q , en agua con viscosidad cinemática ν , es la indicada en la Ecuación (1), unidades en el Sistema Internacional (S.I.):

$$I = 0.0246 \nu^{0.25} Q^{1.75} D^{-4.75} \quad (1)$$

La curva de gasto en ramales, Ecuación (2), se utilizó para determinar los coeficientes k y x en:

$$q = k h^x, \quad (2)$$

Con goteros no compensantes, se determinó para cada ensayo el caudal medio q_{med} (dividiendo el caudal total Q_0 por el número de goteros) y la presión media del ramal h_{med} fue estimada a partir de la presión en cabeza h_0 o de la presión en cola h_L , y las pérdidas de carga con la Ecuación (3), Juana et al. (2002a):

$$h_{med} \cong h_0 - \frac{m+1}{m+2} hf_r \cong h_L + \frac{1}{m+2} hf_r \quad (3)$$

donde el exponente $m=1.75$ de la expresión de Blasius.

Con los pares (h_{med} , q_{med}) ajustados por regresión de mínimos cuadrados los coeficientes k y x de (2). En vez de h_{med} pudo ser preferible determinar la presión correspondiente al caudal medio $h_{q_{med}}$, ambas pueden relacionarse a través del exponente x (necesario una primera aproximación) y de las pérdidas de carga hf_r en el ramal, Juana et al. (2002b), pero por la experiencia de los autores, es que no se produce diferencias significativas. Por lo que fue de mayor interés, hacer ensayos con diferencias significativas de presión, de lo contrario, sería preferible suponer el exponente x dado por el fabricante y determinar únicamente el coeficiente k . A este respecto, hoy en día los goteros no compensantes tienen frecuentemente valores de x próximos a 0.5 y la adopción de este valor, salvo para casos específicos, debería ser valorado.

Con ramales abiertos en cola se pudo obtener asimismo expresiones aproximadas para determinar h_{med} con goteros no compensantes, no obstante, dado que para estos goteros no se realizaron estos tipos de ensayos, se prefirió calcularlos con una subrutina del método tramo por tramo.

El coeficiente de variación de manufactura (CV_m), relación entre la desviación típica y la media, para cada ensayo de ramal, se determinó en función de las diferencias entre los caudales q_i individuales medidos en los $N=25$ goteros y los que corresponden en dichos puntos, $q_{i\ est}$ a partir de la presión estimada $h_{i\ est}$, en ellos con la k y x obtenida previamente, $q_{i\ est} = k \cdot h_{i\ est}^x$. En concreto, se ha usado la siguiente Ecuación (4):

$$CV_m \cong \sigma\left(\frac{q_i}{q_{est_i}} - 1\right) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum \left(\frac{q_i}{q_{est_i}} - 1\right)^2} \quad (4)$$

De esta forma, en goteros no compensantes se determinó el comportamiento frente a la presión de trabajo. En especial, fue de interés ensayar presiones más bajas que la nominal con objeto de valorar, en algunos casos, si procede, la reducción de presiones para reducir el consumo de energía y, en su caso, el de potencia contratada.

En goteros autocompensantes, la determinación del rango de compensación se realizó observando cuando, al modificar las presiones de los ensayos, los caudales de los goteros cambiaban significativamente. El CV_m fue estimado para cada ensayo directamente con los caudales medidos y con las presiones dentro del rango de compensación. Para la simulación en goteros autocompensantes por debajo de la altura de presión mínima h_{min} del rango de compensación se propuso la Ecuación (5), en la que se introducen variables lógicas:

$$q = q_n \cdot (h \geq h_{min}) + q_n \left(\frac{h}{h_{min}}\right)^{0.5} \cdot (h < h_{min}) \quad (5)$$

Para la caracterización de las pérdidas de carga se propusieron tres métodos: el primero el que llamaremos pérdidas de carga nominales (hf_m) o pérdida de carga de la longitud ensayada cuando descarga el caudal nominal correspondiente a sus goteros; el

segundo la longitud equivalente (le) de pérdida de carga localizada en cada gotero, para esta se supondrá la expresión de Blasius para los tramos uniformes. Finalmente, el coeficiente (K) de pérdida de carga localizada en cada gotero, igualmente suponiendo para los tramos uniformes la expresión de Blasius.

Para el estudio de las pérdidas de carga en el ramal (hf_r) con goteros autocompensantes y el extremo final cerrado, en función de que se consideren el concepto de longitud equivalente le o el coeficiente K , se han usados las Ecuaciones (6) y (7), S.I.:

$$hf_r = \frac{0.0246}{2.75} \nu^{0.25} Q_0^{1.75} D^{-4.75} L \left(1 + \frac{le}{s}\right) \quad (6)$$

$$hf_r = \frac{0.0246}{2.75} \nu^{0.25} Q_0^{1.75} D^{-4.75} L + \frac{K}{3} \frac{L}{s} \left(\frac{4Q_0}{\pi D^2}\right)^2 \frac{1}{2g} \quad (7)$$

siendo: ν la viscosidad cinemática del agua, Q_0 el caudal de entrada, D el diámetro interno de la tubería, L la longitud del ramal, s la separación de los goteros y g la aceleración gravitatoria.

Para goteros no compensantes, las Ecuaciones (6) y (7) fueron válidas únicamente en el caso de que las pérdidas de carga no superen el 20% de la presión media h_{med} . Para ampliar este rango hasta el 80% Juana et al. (2002a) propusieron un coeficiente corrector que depende del exponente del gotero x y del porcentaje mencionado hf_r/h_{med} . Las Ecuaciones (8) y (9), resultantes, han sido en este caso las usadas, S.I.:

$$hf_r = \frac{0.0246}{2.75} \nu^{0.25} Q_0^{1.75} D^{-4.75} L \left(1 + \frac{le}{s}\right) \left[1 - 0.117 x \frac{hf_r}{h_{med}}\right]^2 \quad (8)$$

$$hf_r = \frac{0.0246}{2.75} \nu^{0.25} Q_0^{1.75} D^{-4.75} L \left[1 - 0.117 x \frac{hf_r}{h_{med}}\right]^2 + \frac{K}{3} \frac{L}{s} \left(\frac{4Q_0}{\pi D^2}\right)^2 \frac{1}{2g} \left[1 - 0.125 x \frac{hf_r}{h_{med}}\right]^2 \quad (9)$$

Para los ramales abiertos en cola con goteros autocompensantes, fue necesario medir el caudal que sale por cola Q_L . Con la relación $r_L = Q_L/Q_0$ se justifican las Ecuaciones (10) y (11) propuestas por Benítez y Juana (2012) para estimar hf_r , S.I.:

$$hf_r = \frac{1 - r_L^{2.75}}{1 - r_L} \frac{0.0246}{2.75} \nu^{0.25} Q_0^{1.75} D^{-4.75} L \left(1 + \frac{le}{s}\right) \quad (10)$$

$$hf_r = \frac{1 - r_L^{2.75}}{1 - r_L} \frac{0.0246}{2.75} \nu^{0.25} Q_0^{1.75} D^{-4.75} L + \frac{1 - r_L^3}{1 - r_L} \frac{K}{3} \frac{L}{s} \left(\frac{4Q_0}{\pi D^2}\right)^2 \frac{1}{2g} \quad (11)$$

Siempre puede abordarse el estudio hidráulico “tramo por tramo” en una pequeña subrutina. En este caso, partiendo en cola del gasto desaguado Q_L y con la altura de presión medida h_L se fue tramo a tramo aguas arriba hasta llegar a la sección de entrada. En ésta, los valores Q_0 y h_0 deberían coincidir con los medidos. En cada ensayo, para la coincidencia de Q_0 se corrigió el coeficiente k de desagüe del gotero y para la coincidencia de h_0 se corrigió, bien le , o bien el coeficiente K , de pérdidas localizadas.

Para la determinación de los parámetros de pérdidas locales por las características geométricas de K_g y le_g , se estimaron las pérdidas de carga en las expansiones con el teorema de Belanger-Borda (Juana et al., 2002a), como si fuesen bruscas. Para ello fue también necesario medir la relación (r) entre la sección de obturación producida por el gotero y la sección de libre circulación del flujo en la tubería y estimar el coeficiente de contracción (C_c) o la menor sección del flujo de aguas abajo debida al gotero. El coeficiente de contracción se ha estimado como el de orificios, Juana et al., 2002b, a partir de la relación r y un ángulo medio α de la pared del gotero con respecto a la tubería que se ha considerado de 90° . El valor de K se determinó por la Ecuación (12), donde para cada tipo de emisor, se obtienen r y C_c :

$$K_g = \left(\frac{1}{C_c \cdot r_s} - 1\right)^2 \quad (12)$$

De donde r se obtiene por la Ecuación (13):

$$r = \frac{\omega_r}{\omega} = \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (13)$$

El Coeficiente de contracción C_c , a partir de r o d/D y α , se obtuvo por interpolación en tablas, de ecuaciones aproximadas de ajuste, Juana et al., 2002b, o por la solución del movimiento potencial plano, con una subrutina que resuelve por iteraciones la Ecuación (14):

$$C_c = \frac{1}{1 + (t_D + 1) \cdot \int_0^1 \frac{\sin(\alpha \cdot \xi) \cdot \sin(\pi \cdot \xi)}{(1 - \cos(\pi \cdot \xi)) \cdot (\cos(\pi \cdot \xi) + t_D)} d\xi} \quad \text{con:} \quad t_D = -\cosh\left(\frac{\pi}{\alpha} \cdot \ln \frac{D}{d \cdot C_c}\right) \quad (14)$$

A cada valor de K_g le corresponde un valor de le_g en función de las características del flujo para que representen las mismas pérdidas de carga singulares.

$$le_g = K_g \cdot Q_0^{0.25} \cdot D^{0.75} \cdot v^{-0.25} / 0.324 \quad (15)$$

Para el estudio hidráulico de unidades de campo rectangulares y trapeciales hay expresiones aproximadas de utilidad Juana et al. (2004) y (2005), no obstante, dado que algunos ramales estaban abiertos por cola y otros no, se ha realizado con el apoyo de una subrutina que considera las situaciones concretas ensayadas. De la misma manera, que lo explicado en el ramal, la coincidencia de las presiones en cabeza o pérdidas de carga se consigue modificando los parámetros le o K de las pérdidas de carga localizadas y la de caudales con el coeficiente de la ecuación de desagüe k . De no modificar el valor de k , por considerar que se tiene bien determinado, aparecerá un error entre caudales medidos y estimados.

En la unidad de campo, las pérdidas de carga de la tubería principal se calcularon con las medidas de las presiones en cabeza, en cola y de las cotas. Las pérdidas de carga, bien como en las acometidas de cada ramal (le_{ar}) o bien como K_r , se obtuvieron para la coincidencia entre valores medidos y estimados. Sin embargo, como la conexión de los ramales a la tubería está enterrada, las pérdidas de carga en ramales se estimaron con la cota y presión de cola correspondiente y con la energía estimada en cabeza correspondiente a la de la tubería porta-ramales en el punto de inserción del ramal. En este caso, por una parte, se determinó un valor de le o de K para cada ramal, pero también único para el conjunto determinado haciendo mínima una función objetivo que considere las diferencias entre los valores medidos y estimados.

RESULTADOS

Ensayos en laboratorio

Curva de gasto y coeficiente de variación de manufactura

En los *Emisores autocompensantes*, los resultados muestran que es posible determinar la curva de gasto y el coeficiente de variación de manufactura del emisor con una precisión similar a la que se obtiene con el método normalizado, lo que puede ser más representativo y de poder aplicarse en las instalaciones reales.

La Figura 6 muestra los resultados para los emisores autocompensantes, se observa que los rangos de autocompensación coinciden con los aportados por el fabricante, sin embargo, los caudales resultaron algo más elevado que el aportado. Así, el caudal de descarga disminuye primero marginalmente al aumentar la presión ($4 \leq h_{med} \text{ (m)} \leq 20$), y luego aumentó marginalmente ($20 \leq h_{med} \text{ (m)} \leq 30$), en los emisores A, A2 y B, el emisor B2 presentó un caudal de descarga homogéneo, casi en todas las presiones ($4 \leq h_{med} \text{ (m)} \leq 33$).

Si bien el caudal fue algo más elevado en todos los emisores, como se muestra en la Figura 6 y Tabla 3, se puede observar claramente, que el caudal medido en el gotero B están entre un 18.8% y 14.4% mayor que el caudal nominal indicado por el fabricante ($q_n = 1.6 \text{ L/h}$), en los ensayos normalizados y en el ramal, respectivamente. Por lo contrario, también se puede observar, que el emisor que mejor se comporta y se acerca al caudal aportado por el fabricante es el B2, con un caudal medio de 1.08 L/h en el ensayo normalizado y 1.02 L/h en el ramal.

En todos los ramales se pudo observar un pequeño efecto de histéresis, los caudales medidos fueron mayores durante la fase con presiones crecientes. *A priori*, se podría anticipar que los emisores se comportan como un emisor no compensante fuera del rango de autocompensación, en particular cuando está por debajo de la presión mínima. Por este motivo, se intentó ajustar los puntos obtenidos en las pruebas por debajo del rango de autocompensación a una curva de gasto común al de no compensantes con un $x=0.5$. Con este procedimiento, se observó una buena concordancia entre los puntos y la curva de ajuste, por lo que parece adecuada la propuesta de considerar una curva de gasto tipo orificio hasta la presión mínima (h_{min}) del rango de compensación y un gasto constante por encima de este. La Tabla 3 presenta los resultados referidos al caudal nominal y al coeficiente de variación de manufactura para emisores autocompensantes, determinados a partir de ambos métodos.

La relación entre CV_m y la presión media de los goteros fue insignificante, las pendientes de las regresiones lineales fueron $-3 \cdot 10^{-4}$ ($R^2=0.2$); $1.3 \cdot 10^{-5}$ ($R^2=0.001$); $-6 \cdot 10^{-4}$ ($R^2=0.1$) y $-6 \cdot 10^{-4}$ ($R^2=0.41$) para los emisores A, A2, B, Y B2, respectivamente. por tanto, se puede deducir que el coeficiente de variación de manufactura no depende de la presión.

Tabla 3 | Caudal nominal y coeficiente de variación de manufactura obtenidos por los ensayos normalizados y por el método propuesto en ramales trabajando dentro del rango de compensación.

	ID	Fabricante	Ensayo normalizado		Ensayo ramal	
		L/h	L/h	$(q_{med}/q_n)-1$	L/h	$(q_{med}/q_n)-1$
Caudal nominal, q_n (L/h)	A	2.3	2.52	9.6%	2.43	5.7%
	A2	1.6	1.69	5.6%	1.63	1.9%
	B	1.6	1.9	18.8%	1.83	14.4%
	B2	1	1.08	8.0%	1.02	2.0%
Coeficiente de variación manufactura, $CV_{m med}$	A		0.035 ($\sigma=0.006$)		0.029 ($\sigma=0.006$)	
	A2		0.038 ($\sigma=0.005$)		0.021 ($\sigma=0.003$)	
	B		0.026 ($\sigma=0.003$)		0.019 ($\sigma=0.001$)	
	B2		0.024 ($\sigma=0.003$)		0.017 ($\sigma=0.005$)	

En los *emisores no compensantes*, la Figura 7 muestra los valores obtenidos para los ensayos normalizados y en ramales, de acuerdo con los resultados cabe calificarlos de similares y, por tanto, repetibles, el caudal nominal determinado por ambos métodos se presenta en la Tabla 4. Los exponentes x resultan en todos casos próximos a 0.50. La adopción del exponente $x=0.50$ y el caudal nominal q_n obtenido se considera un buen método para caracterizar la curva de gasto en los goteros no compensantes. Una adopción del exponente $x=0.5$, salvo cuando se indique su no validez, tendría ventajas simplificadoras.

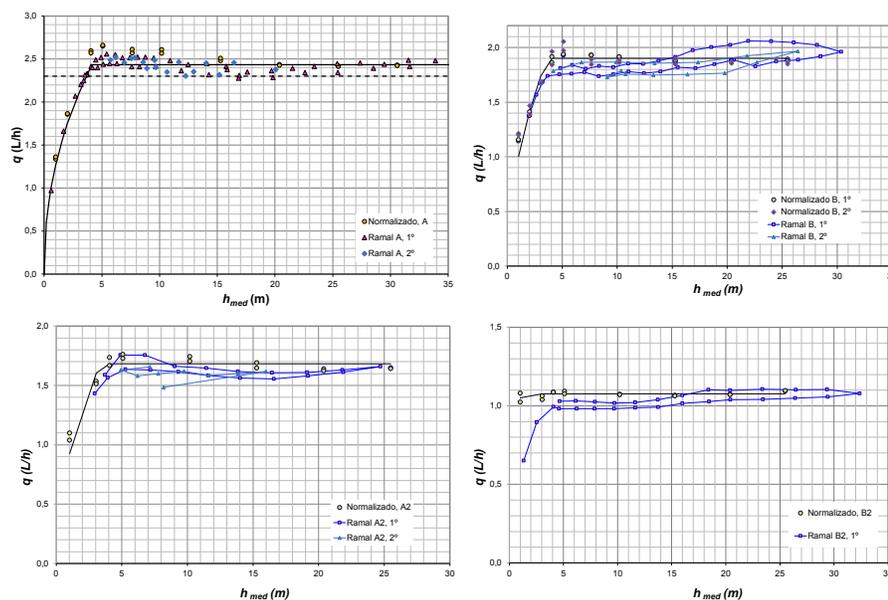


Figura 6 | Curvas de gasto obtenidas en ensayos normalizados y en ensayos de ramales, emisores autocompensantes A, A2, B y B2.

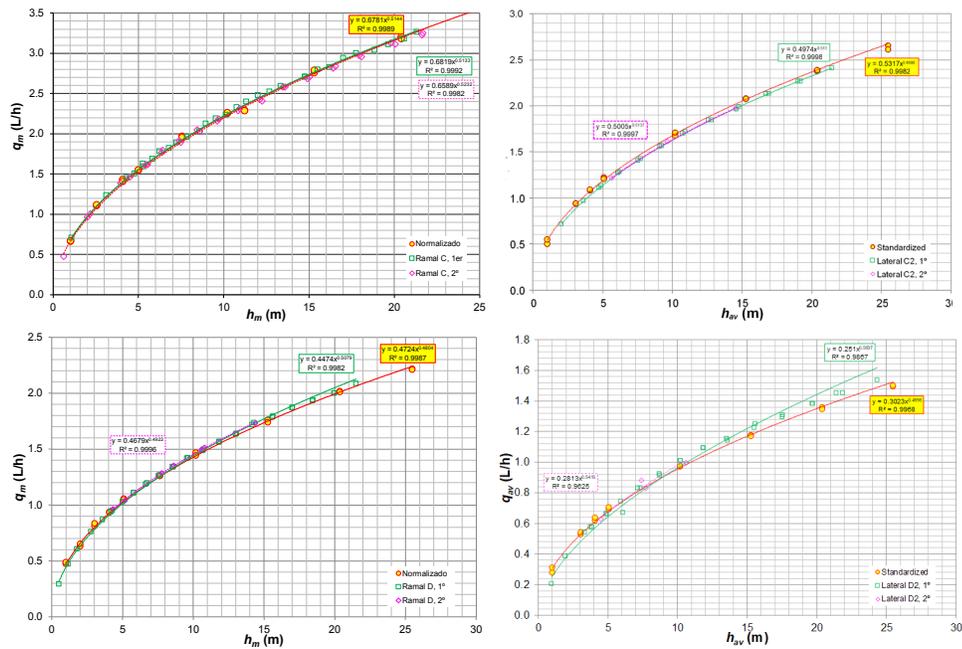


Figura 7 | Curva de gasto obtenida mediante ensayos normalizado y en ensayos en ramales realizados en días distintos (1° y 2°), para emisores no compensantes (C, C2, D Y D2).

La Tabla 4 presenta los resultados referidos al q_n y al CV_m para los emisores no-compensantes, determinados a partir de ambos métodos. La mayoría de los emisores tienen un caudal nominal de acuerdo con el aportado por el fabricante, excepto del emisor C2, que aporta un 9% más. En cuanto al CV_m , se consideran buenos, todos por debajo al 3.5%.

Tabla 4 | Caudal nominal y coeficiente de variación de manufactura obtenidos por los ensayos normalizados y por el método propuesto en ramales.

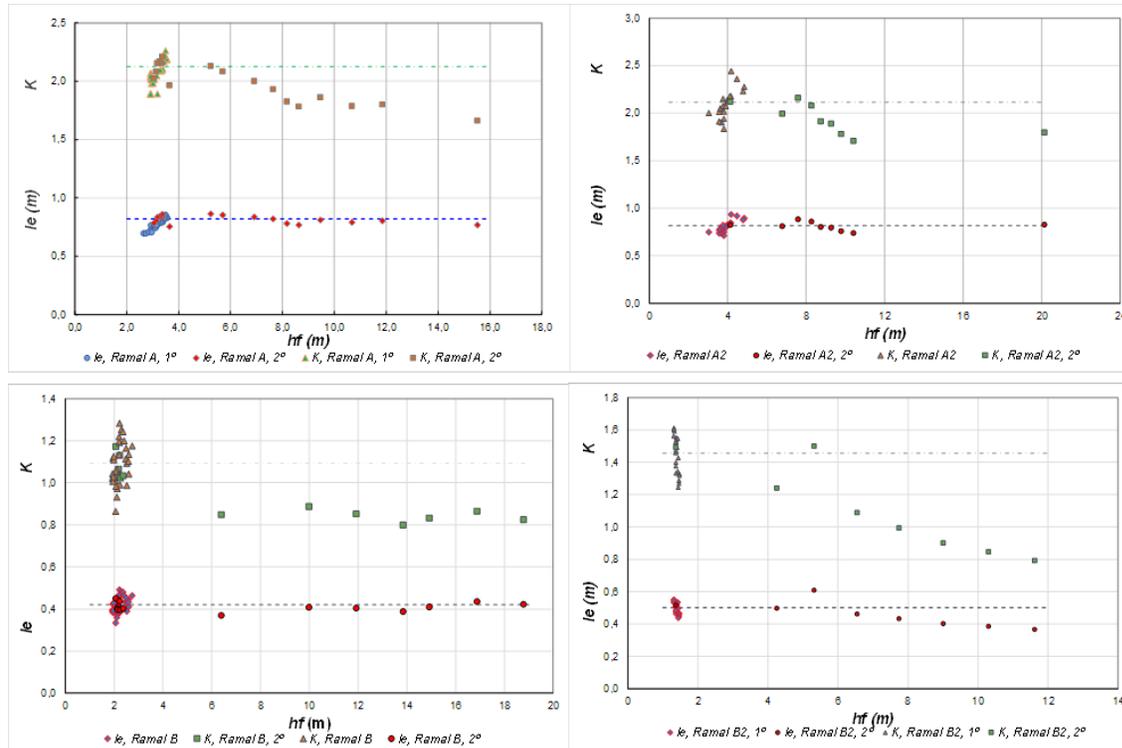
	ID	Fabricante		Ensayo normalizado		Ensayo ramal	
		L/h	L/h	L/h	$(q_{med}/q_n)-1$	L/h	$(q_{med}/q_n)-1$
Caudal nominal, q_n (L/h)	C	2.15	2.24	4.2%	2.25	4.7%	
	C2	1.55	1.69	9.0%	1.64	5.8%	
	D	1.50	1.44	-4.0%	1.46	-2.7%	
	D2	1.00	0.96	-4.0%	0.97	-3.0%	
Coeficiente de variación manufactura, CV_{m_med}	C			0.033 ($\sigma=0.0050$)		0.035 ($\sigma=0.0042$)	
	C2			0.031 ($\sigma=0.0056$)		0.026 ($\sigma=0.0018$)	
	D			0.022 ($\sigma=0.0047$)		0.018 ($\sigma=0.0102$)	
	D2			0.024 ($\sigma=0.0022$)		0.019 ($\sigma=0.0042$)	

La relación lineal entre CV_m y el rango de operación de la presión fue insignificante, las pendientes de las regresiones lineales fueron $-3 \cdot 10^{-4}$ ($R^2=0.27$); $-7 \cdot 10^{-5}$ ($R^2=0.02$); $-3 \cdot 10^{-4}$ ($R^2=0.24$) y $-4 \cdot 10^{-5}$ ($R^2=0.03$) para los emisores C, C2, D y D2, respectivamente, por lo tanto, se puede concluir que, al igual que en los emisores autocompensantes, no hay dependencia entre el CV_m y la presión. Resultado experimental acorde a la teoría para un exponente $x \cong 0.5$, con flujo en el gotero en turbulencia completa. Las variaciones relativas del gasto son proporcionales a las variaciones relativas de la sección de paso, independientes del número de Reynolds o de las variables que no lo modifiquen siempre que no sea de forma muy significativa, en cuyo caso el exponente no sería 0.5. (Juana et al., 2002b; Chamba et al., 2019b).

Pérdidas de carga en los ramales y determinación de los parámetros de pérdidas de carga localizadas

Los resultados obtenidos en los experimentos realizados con la presión en cabeza dentro del rango de compensación permitieron determinar los valores de le y de K con las Ecuaciones (5) y (6). Para los *emisores autocompensantes*, el rango de

variación del caudal medido fue menor que para los no compensantes, por ello, se hicieron ensayos con los ramales abiertos o con salida caudal en cola (Figura 8). En la Figura 8 se observa que le tiene un mejor desempeño que K porque, a diferencia de K , permanece constante para diferentes valores de hf . Esto indica que los valores de le no muestran variaciones significativas a medida que varía el caudal de descarga, en comparación con K , que presenta una tendencia decreciente con el caudal creciente.



Nota: La línea de puntos se corresponde con los valores de le y K para obtener las pérdidas de carga nominales mostradas en la Tabla 5 con la expresión de Blasius.

Figura 8 | Parámetros le y K de las pérdidas de carga localizadas en los ramales A, A2, B y B2.

En cambio, para los *emisores no compensantes*, se observó que en los ramales C y C2, las tuberías estaban claramente ovaladas y que este vicio lo mantuvieron en gran medida durante los ensayos, no alcanzando la forma completamente cilíndrica en ninguno de ellos. En el campo, posiblemente con el paso del tiempo y el calentamiento y enfriamiento diario, posiblemente desaparezca. Los resultados de las pérdidas de carga hf_r mostradas en la Figura 9 y Tabla 5, con un caudal nominal de entrada $Q_{0n}=286$ L/h, para el lateral C fue $hf_r=1.61$ m. Sin embargo, el comportamiento de los puntos Q_0-hf_r medidos fue diferente al anticipado y, se supone que, si la forma ovalada hubiese desaparecido completamente, las diferencias habrían sido menores. Al ajustar una función de potencia a Q_0-hf_r , el exponente obtenido fue 1.45, tanto para los experimentos realizados para el día uno como para el del día dos. Probablemente, los ensayos con un flujo de entrada y presiones de operación más altos hicieron que la sección transversal de la tubería fuera más circular y, por lo tanto, estos resultados pudiesen ser más representativos. Por esta razón, también se representó una curva de envolvente más baja con un exponente $m=1.75$. Con esta curva, las pérdidas de carga para el caudal nominal serían $hf_{r,n}=1.40$; en el resto de los ramales C2, D y D2, la curva Q_0-hf_r ha mostrado el comportamiento esperado, ver Figura 9.

En la Tabla 5, se resumen los resultados medios y varianzas para todos los ramales, en ella, se han considerado como caudales nominales los obtenidos en los ensayos y no los aportados por el fabricante. Acorde con los gráficos, se observa unos valores del error estándar, σ , de le y K significativamente menores en el ramal D, siendo los de le también significativamente menores que los de K . En todos los ramales, se observa un pequeño efecto de histéresis, en la primera fase, con caudal creciente, han resultado unas pérdidas de carga ligeramente mayores que en la posterior fase decreciente.

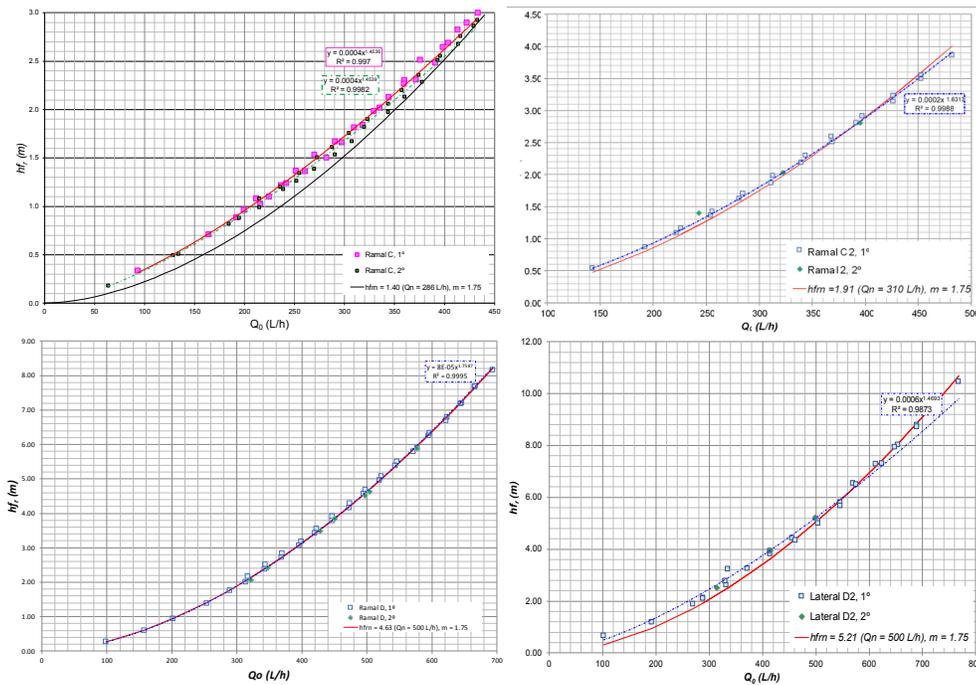


Figura 9 | Pérdidas de carga en los ramales C, C2, D y D2, en función del caudal entrante, curvas de ajustes y curva con expresión de Blasius (exponente $m=1.75$), que ajusta por abajo en C.

Finalmente, en los goteros autocompensantes se analizó si la caracterización de la curva de gasto Ecuación (5) permitía simular adecuadamente los ramales. Para este propósito, se realizaron pruebas en las que se midieron los caudales de los 25 goteros, con el extremo en cola abierto y en los que las presiones estaban por debajo del límite menor del rango de compensación. La Figura 10, muestra los resultados estimados y simulados de estos experimentos en el ramal A.

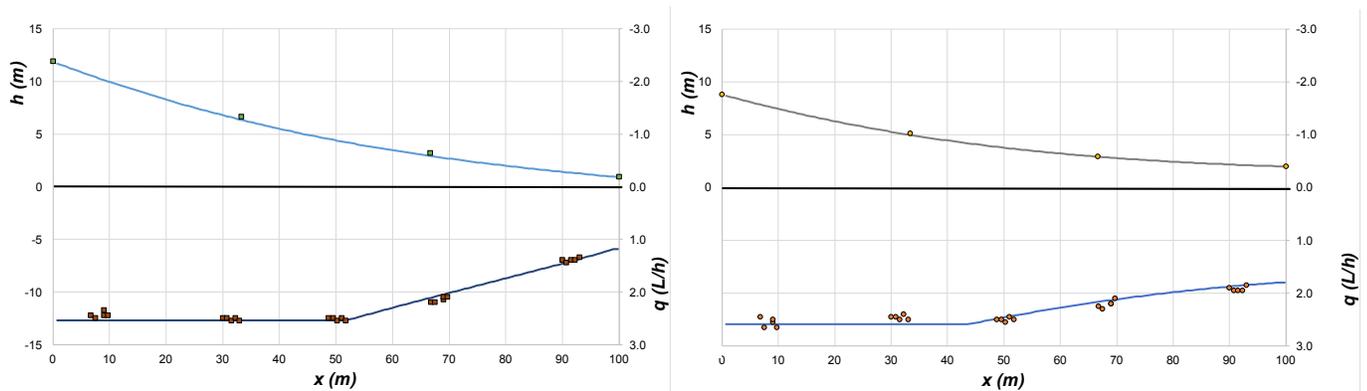


Figura 10 | Valores observados (a) y simulados (b) en dos ensayos para el ramal A.

Con estos resultados y con los mostrados en las curvas de gasto, el método propuesto puede ser usado para los objetivos planteados de caracterización en ramales y unidades de los emisores.

Pérdidas de carga local a partir de las características geométricas de los goteros

Los resultados obtenidos por la caracterización geométrica de los ocho ramales también se muestran en la Tabla 5, se observa los parámetros le_g y K_g estimados, comparados con los valores observados de le y K , y sus diferencias ($\Delta le/le_g$ y $\Delta K/K_g$).

Como era de esperar, los valores de K y K_g son más altos que lo de le y le_g . También la variabilidad de los valores estimados K_g y le_g fueron menores casi en todos los casos, excepto en el modelo B que fueron mayores. Como cabría de esperar, tanto los valores de K como le , son más bajos en los goteros no compensantes (C, C2, D y D2), esto se debe a la forma más plana del emisor.

Tabla 5 | Comparación entre pérdidas de carga para el caudal nominal (hf_{rn}) y parámetros de pérdidas le y K , ensayada en ramales ($_{med}$) y estimadas por la geometría de los emisores ($_g$).

Ramal	Q_n (L/h)		hf_{rn}			le			K		
			ramal	geometría	%	ramal	geometría	%	ramal	geometría	%
A	323	Media	2.79	2.64	-5.38	0.79	0.70	-11.39	2.02	1.83	-9.18
		σ	0.07	0.11		0.04	0.06		0.14	0.13	
A2	325	Media	3.81	3.71	-2.62	0.81	0.76	-6.17	2.02	1.97	-2.47
		σ	0.19	0.07		0.06	0.04		0.12	0.04	
B	311	Media	1.07	1.19	11.21	0.42	0.48	15.66	1.01	1.40	38.27
		σ	0.08	0.08		0.03	0.05		0.11	0.27	
B2	208	Media	1.81	1.75	3.31	0.49	0.45	-8.16	1.31	1.21	-7.27
		σ	0.05	0.04		0.06	0.03		0.24	0.07	
C	286	Media	1.61	1.33	-17.39	0.30	0.13	-57.23	0.84	0.34	-59.57
		σ	0.04	0.20		0.16	0.12		0.56	0.35	
C2	310	Media	1.92	1.64	-14.58	0.25	0.13	-47.36	0.48	0.34	-29.60
		σ	0.05	0.20		0.02	0.08		0.09	0.10	
D	500	Media	4.85	4.00	-17.52	0.18	0.10	-45.35	0.43	0.23	-46.13
		σ	0.05	0.60		0.06	0.06		0.04	0.14	
D2	500	Media	5.48	4.50	-17.88	0.17	0.10	-40.83	0.37	0.23	-37.50
		σ	0.07	0.69		0.02	0.05		0.07	0.10	

Nota: Diferencia de pérdidas de carga expresadas como el porcentaje en relación de los valores medios medidos y estimados por la geometría $\Delta hf_{rn_med} / hf_{rn_g} = (hf_{rn_g} - hf_{rn_med}) / hf_{rn_med}$; $\Delta le/le_g = (le_g - le_{med}) / le_{med}$; $\Delta K/K_g = K_g - K_{med} / K_{med}$.

Ensayos en campo

Uniformidad del riego en la unidad

El caudal medio de todos los goteros y en todos los ensayos fue $q_{med}=2.26$ L/h y el coeficiente de variación $CV_m=0.029$. Si bien fue necesario extremar las precauciones para el agua del gotero no discurriese por la tubería y o no recoger agua desaguada o recoger el agua de otros goteros, situación que ocurre en las circunstancias normales de riego. Cabe concluir que la uniformidad de emisión es muy buena. Las curvas de distribución del agua aplicada de los once ensayos son parecidas y que el rango de caudal representado empieza en 2 L/h, ver Figura 11a.

Si hacemos en cada ubicación el valor medio de las once observaciones y determinamos la curva de distribución de estos valores medios se obtiene la línea negra más gruesa de la Figura 11a. Sobre la curva de distribución media se han etiquetado las ubicaciones a las que corresponde cada punto. Puede así observarse que los goteros 2° y 4° son los que menos agua han aportado, ambas del primer ramal, mientras que el 17° (primero del tercer ramal) y el 15° (séptimo del segundo ramal) los que más. Un riego con un $CV=0.027$ daría una $UD_{1/4}=0.966$, y de considerar la lámina de riego igual a la lámina del cuarto menor, el caudal de cada riego se supondría $q_r=2.26 \cdot 0.966=2.18$ L/h. Bajo estas consideraciones, en algunos riegos podría haber déficit en distintas ubicaciones, pero en global, de aceptar la distribución media determinada, únicamente el gotero 2 sería la que recibe menos agua de la considerada, ver Figura 11b.

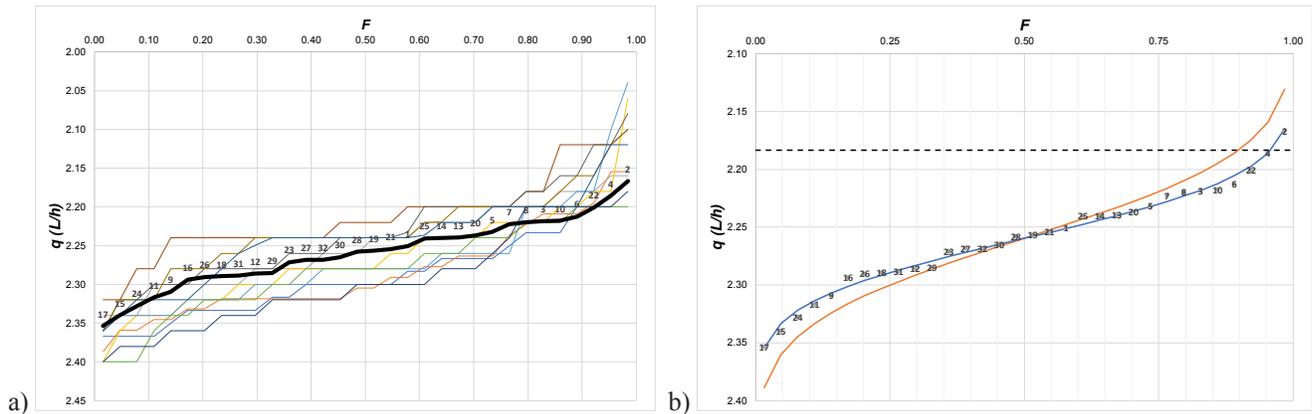


Figura 11 | a) Funciones de distribución del agua en los 11 ensayos y de los valores medios de cada ubicación con indicación de esta. b) Funciones de distribución del agua de un riego, con su caudal del cuarto menor $q_{1/4}$, y de los valores medios.

Caudal descargado en función de la presión en la entrada

La Figura 12 muestra el caudal medio medido q_m comparado con la presión en cabeza de la unidad H_0 en los 11 ensayos comentados más otros 2, con presiones por debajo de las de compensación. Se observa que por debajo de una altura $H_0=6.25$ m, la unidad empieza a reducir su caudal. Como consecuencia, no merece estar por debajo, pero tampoco merece la pena trabajar a más presión de esta, más allá de un pequeño margen de seguridad, pues tampoco se observa mejora en el coeficiente de variación, también representado. Se concluye que el comportamiento H_0-q_{med} es similar al observado en ramales con $h_{med}-q_{med}$. Hemos preferido usar aquí la altura de presión en cabeza H_0 , en vez de la presión media h_{med} aunque tendría también un comportamiento similar, por ser más fácil de controlar y medir en campo.

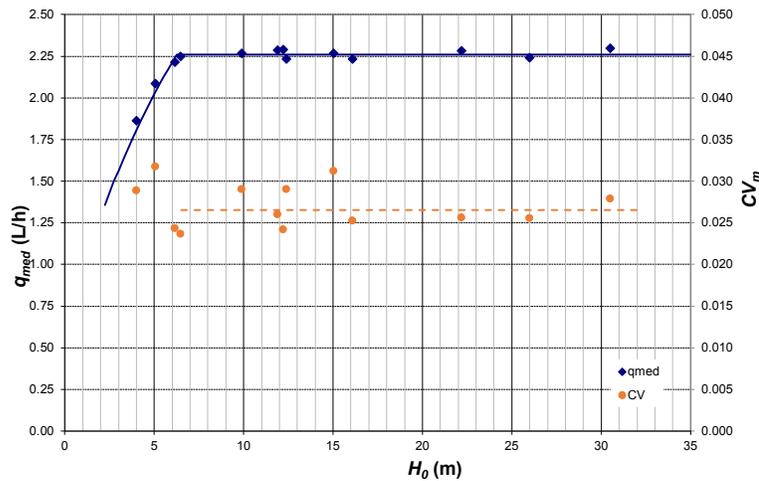


Figura 12 | Caudal medio, q_{med} , y coeficiente de variación, CV_m de los goteros en función de la altura de presión en cabeza, H_0 .

Pérdidas de carga y distribución de presiones en la unidad

La solución ajustada, mostrada en la Figura 13, se corresponde con $le_i=0.67, 0.46, 0.49$ y 0.43 , respectivamente, para los cuatro ramales ensayados y $le_{ar}=0.80$, para la tubería porta-ramales. Se observó que los valores de le , de los ramales, cambian poco en función de la función objetivo a minimizar, por comparación con el valor de le_{ar} de la tubería porta-ramales. Seguramente debido a las pérdidas de carga en ramales eran mayores que las de la tubería porta-ramales, además de ser cuatro. En este caso, se ha preferido, dar un le distinto por ramal, que hacerlo en conjunto, que resultaría $le=0.51$. Los valores de le obtenidos para los

ramales son acordes a los que cabría esperar por la obturación del gotero, con las expresiones de Juana et al. (2002b). La tubería porta-ramales está enterrada y no disponemos información sobre la inserción de los ramales en la tubería porta-ramales ni posibles puntos singulares en la misma. Para la tubería porta-ramales, en la Figura 13, se muestran los valores observados y estimados de los 12 ensayos. Para los ramales, se muestran de esos 12, los 8 en los que se disponía de datos en los ramales. Para cada ensayo, se ha usado un color, los cuatro puntos de mismo color se corresponden a los cuatro ramales.

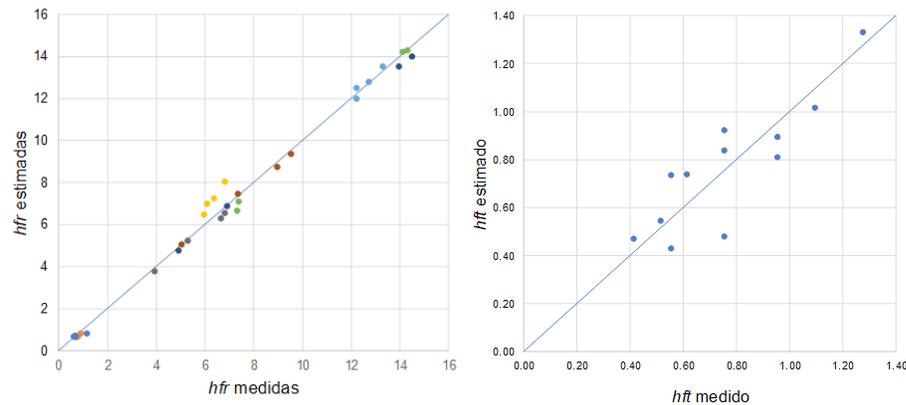


Figura 13 | Pérdidas de carga medidas y estimadas en la tubería porta-ramales, hf_r , y en los ramales, hf_r .

CONCLUSIONES

Los ensayos realizados con ramales de goteo en el laboratorio permitieron la determinación precisa de la curva de descarga, el coeficiente de variación de manufactura y el rango de autocompensación de los emisores. Los valores obtenidos en los experimentos fueron similares a los obtenidos por el método normalizado.

Para los ramales estudiados, el parámetro de pérdida local le arrojó resultados más precisos que los obtenidos con K , debido a su menor dependencia del flujo circulante. En el caso de los goteros autocompensantes, si las pérdidas de carga en los ramales son pequeñas, es conveniente incluir pruebas con el ramal en cola abierto para estimar las pérdidas de carga locales. En el caso de goteros no compensantes, no es necesario, si se dispone de pruebas con presiones significativamente diferentes.

Para los goteros no compensantes ensayados, la adopción de un exponente $x=0.5$ podría tener efectos positivos. De esta manera, la curva de descarga solo estaría definida por el flujo nominal. En los goteros autocompensantes, la presión nominal podría reemplazarse por la presión mínima del rango de compensación, suponiendo un caudal constante para presiones más altas, sin embargo, para presiones más bajas, una ecuación de tipo orificio ($x=0.5$) podría ser suficiente.

La estimación de las pérdidas de carga por las características geométricas mostró una estimación razonable, los valores resultantes del coeficiente K y le , fueron generalmente algo menores que los obtenidos en los ensayos de ramales de goteo.

Los experimentos llevados a cabo en la unidad de campo permitieron la determinación de la curva de descarga y el coeficiente de variación, así como una estimación razonable de las pérdidas localizadas en los laterales y porta-ramales.

La respuesta estimada del caudal medio y su uniformidad a la presión en la entrada de la unidad se puede utilizar para administrar un sistema de riego, tanto la presión en sí, como el tiempo de riego para la lámina de riego deseada.

AGRADECIMIENTOS

Diego Chamba agradece a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) y al Instituto de Fomento al Talento Humano del Gobierno de la República de Ecuador, por la adjudicación de la beca N° 2015-AR7L7871, para estudio de doctorado.

REFERENCIAS

- ASAE. 1998. ASAE Standards. ASAE. 2950 Niles Road, St. Joseph, MI 49085-9659, USA.
- Benítez, L., Juana, L. 2012. Pérdidas de carga localizadas en ramales de riego por goteo, aspectos a considerar en su determinación. *XXIX Congreso Nacional de Riegos*, Albacete-España.
- Bralts, V.F., Edwards, D.M., Wu, I.P. 1987. Drip irrigation design and evaluation based on the statistical uniformity concept. Volume 4, in: *Advances in Irrigation*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-024304-4.50005-5>
- Bralts, V.F., Kesner, D. 1983. Drip irrigation field uniformity estimation. *Trans. American Society of Agricultural and Biological Engineers ASAE*, 26(5), 1367-1374.
- Chamba, D., Zubelzu, S., Juana, L. 2019a. Energy, cost and uniformity in the design of drip irrigation systems. *Biosystems Engineering*, 178(2019), 200-218. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.012>
- Chamba, D., Zubelzu, S. Juana, L. 2019b. Determining hydraulic characteristics in laterals and drip irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 226(2019), 105791. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105791>
- FAO, 1986. Riego localizado. *Estudio FAO Riego y Drenaje n° 36*. FAO Eds, Roma-Italia.
- ISO, 2004. ISO 9261:2004. Agricultural irrigation equipment - Emitters - Specification and test methods. Geneva, Switzerland.
- Juana, L., Losada, A., Rodríguez-Sinobas, L., Sánchez, R. 2004. Analytical relationships for designing rectangular drip irrigation units. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130, 47-59. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2004\)130:1\(47\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2004)130:1(47))
- Juana, L., Rodríguez-Sinobas, L., Losada, A. 2002a. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. I: Methodology. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(6), 376-384. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2002\)128:6\(376\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:6(376))
- Juana, L., Rodríguez-Sinobas, L., Losada, A. 2002b. Determining minor head losses in drip irrigation laterals. II: Experimental study and validation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128(6), 385-396. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2002\)128:6\(385\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:6(385))
- Juana, L., Rodríguez-Sinobas, L., Sanchez, R., Losada, A. 2005. Analytical expressions for hydraulic calculation of trapezoidal drip irrigation units. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(5), 420-432. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:5\(420\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:5(420))
- Juana, L., Rodríguez-Sinobas, L., Sánchez, R., Losada, A. 2007. Evaluation of drip irrigation: Selection of emitters and hydraulic characterization of trapezoidal units. *Agricultural Water Management*, 90, 13-26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.01.007>
- Lorenzo, D., Juana, L. 2010. Alternativas para una norma sobre pérdidas de carga en tuberías emisoras. Presentación y elaboración de resultados. *XXVII Congreso Nacional de Riegos*, León - España.
- Merriam, J.L., Keller, J. 1978. *Farm Irrigation system evaluation: A guide for management*. Utah St. Univ. Logan.
- Palau-Salvador, G., Sanchis, L. H., González-Altozano, P., Arviza-Valverde, J. 2006. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132(December), 522-530. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2006\)132:6\(522\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:6(522))
- Provenzano, G., D., Dio Di, P., Leone, R. 2014. Assessing a Local Losses Evaluation Procedure for Low-Pressure Lay-Flat Drip Laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 140(6), 040104017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000731](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000731)
- Wu, I.P., Gitlin, H.M. 1975. Energy gradient line for drip irrigation laterals. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. 101(4), 323-326.
- Wu, I.P., Howell, T. A., Hiler, E.A. 1979. *Hydraulic design of drip irrigation systems*. *Technical Bulletin*, 105. Hawaii Agricultural Experiment Station, University of Hawaii.