



IV CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2018

Aguascalientes, Ags., del 15 al 18 de octubre de 2018

EFFECTOS DE LA PENDIENTE EN EL COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD EN UN LATERAL DE RIEGO POR GOTEO

Marlio Bedoya Cardoso^{1*}; Pablo Cesar Yossa Manrique¹; Luis Felipe Yossa Osorio¹

¹Facultad de Ingeniería. Universidad Surcolombiana. Av. Pastrana Borrero carrera 1a Neiva, Huila, Colombia.

marlio.bedoya@usco.edu.co (*Autor de correspondencia)

Resumen

Los sistemas de riego bien diseñados posibilitan el uso óptimo de los recursos, permitiendo dimensionar la disposición y el tamaño de cada componente del sistema, con el fin de proporcionar el agua a las plantas en el momento oportuno, teniendo en cuenta aspectos edáficos, climáticos y vegetativos bajo ciertas condiciones de energía, economía y mano de obra, permitiendo mejorar los rendimientos de la producción. El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana en la ciudad de Neiva en el Departamento del Huila, para determinar el efecto que tiene la pendiente sobre el Coeficiente de Uniformidad, en un lateral de riego por goteo de 10 metros (m) de longitud, con tres tipos de goteros de 2 l/h que se comercializan en la zona, espaciados cada 0.20 metros, instalados en diámetros exteriores de tubería de 12 mm y 16 mm, en pendientes de 3%, 0%, -1% y -3%. Los emisores evaluaron teniendo en cuenta la norma mexicana NMX-O-082-SCFI-2001, determinando que 2 de los tres emisores empleados son autocompensados. Para evaluar el desempeño de los laterales, cuatro metodologías fueron empleadas para determinar el Coeficiente de Uniformidad (CU); estas fueron: la propuesta por Christiansen (1942), Keller y Karmeli (1974), Keller y Meriam (1975) y finalmente Barragán et al (2005); concluyendo que en la mayoría de los casos no se presentan diferencias estadísticamente significativas dependiendo de la metodología empleada.

Palabras claves: Riego localizado de alta frecuencia; Coeficiente de Variación; Goteo; Autocompensado.



Introducción

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, (2011) estima que para proporcionar alimento a una población de más de 9000 millones de personas en el año 2050, será necesario aumentar la producción agrícola mundial en un 70 % y en los países en vía de desarrollo hasta en un 100 %, lo que conlleva a un crecimiento en la demanda del recurso hídrico para fines de regadío; por esta razón, como lo afirma Hall (1999), es evidente que se debe dar prioridad a la investigación relacionada con la irrigación, ya que la innovación y el perfeccionamiento de los actuales sistemas incrementan la producción agrícola y permiten garantizar un manejo racional del recurso hídrico.

Pizarro (1996) asegura que los riegos localizados de alta frecuencia RLAF (Goteo, Microaspersión y Exudación) cobran cada vez una mayor importancia a nivel mundial incrementándose su uso los últimos años, sobre todo en países como Estados Unidos, España, Australia, Sudáfrica, Israel, entre otros. En las zonas donde se instalan dichos sistemas se genera una gran revolución agrícola, no solo por sus ventajas y desventajas respecto a otros métodos de riego como gravedad y aspersión sino que han cambiado la forma de cultivar aun en terrenos arenosos, poco profundos con topografías agrestes donde cultivar en seco es bastante complejo e impredecible, incrementando de esta manera el valor de dichos predios.

En riego por aspersión y especialmente por goteo se supone que la lámina de agua que se aplica es igual a la profundidad promedio de humedecimiento en el área aplicada siempre y cuando no exista escorrentía; una forma muy común de evaluar que tan lejos o cerca se encuentra un sistema de riego de este ideal es a través del Coeficiente de Uniformidad (CU) que es la representación estadística del patrón de humedecimiento de los emisores; un valor bajo de este parámetro indica que existen una mayor cantidad de pérdidas y por lo tanto, sería un sistema inaceptable (Merriam y Keller, 1978). Éste coeficiente está en función de dos factores principalmente: El primero es la variación de la descarga debido a la variación de la presión y el segundo la variación de la descarga entre emisores operados a la misma presión.

Por lo anterior, el diseño adecuado de un lateral de riego debe garantizar un CU relativamente alto, el cual se ve afectado considerablemente por las pérdidas de presión, el espaciamiento de los emisores, taponamiento, temperatura del agua y la variabilidad de las características hidráulicas del suelo (Provenzano y Pumo, 2004). Por su parte, Keller y Bliesner (1990), manifiestan que un valor ideal de CU es relativo, pues éste depende de diferentes factores como el costo de instalación y administración del sistema, la topografía, la calidad del agua, el tipo de cultivo y su respuesta al déficit hídrico, entre otros, de tal manera que proponer un valor alto o bajo de este parámetro para efectuar el diseño puede ser equivocado.

Kang y Nishiyama (1996) propusieron un método para el diseño de laterales de microirrigación fundamentado en la descarga promedio del emisor y la uniformidad requerida de aplicación de agua. Por otro lado, Barragan y Wu (2005) compararon



diferentes expresiones de uniformidad donde encontraron una alta correlación entre ellas, concluyendo que la variación de la descarga del emisor, la relación de flujo del mismo, el Coeficiente de Variación y el coeficiente de Christiansen pueden ser empleados como criterios de diseño.

Smajstrla, et al. (2015), presentan un método para evaluar la uniformidad de aplicación del agua en microirrigación en condiciones de campo empleando dos nomogramas que requieren los datos de descarga de los emisores seleccionados y los datos de presión.

En la actualidad no se conoce la relación que existe entre la pendiente de un lateral de riego, y la forma como se conectan los emisores sobre el Coeficiente de Uniformidad (CU). Por lo tanto, el presente trabajo pretende establecer dichas relaciones con un nivel de significancia del 95% en laterales de riego por goteo.

Materiales y Métodos

Localización

El estudio se llevó a cabo en la parte posterior del laboratorio de suelos localizado en las instalaciones de la facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana, ubicado en las coordenadas 02° 56' 34.1" Norte, 75° 18' 04" Oeste, en la ciudad de Neiva - Huila.

Muestras de goteros

En la tabla 1 se encuentra consignada la información referente a las especificaciones de los goteros utilizados en el estudio.

Se seleccionaron tres tipos de goteros con diferente conexión y descarga de 2 l/h que se comercializan en la zona. Los emisores se insertaron cada 0.20 m en laterales de 16 mm y 12 mm de diámetro, empleando pendientes de 3% 0% -1% y -3% considerando positiva la pendiente ascendente y negativa la pendiente descendente, teniendo en cuenta, los escenarios planteados por Pizarro (1996; dichas pendientes fueron trazadas con un nivel óptico marca Topcon AT-B4/PS sobre una reja.

Un tanque plástico suministró el agua previamente filtrada, en el cual se instaló una electrobomba marca Perfetti modelo QB60, adaptando un retorno con una válvula en la descarga de la electrobomba para regular la presión a la entrada de cada lateral, la cual fue registrada empleando un manómetro análogo de glicerina marca Winters con rango de medición 0 a 15 PSI, con precisión de $\pm 1\%$ ANSI/ ASME Grado 1A. El aforo de cada emisor se realizó por triplicado empleando probetas graduadas de 100 ml. Es importante mencionar que los emisores tipo A se evaluaron en posición ordenada y aleatoria, de acuerdo a la posición del bisel dentro de la tubería en pendiente 0%.

Tabla 1. Especificaciones de los goteros empleados en el estudio.

Tipo de gotero	Gotero	Caudal de descarga (L/h)	Presión de operación (KPa)	Observaciones	Muestra
A		2	100	Gotero sobre la línea (botón) autocompensado	50
B		2	100	Gotero sobre la línea (botón) autocompensado	50
C		2	100	Gotero insertado por el fabricante en línea, no autocompensado	50

Todos los datos obtenidos en cada uno de los laterales y en todas las pruebas se almacenaron en una hoja de Excel del programa Microsoft office 2013; el análisis estadístico de los datos se realizó empleando la versión de prueba del Software STATGRAPHICS Centurión XVI.I.

Determinación de la ecuación Presión - Caudal y Coeficiente de Variación (CV)

La determinación de la ecuación Presión - Caudal y el Coeficiente de Variación de cada emisor se hizo mediante la metodología descrita por la norma NMX-O-082-SCFI-2001. El CV se calculó a partir de los datos obtenidos durante las mediciones por triplicado de los cincuenta goteros a lo largo del lateral de estudio para cada uno de los tipos de goteros en la pendiente de 0% mediante la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{S_q}{\bar{q}} * 10 \quad (1)$$

Dónde: S_q es la desviación estándar, y \bar{q} es el promedio de los datos, en este caso el promedio de los caudales.

Coeficiente de Uniformidad (CU)

Una vez generados los resultados en el lateral, se determinó el Coeficiente de Uniformidad de aplicación, utilizando las ecuaciones que se describen a continuación.



Inicialmente Christiansen (1942) planteó una ecuación que le permitió comparar patrones de aspersores y establecer la influencia de varios espaciamientos en los resultados de la distribución en la aplicación del agua. Con ella es posible determinar el Coeficiente de Uniformidad CU mediante la desviación estándar y el promedio de las descargas de los emisores, mediante la ecuación (19):

$$CU = \left[1 - \frac{Sq}{\bar{q} * m} \right] * 100 \quad (2)$$

Luego Keller y Karmeli (1974) dieron a conocer una ecuación para estimar el coeficiente de aplicación CU a partir de pruebas de campo, el cual se encuentra en función del cuarto medio de los caudales más bajos y el caudal medio del emisor.

$$CU = 100 * \frac{q_{25\%h}}{q_{medd}} \quad (3)$$

Más tarde Keller y Karmeli (1975) manifestaron una nueva expresión que integra el Coeficiente de Variación de fabricación del emisor, el caudal medio y mínimo, como se indica en la ecuación (21):

$$CU = 100 * \left[1 - \frac{1.27 * CV}{\sqrt{EP}} \right] * \frac{q_{min}}{q_{medd}} \quad (4)$$

Por su parte Barragán et al (2005) plantearon una expresión que permite estimar el Coeficiente de Uniformidad empleando para ello el caudal mínimo, el caudal promedio, el Coeficiente de Variación y el número de emisores por planta que para este trabajo de investigación su valor es igual a 1.

$$CU = 1 - \sqrt{\left[1 - \frac{q_{min}}{\bar{q}} \right]^2 + \left[\frac{1.27CV}{\sqrt{N}} \right]^2} \quad (5)$$

Análisis estadístico

El análisis de los datos obtenidos en cada tratamiento se realizó mediante un Análisis de Varianza simple (ANOVA), en donde la comparación se realizó bajo la prueba de múltiples rangos con diferencia honestamente significativa de Tukey HSD ($\alpha=0.05$), que también fue aplicada mediante un ANOVA multifactorial para establecer las diferencias entre las unidades experimentales, mediante la utilización de la versión de prueba del software STATGRAPHICS Centurion XVI.I.

Resultados y Discusión

Relación presión – caudal

La tabla 2 contiene las ecuaciones de presión – caudal para cada gotero con su respectivo coeficiente de determinación, obtenidas a partir de los datos experimentales.



Tabla 2. Ecuación experimental de cada gotero.

GOTERO	ECUACION	R ²
Tipo A	$q = 3.0555h^{0.2329}$	0.9641
Tipo B	$q = 2.0654h^{0.0548}$	0.863
Tipo C	$q = 1.7763h^{0.7716}$	0.962

Se comprobó en los goteros Tipo A, que no es recomendable operarlos a presiones superiores de 20 PSI, ya que, al superar esta presión, su descarga disminuye considerablemente, lo mismo ocurre con los emisores Tipo B, cuando se trabajan a presiones superiores de 58 PSI. Según Perea et al (2013), generalmente los emisores autocompensados presentan CU elevados, pero cuando se operan por fuera del rango recomendado su desempeño puede ser incluso inferior que el de un gotero no autocompensado.

Por otro lado, los exponentes de las ecuaciones obtenidas en las curvas de cada gotero manifiestan una medida de la sensibilidad a la variación de presión. De este modo, la norma mexicana NMX-O-082-SCFI-2001 reporta que, para goteros no autorregulados el valor del exponente no debe exceder de 0.2 y para goteros sin autorregulación debe estar entre 0.2 y 0.6; por su parte, (Pizarro, 1996) establece que el valor del exponente para un gotero autocompensante se encuentra en un rango de 0 a 0.4. Según estas clasificaciones, se puede afirmar que los goteros A y B son autocompensados y el gotero C no lo es.

Coeficiente de Variación (CV)

La tabla 3 contiene la información referente al Coeficiente de Variación CV de los diferentes tipos de gotero, calculados a partir de las descargas obtenidas de la totalidad de emisores en el lateral.

Tabla 3. Coeficiente de Variación promedio de los diferentes tipos de gotero.

TIPO DE GOTERO	CV
A	0.096
B	0.025
C	0.031

Los emisores que alcanzaron el menor y mayor coeficiente de uniformidad fueron los Tipo B y Tipo A respectivamente, de tal manera que según la clasificación hecha por Keller y Bliesner (1990) el gotero tipo A es marginal, mientras que los goteros tipo B y tipo C son excelentes. Por otro lado, según la clasificación propuesta por la norma mexicana NMX-O-082-SCFI-2001, el gotero tipo A pertenece a la categoría B mientras los goteros tipo B y C pertenecen a la categoría A.

En un estudio hecho por Vélez et. al (2013) reportan que el Coeficiente de Variación CV para los goteros análogos al tipo A, B y C son 12.39%, 2.41% y 13.69%



respectivamente, siendo el primero un valor aproximado al encontrado en este trabajo el cual pertenece a una clasificación muy cercana según Keller y Bliesner (1990) y a la misma categoría de la norma mexicana, en el caso del segundo emisor se obtuvieron resultados muy similares, mientras que en el gotero tipo C se obtuvieron valores de CV muy distantes.

Coeficiente de Uniformidad (CU)

La tabla 4 presenta el comportamiento del Coeficiente de Uniformidad (CU), calculado a partir de diferentes metodologías, observando las diferencias estadísticamente significativas según la prueba de múltiples rangos Tukey HSD ($\alpha=0.05$) entre el CU y las pendientes, las cuales se encuentran demarcadas con letras diferentes en caso de existir diferencias significativas y letras iguales en caso contrario.

Dependiendo de la metodología que se utilice para el cálculo del Coeficiente de Uniformidad (CU) se pueden encontrar diferencias significativas entre una pendiente y otra (Tabla 4), por ejemplo, para la unidad experimental del gotero tipo A en lateral de 16 mm se puede afirmar con un 95% de confianza que en la pendiente de -1% existen diferencias con las pendientes de 0% y 3% según la mayoría de las metodologías.

Para el caso de los goteros tipo B instalados en lateral de 16 mm, se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% que no existen diferencias estadísticamente significativas entre el CU calculado en cada pendiente, en la mayoría de metodologías, solamente la metodología propuesta por Christiansen (1942), presentó diferencias entre las pendientes de 0% y 3%.

El Coeficiente de Uniformidad presentado por gotero tipo C (no autocompensado) en el lateral de 16 mm, presentó un comportamiento muy similar al caso anterior, indicando su buen desempeño al ser comparado con un gotero autocompensado, por otra parte, con un nivel de confianza del 95% se puede afirmar que según la mayoría de las metodologías no existen diferencias entre los CU y las diferentes pendientes para esta unidad experimental; no obstante, según la metodología de Keller y Karmeli (1974) existen diferencias entre la pendiente de -3% y las pendientes de 0% y 3%.

Tabla 4. Coeficientes de Uniformidad (CU), según diferentes metodologías para cada una de las pendientes evaluadas.

GOTERO DIAMETRO	METODOLOGIA	PENDIENTES			
		3%	0%	-1%	-3%
A 16mm	Christiansen (1942)	90.26 ± 0.31 ab	90.17 ± 0.29 a	90.57 ± 0.23 b	90.38 ± 0.08 ab
	Keller y Karmeli (1974)	89.9 ± 0.3 a	89.02 ± 0.23 a	89.51 ± 0.56 b	89.67 ± 0.16 ab
	Keller y Karmeli (1975)	76.49 ± 1.32 a	72.96 ± 0.64 a	74.83 ± 0.98 b	74.73 ± 1.7 ab
	Barragán et al (2005)	82.27 ± 1.08 a	79.21 ± 0.55 a	80.81 ± 0.87 b	80.76 ± 1.53 ab



GOTERO DIAMETRO	METODOLOGIA	PENDIENTES			
		3%	0%	-1%	-3%
B 16mm	Christiansen (1942)	98.13 ± 0.29 a	97.42 ± 0.21 b	97.89 ± 0.08 ab	97.96 ± 0.28 ab
	Keller y Karmeli (1974)	97.38 ± 1.02 a	97.24 ± 0.26 a	97.13 ± 0.55 a	96.93 ± 0.4 a
	Keller y Karmeli (1975)	93.56 ± 0.04 a	94.05 ± 0.4 a	94.15 ± 0.45 a	93.92 ± 0.24 a
	Barragán et al (2005)	95.2 ± 0.08 a	95.72 ± 0.29 a	95.78 ± 0.33 a	95.58 ± 0.2 a
C 16mm	Christiansen (1942)	97.39 ± 0.06 a	97.21 ± 0.24 a	97 ± 0.22 a	96.94 ± 0.2 a
	Keller y Karmeli (1974)	96.76 ± 0.23 a	97.2 ± 0.13 a	96.66 ± 0.34 ab	96.1 ± 0.22 b
	Keller y Karmeli (1975)	91.44 ± 0.4 a	92.83 ± 1.59 a	91.72 ± 2.56 a	91.01 ± 2.04 a
	Barragán et al (2005)	93.64 ± 0.36 a	94.84 ± 1.21 a	93.99 ± 2.02 a	93.42 ± 1.74 a
A 12mm	Christiansen (1942)	91.11 ± 0.07 a	91.13 ± 0.33 a	91.25 ± 0.72 a	91.06 ± 0.83 a
	Keller y Karmeli (1974)	90.42 ± 0.2 a	90.06 ± 0.66 a	90.75 ± 0.85 a	90.92 ± 0.85 a
	Keller y Karmeli (1975)	78.46 ± 1.8 a	77.09 ± 4.61 a	77.29 ± 6.42 a	77.01 ± 8.24 a
	Barragán et al (2005)	83.85 ± 1.48 a	82.71 ± 4.31 a	82.86 ± 5.92 a	82.64 ± 7.75 a
B 12mm	Christiansen (1942)	98.04 ± 0.32 a	98.32 ± 0.23 a	98.49 ± 0.3 a	97.79 ± 0.65 a
	Keller y Karmeli (1974)	97.6 ± 0.34 a	7.83 ± 0.59 ab	99.07 ± 0.39 b	97.57 ± 0.81 a
	Keller y Karmeli (1975)	93.16 ± 0.51 a	91.71 ± 2.58 a	94.65 ± 0.38 a	92.71 ± 0.73 a
	Barragán et al (2005)	94.89 ± 0.34 a	93.36 ± 2.58 a	96.01 ± 0.17 a	94.6 ± 0.43 a

En el caso de las unidades experimentales instaladas en el lateral de 12 mm, para el gotero tipo A en particular, con un nivel de confianza del 95% ninguna de las metodologías presenta diferencias estadísticamente significativas entre los CU en las diferentes pendientes; importante resaltar que para esta unidad experimental se observa una mayor dispersión de los datos, especialmente en las metodologías de Keller y Karmeli (1975) y Barragan et al (2005), las cuales tienen en común que basan sus modelos en el Coeficiente de Variación del emisor y el caudal mínimo, por lo que se presume que la variación en mención se debe a estos parámetros. Por otro lado, en el gotero tipo B con un nivel de confianza del 95% se puede afirmar que según la mayoría de las metodologías evaluadas no existen diferencias entre los CU y las

diferentes pendientes; aun así, según la metodología de Keller y Karmeli (1974) si se presentan diferencias entre las pendiente -1% y las pendientes de 3% y -3%.

Las figuras 1 y 2 muestran con un nivel de confianza del 95% que, según la mayoría de metodologías, sí existen diferencias entre los CU de cada tipo de gotero; por otra parte, se observa también que los coeficientes de uniformidad más bajos los presenta el gotero tipo A mientras que los otros dos goteros presentan una alta uniformidad de aplicación.

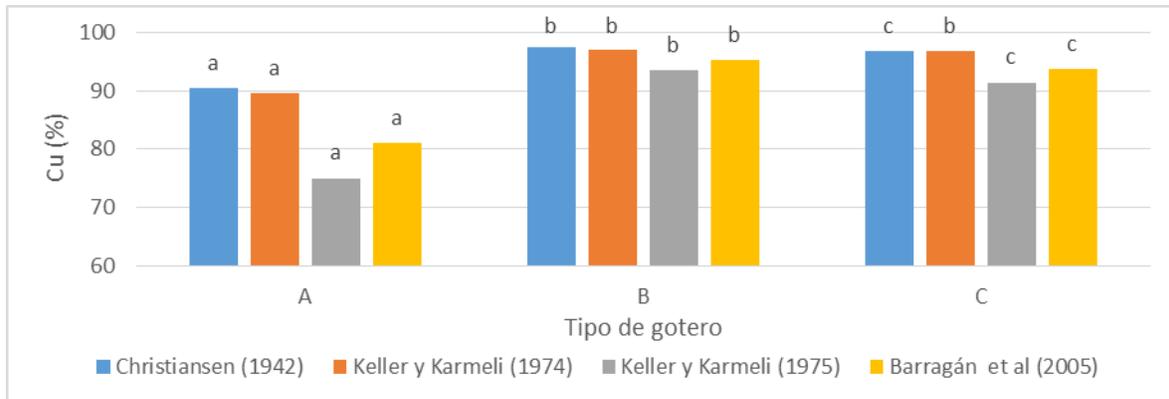


Figura 1. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada tipo de gotero en lateral de 16 mm.

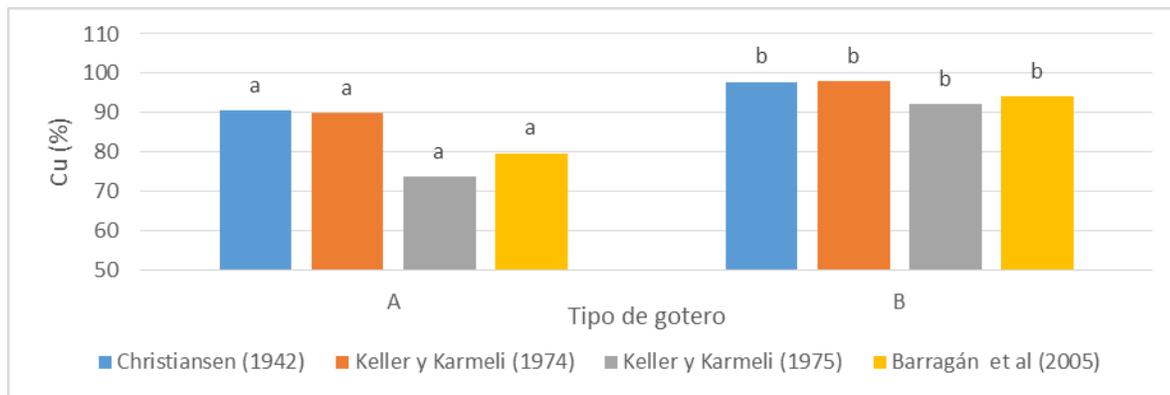


Figura 2. Coeficiente de Uniformidad, según diferentes metodologías para cada tipo de gotero en lateral de 12 mm.

De manera general, el comportamiento de las diferentes metodologías descritas anteriormente es muy similar al obtenido por Bedoya y Ángeles (2014) y Bedoya y Ángeles (2016), quienes presentan en sus investigaciones que la metodología que expresa el valor más alto de Coeficiente de Uniformidad es la de Keller y Karmeli (1974), seguida por Barragán et al (2005) y finalmente con el valor más bajo Keller y Karmeli (1975).

En ninguno de los casos el Coeficiente de Uniformidad fue inferior al 70% y ninguno de los coeficientes de variación superó el 30%, lo cual corrobora lo expuesto por Barragán y wu (2005) quienes afirman que cuando el Coeficiente de Variación CV es menor al



30%, el CU es superior al 70%. Por otra parte, Wu (1997) sostiene que emisores con un CV de 3% a 7% comúnmente presentan un Coeficiente de Uniformidad de 95% – 98%, encontrándose dicho comportamiento en los emisores B y C con la mayoría de metodologías. Por otra parte, el gotero tipo A presenta los coeficientes de uniformidad más bajos en toda la prueba, debido al alto Coeficiente de Variación; según Perea et al (2013), este es un parámetro que influye grandemente en la uniformidad de aplicación.

Empleando la metodología de CU de Christiansen (1942) se encontró que al aumentar la pendiente de 0% a 3% en el lateral de 16 mm también lo hizo el CU con todos los tipos de gotero, contrario a los hallazgos de Yildirim (2008) quien en su investigación concluyó que al incrementar el valor de la pendiente cuesta arriba el CU disminuye;

Por otra parte, al disminuir la pendiente en el mismo lateral de 16 mm en el caso de los goteros A y C se presenta un incremento del CU al disminuir la pendiente de 0% a -1% y una posterior disminución al momento de disminuir la pendiente a -3%, lo cual está acorde con la investigación Yildirim (2008), sin embargo, en el gotero tipo B a medida que se disminuye la pendiente incrementa el CU.

En lateral de 12 mm el comportamiento del CU es muy similar al obtenido por Yildirim (2008), es decir que al incrementar la pendiente de 0% a 3%, el CU tiende a disminuir, mientras que, si la pendiente se disminuye, inicialmente hay un incremento del CU en la pendiente de -1% y luego este valor tiende a disminuir a medida que se disminuye el valor de la pendiente.

Relacionando el exponente de la ecuación del emisor (x), con los Coeficientes de Variación (CV) y de Uniformidad (CU) de los emisores evaluados, se establece que el CU más alto fue obtenido con los goteros tipo B ($x=0.0548$; $CV=0.025$), seguido por los Goteros tipo C ($x=0.7716$; $CV= 0.031$) y por último los goteros tipo A ($x=0.2329$; $CV= 0.096$); a pesar de que todos los goteros presentan CU relativamente altos.

Llama la atención el comportamiento del gotero no autocompensado (Tipo C), el cual posee un exponente alto y fue el segundo emisor con mayor CU, por encima del gotero tipo A que es autocompensado; este comportamiento se alcanzó, debido a su bajo Coeficiente de Variación (CV), por lo tanto, se puede afirmar que los goteros tipo C tienen un buen comportamiento hidráulico y tienen poca sensibilidad a cambios de presión. Confirmando lo reportado por Smajstrla et al (2015), quienes mencionan que el Coeficiente de Variación influye en la uniformidad de aplicación del agua.

Los Coeficientes de Uniformidad (CU) más altos se alcanzaron con las metodologías propuestas por Christiansen (1942) y Keller y Karmeli (1974); sin embargo, Pizarro (1996) manifiesta que a pesar de ser una de las más antiguas, ampliamente difundida y utilizada sobre todo en riego por aspersión, la metodología propuesta por Christiansen, tiende a sobreestimar los valores del CU debido a que esta metodología plantea que en campo la mitad del área regada está recibiendo más de lo necesario, mientras que la otra mitad recibe la cantidad justa de agua, sin embargo, de esta otra mitad, (25% del terreno), recibe menos de la cantidad necesaria de agua. Por esta razón, se han planteado otras metodologías para estimar el CU en riego localizado de alta frecuencia



utilizan criterios más exigentes, como el promedio del cuarto inferior de las descargas, es decir el promedio del 25% de las mediciones más bajas, lo cual significa que en campo solo el 12.5% del terreno recibe menos del agua necesaria.

La metodología propuesta por Keller y Karmeli (1974) para el cálculo del CU en campo, fue empleada y aceptada por Merriam y Keller (1978) como el valor de la uniformidad de distribución en su documento; además, Merkley y Allen (2004) aclaran que en dicha metodología para $CU > 70\%$ los datos generalmente se ajustan a una distribución normal simétrica sobre el valor medio, por lo que el valor de esta metodología puede considerarse como el Coeficiente de Uniformidad. Es importante mencionar que todos los emisores evaluados en este trabajo lograron CU superiores al 70%. Aunque, esta metodología restringe un poco el CU, los resultados logrados en este trabajo fueron similares empleando la metodología de Christiansen (1942), debido a que solo tiene en cuenta factores de diseño hidráulico, pero no factores constructivos.

Por otra parte, las metodologías propuestas por Keller y Karmeli (1975) y Barragán et al (2005) presentan los valores más bajos de los CU, debido a que ambas ecuaciones incluyen en su modelo el caudal mínimo y el CV. Barragán y Wu (2005), exponen que valores muy bajos de CU darán como resultado un diseño muy conservador y seguro; sin embargo, puede causar un sobrediseño en sistemas de microirrigación lo cual se verá reflejado en costos; por otro lado, sostienen que la ecuación de su autoría se ajusta muy bien a los valores reales obtenidos en campo.

Finalmente, Keller y Bliesner (1990), manifiestan que un valor ideal del Coeficiente de Uniformidad es relativo, pues éste depende de diferentes factores haciendo complicada su clasificación, sin embargo, según la clasificación de la ASAE (1996) citada por Smajstrla et al (2015), el CU del gotero Tipo A se puede clasificar como bueno y los goteros Tipo B y C como excelentes teniendo en cuenta la mayoría de las metodologías evaluadas en esta investigación.

Conclusiones

En los goteros Tipo A instalados en el lateral de 16 mm de diámetro exterior se presentaron variaciones del Coeficiente de Uniformidad respecto a las pendientes seleccionadas, con un alfa igual 0.05. Sin embargo, en los Emisores Tipo B y C no se presentaron variaciones del Coeficiente de Uniformidad (CU) empleando diferentes pendientes con un nivel de confianza del 95% en la mayoría de las metodologías empleadas.

Comparando los Coeficientes de Uniformidad (CU) arrojados por los emisores evaluados, se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% que, si existen diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes tipos de goteros, en ambos diámetros de tubería, lográndose establecer que el CU más alto es presentado por el gotero tipo B seguido por el C y finalmente el A.

Los Coeficientes de Uniformidad (CU) más altos en los emisores evaluados fueron alcanzados con las metodologías propuestas por Christiansen (1942) y Keller y Karmeli



(1974) en todas las pendientes estudiadas; mientras que las metodologías propuestas por Keller y Karmeli (1975) y Barragán et al (2005) presentan los valores más bajos de los CU, debido a los parámetros que se emplean en estas metodologías, haciéndolos muchos más exigentes.

Referencias Bibliográficas

- Barragan, J., y Wu, I. P. (2005). Simple Pressure Parameters for Micro-irrigation Design. *Biosystems Engineering*, 463 – 475. doi:10.1016/j.biosystemseng.2004.11.009
- Bedoya, M., y Ángeles, V. (2014). ¿Es posible mejorar la uniformidad de riego utilizando diferentes espaciamientos entre emisores?. *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. V, núm. 6., 169-175.
- Bedoya, M., y Ángeles, V. (2016). Estrategias para estimar el coeficiente de uniformidad en laterales de riego. *Revista ingeniería y región*, 65 - 71. <http://dx.doi.org/10.25054/22161325.1300>
- Christiansen, J. E. 1942. *Irrigation by Sprinkling*. University of California. Berkley California. 94 p.
- FAO, O. d. 2011. *El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo*. FAO. Roma. 47 p.
- Hall, A. W. (1999). Priorities for irrigated agriculture. *Agricultural Water Management* 40, 25-29. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00099-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00099-7)
- Kang, Y., y Nishiyama, S. (1996). Analysis of microirrigation systems using a lateral discharge equation. *American Society of Agricultural Engineers*, 921 - 929. DOI: 10.13031/2013.27577
- Keller, J., y Bliesner, R. D. 1990. *Sprinkle and trickle irrigation* Van Nostrand Reinhold. New York. 86 p.
- Keller, J., y Karmeli, D. (1974). Trickle irrigation desing parameters. *ASAE*, 678 - 684. doi: 10.13031/2013.36936.
- Merkley, G. P., y Allen, R. G. 2004. *Sprinkle & trickle irrigation Lecture Notes*. Utah State University. Utah. 40 p.
- Merriam, J. L., y Keller, J. 1978. *Farm irrigation system evaluation: A guide for management*, Utah state university. Utah. 11 p.
- Perea, H., Enciso, J., y Singh, V. P. (2013). Statistical analysis of non-pressure-compensating and pressure-compensating drip emitters. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 986 - 994. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000644



- Pizarro, F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación. Mundi prensa. Madrid - Barcelona – Mexico. 397 p.
- Provenzano, G., y Pumo, D. (2004). Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. Journal of irrigation and drainage engineering, 318 - 324. DOI: 10.1061/~ASCE!0733-9437~2004!130:4~318!
- Smajstrla, A. G., Boman, B. J., Haman, D. Z., Pitts, D. J., y Zazueta, F. S. (2015). Field evaluation of microirrigation water application uniformity. IFAS Extension, 1 - 8.
- SECRETARÍA DE ECONOMÍA DGN: Goteros para sistemas de riego – especificaciones y métodos de prueba, [en línea], no. NMX-O-082-SCFI-2001, México D.F., p. 19, 2001, Disponible en: <http://cide.uach.mx/pdf/NORMAS%20MEXICANAS%20NMX/EQUIPO%20DE%20USO%20GENERAL%20EN%20LA%20INDUSTRIA%20Y%20AGRICULTURA/GOTEROS%20PARA%20SISTEMAS%20DE%20RIEGO.pdf>, [Consulta: 10 de abril de 2018].
- Vélez, J. E., Camacho, J. H., y Álvarez, J. G. (2013). Evaluación de goteros utilizados en microirrigación en Colombia. Revista colombiana de ciencias Hortícolas, 186 - 200. DOI: <https://doi.org/10.17584/rcch.2013v7i2.2234>
- Wu, I.-P. (1997). An assessment of hydraulics desing of micro-irrigation systems. Agricultural water management, 275 - 284. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(96\)01270-X](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(96)01270-X)
- Yildirim, G. (2008). Dtermining operating inlet pressure head incorporating uniformity parameters for multioutlet plastic pipelines. Journal of irrigation and drainage engeneering, 341 - 348. DOI: 10.1061/_ASCE_0733-9437_2008_134:3_341_

Nomenclatura

- Sq = Desviación estándar de las descargas de los goteros.
 \bar{q} = Caudal medio de las mediciones de las descargas (L/h).
 CU = Coeficiente de Uniformidad del emisor (%).
 m = Número de observaciones.
 $q_{25\%h}$ = Caudal medio del 25% de los emisores de menor caudal (l/h).
 q_{med} = Caudal medio del emisor (l/h).
 CV = Coeficiente de Variación.
 ep = Número de emisores por planta.
 q_{min} = Caudal mínimo del emisor (L/h).
 N = Número de emisores agrupados por planta (1).