






Evaluación del comportamiento hidráulico de doce modelos de goteros autocompensados en sistemas de riego presurizado

Evaluation of the hydraulic performance of twelve self-regulating dripper models in pressurized irrigation systems

Marlon Fernando Monge-Freile^{1*} , Guillermo Freire-Martínez² , Belén Estefanía Simbaña-Cifuentes¹ ,

Katiuska Carolina Molina-Yépez¹ , José Noel Condori-Cahuapaza³ 

RESUMEN

La evaluación de goteros autocompensados es fundamental para optimizar la uniformidad del riego y mejorar la eficiencia en el uso del agua. El objetivo de este estudio fue analizar el desempeño hidráulico de cuatro tipos de goteros autocompensados bajo diferentes condiciones de presión y caudal nominal. El experimento se realizó en febrero de 2024 en el cantón Rocafuerte, provincia de Manabí, Ecuador. Se evaluaron cuatro modelos de gotero con tres caudales nominales (2, 4 y 8 L/h) y cuatro niveles de presión, mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial (4×4), que generó 16 tratamientos con cinco repeticiones. Las variables analizadas fueron el coeficiente de variación de fabricación, el coeficiente de uniformidad y la diferencia porcentual entre el caudal nominal y el caudal medio, conforme a la norma ISO 9261:2004. Los resultados evidenciaron diferencias en la calidad de fabricación y desempeño hidráulico entre los modelos. Los goteros B y D mostraron mejor ajuste al caudal nominal en varios tratamientos, mientras que los modelos A y C presentaron mayores desviaciones, especialmente bajo ciertas presiones. Los mayores coeficientes de uniformidad se registraron en el modelo B para 4 y 8 L/h, y en el modelo D para 2 L/h. Se concluye que la presión influye significativamente en el rendimiento hidráulico de los goteros, con diferencias según modelo y caudal, destacándose el modelo B por su mayor consistencia.

Palabras clave: coeficiente de uniformidad, goteros autocompensados, comportamiento hidráulico, caudal nominal, riego presurizado.

ABSTRACT

The evaluation of self-regulating drippers is essential for optimizing irrigation uniformity and improving water use efficiency. The objective of this study was to analyze the hydraulic performance of four types of self-regulating drippers under different pressure and nominal flow conditions. The experiment was conducted in February 2024 in the Rocafuerte canton, Manabí province, Ecuador. Four dripper models were evaluated at three nominal flow rates (2, 4, and 8 L/h) and four pressure levels, using a completely randomized factorial design (4×4), which generated 16 treatments with five replicates. The variables analyzed were the manufacturing coefficient of variation, the uniformity coefficient, and the percentage difference between the nominal flow rate and the average flow rate, in accordance with ISO 9261:2004. The results revealed differences in manufacturing quality and hydraulic performance among the models. Drippers B and D showed better conformity to the nominal flow rate in several treatments, while models A and C exhibited greater deviations, especially under certain pressures. The highest uniformity coefficients were recorded for model B at 4 and 8 L/h, and for model D at 2 L/h. It is concluded that pressure significantly influences the hydraulic performance of the drippers, with differences depending on the model and flow rate, with model B standing out for its greater consistency.

Keywords: uniformity coefficient, pressure-compensating emitters, hydraulic performance, nominal flow rate, pressurized irrigation.

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

²Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador.

³Universidad Tecnológica de los Andes, Apurímac, Perú.

*Autor de correspondencia. E-mail: mmongef@uteq.edu.ec

I. INTRODUCCIÓN

La eficiencia del riego por goteo depende en gran medida de la uniformidad de aplicación y la estabilidad del caudal emitido (Duarte et al., 2022), factores clave para optimizar el uso del agua y maximizar la productividad agrícola en escenarios de creciente escasez hídrica (Liotta et al., 2015). En este contexto, los sistemas de riego localizado de alta frecuencia han ganado relevancia debido a su capacidad para suministrar agua de forma precisa y controlada, especialmente en cultivos intensivos y condiciones edafoclimáticas variables (Baeza & Contreras, 2020).

En los últimos años, la investigación ha evidenciado un creciente interés en mejorar el desempeño hidráulico de los emisores, particularmente de los goteros autocompensados, los cuales incorporan membranas internas que permiten mantener un caudal relativamente constante ante variaciones de presión (Soto-Bravo & Monge-Palma, 2023; Salvador et al., 2021). Wurda et al. (2025) destacan que estos dispositivos contribuyen significativamente a mejorar la uniformidad de distribución del agua y la eficiencia del riego, especialmente en terrenos con pendientes o sistemas de conducción extensos, donde las pérdidas de carga son frecuentes. Asimismo, se ha reportado que características de diseño, como la posibilidad de desmontaje, pueden influir en el mantenimiento y la durabilidad del sistema (Alvarenga et al., 2022).

Sin embargo, pese a estos avances, persisten limitaciones en la literatura científica relacionadas con la evaluación comparativa de modelos comerciales bajo condiciones reales de operación. En particular, existe escasa evidencia actualizada que analice simultáneamente el efecto de diferentes niveles de presión y caudales nominales sobre variables clave como la uniformidad de emisión, la variabilidad de fabricación y el grado de ajuste al caudal nominal (Xing et al., 2025). Además, muchos estudios se han desarrollado en condiciones controladas, lo que limita su aplicabilidad a contextos productivos específicos (Sarker et al., 2019).

Esta falta de información resulta relevante, ya que la selección inadecuada de emisores puede comprometer la eficiencia del sistema de riego, incrementando el

consumo de agua y reduciendo el rendimiento de los cultivos. Por ello, es necesario generar evidencia experimental que permita evaluar el comportamiento hidráulico real de los goteros autocompensados en condiciones representativas de campo, contribuyendo a una mejor toma de decisiones técnicas y al cumplimiento de estándares internacionales de calidad (Mensah et al., 2024).

En este contexto, el presente estudio se enfoca en la evaluación de cuatro modelos de goteros autocompensados, considerando tres caudales nominales (2, 4 y 8 L/h) y cuatro niveles de presión, bajo un diseño experimental completamente al azar con arreglo factorial. El análisis se centra en variables hidráulicas clave, como el coeficiente de variación de fabricación, el coeficiente de uniformidad y la diferencia porcentual entre el caudal nominal y el caudal medido, en condiciones experimentales desarrolladas en el cantón Rocafuerte, Ecuador.

El objetivo general de esta investigación fue analizar el desempeño hidráulico de diferentes modelos de goteros autocompensados bajo distintas condiciones de presión y caudal nominal. Como pregunta de investigación se plantea: ¿cómo influyen la presión y el tipo de gotero en la uniformidad y precisión del caudal emitido? Se plantea como hipótesis que existen diferencias significativas en el desempeño hidráulico entre modelos de goteros, determinadas por la interacción entre la presión de operación y el caudal nominal.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Sitio experimental

La investigación se llevó a cabo en una parcela de 500 m² durante febrero de 2024, ubicada en el cantón Rocafuerte de la provincia de Manabí en las coordenadas geográficas 0° 55' 02.86" S, 80° 26' 33.30" O. La altitud del lugar donde se realizó la investigación es de 90 metros sobre el nivel del mar. Posee una temperatura anual media de 24.5 °C y precipitaciones anuales promedio de 397.4 mm. El cantón Rocafuerte posee dos tipos de clima: tropical megatérmico semiárido y tropical megatérmico seco. La evapotranspiración potencial va entre 1400 y 1500 mm.

Diseño experimental y análisis estadístico

El estudio consideró dos factores principales: el modelo comercial de gotero (Factor A) y los niveles de presión del agua (Factor B). El Factor A estuvo conformado por cuatro modelos comerciales de goteros autocompensados, denominados Gotero A, Gotero B, Gotero C y Gotero D. Cada modelo corresponde a un producto específico cuyas características (como país de origen, diseño desarmable o no desarmable y fabricante) no se evaluaron de manera independiente, sino de forma conjunta como parte del modelo comercial. Por su parte, el Factor B contempló cuatro niveles de presión: B1 (10 mca), B2 (20 mca), B3 (30 mca) y B4 (40 mca).

El experimento se estructuró bajo un diseño factorial 4×4 , con cinco repeticiones por tratamiento, evaluándose goteros de 2, 4 y 8 L h⁻¹. Aunque el caudal nominal fue considerado como una dimensión analítica adicional, este no se incorporó formalmente como factor dentro del diseño experimental; por tanto, el análisis se realizó de manera independiente para cada nivel de caudal, equivalente a la conducción de tres experimentos separados.

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) bifactorial para cada caudal nominal, con el fin de determinar los efectos principales de los factores en estudio y su interacción. Previo al ANOVA, se verificaron los supuestos de normalidad de los residuos y homogeneidad de varianzas.

Cuando se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, las medias fueron comparadas mediante la prueba de Diferencia Mínima Significativa (LSD) de Fisher al 5 % de probabilidad ($\alpha = 0.05$). El uso de la prueba LSD se justifica debido a que: (i) el ANOVA previo mostró efectos significativos, condición necesaria para su aplicación; (ii) el número de tratamientos es moderado y el diseño es balanceado, lo que mantiene controlado el error tipo I; y (iii) el interés del estudio se centra en comparaciones específicas entre medias de tratamientos, más que en un control estricto del error familiar, para lo cual la prueba LSD resulta adecuada y con mayor poder estadístico que métodos más conservadores. En la Tabla 1 se presentan los tratamientos resultantes de la interacción entre los dos factores en estudio para cada caudal nominal.

Tabla 1. Tratamientos del banco de ensayos.

Número de tratamiento	Factor A. Modelo comercial de gotero	Factor B. Presión de agua
T 1	Autocompensado desarmable - China	10 mca
T 2	Autocompensado no desarmable - Israel	10 mca
T 3	Autocompensado no desarmable - España	10 mca
T 4	Autocompensado desarmable - Italia	10 mca
T 5	Autocompensado desarmable - China	20 mca
T 6	Autocompensado no desarmable - Israel	20 mca
T 7	Autocompensado no desarmable - España	20 mca
T 8	Autocompensado desarmable - Italia	20 mca
T 9	Autocompensado desarmable - China	30 mca
T 10	Autocompensado no desarmable - Israel	30 mca
T 11	Autocompensado no desarmable - España	30 mca
T 12	Autocompensado desarmable - Italia	30 mca
T 13	Autocompensado desarmable - China	40 mca
T 14	Autocompensado desarmable - Israel	40 mca
T 15	Autocompensado no desarmable - España	40 mca
T 16	Autocompensado desarmable - Italia	40 mca

Manejo del experimento

Los emisores seleccionados para este estudio fueron un total de 12 modelos de goteros (Tabla 2), distribuidos de la siguiente manera: cuatro goteros autocompensados con un caudal nominal de 8 L/h, cuatro de 4 L/h y cuatro de 2 L/h. Cabe destacar que los doce modelos evaluados provienen de cuatro fabricantes distintos, considerando tres modelos por fabricante con diferentes caudales nominales (2, 4 y 8

L/h), lo que suma un total de 12 modelos de goteros autocompensados.

Los ensayos del comportamiento hidráulico de los goteros se llevaron a cabo durante febrero de 2024, en las primeras horas de la mañana, entre las 6:30 a.m. y las 8:00 a.m. El agua utilizada en el experimento fue tomada de la red de agua potable del cantón Rocafuerte.

Tabla 2. Características de goteros evaluados.

Modelo referencia	Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)	Presión de trabajo (bar)	Procedencia
Gotero A	Autocompensado desarmable	8	1.0 - 3.0	China
Gotero B	Autocompensado no desarmable	8	0.5 - 4.0	Israel
Gotero C	Autocompensado no desarmable	8	0.6 - 3.5	España
Gotero D	Autocompensado desarmable	8	1.0 - 4.0	Italia
Gotero A	Autocompensado desarmable	4	1.0 - 3.0	China
Gotero B	Autocompensado no desarmable	4	0.5 - 4.0	Israel
Gotero C	Autocompensado no desarmable	4	0.6 - 4.0	España
Gotero D	Autocompensado desarmable	4	1.0 - 4.0	Italia
Gotero A	Autocompensado desarmable	2	1.0 - 3.0	China
Gotero B	Autocompensado no desarmable	2	0.5 - 4.0	Israel
Gotero C	Autocompensado no desarmable	2	0.6 - 3.5	España
Gotero D	Autocompensado desarmable	2	1.0 - 4.0	Italia

Determinación del caudal

Para la determinación del caudal, se estableció una estructura experimental clara en función del número de emisores, tratamientos y repeticiones. Se evaluaron tres caudales nominales (2, 4 y 8 L/h) y cuatro niveles de presión (10, 20, 30 y 40 mca), con cinco repeticiones por tratamiento.

Cada unidad experimental estuvo conformada por un emisor individual, medido de forma independiente. En total, se utilizaron 60 goteros: 20 emisores para cada caudal nominal (2, 4 y 8 L/h), los cuales se distribuyeron equitativamente en los diferentes tratamientos.

De esta manera, para cada combinación de presión y caudal nominal se evaluaron cinco emisores ($n = 5$), correspondientes a las cinco repeticiones. El caudal total del sistema (280 L/h) se utilizó únicamente como referencia para la selección del equipo hidráulico, pero

las mediciones se realizaron de manera individual por emisor, garantizando precisión en la estimación de las variables hidráulicas.

Selección del equipo de bombeo

La selección del equipo de bombeo se basó en un análisis técnico del caudal requerido, las condiciones operativas del sistema y la altura manométrica necesaria. El sistema fue diseñado para operar a cuatro niveles de presión (10, 20, 30 y 40 mca), por lo que se seleccionó una bomba eléctrica de 1 HP, con capacidad de alcanzar hasta 44 mca, asegurando un funcionamiento adecuado durante las pruebas.

El dimensionamiento consideró un caudal total de 280 L/h, correspondiente al funcionamiento simultáneo de los 60 emisores instalados (20 de 8 L/h, 20 de 4 L/h y 20 de 2 L/h), garantizando condiciones estables de operación durante el ensayo.

Instalación del sistema experimental

El sistema se instaló utilizando un tanque de almacenamiento de agua con capacidad de 220 L como fuente de alimentación, una bomba eléctrica de 1 HP y una tubería principal de 25.4 mm de diámetro. En la descarga de la bomba se colocó una válvula de paso utilizada como retorno hacia el tanque, lo que permitió regular la presión del sistema de acuerdo con los niveles establecidos en los tratamientos (10, 20, 30 y 40 mca).

Se incorporó una válvula de aire de 3/4" y un filtro de discos de 120 mesh (25.4 mm) para garantizar la limpieza del sistema y evitar obstrucciones en los emisores. La presión fue monitoreada mediante manómetros de glicerina con rango de medición de 0 a 60 mca, precisión ± 1.6 % del fondo de escala y resolución de 1 mca, previamente calibrados mediante comparación con un manómetro patrón antes del inicio del experimento. Estos instrumentos se instalaron en la línea principal, antes y después de los laterales de riego, con el fin de verificar la estabilidad y uniformidad de la presión en el sistema. Los laterales de riego, de 16 mm de diámetro, fueron suspendidos mediante amarras plásticas fijadas a alambre galvanizado tensado entre estacas ubicadas en los extremos, asegurando una adecuada alineación. Cada lateral contó con una válvula de paso independiente para el control del flujo.

Se evaluaron un total de 60 emisores autocompensados, correspondientes a tres caudales nominales (2, 4 y 8 L/h), con 20 emisores por cada nivel de caudal. Los emisores se distribuyeron en cuatro líneas laterales, manteniendo un espaciamiento de 50 cm entre ellos. Cada unidad experimental correspondió a un emisor individual, y para cada combinación de presión y caudal nominal se realizaron cinco repeticiones ($n = 5$), garantizando consistencia en el diseño experimental y la obtención de datos confiables.

Aforo

La medición del volumen de agua emitido por cada gotero se realizó mediante recolección directa en recipientes individuales colocados debajo de cada emisor. El volumen recolectado se determinó utilizando una probeta graduada de 500 mL, con

resolución de 1 mL y precisión ± 1 % del volumen total, previamente verificada mediante calibración con agua destilada a temperatura ambiente.

El tiempo de aforo se estableció en 5 minutos para cada medición, utilizando un cronómetro digital con resolución de 0.01 s y precisión ± 0.1 s, el cual fue verificado antes de su uso. Previo a cada registro, el sistema se dejó estabilizar durante 2 minutos a la presión correspondiente, con el fin de garantizar condiciones de flujo constante.

Para el control del error instrumental y experimental, cada medición se realizó en condiciones controladas de presión y se evitó la presencia de burbujas de aire en las líneas. Además, se implementó un criterio de depuración de datos, mediante el cual se descartaron valores atípicos que excedieran ± 10 % respecto al promedio de las repeticiones dentro de cada tratamiento, siempre que dicha desviación no pudiera atribuirse a condiciones operativas verificables (Figura 1).

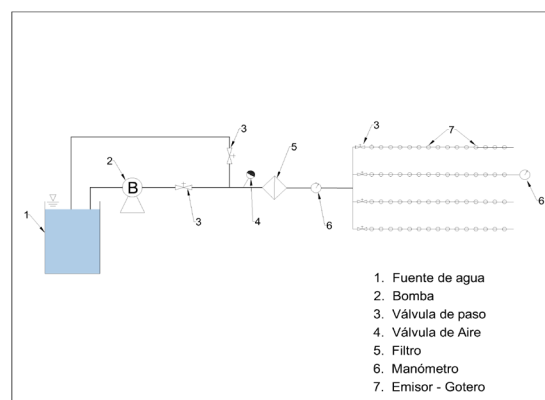


Figura 1. Esquema de instalación del experimento.

Variables evaluadas

Coefficiente de variación de fabricación

Se determinó como el cociente entre la desviación estándar y el caudal promedio suministrado por los goteros evaluados, expresado en porcentaje. Este indicador permite evaluar la uniformidad en la fabricación de los emisores (Mangrio et al., 2013). La fórmula empleada para su cálculo fue la siguiente:

$$CVF = \frac{\sigma_q}{q_a} * 100$$

Donde CVF es el coeficiente de variación de fabricación (%), σ_q es la desviación típica de los caudales evaluados, en litros por hora y q_a es el caudal medio entregado por los goteros evaluados, en L/h. Según el criterio de coeficiente de variación de fabricación se clasifica de la siguiente forma (Tabla 3).

Tabla 3. Clasificación coeficiente de variación de fabricación.

Coeficiente de variación de fabricación	Clasificación
Menor a 10 %	Excelente
10 – 19 %	Bueno
20 – 29 %	Aceptable
30 – 40 %	Pobre
Mayor a 40 %	Inaceptable

Coeficiente de uniformidad de los goteros (CU)

El coeficiente de uniformidad de los goteros se determinó aplicando la ecuación propuesta por Keller y Karmeli, la cual considera el coeficiente de variación de fabricación, el número de emisores por planta (en este caso, uno), el caudal mínimo registrado y el caudal promedio de los emisores evaluados. El resultado se expresa en forma porcentual, permitiendo valorar la uniformidad del sistema de riego. La ecuación utilizada en la presente investigación para calcular el coeficiente de uniformidad (Keller & Karmeli, 1974), se aplicó la siguiente fórmula:

$$CU (\%) = 100 * \left(1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{e}} \right) * \frac{q_{min}}{q_{med}}$$

Fuente: .

Donde CU es el coeficiente de uniformidad expresado en porcentaje, CV es el coeficiente de variación de fabricación, e es el número de emisores por planta, q_{min} es el caudal mínimo de los emisores considerados y q_{med} es el caudal medio de los emisores considerados. En tanto que el coeficiente de uniformidad está clasificado de la siguiente manera:

Tabla 4. Clasificación coeficiente de uniformidad.

Coeficiente de uniformidad CU (%)	Clasificación
Superior a 90 %	Excelente
81 - 90 %	Bueno
71 – 80 %	Aceptable
60 – 70 %	Pobre
Menor a 60 %	Inaceptable

Diferencia entre el caudal nominal y el caudal medio aforado

La diferencia entre el caudal nominal y el caudal medio aforado se calculó comparando el promedio de los caudales medidos en cada repetición con el caudal nominal especificado por el fabricante para cada gotero evaluado. Esta variable permite evaluar la precisión y consistencia de los emisores analizados. De acuerdo con la norma ISO 9261:2004, el caudal medio aforado no debe diferir en más de ± 7 % respecto al valor nominal indicado por el fabricante. Este umbral representa un criterio internacionalmente aceptado para calificar la calidad y el desempeño de los goteros en cuanto a exactitud de caudal.

III. RESULTADOS

Coeficiente de variación de fabricación

El coeficiente de variación de fabricación difirió entre modelos para los tres caudales nominales evaluados, lo que evidencia diferencias en la uniformidad de fabricación entre los emisores. El análisis de varianza mostró diferencias estadísticamente significativas entre los modelos de goteros para los tres caudales nominales evaluados: 8, 4 y 2 L/h.

Goteros de 8 L/h: La prueba de comparación de medias de Fisher al 5 % identificó tres rangos de significancia en el coeficiente de variación de fabricación (ver Tabla 5). En este grupo, los goteros B (Israel) y C (España) se ubicaron en el rango “a”, demostrando un rendimiento destacado con coeficientes promedio de 5.35 % y 5.50 %, respectivamente.

Tabla 5. Comportamiento de los modelos comerciales de goteros en el CVF promedio.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)		
	8		
	CVF (%)		Clasificación CVF
Gotero A	22.15	c	Aceptable
Gotero B	5.35	a	Excelente
Gotero C	5.50	a	Excelente
Gotero D	7.75	b	Excelente
Promedio	10.19		
Coefficiente de variación %	29.03		
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	1.8680		

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

Para analizar la interacción entre los diferentes modelos comerciales de goteros y las presiones aplicadas, se realizaron pruebas de comparación de medias utilizando la prueba de Fisher al 5 %, lo que permitió identificar ocho niveles de significancia estadística (Tabla 6).

Los resultados mostraron que el gotero B, de origen israelí, presentó los coeficientes de variación promedio más bajos, con valores de de 5.35 % y 3.00 % bajo presiones de 10 y 20 mca, respectivamente, ubicándose en el rango de mayor uniformidad (rango “a”). Por su parte, los goteros de origen español alcanzaron coeficientes de variación de 3 % y 6.2 % a presiones de 30 y 40 mca, respectivamente, manteniéndose dentro de un desempeño excelente. En contraste, el gotero A, fabricado en China, registró de forma consistente los coeficientes de variación más elevados, destacando un valor de 31.6 % bajo una presión de 40 mca, lo que, según los criterios técnicos, lo clasifica como de bajo desempeño en términos de uniformidad.

Tabla 6. Comportamiento de goteros y niveles de presión en CVF con caudal nominal 8 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal 8 L/h							
	Presión (mca)							
	10		20		30		40	
	CVF (%)		CVF (%)		CVF (%)		CVF (%)	
Gotero A	22.15	c	16.60	f	21.00	g	31.60	h
Gotero B	5.35	a	3.00	ab	9.20	de	7.20	cde
Gotero C	5.50	a	4.00	abc	3.00	ab	6.20	bcd
Gotero D	7.75	b	10.00	e	6.60	bcde	7.20	cde
Promedio	10.19							
CV (%)	29.03							
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	3.73607							

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

Para el caudal nominal 4 L/h, en esta variable la prueba de Fisher al 5 % estableció tres rangos de significación (Tabla 7). Compartieron el rango (a) con los promedios más bajos, los goteros B de procedencia israelí y los goteros C de origen español, con 4.25 % y 4.90 % respectivamente, lo que se constituye en un desempeño excelente. Los goteros A obtuvieron el CVF más alto con 18.8 %.

Tabla 7. Comportamiento de modelos comerciales de goteros en el CVF promedio para goteros 4 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)		
	4		
	CVF (%)		Clasificación CVF
Gotero A	18.80	c	Bueno
Gotero B	4.25	a	Excelente
Gotero C	4.90	a	Excelente
Gotero D	10.50	b	Bueno
Promedio	9.61		
Coefficiente de variación %	31.49		
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	1.9123		

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

En relación con la interacción entre los modelos comerciales de goteros y las presiones, la prueba de Fisher al 5 % estableció nueve rangos de significación (Tabla 8). El gotero B, junto con las presiones de 20, 30 y 40 mca, presentó los CVF promedio más bajos, situándose entre el 2 % y el 3 % (rango a), lo que se clasifica como excelente. Por otro lado, el gotero A, con una presión de 40 mca, exhibió el CVF promedio más alto, con un 31 %, categorizado como pobre.

Tabla 8. Comportamiento de goteros y niveles de presión en CVF con caudal nominal 4 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal 4 L/h							
	Presión (mca)							
	10		20		30		40	
	CVF (%)		CVF (%)		CVF (%)		CVF (%)	
Gotero A	25.8	h	7.00	bcd	11.40	efg	31.00	i
Gotero B	9.00	def	3.00	a	3.00	a	2.00	a
Gotero C	3.80	ab	7.80	cde	4.00	abc	4.00	abc
Gotero D	7.80	cde	8.40	de	12.80	fg	13.00	g
Promedio	9.61							
CV (%)	31.49							
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	3.82449							

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

En el caudal nominal de 2 L/h, la prueba de Fisher al 5 % estableció tres rangos de significación (Tabla 9). Se observó el menor coeficiente de variación de fabricación (CVF) en el gotero D de procedencia italiana, con un valor de 2.40 %, dentro del rango (a), lo que indica un desempeño excelente según la clasificación. En contraste, el gotero A nuevamente exhibió el coeficiente más alto con 18.85 %.

Tabla 9. Comportamiento de modelos comerciales de goteros en el CVF promedio para goteros 2 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)		
	2		
	CVF (%)		Clasificación CVF
Gotero A	18.85	c	Bueno
Gotero B	4.90	ab	Excelente
Gotero C	7.45	b	Excelente
Gotero D	2.40	a	Excelente
Promedio	8.40		
Coeficiente de variación %	63.16		
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	3.3514		

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

En relación a la interacción entre los modelos comerciales de goteros y las presiones aplicadas, la prueba de Fisher al 5 % reveló cinco rangos significativos para esta relación (Tabla 10). Se observó que los goteros D exhibieron los valores promedio más bajos en las presiones de 10, 20 y 30 mca, con coeficientes de variación promedio (CVF) de 2 %, 2.60 % y 2 %, respectivamente. Además, los goteros de tipo B, de origen israelí, bajo una presión de 40 mca, mostraron un CVF de 2 %. En contraste, el gotero A registró el CVF más alto, alcanzando un 38.6 % bajo una presión de 40 mca.

Tabla 10. Comportamiento de goteros y niveles de presión en CVF con caudal nominal 2 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal 2 L/h							
	Presión (mca)							
	10		20		30		40	
	CVF (%)		CVF (%)	CVF (%)		CVF (%)		CVF (%)
Gotero A	21.2	d	7.40	abc	8.20	abc	38.60	e
Gotero B	5.00	ab	4.80	ab	7.80	abc	2.00	a
Gotero C	4.00	ab	4.40	ab	9.40	bc	12.00	c
Gotero D	2.00	a	2.60	a	2.00	a	3.00	ab
Promedio	8.40							
CV (%)	63.16							
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	6.70282							

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

El coeficiente de variación de fabricación (CVF) generalmente no es proporcionado por los fabricantes de goteros, y esta omisión es común en la mayoría de las marcas analizadas en esta investigación. En los goteros tipo B, C y D se observó un buen coeficiente de variación de fabricación (CVF), lo que sugiere una menor variabilidad hidráulica entre unidades del modelo evaluado.

Coeficiente de Uniformidad

El análisis de varianza reveló diferencias significativas entre los modelos comerciales de goteros en cuanto al coeficiente de uniformidad en los caudales nominales de 8, 4 y 2 L/h. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el estudio.

Para el caudal nominal de 8 L/h, la prueba de Fisher al 5 % identificó cuatro rangos de significancia en esta variable (Tabla 11). El gotero B, de origen israelí, obtuvo el valor promedio más alto con un 87.85 % (rango a), clasificado como bueno. En contraste, el gotero A de origen chino mostró el coeficiente de uniformidad (CU) promedio más bajo con un 55.3 % (rango d), clasificado como inaceptable.

Tabla 11. Comportamiento de modelos comerciales de goteros en el CU promedio para goteros 8 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)		
	8		
	CU (%)		Clasificación CU
Gotero A	55.30	d	Inaceptable
Gotero B	87.85	a	Bueno
Gotero C	86.05	b	Bueno
Gotero D	79.90	c	Aceptable
Promedio	77.28		
Coeficiente de variación %	3.61		
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	1.7615		

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación; CU: Coeficiente de uniformidad.

En la interacción entre los modelos comerciales de goteros y las presiones, para un caudal nominal de 8 L/h, la prueba de Fisher al 5 % identificó nueve rangos de significancia (Tabla 12). Los tratamientos que emplearon el gotero B, de origen israelí, con presiones de 10 y 20 mca, presentaron coeficientes de uniformidad (CU) del 94 % y 92 %, respectivamente. Por su parte, los tratamientos con el gotero C, de origen español, a presiones de 30 y 40 mca, registraron los valores más altos de CU, con 94 % y 84 %, respectivamente. En contraste, el gotero A, de fabricación china, sometido a una presión de 40 mca, presentó el CU promedio más bajo, con un 42.4 % (rango i), clasificándose como inaceptable.

Tabla 12. Comportamiento de goteros y niveles de presión en CU con caudal nominal 8 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal 8 L/h							
	Presión (mca)							
	10		20		30		40	
	CU (%)		CU (%)	CU (%)		CU (%)		CU (%)
Gotero A	51.80	h	67.80	f	59.20	g	42.40	i
Gotero B	94.00	a	92.00	ab	83.40	c	82.00	cd
Gotero C	75.60	e	90.20	b	94.00	a	84.40	c
Gotero D	79.60	d	74.00	e	84.60	c	81.40	cd
Promedio	77.28							
CV (%)	3.61							
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	3.52303							

Para el caudal nominal de 4 L/h, la prueba de Fisher al 5 % determinó tres rangos de significancia (Tabla 13). Los goteros B, de origen israelí, registraron el coeficiente de uniformidad (CU) promedio más alto, con un 89.30 % (rango a). En contraste, el gotero A, de origen chino, presentó el valor más bajo de CU, con un 60.15 %, lo que lo clasifica como de desempeño pobre.

Tabla 13. Comportamiento de tipos de gotero en el CU promedio para goteros 4 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)		
	4		
	CU (%)		Clasificación CU
Gotero A	60.15	c	Pobre
Gotero B	89.30	a	Bueno
Gotero C	89.05	a	Bueno
Gotero D	73.20	b	Aceptable
Promedio	77.93		
Coefficiente de variación %	3.37		
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	1.6602		

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación; CU: Coeficiente de uniformidad.

La prueba de Fisher al 5 % reveló siete rangos de significancia para la interacción entre los modelos comerciales de goteros y las presiones, en un caudal nominal de 4 L/h (Tabla 14). Los tratamientos que combinaron el gotero C con una presión de 10 mca alcanzaron un coeficiente de uniformidad (CU) del 91 %. Por su parte, los goteros B operando a presiones de 20, 30 y 40 mca registraron CU de 93 %, 94 % y 94 %, respectivamente. En contraste, el gotero A, de origen chino, sometido a una presión de 40 mca, presentó el valor promedio más bajo de CU, con un 40.8 % (rango g), lo que lo clasifica como inaceptable.

Tabla 14. Comportamiento de goteros y niveles de presión en CU con caudal nominal 4 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal 4 L/h							
	Presión (mca)							
	10		20		30		40	
	CU (%)		CU (%)	CU (%)	CU (%)	CU (%)	CU (%)	
Gotero A	42.00	g	82.00	bc	75.80	e	40.80	g
Gotero B	76.20	de	93.00	a	94.00	a	94.00	a
Gotero C	91.00	a	82.80	bc	91.20	a	91.20	a
Gotero D	82.20	bc	79.20	cd	66.20	f	65.20	f
Promedio	77.93							
CV (%)	3.37							
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	3.32038							

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

Para el caudal nominal de 2 L/h, la prueba de Fisher al 5 % determinó tres rangos de significancia (Tabla 15). El mayor coeficiente de uniformidad (CU) promedio se registró en el gotero D, de origen italiano, con un valor de 94.95 % (rango a), clasificado como excelente según la escala de evaluación del CU. En contraste, el gotero A, de origen chino, presentó el valor promedio más bajo, con un 60.2 % (rango d), considerado como de desempeño pobre.

Tabla 15. Comportamiento de modelos comerciales de goteros en el CU promedio para goteros 2 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)		
	2		
	CU (%)		Clasificación CU
Gotero A	60.20	d	Pobre
Gotero B	89.80	b	Bueno
Gotero C	80.75	c	Aceptable
Gotero D	94.95	a	Excelente
Promedio	81.43		
Coefficiente de variación %	3.87		
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	1.9915		

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

En cuanto a la interacción entre los modelos comerciales de goteros y las presiones, la prueba de Fisher al 5 % identificó nueve rangos de significancia (Tabla 16). Los tratamientos que presentaron los coeficientes de uniformidad (CU) promedio más altos correspondieron a los goteros tipo D, de fabricación italiana, con valores de 96 %, 94.8 % y 95 % a presiones de 10, 20 y 30 mca, respectivamente. Asimismo, los goteros tipo B, de origen israelí, operando a una presión de 40 mca, alcanzaron un CU de 96 %, clasificado como excelente. En contraste, el gotero tipo A, de origen chino, sometido a una presión de 40 mca, registró el CU promedio más bajo, con un 22.6 %, siendo clasificado como inaceptable.

Tabla 16. Comportamiento de goteros y niveles de presión en CU con caudal nominal 2 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal 2 L/h							
	Presión (mca)							
	10		20		30		40	
	CU (%)		CU (%)	CU (%)	CU (%)	CU (%)	CU (%)	
Gotero A	53.20	h	83.00	e	82.00	e	22.60	i
Gotero B	89.20	c	88.80	cd	85.20	de	96.00	a
Gotero C	90.00	c	90.60	bc	74.20	f	68.20	g
Gotero D	96.00	a	94.80	a	95.00	a	94.00	ab
Promedio	81.43							
CV (%)	3.87							
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	3.98295							

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

Al comparar los coeficientes de uniformidad (CU) promedio de los goteros evaluados, se observó que los goteros tipo B registraron los valores más altos para los modelos de 8 y 4 L/h, con CUs de 87.85 % y 89.30 %, respectivamente.

En el caso del modelo de 2 L/h, el mayor CU correspondió al gotero tipo D, de fabricación italiana, con un valor de 94.95 %. En contraste, los goteros tipo A, de origen chino, presentaron los coeficientes de uniformidad más bajos en todos los caudales evaluados (8, 4 y 2 L/h), según se detalla en la Tabla 17.

Tabla 17. Comportamiento de modelos comerciales de goteros en el Coeficiente de Uniformidad.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal (L/h)					
	8		4		2	
	CU (%)		CU (%)		CU (%)	
Gotero A	55.30	d	60.15	c	60.20	d
Gotero B	87.85	a	89.30	a	89.80	b
Gotero C	86.05	b	89.05	a	80.75	c
Gotero D	79.90	c	73.20	b	94.95	a
Promedio	77.28		77.93		81.43	
CV (%)	3.61		3.37		3.87	
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	1.7615		1.6602		1.9915	

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

Durante esta investigación se analizó el coeficiente de uniformidad (CU) con el fin de identificar los modelos de goteros con mejor desempeño en la distribución del agua, así como los rangos de presión óptimos. Un alto CU indica una distribución más homogénea del flujo.

Diferencia entre caudal nominal y caudal medio aforado

El análisis de varianza reveló diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tipos de goteros en cuanto al caudal medio. Asimismo, se identificaron diferencias significativas en la interacción entre los tipos de goteros y las presiones aplicadas. Cabe destacar que la norma ISO 9261:2004 establece que la diferencia máxima permitida entre el caudal nominal y el caudal medio es de $\pm 7\%$. A continuación, se detallan los resultados obtenidos.

En cuanto al caudal medio promedio de los goteros evaluados bajo diferentes presiones, para el caudal nominal de 8 L/h, el análisis de varianza mostró diferencias significativas en la variable analizada, y la prueba de Fisher al 5 % estableció tres rangos de significancia (Tabla 18). Los goteros tipo B, de origen israelí, con un caudal medio de 8.01 L/h, y los goteros tipo D, de origen italiano, con un caudal medio de 8.05 L/h, se ubicaron como los tratamientos más cercanos al valor nominal, cumpliendo con los límites establecidos por la norma ISO 9261:2004. En contraste, los goteros tipo C, de fabricación española, presentaron un caudal medio un 19.14 % superior al nominal, excediendo el margen permitido (Tabla 19).

Tabla 18. Comportamiento de modelos comerciales de goteros en el caudal medio promedio.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal (L/h)					
	8		4		2	
	CU (%)		CU (%)		CU (%)	
Gotero A	6.83	a	3.57	a	2.10	a
Gotero B	8.01	b	3.98	b	2.18	b
Gotero C	9.53	c	3.93	b	2.44	c
Gotero D	8.05	b	4.24	b	2.26	bc
Promedio	8.11		3.93		2.25	
CV (%)	10.77		3.39		4.33	
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	0.5513		0.0340		0.0368	

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CU: caudal medio; CV: coeficiente de variación.

Tabla 19. Comportamiento de los modelos comerciales de goteros 8 L/h en el caudal nominal vs el caudal medio promedio.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)		
	8		
	Caudal nominal vs caudal medio muestra (%)		Cumplimiento de ISO 9261:2004 ($\pm 7\%$)
Gotero A	-14.66	a	No cumple
Gotero B	0.17	b	Cumple
Gotero C	19.14	c	No cumple
Gotero D	0.59	b	Cumple
Promedio	1.31		
Coeficiente de variación %	1.83		
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	0.0348		

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

Para la interacción entre los modelos comerciales de goteros y las presiones, la prueba de Fisher al 5 % estableció cinco rangos de significación para el caudal nominal de 8 L/h (Tabla 20). Los tratamientos que compartieron el mismo rango (c) fueron los más cercanos al valor nominal. Entre ellos, el gotero tipo B mostró un caudal medio más próximo al nominal bajo presiones de 10 y 20 mca, con valores de 7.75 y 7.74 L/h, respectivamente. Por su parte, el gotero tipo D presentó caudales medios de 8.22 y 7.88 L/h a presiones de 30 y 40 mca, respectivamente, manteniéndose dentro del margen permitido por la norma ISO 9261:2004. En contraste, el gotero tipo C registró el caudal medio más alto, con un valor de 9.74 L/h a una presión de 30 mca.

Tabla 20. Influencia de los niveles de presión en el caudal medio para los goteros de 8 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal 8 L/h							
	Presión (mca)							
	Caudal medio (L/h)							
	CU (%)		CU (%)		CU (%)		CU (%)	
Gotero A	6.79	ab	7.74	bc	6.55	a	6.23	a
Gotero B	7.75	bc	7.74	bc	8.29	cd	8.27	cd
Gotero C	9.41	de	9.54	de	9.74	e	9.43	de
Gotero D	7.73	bc	8.35	cde	8.22	cd	7.88	bc
Promedio	8.10							
CV (%)	10.77							
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	1.1027							

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

En el caudal nominal de 4 L/h, el análisis de varianza expuso diferencias significativas en la variable de caudal medio, según la prueba de Fisher al 5 %, que estableció dos rangos de significancia distintos (Tabla 21). En este contexto, el gotero B de origen israelí fue el que estuvo más cerca al caudal nominal con un promedio de 3.98 L/h. Por otro lado, el gotero A fue el que más se alejó del caudal nominal, presentando una diferencia del -10.65 % en relación con el valor nominal.

Tabla 21. Comportamiento de goteros 4 L/h en el caudal nominal vs el caudal medio promedio.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)		
	4		
	Diferencia porcentual entre el caudal nominal y el caudal medio(%)		Cumplimiento de ISO 9261:2004 (± 7 %)
Gotero A	-10.65	a	No cumple
Gotero B	-0.58	b	Cumple
Gotero C	-1.73	b	Cumple
Gotero D	5.94	b	Cumple
Promedio	-1.76		
Coeficiente de variación %	1.81		
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	0.0341		

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

En cuanto a la interacción entre los modelos comerciales de goteros y las presiones para los goteros con caudal nominal 4 L/h, la prueba Fisher al 5 %, estableció seis rangos de significación entre los modelos comerciales de goteros y las presiones (Tabla 22). Se observó que los tratamientos que comparten el rango (cd) son los que más se acercan al valor nominal de 4 L/h. En particular, el gotero B bajo las presiones de 10, 20, 30 y 40 mca mostró los valores más cercanos al caudal nominal, con mediciones de 3.90, 3.98, 4.02 y 4.01 L/h respectivamente, cumpliendo con los estándares de la norma ISO 9261:2004. Por otro lado, el valor menos ajustado fue presentado por el gotero A con una presión de 40 mca, con un caudal de 2.26 L/h.

Tabla 22. Influencia de los niveles de presión en el caudal medio para los goteros de 4 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal 4 L/h							
	Presión (mca)							
	10		20		30		40	
	Caudal medio (L/h)	CU (%)	CU (%)	CU (%)	CU (%)	CU (%)	CU (%)	CU (%)
Gotero A	3.65	bc	4.61	f	3.77	bcd	2.26	a
Gotero B	3.90	bcde	3.98	bcdef	4.02	bcdef	4.01	bcdef
Gotero C	3.57	b	3.87	bcde	4.13	bcdef	4.16	cdef
Gotero D	3.82	bcde	4.39	ef	4.35	def	4.39	ef
Promedio	3.93							
CV (%)	3.39							
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	0.0679							

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

Para el caudal nominal de 2 L/h, la prueba de Fisher al 5 % identificó tres rangos significativamente distintos de caudal medio (Tabla 23). El gotero tipo A, de fabricación china, presentó el valor promedio más cercano al nominal, con un caudal medio de 2.10 L/h. En contraste, el gotero tipo C, de origen español, registró el caudal medio más elevado, con una diferencia del 22.03 % por encima del valor nominal.

Tabla 23. Comportamiento de modelos comerciales de goteros 2 L/h en el caudal nominal vs el caudal medio promedio.

Modelo comercial de gotero	Caudal nominal (L/h)		
	2		
	Diferencia porcentual entre el caudal nominal y el caudal medio (%)	Cumplimiento de ISO 9261:2004 (± 7 %)	
Gotero A	4.90	a	Cumple
Gotero B	9.19	ab	No cumple
Gotero C	22.03	c	No cumple
Gotero D	13.02	bc	No cumple
Promedio	12.29		
Coeficiente de variación %	1.90		
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	0.0366		

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

En la interacción entre los modelos comerciales de goteros y las presiones, la prueba de Fisher al 5 % estableció cuatro rangos de significancia (Tabla 24). El gotero tipo B presentó el mejor ajuste al caudal nominal bajo presiones de 10, 20 y 30 mca, con caudales medios de 2.13, 2.12 y 2.27 L/h, respectivamente. De igual forma, el gotero tipo A, operando a una presión de 40 mca, registró un valor promedio de 2.08 L/h, también cercano al nominal. Solo los tratamientos B a 10 y 20 mca, y A a 40 mca, se ubicaron dentro del margen de tolerancia de ± 7 % establecido por la norma ISO 9261:2004. En contraste, el gotero tipo C, sometido a una presión de 40 mca, presentó el mayor desvío respecto al caudal nominal, con un valor medio de 2.54 L/h.

Tabla 24. Influencia de los niveles de presión en el caudal medio para los goteros de 2 L/h.

Modelo comercial de gotero	Caudal Nominal 2 L/h							
	Presión (mca)							
	10		20		30		40	
	Caudal medio (L/h)							
Gotero A	1.69	a	2.21	bcd	2.41	cd	2.08	ab
Gotero B	2.13	bcd	2.12	bc	2.27	bcd	2.21	bcd
Gotero C	2.33	cd	2.44	cd	2.46	cd	2.54	d
Gotero D	2.17	bcd	2.23	bcd	2.30	bcd	2.34	cd
Promedio	2.25							
CV (%)	4.33							
LSD Fisher ($\alpha = 0.05$)	0.2964							

Nota: medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$); CV: coeficiente de variación; CVF: coeficiente de variación de fabricación.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos confirman que el tipo de gotero y la presión de operación influyen significativamente en el desempeño hidráulico, validando la hipótesis planteada. En términos generales, los modelos B y D mostraron mayor consistencia en la uniformidad y ajuste al caudal nominal, lo que indica que no todos los goteros autocompensados garantizan un comportamiento homogéneo bajo distintas condiciones de presión (Elamin et al., 2017).

Estos hallazgos coinciden con estudios previos que destacan la superioridad de ciertos emisores en función de su calidad de fabricación y diseño interno. Investigaciones han reportado que goteros de mayor precisión constructiva tienden a presentar menor variabilidad y mejor uniformidad de aplicación, lo que refuerza la relación entre coeficiente de variación de fabricación y desempeño hidráulico. Asimismo, el mejor comportamiento observado en algunos modelos bajo presiones intermedias concuerda con reportes que indican que los emisores alcanzan su máximo desempeño dentro de rangos óptimos de operación (Moreno-Pérez, 2021).

Sin embargo, también se identificaron diferencias respecto a otros estudios, particularmente en la magnitud de las desviaciones del caudal nominal en ciertos modelos. Mientras algunas investigaciones reportan variaciones moderadas, en este estudio se

evidenciaron desviaciones más pronunciadas en determinados goteros, lo que podría explicarse por diferencias en las condiciones experimentales, como el rango de presiones evaluado, el origen comercial de los emisores o las condiciones de instalación y operación del sistema (Kapupara et al., 2020).

Desde una perspectiva teórica, los resultados pueden explicarse por la interacción entre el diseño del mecanismo de compensación y la calidad de los materiales. Los goteros con membranas más sensibles y procesos de fabricación más uniformes tienden a responder de manera más estable a cambios de presión, mientras que aquellos con menor precisión presentan fluctuaciones en el caudal. Además, la existencia de un rango óptimo de presión sugiere que la autocompensación no es absoluta, sino dependiente de condiciones hidráulicas específicas (Chen et al., 2025).

Entre las limitaciones del estudio se encuentra el tamaño muestral por tratamiento y la evaluación en condiciones controladas, lo que podría no reflejar completamente la variabilidad presente en campo a largo plazo. No obstante, estas limitaciones no invalidan los hallazgos, ya que el diseño experimental permitió comparar de manera consistente el desempeño relativo entre modelos. Por el contrario, abren la posibilidad de futuras investigaciones que incluyan evaluaciones en condiciones reales de cultivo y análisis de durabilidad de los emisores.

V. CONCLUSIONES

El desempeño hidráulico de los goteros autocompensados varió según el modelo comercial, el caudal nominal y la presión de operación, confirmándose diferencias en la uniformidad de emisión, la variabilidad de fabricación y el ajuste entre el caudal nominal y el caudal medio aforado. Los goteros B y C presentaron los menores coeficientes de variación de fabricación en los caudales de 8 y 4 L/h, mientras que el gotero D mostró el mejor comportamiento en 2 L/h. En contraste, el gotero A registró mayor variabilidad, especialmente bajo presiones extremas. En cuanto al coeficiente de uniformidad, el gotero B alcanzó los mejores promedios en 8 y 4 L/h, con clasificación buena, mientras que el gotero D destacó en 2 L/h, con clasificación excelente. El gotero A presentó los menores valores de uniformidad en los tres caudales evaluados. El cumplimiento del límite de $\pm 7\%$ establecido por la norma ISO 9261:2004 dependió del caudal nominal y de la presión aplicada. En promedio, cumplieron los goteros B y D en 8 L/h; B, C y D en 4 L/h; y solo A en 2 L/h, aunque el cumplimiento por tratamiento no fue uniforme. Los resultados evidencian que la selección de goteros autocompensados debe considerar, además del caudal nominal declarado por el fabricante, su estabilidad hidráulica bajo diferentes presiones. En las condiciones evaluadas, el gotero B mostró el desempeño más consistente en 8 y 4 L/h, mientras que el gotero D destacó por su uniformidad en 2 L/h.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses relacionado con esta investigación. Asimismo, señalan que el estudio se desarrolló de manera objetiva, sin influencias externas que comprometan la integridad de los resultados.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Conceptualización: M.F.M.-F.; G.F.-M. Curación de datos: B.E.S.-C.; K.C.M.-Y. Análisis formal: M.F.M.-F.; J.N.C.-C. Investigación: M.F.M.-F.; G.F.-M.; B.E.S.-C.; K.C.M.-Y. Administración del

proyecto: M.F.M.-F. Recursos: G.F.-M.; J.N.C.-C. Software: J.N.C.-C. Supervisión: G.F.-M.; J.N.C.-C. Validación: M.F.M.-F.; G.F.-M. Visualización: B.E.S.-C.; K.C.M.-Y. Redacción del borrador original: M.F.M.-F. Redacción, revisión y edición: M.F.M.-F.; G.F.-M.; B.E.S.-C.; K.C.M.-Y.; J.N.C.-C.

VI. REFERENCIAS

- Alvarenga Almeida, I., de Sousa Pereira, D. J., de Oliveira Costa, J., Quiloango-Chimarro, C. A., & Duarte Coelho, R. (2022). Obstrucción de goteros: Énfasis en el problema y cómo minimizar el impacto. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, 16. <https://doi.org/10.18011/bioeng.2022.v16.1095>
- 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(5), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w12051463>
- Chen, X., Wei, Z., Ma, R., Li, J., Wang, Y., Huang, L., & Li, Z. (2025). Research on the compensation mechanism of pressure compensating emitters based on numerical simulation and visualisation experiment. *Biosystems Engineering*, 253, 104125. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104125>
- Duarte Naranjo, L., Pla Rodríguez, E., & Camejo Barreiro, E. (2022). Evaluación de un sistema de riego por goteo soterrado en plantaciones de mango / Assessment of an underground drip irrigation drip system in mango plantations. *Universidad & Ciencia*, 11(2), 26–37. <https://revistas.unica.cu/index.php/uciencia/article/view/1943>
- Elamin, A. W. M., Abd Eldaiam, A. M., Abdalla, N. A., & Hussain, M. E. (2017). Hydraulic performance of drip irrigation system under different emitter types and operating pressures using treated wastewater at Khartoum State. *International Journal of Development and Sustainability*, 6(9), 1086–1095.

- Kapupara, J. P., Bhatu, M. H., & Gohel, J. (2020). Study of the hydraulic performance parameters of the drip irrigation system at various operating pressures. *Agricultural Science Digest*, 41(1), 89–92. <https://doi.org/10.18805/ag.D-5192>
- Keller, J., & Karmeli, D. (1974). Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE*, 17(4), 678–684. <https://doi.org/10.13031/2013.36936>
- Liotta, M. A., Carrión, R. A., Ciancaglini, N., & Olgún Pringles, A. (2015). Riego por goteo. PROSAP; INTA.
- Mangrio, A. G., Asif, M., Ahmed, E., Sabir, M. W., Khan, T., & Jahangir, I. (2013). Hydraulic performance evaluation of pressure compensating (PC) emitters and micro-tubing for drip irrigation system. *Science, Technology and Development*, 32(4), 290–298.
- Mensah, S. A., Torgbenu, J. K., Sabi, E. B., Amoatey, P. K., Dwumoh, F., & Asenso, E. (2024). Evaluation of pressure compensating drip emitters fitted in a polyvinyl chloride pipe. *Science and Development Journal*, 8(2), 33–40.
- Moreno-Pérez, M. F., Baeza-Cano, R., Roldán-Cañas, J., Cánovas-Fernández, G., & Reyes-Requena, R. (2021). Hydraulic characterization of low flow drip irrigation emitters used in intensive horticultural crops in Almería (Spain). *Proceedings of the IAHR World Congress*. <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC252171192022407>
- Salvador, R., Zapata, N., Moré, N., & Citoler, J. (2021). Riego por goteo enterrado en cultivos extensivos de fincas comerciales. https://citarea.cita-aragon.es/bitstream/10532/5471/1/2021_215.pdf
- Sarker, K. K., Hossain, A., Murad, K. F. I., Biswas, S. K., Akter, F., Rannu, R. P., Moniruzzaman, M., Karim, N. N., & Timsina, J. (2019). Development and evaluation of an emitter with a low-pressure drip-irrigation system for sustainable eggplant production. *AgriEngineering*, 1(3), 376–390. <https://doi.org/10.3390/agriengineering1030028>
- Soto-Bravo, F., & Monge-Palma, J. I. (2023). Morphophysiological and productive behavior of hydroponic sweet pepper in greenhouse with different fertigation management strategies. *Agronomía Costarricense*, 47(1), 37–57. <http://dx.doi.org/10.15517/rac.v47i1.53948>
- Wurda, J. S., Tarimo, A. K., & Fue, K. G. (2025). Modelling and performance evaluation of a drip irrigation system under different pressure heads. *Water and Environmental Sustainability*, 5(4), 1–14. <https://doi.org/10.52293/WES.2025.4.1082>
- Xing, S., Du, K., Liu, N., Li, M., Li, W., Zhang, J., & Wang, Z. (2025). Effect of dynamic pressure and emitter type on irrigation and fertigation uniformity of drip irrigation systems. *Agricultural Water Management*, 312, 109418. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109418>