"Enseñar la explotación de la tierra, No la del hombre"

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua

ANÁLISIS HIDRÁULICO MATEMÁTICO DEL FLUJO EN TUBERÍAS CON SALIDAS MÚLTIPLES

TESIS

COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

DIRECCION GE...EP...L A...DEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOL...ES
OFICINA DE EXAMENES ...ALES

MAESTRO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA

PRESENTA:

MARLIO BEDOYA CARDOSO

Julio de 2012
Chapingo, Texcoco, Estado de México

ANÁLISIS HIDRÁULICO MATEMÁTICO DEL FLUJO EN TUBERÍAS CON SALIDAS MÚLTIPLES

Tesis realizada por **Marlio Bedoya Cardoso** bajo la dirección del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA AGRICOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA, ORIENTACIÓN USO INTEGRAL DEL AGUA.

DIRECTOR: _____

Dr. Vicente Ángeles Montiel

ASESOR: _____

Dr. Mauricio Carrillo García

ASESOR: _____

Dr. Irineo Lorenzo López Cruz

DEDICATORIA

A mi Madre:

Graciela Cardoso Cuellar

A mi Padre:

Fernando Bedoya Losada

A mi Amiga y Esposa:

Nadia Brigitte. Sanabria Méndez.

A mis Hermanos:

Fernando M. Bedoya Cardoso

Hollman Bedoya Cardoso

Diego A. Bedoya Cardoso

A mis compañeros y Amigos de Chapingo

A todos mis Familiares y Amigos de Colombia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios que me dio la vida, una maravillosa familia, una mujer extraordinaria como esposa y unos amigos inolvidables.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que fue indispensable para llevar a cabo las actividades académicas durante mi estancia en el posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo por haberme dado la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

Al programa de Postgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por permitirme ser parte de su proyecto académico

Al Dr. Ramón Arteaga Ramírez por haber creído en mí.

Al Dr. Vicente Ángeles Montiel, por sus indicaciones y haber dirigido este trabajo de investigación.

A los Doctores Irineo López y Mauricio Carrillo por su valiosa colaboración.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña quien me ayudó con la parte estadística de este trabajo.

Al Coordinador del Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua: Dr. Eugenio Romanchik K. quien me dio todas las facilidades para culminar el postgrado.

Al Dr. David Cristóbal Acevedo, Coordinador del Posgrado en recursos naturales, quien permitió realizar los análisis de suelo para este trabajo.

A todos los profesores de la Universidad Autónoma Chapingo que contribuyeron con su conocimiento en mi formación.

A todo el personal administrativo y operativo que contribuyó de alguna forma con este logro.

DATOS BIOGRÁFICOS DEL AUTOR

El autor del presente trabajo de tesis es originario de Colombia, nacido el 16 de octubre de 1978 en el municipio de Neiva en el departamento del Huila. Es bachiller académico del Colegio Nacionalizado José Acevedo y Gómez del municipio de Acevedo. Inició estudios de Ingeniería Agrícola en la Universidad Surcolombiana en el 2002 y finalizó en el año 2007, obteniendo su título como Ingeniero Agrícola el 27 de Octubre del mismo año.

Como profesional ha desempeñado los siguientes cargos:

Ingeniero Residente, en la construcción del sistema de riego y drenaje del campo deportivo del municipio de San Agustín en el departamento del Huila. Julio 2007 a Enero 2008.

Trabajó con la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia desempeñando el cargo como Extensionista del municipio de Saladoblanco en el departamento del Huila. Febrero 2008 a Julio 2010 y

En agosto de 2010 ingresó al Programa de Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua en la Universidad Autónoma Chapingo, para realizar estudios de Maestría.

RESUMEN

Las pérdidas por fricción y localizadas, el espaciamiento entre emisores, la pendiente del terreno, la velocidad de descarga y el régimen del emisor, son parámetros importantes para obtener un buen diseño de laterales de riego y uniformidad de aplicación. Por lo anterior, el presente trabajo se realizó con el fin de mejorar la uniformidad de riego, utilizando espaciamientos distintos en un lateral. Las pruebas se realizaron en dos laterales de 50 metros (m) de longitud y 13.5 milímetros (mm) de diámetro interior, y basado en los resultados de diámetro húmedo formado en el suelo, se decide para el primer lateral un espaciamiento constante de 0.40 m y para el segundo lateral, espaciamientos distintos de 0.40 m en los primeros 10 m, y 0.35 m hasta el final; los dos laterales tienen espaciamiento inicial de 0.35 m, para asegurar un toma de presión cada 10 metros para su respectiva lectura. Todos los goteros de los dos laterales se aforaron 3 veces para determinar su promedio. Los goteros utilizados fueron auto compensados de 8 litros por hora (l/h) de la marca NAANDANJAIN, pues presentaron mejor uniformidad de aplicación, mejor coeficiente de determinación R^2 y menor coeficiente de variación de los emisores probados (4, 8 y 12 l/h). La propuesta de espaciamientos distintos para laterales de riego, mejora entre un 2 y 2.37% la uniformidad de aplicación en comparación con el espaciamiento constante utilizado, pero la hipótesis de igualdad de varianza, muestra con un nivel de significancia del 95% que esta mejora, no representa diferencias significativas entre los dos laterales, igualmente basado en los resultados del análisis hidráulico y matemático hecho con la ecuación de Darcy-Weisbach y Blasius se concluye que esta debe ser utilizada y considerarse como una norma para determinar las pérdidas por fricción en tuberías por su alta precisión, comparada con la ecuación de Hazen-Williams.

Palabras claves: Diámetro húmedo, espaciamientos entre emisores, Uniformidad de aplicación, pérdidas por fricción y localizadas.

ABSTRACT

Friction and localized losses, the spacing between emitters, the slope of the ground, the emitter flow rate and flow regimen are important parameters for design a suitable irrigation lateral and an emission uniformity. By these considerations, the present work was performed in order to improve the emission uniformity, using different spacing on a lateral. The tests were conducted on two laterals of 50 meters (m) length and 13.5 millimeters (mm) inside diameter. Based on the results of wetting diameter formed on soil, it was decided to use a constant spacing of 0.40 m on the first lateral. A different spacing was set for the second lateral, this is: 0.40 m in the first section and 0.35 m in the other 40 m. The two laterals have an initial spacing of 0.35 m to ensure that every 10 meters could be installed a pressure outlet for measurement. All the emitters of the two laterals are gauged 3 times to determine their average. 8 liters per hour (l h) self-compensated drippers from NAANDANJAIN brand have been used, because they showed a better emission uniformity, better determination coefficient R^2 and a lower coefficient of variation from the emitters tested (4, 8 and 12 l / h.) Compared to the constant spacing used. The proposal of a different spacing for irrigation laterals improved between 2.0 and 2.37% the emission uniformity, but the hypothesis of equal variance, show with a significance level of 95% this improvement does not represents significant differences between the two laterals. In the same way based on the result hydraulic and mathematic analysis done with Darcy-Weisbach and Blasius equation, it was concluded that it must be considered and used as a standard for determining loss friction in pipes because of its high precision, contrasted with Hazen-Williams equation.

Keywords: wetting diameter, spacing between emitters, emission uniformity, friction losses and localized.

CONTENIDO

Resumen VI

Contenido VIII

Índice de Cuadros XI

Índice de Figuras XII

1. Introducción……. 1

2. Objetivos…… 4

3. Revisión de literatura…… 5

3.1 Movimiento de agua en el suelo…… 5

3.1.1 Zona saturada bajo el emisor…… 8

3.1.2 El radio máximo teórico…… 9

3.1.3 Porosidad del suelo……. 11

3.2 Pérdidas de carga por fricción en tuberías con salidas múltiples… 12

3.2.1 Ecuaciones para el cálculo de pérdidas por fricción…… 12

3.2.2 Determinaciones del factor de fricción…… 15

3.2.3 Determinación del factor de salidas múltiples…… 19

3.2.4 Pérdidas menores o localizadas…….. 23

3.3 Ecuación del emisor…… 27

3.4 Coeficiente de Uniformidad…… 28

3.5 Coeficiente de Variación…… 31

3.6 Coeficiente de determinación…… 32

4. Materiales y Métodos…… 33

4.1 Descripción de la parcela……. 33

4.2 Método para determinar las características del suelo……. 33

4.3 Método para fijar el espaciamiento entre emisores…….. 34

4.4 Método de selección y determinación de la ecuación del emisor... 35

4.5 Método para establecer pendiente cero en los laterales……. 35

4.6 Método para determinar las pérdidas por fricción y menores……. 35

4.7 Método para determinar el coeficiente de uniformidad……. 37

4.8 Método para propuesta de aforo…….……. 38

4.9 Procedimiento para el análisis de resultados……. 40

5. Resultados y Discusión……... 41

5.1 Características del suelo…… 41

5.2 Selección del emisor…….. 42

5.3 Relación del volumen aplicado y diámetro húmedo…….. 46

5.4 Presión a lo largo del lateral……. 46

5.5 Pérdidas por fricción y menores…….. 48

5.6 uniformidad de aplicación……. 54

5.7 Propuesta de aforo……. 55

5.7.1 Primer Procedimiento……. 55

5.7.2 Segundo y tercer procedimiento…….. 57

5.7.3 Cuarto Procedimiento…… 58

6. Conclusiones…….. 60

Literatura citada…….. 63

Apéndice A Lista de materiales utilizados……. 69

Apéndice B Datos de campo lateral Tradicional…… 75

Apéndice C Datos de campo lateral Propuesto…… 78

Apéndice D Datos para el coeficiente de uniformidad lateral tradicional y propuesto en las dos repeticiones…….. 82

ÍNDICE DE CUADROS

1. Valor de u en función del número de emisores por planta (e)…..... 29
2. Algunas características del suelo de los lotes objeto de estudio… 41
3. Porosidad densidad aparente y real del suelo objeto de estudio… 41
4. Coeficiente de Variación (C_v) y Uniformidad de aplicación (C_{EU}) de los goteros probados en campo…….. 43
5. Diámetro húmedo de los emisores probados……..... 44
6. Distribución de presiones en el lateral con espaciamientos constantes de 0.40 metros con pendiente cero (Tradicional)…….. 47
7. Distribución de presiones en el lateral con espaciamientos distintos (0.40 y 0.35) metros con pendiente cero (Propuesto)….. 47
8. Pérdidas por fricción en el lateral tradicional…….. 49
9. Pérdidas por fricción en el lateral propuesto…….. 49
10. Pérdidas menores por conexión en el lateral tradicional……..... 53
11. Pérdidas menores por conexión en el lateral Propuesto…… 54
12. Coeficientes de uniformidad en los dos laterales…….. 55
13. Uniformidad en procedimientos de aforo en el lateral tradicional… 58
14. Uniformidad en procedimientos de aforo en el lateral propuesto… 59

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Tubería con salidas múltiples…….. 19
2. Reducción y ampliación posterior del flujo por conexión de emisor.. 24
3. Interior de la tubería…….. 25
4. Vista satelital del campo experimental Tlapeaxco, Montecillo y la Cerona. Google Earth 2012 ®……. 33
5. Montaje del sistema Experimental…….. 38
6. Ecuación de los emisores y Coeficiente de determinación R^2…….. 42
7. Ecuación del volumen aplicado versus diámetro húmedo…….. 46
8. Longitud equivalente por conexión del emisor……. 53
9. Comportamientos de los coeficientes de uniformidad con n=5……. 58
10 Comportamientos de los coeficientes de uniformidad con n=25….. 59

1. Introducción

Indudablemente la implementación del riego por superficie en áreas cultivadas mejoró la producción de éstas, en comparación a las siembras por temporal, con la desventaja de generar grandes pérdidas del recurso hídrico, especialmente por infiltración en los canales de conducción que no están revestidos y por percolación profunda en las parcelas; fue así, como el riego a presión logra mitigar considerablemente este impacto ambiental y aumentar la producción con un mayor número de riegos, gracias a la utilización de tuberías, accesorios, emisores y sistemas de bombeo.

Los sistemas de riego presurizados juegan un papel fundamental en la agricultura moderna, pues con estos se busca mejorar los rendimientos de los cultivos para suplir las demandas alimentarias de la población, hacer uso racional del agua y causar la menor pérdida y contaminación del recurso hídrico, cada vez más escasos en algunas zonas del mundo. Estos sistemas de riego han habilitado suelos potencialmente aptos con características edáficas y pendientes que hacen difícil la implementación del riego por gravedad; razón por la cual se han aumentado las áreas regadas con los sistemas de riego presurizados.

El sistema de riego a presión requiere de un cabezal, donde se ubica la motobomba eléctrica o de combustión interna, que suministrará la potencia requerida para vencer las pérdidas por fricción de la tubería, los accesorios y la pendiente topográfica del terreno, así proporcionar la lámina de agua requerida por el cultivo establecido o a establecer en todos los lugares de la

parcela. Generalmente el costo inicial de implementación de estos sistemas de riego presurizados y el consumo energético son las desventajas más significativas en comparación con el riego por gravedad.

Entre los sistemas de riego presurizados se encuentra el localizado. El calificativo de localizado, referido a este tipo de riego, incide en que el agua se aplica sólo en determinadas partes de la parcela; esta es una característica distintiva básica de este tipo de riego frente a la mayor parte de los riegos por superficie o por aspersión. (Arbat, 2005).

El riego localizado se empezó a ensayar en Alemania en 1860 y en Estados Unidos en 1918, mediante tuberías porosas o perforadas enterradas. El sistema resultó caro por el tipo de tuberías que se empleaban y presentaba problemas de obstrucción, porque las raíces de las plantas acababan taponando las salidas (Martínez, 1991). Pero fue hasta la década de 1960 cuando este tipo de sistemas de riego comenzó a utilizarse de forma masiva en los países como Estados Unidos, Israel, Suráfrica y Australia entre otros. Como consecuencia del auge de la industria de los plásticos que proporcionó materiales adecuados y baratos.

La red de distribución de un sistema de riego localizado se dividen en: principal, segundaria, terciaria y lateral; la línea lateral está considerada como una tubería con salidas múltiples, ya que es donde se instalan los emisores que suministran el agua a las plantas; por lo anterior, el diseño hidráulico de la tubería lateral juega un papel importante en estos sistemas de riego, pues de él depende el éxito o fracaso de los proyectos.

El principal problema presentado en los laterales con emisores igualmente espaciados, es que a medida que avanza el flujo, la descarga de los emisores va disminuyendo igual que la uniformidad de riego por efectos de pérdidas de presión y caudal, por este motivo, en el presente trabajo se planteó probar la siguiente hipótesis: “Es posible mejorar la uniformidad de riego en los laterales, trabajando con espaciamientos distintos entre los emisores”. Para eso se proponen las siguientes metodologías:

1) Método para determinar características del suelo
2) Método para fijar el espaciamiento entre emisores
3) Método para la selección del emisor
4) Método para determinar las pérdidas por fricción y menores
5) Método para determinar el coeficiente de uniformidad y
6) Método de propuesta de aforo en lateral.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Generar una propuesta de espaciamientos distintos entre emisores que mejore el coeficiente de uniformidad en los sistemas de riego por goteo, analizando el bulbo de humedecimiento generado y basados en las pérdidas de carga por fricción, menores y la ecuación clásica de continuidad.

2.2 Objetivos Específicos

- Establecer una relación entre la conductividad hidráulica del suelo y el caudal del emisor, en la formación de diámetro húmedo.

- Seleccionar el mejor emisor de acuerdo, a su coeficiente de variación, uniformidad de aplicación y coeficiente de determinación R^2.

- Proponer estrategias alternativas de aforo de emisores en lateral que tiendan a reducir el número de lecturas.

3. Revisión de Literatura

3.1 Movimiento del agua en el suelo

El movimiento del agua en el suelo se origina por las diferencias en el potencial del agua entre puntos del suelo. El movimiento se produce desde el estado de mayor energía al de menor, buscando un estado de equilibrio que anule el gradiente de potencial existente. Darcy (1856), formuló matemáticamente el flujo del agua en el suelo: el volumen de agua que fluye por unidad de tiempo en una columna de suelo saturado es directamente proporcional a la diferencia de presión hidráulica y al área transversal de la columna e inversamente proporcional a la longitud de la columna (Ramírez 1994).

$$Q = -K_{sat} * A * \frac{\Delta H}{L} \qquad \text{Ecuación. 1}$$

Dónde:

Q = caudal de agua que fluye (m^3/s)

K_{sat} = conductividad hidráulica a saturación (m /s)

A = área (m^2)

ΔH = altura de agua (m)

L = largo de la muestra de suelo (m)

En el intervalo donde la ley de Darcy es aplicable, la velocidad del flujo es directamente proporcional al gradiente hidráulico; esto indica que, dentro del campo de aplicabilidad de la ley de Darcy, el flujo en el suelo es laminar. Darcy construyó un filtro de arenas finas, generalmente, de lo cual se

deduce que ya en estos suelos el flujo del agua es laminar, por lo menos mientras las cargas hidráulicas no sean excesivas. En suelos más finos (mezcla de limos y arcillas o arcillas puras) el agua circula a velocidades aún menores, por lo que, con mayor razón, el flujo también será laminar. De hecho las investigaciones realizadas a partir de la publicación de la ley de Darcy, indica que esa ley solo es aplicable a suelos de partículas no muy gruesas, quedando, desde luego excluidas las gravas limpias, cantos rodados etc. (Juárez y Rico 2011).

Posteriormente a Darcy, el siguiente paso fundamental en el avance del conocimiento fue alrededor de 1880 por Ph. Forchheimer, quien demostró que la función hidráulica que gobierna el flujo en medios porosos es una función armónica, es decir, que satisface la ecuación de Laplace (ecuación 2). El propio Forchheimer desarrolló al principio de este siglo las bases para el método gráfico que hoy se conoce con el nombre de métodos de las redes de flujo, que sigue siendo el arma más sencilla y poderosa de que el ingeniero dispone para la resolución práctica de los problemas diarios que involucre el flujo de agua en el suelo (Juárez y Rico 2010).

$$\frac{\partial^2 \mathrm{h}}{\partial \mathrm{x}^2} + \frac{\partial^2 \mathrm{h}}{\partial \mathrm{y}^2} = 0 \qquad \text{Ecuación. 2}$$

Slichter (1899), generalizó la ley de Darcy en una ecuación tridimensional,

$$\mathrm{q} = -\mathrm{K}_{\mathrm{sat}} * \nabla \Psi_h \qquad \text{Ecuación. 3}$$

Dónde:

$q =$ Densidad de flujo, cantidad de agua que fluye por unidad de área y

K_{sat} = de tiempo (m^3/m^2 s).

$\nabla\Psi_h$= Conductividad hidráulica a saturación (m /s).

Es el gradiente de potencial (o gradiente hidráulico) en un espacio tridimensional (adimensional).

La generalización de Slichter describe condiciones de flujo permanente (estacionario), es decir invariables en el tiempo (Ramírez 1994).

Richards (1931), extendió a condiciones de flujo no saturado la generalización de Slichter, originariamente concebida para flujo saturado. Para ello, trató a la conductividad hidráulica K como función del potencial matricial Ψ_m. (Ramírez 1994), entonces la ecuación 3 quedaría:

$$q = -K * (\Psi_m) * \nabla\Psi_h \qquad \text{Ecuación. 4}$$

Dónde:

q = Densidad de flujo, cantidad de agua que fluye por unidad de área y de tiempo (m^3/m^2 s)

K = Conductividad hidráulica (m /s)

Ψ_m = Potencial matricial (Kpa.)

Existen varios modelos matemáticos basados en la resolución de ecuación de Richards mediante métodos analíticos o numéricos y que permiten la simulación del movimiento de agua en el suelo en condiciones de riego localizado. Entre las soluciones analíticas: Philip (1971), Raats (1971), Warrick (1974), Revol *et al.* (1997), Coelho y Or (1996), entre otras; y entre

las soluciones numéricas: Brandt *et al.* (1971), Van der Ploeg y Benecke (1974), Armstrong y Wilson (1983), Taghavi *et al.* (1984), Ghali (1986), Ramírez de Cartagena (1994), Simunek *et al.* (1999), Annandale *et al* (2003). En todos los modelos anteriores la resolución de la ecuación de Richards se consigue imponiendo unas determinadas condiciones de contorno al dominio de flujo definido (Arbat, 2005).

3.1.1 Zona saturada bajo el emisor

El agua procedente de los goteros se distribuye en la superficie del suelo formando un charco que aumenta su extensión hasta que la velocidad de infiltración del suelo se iguala con el flujo de agua que aporta el gotero. Después de un cierto tiempo de iniciarse el riego la extensión del área mojada bajo los emisores alcanza un valor máximo (Wooding, 1968). La forma y dimensiones de la zona encharcada vienen condicionadas por la disposición y caudal de los emisores, y por la capacidad de infiltración del suelo (Arbat, 2005).

En riego por cintas o goteo cuando los emisores están poco espaciados, en el terreno se forma una franja humedecida (banda regada) a lo largo de la longitud del lateral y cuando el emisor está aislado se forma una especie de circulo (diámetro húmedo); esta banda regada y el diámetro húmedo están en función de las características del suelo y el volumen aplicado al terreno hasta alcanzar un valor máximo.

Bresler (1978), establece un método, basado en la solución de Wooding (1968), que permite fijar la separación entre emisores en función de la sensibilidad del cultivo, el tipo de suelo y del caudal utilizado. De su trabajo se deduce que la utilización de emisores de mayor caudal permite aumentar su separación y reducir su número, con el ahorro económico que esto implica. Aunque un mayor caudal también puede comportar mayores pérdidas debidas a la escorrentía superficial de agua y a la evaporación (Arbat, 2005).

En riego por goteo, al humedecerse sólo una parte de la superficie del suelo, puede producirse la difusión de oxígeno durante el proceso de riego, y por consiguiente asegurar una mejor aireación de las raíces. Sin embargo, el área próxima al emisor está saturada durante el periodo de riego y durante algún tiempo después del riego impidiendo la difusión de oxígeno en la fase gaseosa (Ramírez 1994).

3.1.2 El radio máximo teórico

Para determinar el diámetro húmedo máximo que puede alcanzar un emisor aislado, Jury y Earl (1977) indican que el radio de la zona saturada bajo un emisor no va a superar un valor máximo teórico. Proponen calcularlo a partir de la solución de Wooding (ecuación 5), despreciando el segundo sumando que contempla el movimiento de agua debido a la capilaridad, por lo anterior y en estas condiciones el radio máximo teórico (r_{max}) se calcularía según la ecuación 6 (Arbat, 2005).

$$\frac{Q}{\pi r_0^2} = K_s + \left[\frac{4K_s}{\pi \alpha r_0}\right]$$ Ecuación. 5

Dónde:

Q = Caudal del emisor [L^3 T^{-1}]

K_s = Conductividad hidráulica saturada [L T^{-1}]

r_0 = radio último del charco [L]

α = Coeficiente de la función de retención de agua en el suelo del modelo de van Genuchten o coeficiente de la curva de conductividad hidráulica insaturada en el modelo de Gardner.

$$r_{max} = \left[\frac{Q}{\pi K_s}\right]^{0.5}$$ Ecuación. 6

Para determinar la anchura máxima de banda regada en el caso de emisores en línea se utiliza la siguiente expresión:

$$x_{max} = \frac{q_L}{2K_s}$$ Ecuación 7.

Dónde:

q_L= Caudal de emisor por unidad de longitud [L^2 T^{-1}]

Schwartzman y Zur (1986), por medio de dos ecuaciones describen un método para determinar la anchura y profundidad del volumen del suelo humedecido bajo un emisor, las cuales se describen a continuación:

$$z = 2.54V^{0.63}\left(\frac{K_s}{q}\right)^{0.45}$$ Ecuación 8.

$$d = 1.82V^{0.22}\left(\frac{K_s}{q}\right)^{-0.17}$$ Ecuación 9.

El diseño y manejo adecuado de los sistemas de riego por goteo subterráneo (SDI), requieren el conocimiento preciso de la distribución de agua en el suelo durante el riego por goteo, el cual es necesario para la optimización de la producción de los cultivos y minimizar las pérdidas por percolación profunda. Ésta compresión puede ser desarrollada a través de una combinación de experimentos de campo con simulación numérica. (Lafolie *et al* 1989; Kandelous *et al* 2011)

3.1.3 Porosidad del suelo

La porosidad (ecuación 10) es definida como la parte qué no es sólida en el suelo y está ocupada por aire y/o por agua, la cual se expresa en porcentaje. A su vez está dividida en macroporosidad y microporosidad, la macroporosidad (ecuación 12) es generalmente ocupado por aire, ya que el efecto de la gravedad sobre el agua es mayor al efecto capilar, por lo tanto no es retenida, la microporosidad (ecuación 11) habitualmente está ocupada por agua, debido a la fuerza de capilaridad que ejerce el suelo sobre el agua.

$$P = \frac{Dr - Da}{Dr} * 100 \qquad \text{Ecuación 10.}$$

$$mp = \frac{CC}{100} * Da * P \qquad \text{Ecuación 11.}$$

$$Mp = P - mp \qquad \text{Ecuación 12.}$$

Dónde:

P = Porosidad del suelo (%)

Dr = Densidad real (gr/cm^3)

Da = Densidad aparente (gr/cm^3)

CC = Capacidad de campo (%)

mp = Microporosidad (%)

Mp = Macroporosidad (%)

3.2 Pérdidas de carga por fricción en tuberías con salidas múltiples

Para determinar las necesidades de energía en el cabezal del sistema, es necesario cuantificar las pérdidas de carga en los accesorios, las tuberías cerradas o simples, así como en las tuberías con salidas múltiples.

La pérdida de carga en tuberías con salidas múltiples igualmente espaciadas, será de menor magnitud que la pérdida de carga en una tubería similar que trasmite el gasto completo sobre toda su longitud debido a que el gasto se disminuye establemente cada vez que pasa por una salida (García y Briones, 2009). Teniendo en cuenta lo anterior se hace necesario el cálculo exacto de las pérdidas por fricción y localizadas para no sobredimensionar la potencia del centro de control o cabezal del sistema.

3.2.1 Ecuaciones para el cálculo de pérdidas por fricción

Las pérdidas por fricción en tuberías dependen principalmente de tres factores que son:

- la rugosidad interna de la tubería
- Diámetro de la tubería y
- La velocidad del agua

Christiansen, (1942) manifiesta, que hay muchas fórmulas basadas en numerosas pruebas en tuberías de distinto diámetro y tipo, las cuales han sido propuestas para expresar la relación entre los factores anteriormente

dichos. Las tres fórmulas más comúnmente utilizadas como tablas y/o diagramas para pérdidas por fricción en tuberías usadas en sistemas de aspersión son Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Scobey, estas fórmulas son las siguientes:

Darcy-Weisbach:

$$H_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \qquad \text{Ecuación 13.}$$

Hazen-Williams:

$$H_f = \frac{3.022\, L\, V^{1.852}}{C^{1.852} D^{1.167}} \qquad \text{Ecuación 14.}$$

Scobey:

$$H_f = \frac{\mathrm{K}_s\, L\, V^{1.9}}{1{,}000 D^{1.1}} \qquad \text{Ecuación 15.}$$

Dónde:

H_f = Pérdidas por fricción por unidad de longitud (ft)

V = Velocidad media (ft s^{-1})

D = Diámetro de la tubería (ft)

g = Aceleración de la gravedad (32.2 ft s^{-2})

L = Longitud de la tubería (ft)

f = Factor de Fricción de Darcy-Weisbach (adimensional), valores que van desde 0.015 para tuberías de gran suavidad hasta 0.050 para tuberías con mucha rugosidad.

C = Coeficiente de Hazen-Williams (adimensional), valores que van desde 140 para tuberías de gran suavidad hasta 70 para tuberías con mucha

rugosidad y

K_s = Coeficiente de Scobey (adimensional), valores que van desde 0.30 para tuberías de gran suavidad hasta 1.0 para tuberías con mucha rugosidad.

En los últimos años se han propuesto otras fórmulas, que dada su simplicidad, las adoptaron de inmediato. Ángeles, (2008) destaca las siguientes:

Veronese: Es una fórmula de utilización práctica, recomendada para el cálculo hidráulico de tuberías de polietileno PVC y esta dada por:

$$H_f = 0.00092 \frac{Q^{1.8} L}{D^{4.8}}$$ Ecuación 16.

Recomendándose su empleo para 40.000 < Re < 1.000.000

Cruciani: fórmula que se utiliza para el cálculo hidráulico de tuberías de polietileno PE y esta dada por:

$$H_f = 0.00099 \frac{Q^{1.75} L}{D^{4.75}}$$ Ecuación 17.

Valido para 40.000 < Re < 1.000.000

Manning: Se aplica prácticamente a todo tipo de conductos**,** tanto en los que el agua circula a superficie libre, como en los que el escurrimiento es a presión.

$$H_f = 10.2936 \, {n_M}^2 \frac{Q^2 L}{D^{16/3}}$$ Ecuación 18.

Dónde:

H_f = Pérdidas de carga por fricción en la tubería, en (m)

Q = Caudal que circula por la tubería, en ($m^3\ s^{-1}$)

D = Diámetro de la tubería, en (m)

L = Longitud de la tubería (m)

n_M = Se conoce como coeficiente de Manning, y su valor depende del material de fabricación del tubo.

Se han hechos esfuerzos para simplificar el procedimiento y eliminar el uso de los diagramas para encontrar el factor de fricción "f", los cuales son responsables del uso de otras ecuaciones empíricas menos precisas como la ecuación de Hazen–Williams; pero con la formula de Swamee y Jain se elimina las ventajas últimas de las ecuaciones en ensayos en tuberías. Por lo tanto debido a su exactitud general y completa gama de aplicaciones, la ecuación de Darcy–Weisbach se debe considerar la norma y las demás se deben dejar para los historiadores (Brown, 2002).

3.2.2 Determinaciones del factor de fricción

Calcular el factor de fricción f a lo largo de la manguera con goteros no es simple, pues f varía en cada segmento entre dos emisores, ya que éste depende de la rugosidad relativa y del número de Reynolds (Re), el cual esta dado por:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$ Ecuación 19.

O equivalente a:

$$Re = \frac{v_s D}{\gamma}$$ Ecuación 20.

Dónde:

ρ = Densidad del fluido (Kg Cm^{-3})

v_s = Velocidad característica del fluido (m/s)

D = Diámetro de la tubería a través del cual circula el fluido (m)

μ = Viscosidad dinámica del fluido Kg $(m\ s)^{-1}$

γ = Viscosidad cinemática del fluido la cual se expresa de la siguiente forma (m^2/s).

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho}$$ Ecuación 21.

Para tubos con paredes lisas y régimen de flujo laminar ($0 < Re < 2000$), donde las pérdidas por fricción no dependen del material de la tubería, el factor de fricción f se calcula directamente con la fórmula de Hagen-Poiseville dada por la ecuación 22.

$$f = \frac{64}{Re}$$ Ecuación 22.

En régimen o escurrimiento transicional ($2000 < Re < 4000$) el factor de f es incierto; sin embargo, a partir de experimentos realizados en tuberías comerciales, se ha encontrado que varía de 0.03 a 0.08. (Ángeles, 2008).

Para el cálculo del factor de fricción f en régimen turbulento ($Re > 4000$) es muy utilizada la ecuación de Colebrook-White por su precisión. Tiene la desventaja de que para su solución se necesita de aproximaciones

sucesivas por tratarse de una ecuación implícita (Ángeles, 2008). Se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left[\frac{\varepsilon}{3.71*D} + \frac{2.51}{Re*\sqrt{f}}\right] \qquad \text{Ecuación 23.}$$

Dónde:

ε = Es la altura de la rugosidad interna de la pared de la manguera.

Para números de Reynolds entre el siguiente rango (3000 < Re < 100000), puede ser utilizada la ecuación empírica presentada por Blasius en 1913 (Howell y Barinas 1980; Hathoot, *et al* 1993; Brown 2002; Juana *et al* 2002):

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \qquad \text{Ecuación 24.}$$

La ecuación 24. Es apropiada para tuberías de plástico en sistemas de riego localizado y recomendadas para diámetros menores o iguales a 125 mm.

Bagarello *et al* (1995) propone dos criterios simples para estimar f basados en enfoque puramente empírico y un análisis semi-teórico de la relación entre la ley de la resistencia al flujo y la distribución de la velocidad en la sección transversal del tubo. De acuerdo al enfoque empírico el coeficiente C de Blasius (1913) asume en la ecuación un valor constante igual a 0.302 (ecuación 25)

$$f = \frac{C}{Re^{m}} \qquad \text{Ecuación 25.}$$

Dónde:

m = es un Coeficiente igual a 0.25.

De acuerdo al enfoque semi-teórico la siguiente ecuación debe ser usada para determinar los coeficiente de C y m

$$C = \frac{6.152}{Re^{0.183}}$$ Ecuación 26.

$$m = \frac{2}{8-(\frac{12.40}{Re^{0.157}})}$$ Ecuación 27.

Utilizando la siguiente ecuación explicita de Swamee y Jain (1976) para el cálculo del factor de fricción en diversas simulaciones de riego por goteo, se concluye que es suficiente precisa con un error máximo de $\pm$ 1% (Valiantzas, 2005). La ecuación (28) de Swamee y Jain (1976) determina el factor de fricción de Darcy sin necesidad de iteraciones.

$$f = 1.325\left[In\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^{-2}$$ Ecuación 28.

Estos mismos autores añaden que ésta ecuación es válida para números de Reynolds entre ($5000 < Re < 10^8$) y relaciones de ε/D entre los siguientes valores ($10^{-6} < \varepsilon/D < 10^{-2}$) citado por Hanafi *et al* (2006).

Swamee (1993), trabajando con la conducción de petróleo, presenta una formula general para el cálculo del factor de fricción f en flujo laminar, turbulento y transicional; válida para números de Reynolds entre el siguiente rango ($0 \leq Re \leq 10^8$) descrito así: citado por (Swamee 1998; Swamee 2001; Andrade 2009).

$$f = \left\{\left(\frac{64}{Re}\right)^8 + 9.5\left[ln\left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right) - \left(\frac{2500}{Re}\right)^6\right]^{-16}\right\}^{0.125}$$ Ecuación 29.

3.2.3 Determinaciones del factor de salidas múltiples

Como se muestra en la figura 1, la estimación de la pérdida de carga por fricción en tuberías con salidas múltiples requiere de un análisis tramo por tramo a partir de la última salida aguas abajo, el caudal de operación aguas arriba y el cálculo de pérdidas causado por fricción en cada segmento (Anwar, 1999a).

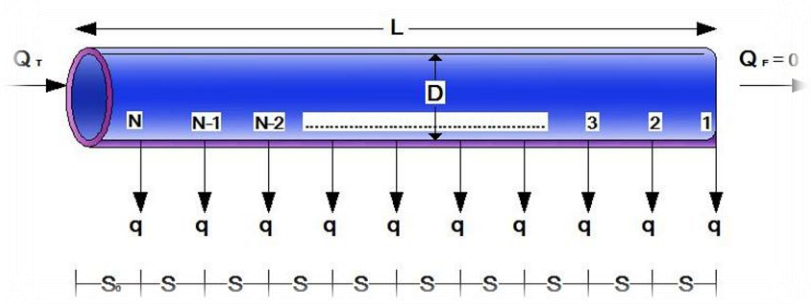


Figura 1. Tubería con salidas múltiples.

Christiansen (1942), desarrolló el factor de fricción (F) para evitar los incomodos análisis tramo por tramo. El factor de Christiansen representado por la ecuación 30 se desarrolló asumiendo lo siguiente:

1. Todas las salidas tienen igual descarga. $q_1 = q_2 = q_3 \ldots\ldots = q_n$
2. Todas las salidas están igualmente espaciadas. S (salidas con espaciamiento constante).
3. La distancia de inicio de la tubería y la primera salida es igual al espaciamiento existente entre todas las salidas de la tubería. $S_0 = S$
4. No hay salida de agua en el extremo de la tubería.
5. El factor de fricción y el diámetro de la tubería son iguales en toda la longitud.

$$F = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{2N} + \frac{(m-1)^{0.5}}{6N^2}$$ Ecuación 30.

Dónde:

$F =$ Factor de Christiansen

$m =$ Exponente de la velocidad en la fórmula usada para el cálculo de las pérdidas por fricción.

$N =$ Número de salidas a lo largo de la tubería.

El factor F es adimensional y depende del número de salidas a lo largo de la tubería y de la fórmula empleada para determinar las pérdidas de carga por fricción (Ángeles, 2003).

Un valor de $m = 1.75$ debe ser utilizado para tuberías de diámetro pequeño, como los laterales de riego por goteo, o en cualquier parte donde el número de Reynolds este entre 3000 y 100000 (Watters, 1978; Ross et al., 1980). El valor de $m = 1.85$ debe ser usado en cualquier situación utilizando la ecuación de Hazen-Williams, generalmente esta debe ser en tubería lisa a partir de 26 mm hasta 75 mm en diámetro y cualquier otra instalación donde el número de Reynolds este entre 10^5 y 10^7. El valor de $m = 1.90$ debe ser aplicado en la ecuación de Scobey, por ejemplo con tubos de aluminio de gran tamaño con acoplamientos (Detar, 1982).

Jensen y Fratini (1975), desarrollaron un ajuste al factor F el cual permite el cálculo de pérdida de carga en tuberías de un solo diámetro con salidas igualmente espaciadas, cuando el tramo inicial antes de la primer salida es

la mitad de los espaciamientos de las salidas en la tubería, Citado por (Anwar, 1999a; Ángeles 2007). Dicho factor esta dado por:

$$F = \frac{1}{2N-1}\left[\frac{2N}{m+1} + \frac{\sqrt{m-1}}{3N}\right] \qquad \text{Ecuación 31.}$$

De igual forma Cuenca (1989), También desarrolla una ecuación para el mismo caso anterior, si el tramo inicial antes de la primera salida es la mitad de los espaciamientos de las salidas de la tubería el factor F de Christiansen es ajustado a F_c dado por:

$$F_c = \frac{2N}{(2N-1)} * \left(\frac{1}{m+1} + \frac{\sqrt{(m-1)}}{6N^2}\right) \qquad \text{Ecuación 32.}$$

Chinea y Domínguez (2006). Presentan un procedimiento teórico para el cálculo de pérdidas por fricción a lo largo de una sección de servicio mixto es decir, tanto la conducción y distribución ocurren simultáneamente, y en este trabajo presentan la siguiente ecuación.

$$F_{N,r} = \frac{N}{N-1+r} * \left(\frac{1}{m+1} + \frac{2r-1}{2N} + \frac{m}{12N^2}\right) \qquad \text{Ecuación 33.}$$

Dónde:

$r =$ Relación entre la distancia del inicio (espaciamiento partida) hasta la primer salida y el espaciamiento constante entre salidas consecutivas.

La solución de Detar (1981) y Cuenca (1989) pueden ser fácilmente obtenidas a partir de la ecuación 33, remplazando la relación de espaciamiento $r = 1$ y $r =$ ½, respectivamente. Estas dos condiciones son las situaciones más comunes en la práctica del diseño, pero otros valores

de la relación de espaciamiento también pueden ser frecuentes (Chinea y Domínguez, 2006).

Scaloppi (1988), ajustó el factor F de Christiansen para calcular las pérdidas por fricción en tuberías con salidas múltiples igualmente espaciadas, donde la primer salida es colocada en cualquier distancia del origen de la tubería, este factor ajustado (F_a) puede ser escrito de la siguiente forma:

$$F_a = \frac{NF+x-1}{N+x-1} \qquad \text{Ecuación 34.}$$

Dónde:

F_a = Factor de ajuste de Christiansen

N = Número de salidas a lo largo de la tubería. Intervalos (1 < N < ∞)

F = Factor de Christiansen

x = Relación del espaciamiento antes de la primer salida y el espaciamiento constante entre salidas consecutivas. Intervalos (0 < x <1).

En la ecuación 34 se puede observar que para x = 1 el F_a se reduce al factor de Christiansen, es fácil comprobar que para x = 0.5 F_a se reduce a la misma expresión desarrollada por (Jensen y Fratini, 1975; y Detar, 1989).

El factor G que permite calcular la pérdida de carga en tuberías con salidas igualmente espaciadas y caudal aguas abajo de la última salida. Si el caudal aguas abajo es nulo, el factor G se reduce al factor de salidas múltiples de Christiansen. Este factor se aplica para el diseño de líneas laterales y tuberías secundarias con distintos diámetros, en sistemas de riego por

aspersión y microaspersión que tengan la primera salida a una distancia igual al espaciamiento completo entre salidas (Anwar, 1999a).

$$G = \left(\frac{1}{N^{2m+1}(1+c)^m}\sum_{k=1}^{N}(k+NC)^m\right) \qquad \text{Ecuación 35.}$$

Dónde:

$k =$ Número entero que represente la sección de la tubería, $k = 1$ para la última sección (aguas abajo) y $k = N$ para la sección más cerca a la entrada de la tubería. (Cerca al espaciamiento partida)

$C =$ Relación de los caudales en cada segmento.

El factor de correlación Ga es general para el cálculo de las pérdidas por fricción para tuberías con salidas múltiples, este factor está en función del número de salidas a lo largo de la tubería, la posición de la primer salida, la relación entre el caudal después de la última salida analizada, el caudal que se transporta al inicio de la tubería en estudio y el exponente de la velocidad de la fórmula de perdida de carga empleada (Anwar, 1999b). Este factor es el siguiente:

$$G_a = \frac{NG+x-1}{N+x-1} \qquad \text{Ecuación 36.}$$

Una tubería con salidas múltiples es una estructura hidráulica, cuyo diseño está limitado por la presión de entrada, la topografía del terreno y por la uniformidad de aplicación de agua que se ve afectada por la pérdida total de energía a lo largo de la tubería, así como las características hidráulicas de la salida (Yildirim, 2006).

3.2.4 Pérdidas menores o localizadas

Algunos diseñadores de sistemas de riego a presión, partiendo de la hipótesis que las pérdidas localizadas se puedes despreciar, no las toman en cuenta, lo cual genera una deficiencia en el diseño y funcionamiento de éstos sistemas, pues un número considerable de emisores en los laterales puede convertirse en un porcentaje importante en las pérdidas de carga total.

Numerosos estudios de investigación han sido publicados sobre pérdidas localizadas generadas por goteros en línea y sobre línea a lo largo de la tubería, que determinan la contracción y la posterior ampliación en la corriente de agua, (Figura 2.) Los emisores sobre línea causan la contracción y la ampliación posterior en la corriente del flujo debido a la parte larga o barra del emisor que se conecta a la manguera Demir (2007).

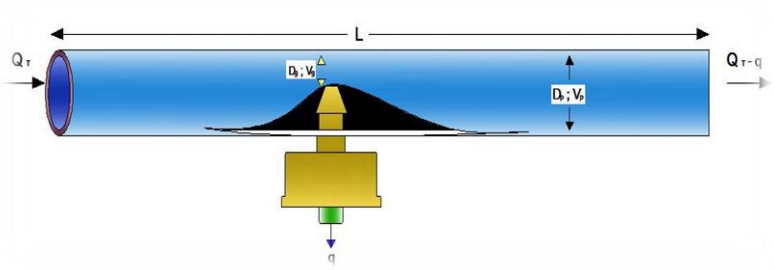


Figura 2. Reducción y ampliación posterior del flujo por conexión de emisor.

Las pérdidas menores, (h_m) son expresadas en la ecuación clásica de la carga cinética multiplicada por el coeficiente de pérdida locales ($\propto$)

$$h_m = \propto \frac{V^2}{2g}$$ Ecuación 37.

Dónde:

h_m = Pérdidas menores (m)

Bagarello *et al* (1997), en su investigación experimental deduce un procedimiento para evaluar las pérdidas locales debido a la protuberancia de la parte sólida del emisor en la línea del flujo de riego por goteo. El coeficiente de las pérdidas locales (ecuación 39) correspondían a diferentes sistemas de emisores sobre línea con diferentes valores de número de Reynolds, y cada sistema de emisor fue caracterizado por un índice de obstrucción (OI) ecuación 38.

$$OI = \left(\frac{1-r^2}{r^2}\right)^{0.645} \qquad \text{Ecuación 38.}$$

$$\alpha = 1.68 * (OI)^{0.645} \qquad \text{Ecuación 39.}$$

Dónde:

$OI =$ Índice de obstrucción

$\alpha =$ Coeficiente de pérdidas menores o localizadas

$r^2 =$ Relación de obstrucción.

El coeficiente de pérdidas locales $\propto$ (ecuación 40) incluye ambas características, la de conexión del emisor y la deformación de la tubería que rodea el vástago (parte insertada del emisor) que es definida en los rangos 1.0 < A_p/A_g < 1.44. Demir (2007).

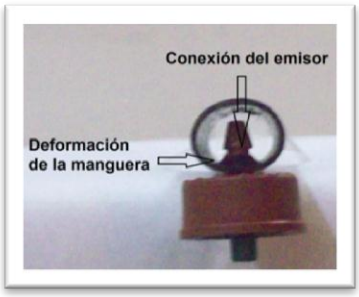


Figura 3. Interior de la tubería.

$$\propto = \ 1.68\left(\frac{A_p}{A_g} - 1\right)^{1.29}$$ Ecuación 40.

Dónde:

$A_p =$ Área de la sección circular de la tubería

$A_g =$ Área ocupada por el emisor dentro de la tubería

Las ecuaciones 39 y 40 son las mismas, solo que una esta en función del radio y la otra esta en función del área.

Provenzano y Pumo (2004), propusieron un procedimiento para estimar las pérdidas locales para riego por cintas, el valor del coeficiente $\propto$ fue correlacionado con parámetros simples de la geometría de la conexión entre el emisor y la tubería, despreciando la morfología específica del emisor. La geometría de la conexión fue caracterizada por una fácil relación de medida $\frac{D_p}{D_g}$ entre el diámetro de la tubería y del emisor, el cual es obtenido en un rango entre 1.00 < $\frac{D_p}{D_g}$ < 1.20

$$\propto = \ 0.056\left[\left(\frac{D_p}{D_g}\right)^{17.83} - 1\right]$$ Ecuación 41.

Dónde:

$D_p =$ Diámetro interno de la tubería

$D_g =$ Diámetro del emisor dentro de la tubería

Martínez (1991), utiliza la ecuación 42 para expresar las pérdidas de carga por conexión en longitud equivalente del lateral y con ella se determina la pérdida unitaria.

$$J = \left(\frac{se+fe}{se}\right)$$ Ecuación 42.

Dónde:

J = Pérdida de carga unitaria corregida por las pérdidas de conexión del emisor m/100m

se = Separación entre emisores m

fe = Longitud equivalente de pérdidas de carga por conexión en m

3.3 Ecuación del Emisor

En laterales de riego por goteo, los emisores son instalados a espaciamientos iguales, la descarga del emisor depende de la presión y los emisores pueden ser caracterizados por (Hathoot, *et al* 1993; Wu, and Yue 1993):

$$q = K_d * H^b$$ Ecuación 43.

Dónde:

q = Es el caudal del emisor (l/h) (g/h)

K_d = Es la constante de proporcionalidad que caracteriza cada emisor

H = Es la presión en que opera el emisor, (m) (ft)

b = Es el exponente que caracteriza el régimen del flujo.

Estos mismos autores han definido que el flujo es laminar, turbulento o totalmente autocompensado, para los valores de b = de 1.0, 0.5, y 0 respectivamente (Keller y Karmeli, 1974).

3.4 Coeficiente de Uniformidad

Los factores que influyen en la aplicación y uniformidad en el sistema de riego por goteo y cintas son:

- Variaciones de presión a lo largo del lateral, generadas por la pendiente del terreno, las pérdidas por fricción y conexión
- Homogeneidad en las salidas de los emisores
- Homogeneidad en los materiales utilizados en el proceso de fabricación del emisor y
- Espaciamiento entre emisores

Christiansen (1942), para comparar patrones de aspersores y determinar como varios espaciamientos afectan los resultados de la distribución de agua, manifestó que se necesita una expresión numérica que sirva como índice para asegurar una uniformidad. Para este propósito una expresión llamada coeficiente de uniformidad (C_u) fue adoptado. El coeficiente de uniformidad expresado como porcentaje es definido por la siguiente ecuación.

$$C_u = 100 * \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}[\sigma_x]}{m_o * n_o}\right] \qquad \text{Ecuación 44.}$$

Dónde:

C_u = Es el Coeficiente de uniformidad (%)

σ_x= Es la desviación de observaciones individuales

m_o= Es la media

n_o= Es el número de observaciones.

Keller y Karmeli (1974), la uniformidad de Emisión (C_{UE}), es útil en diseño y manejo de sistemas de riego por goteo de laterales la cual se expresa de la siguiente manera:

$$C_{UE} = 100 * \left[1 - u + u * \frac{q_{25\%h}}{q_{medh}}\right] * \frac{q_{mind}}{q_{medd}} \quad \text{Ecuación 45.}$$

O a partir de pruebas de campo:

$$C_{UE} = 100 \frac{q_{25\%h}}{q_{medd}} \quad \text{Ecuación 46.}$$

Dónde:

C_{UE} = Es el coeficiente de uniformidad del emisor.

u = Es el factor de corrección o ponderación que depende del número de emisores por planta (adimensional), (Cuadro 1).

$q_{25\%h}$ = Es el caudal medio del 25% de los emisores de menor caudal en la presión de referencia (l/h).

q_{medh} = Es el caudal medio de la muestra de emisores operados a presión de referencia (l/h).

q_{mind} = Es el caudal mínimo en el diseño (l/h) y

q_{medd} = Es el caudal medio de dimensionamiento o diseño (l/h).

Cuadro 1. Valor de u en función del número de emisores por planta (e)

Número de Emisores por planta (e)	<= 1	2	3	4	6	8
Valor de u	1	0.71	0.58	0.5	0.41	0.35

Barragán *et al* (2005), considerando que los emisores se toman por muestras aleatorias y una distribución normal pude ser asumida por la variación de fabricación, la uniformidad de emisión causada por la variación de fabricación puede ser expresada de la siguiente forma:

$$C_{UE} = 1.0 - 1.27 * \frac{Cvf}{\sqrt{ep}} \qquad \text{Ecuación 47.}$$

Dónde:

C_{UE} = Es el coeficiente de uniformidad del emisor.

Cvf = Es el coeficiente de variación de fabricación.

ep = Es el número de emisores agrupador por planta.

El valor de 1.27 en el coeficiente especifica la localización de la media del cuarto inferior de las muestras en una distribución normal.

El coeficiente de uniformidad puede ser estimado en el momento del dimensionamiento teniendo en cuenta el coeficiente de fabricación definido por Keller y Karmeli (1975), de la siguiente forma:

$$C_{EU} = 100 * \left[1 - \frac{1.27 * Cvf}{\sqrt{ep}}\right] * \frac{q_{mind}}{q_{medd}} \qquad \text{Ecuación 48.}$$

La ecuación 48. Es sugerida por la norma EP405.1 (AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS, 2003). Para estimar la uniformidad de emisión de diseño en términos del coeficiente de variación de fabricación (Cvf) y variaciones de presión del emisor.

Barragán *et al* (2005), presentan una fórmula de uniformidad de emisión con los mismos parámetros de la formula original de uniformidad de emisión, pero de una forma diferente, el cual incrementa el valor calculado de 5 a 8% más que el valor calculado utilizando la fórmula original con los mismos datos de campo, la ecuación propuesta es:

$$C_{EU} = 1 - \sqrt{\left(1 - \frac{qmind}{qmedd}\right)^2 + \left(\frac{1.27 * Cvf}{\sqrt{ep}}\right)^2} \qquad \text{Ecuación 49.}$$

La ecuación 49 puede ser escrita de la siguiente forma cuando los emisores son autocompensado:

$$C_{EU} = 1 - \sqrt{\left(\frac{1.27 * Cvf}{\sqrt{ep}}\right)^2} \qquad \text{Ecuación 50.}$$

3.5 Coeficiente de Variación

El coeficiente de variación es una medida de la variabilidad de la descarga de una muestra aleatoria de una marca determinada, modelo o tamaño del emisor como la producida por el fabricante antes de cualquier operación en campo, está dada por la siguiente ecuación.

$$Cv = \frac{s}{\bar{q}} \qquad \text{Ecuación 51}$$

Dónde:

Cv = Coeficiente de variación.

$\bar{q}$ = Descarga media de la muestra de emisores.

s = Desviación estándar de las descargas de la muestra de los emisores.

3.6 Coeficiente de Determinación

Cuando se realiza una regresión a una cantidad de datos es importante contar con una medida que mida el ajuste realizado y que permita decidir si el ajuste lineal es suficiente o deben buscarse modelos alternativos, por lo anterior el coeficiente de determinación (R^2) es una medida que nos dice que tan bien se ajusta la recta de regresión de los datos, es decir es una medida de bondad de ajuste. Una correlación perfecta es aquella en que todos los valores de (Y) caen en la línea de estimación por lo tanto el coeficiente de determinación es 1. Cuando el valor del coeficiente de determinación es 0 quiere decir que no hay correlación entre las dos variables.

4. Materiales y Métodos

4.1 Descripción de la parcela

Las parcelas objeto de la experimentación se encuentran en las instalaciones del laboratorio de ingeniería de riego campo: Tlapeaxco, Montecillo y la Cerona, de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicada en el km. 38 de la carretera México Texcoco, con las siguientes coordenadas 19° 29´ latitud Norte, 98° 54´ de longitud Oeste y una altura de 2250 m.s.n.m. (Figura 4.)

Figura 4. Vista satelital del campo experimental Tlapeaxco, Montecillo y la Cerona. Google Earth 2012 ®

4.2 Método para determinar las características del suelo.

Basados en algunos resultados sobre el levantamiento nutrimental de García (2005), se seleccionaron tres sitios, para determinar las siguientes

características: textura, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente con terrón parafinado, densidad real y conductividad hidráulica con permeámetro de carga constante. Para ello se realizaron los procedimientos establecidos en el laboratorio de física de suelos en el Departamento de suelos de la Universidad Autónoma Chapingo.

Para determinar la densidad aparente utilizando cilindró de volumen conocido, se introduce este cilindro al suelo por impacto, luego se saca el suelo del cilindro y se seca en estufa a 110°C por 24 horas, posteriormente se pesa el suelo seco y se divide por el volumen del cilindro.

4.3 Método para fijar el espaciamiento entre emisores.

En los tres sitios seleccionados anteriormente se puso en funcionamiento un pequeño sistema de riego a presión el cual costaba de goteros de 4, 8 y 12 litros por hora, conectados a tres mangueras de 13.5 mm de diámetro interior, estos emisores suministraron un volumen de 12 litros, y se midió el diámetro húmedo formado a los 6, 9 y 12 litros. Es importante mencionar que cada 15 minutos se aforaron los goteros para la corrección del tiempo de aplicación. Los materiales utilizados pueden verse en el apéndice A.

El máximo diámetro húmedo formado con la aplicación de los 12 litros sirvió como referencia para escoger un espaciamiento comercial cercano a este diámetro (0.4 m) en el lateral tradicional. Y para el lateral propuesto el primer tramo (10 m) estaba espaciado igual al lateral tradicional y el segundo tramo (40 m) era aproximadamente el 85% del primer tramo.

4.4 Método de selección y determinación de la ecuación del emisor.

Para obtener la información que permita determinar la ecuación del emisor, o la relación carga gasto, se debe someter a los emisores a distintas cargas de presión inferior y superior a la su carga nominal, con intervalos que no rebases los 5 metros de columna de agua. Por lo anterior, las siguientes fueron las presiones para su verificación. 2.11, 1.76, 1.41, 1.05, y 0.7 kg cm^{-2} por cada presión se aforó 3 veces y se sacó el promedio, luego se graficó la presión versus el caudal y se obtuvo la ecuación del emisor; este procedimiento se realizó con 5 emisores auto compensados de 4, 8 y 12 litros por hora (l/h) para determinar cuál de ellos presenta mejor uniformidad de descarga, mejor coeficiente de determinación R^2 y menor coeficiente de variación.

4.5 Método para establecer pendiente cero en los laterales.

Se realizó un levantamiento topográfico por altimetría para indicar la posición de nivel cero (altura) de una malla que sirvió de soporte para los laterales. Los materiales utilizados pueden consultarse en el apéndice A.

4.6 Método para determinar las pérdidas por fricción y menores.

Las pérdidas por fricción en los dos laterales se calcularon con las ecuaciones de Hazen-Williams (HW) y Darcy-Weisbach (DW), en ésta última se utilizaron los factores de fricción (f) de Blasius (1913) Constante y variable, Bagarello (1997) y Swamee (1993). Las pérdidas arrojadas en cada una de estas ecuaciones se multiplicaron por el factor de salidas múltiples propuesto por Christiansen (1942) y Scaloppi (1988). Finalmente se utilizó el método paso a paso (SBS) para establecer cual de estas ecuaciones (HW y DW) predice mejor las pérdidas por fricción.

En el lateral propuesto además de utilizar los factores de salidas múltiples de Christiansen (1942) y Scaloppi (1988). Se utilizaron dos procedimientos para determinar un factor de salidas múltiple por contar con dos espaciamientos distintos, estos procedimientos se describen a continuación:

i. Se utilizó el factor de salidas múltiples de Christiansen (1942), para establecer dos factores por tener dos espaciamientos (0.4 y 0.35 metros), luego cada factor se multiplicó con su respectivo número de salidas y se dividió por el número total de salidas (ponderado).
ii. El segundo procedimiento consistió en compensar el efecto de los espaciamientos distintos y transformarlos en espaciamientos constantes de la siguiente manera:

a) Se calcularon las pérdidas por fricción en el tramo aguas abajo como una tubería de salidas múltiples y espaciamiento constante de 0.35 metros (del 20 al 100% de la longitud)

b) Posteriormente se realizó una equivalencia de las pérdidas obtenidas en el punto anterior, con las pérdidas por fricción generadas con un espaciamiento igual al primer tramo (0.4 metros) a través de iteraciones con el cual se obtuvo un número de salidas.

c) Luego se sumó el número de salidas del punto anterior con las salidas del primer tramo, y se calcularon las pérdidas por fricción como una tubería con espaciamientos constantes.

Para determinar las pérdidas menores, primero se utilizó la ecuación 40, con la que se calcula el coeficiente de pérdidas menores generado por la conexión del emisor y la deformación de la tubería, luego se utilizó la

ecuación 37 para establecer las pérdidas menores, es importante mencionar que las áreas que se utilizan en la ecuación 40 se determinaron por medio de digitalización de fotografías con el programa AutoCAD.

4.7 Método para determinar el coeficiente de uniformidad

Una vez seleccionando el mejor gotero y definida la altura topográfica a la cual se debía operar, se ajustó la manguera de 50 metros (lateral) a la malla que sirvió de soporte; el lateral se dividió en 5 partes iguales (10 m), y en cada una de ellas se ubicó un toma de presión, para sus respectivas lecturas. La presión de operación fue 1.83 kg cm^{-2} (26 PSI), con la cual se asegura que al final de este lateral llegara la presión de trabajo del gotero, 0.49 kg cm^{-2} (7 PSI), ya que el rango de operación de estos goteros es de 0.49 a 4.22 kg cm^{-2} (7-60 PSI).

Luego se hizo el respectivo aforo volumétrico con la ayuda de un balde y un cronómetro, para establecer la cantidad de agua que se estaba suministrando a los laterales con la presión de operación, éste procedimiento se realizó tres veces, posteriormente se realizó la prueba a cada lateral de 50 metros (m) de longitud y 13.5 mm de diámetro interior, el primer lateral con espaciamiento constante de 0.40 m (Tradicional) y el segundo lateral con espaciamientos distintos de 0.40 m en los primeros 10 m, y 0.35 m hasta el final (Propuesta); los dos laterales tienen espaciamiento inicial de 0.35 m, después de fijada la presión de operación, se realizaron los respectivos aforos en cada gotero de los laterales, 125 goteros para el primero y 139 goteros para el segundo lateral, esta procedimiento se hizo

con tres repeticiones, finalmente se toman las respectivas presiones en cada tramo del lateral (figura 5).

La presión de operación en los dos laterales (Tradicional y Propuesto), se verificó y ajustó cada diez metros cuando ya se habían aforado por lo menos 25 goteros para asegurar la misma presión de operación al inicio.

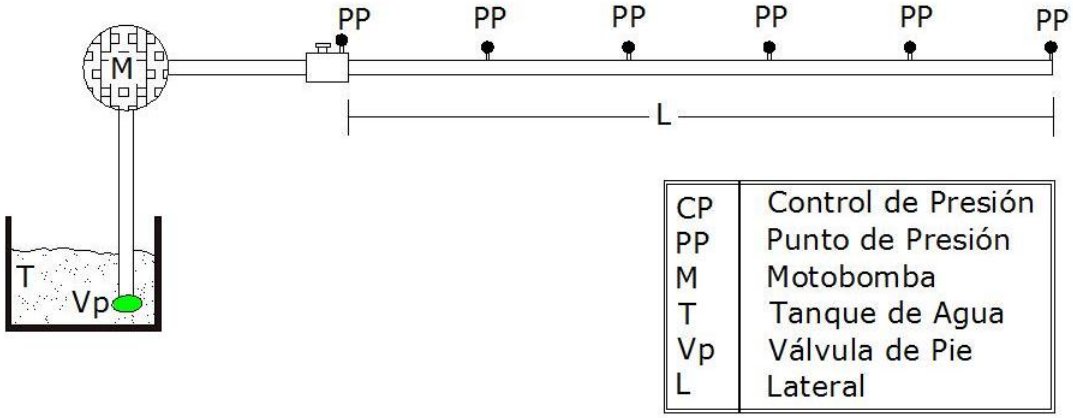


Figura 5. Montaje del sistema Experimental

4.8 Método para propuesta de aforo

Después de realizadas las mediciones en los dos laterales (Tradicional y Propuesto), se determina el coeficiente de uniformidad (aplicación), posteriormente, se diseñaron cuatro procedimientos para predecir la uniformidad de aplicación en los laterales de riego con emisores autocompensados, sin la necesidad de aforar todos los goteros, estableciendo el tamaño de muestra con la ecuación 52, los procedimientos que se realizaron se describen a continuación:

1. Se generaron números aleatorios del 1 al 125, de 50 muestras de tamaño n = 5, 10, 15, 20, 25, 30, para el lateral tradicional y números aleatorios del 1 al 139 de 50 muestras de tamaño n = 5, 10, 15, 22, 30, para el lateral propuesto, el tamaño de la muestra en los dos laterales no es igual por tener diferentes variaciones.
2. Se divide el lateral en 4 partes iguales para realizar los aforos en tres sitios ubicados a 1/4, 1/2, y 3/4 de la longitud del lateral, cada sitio sirvió como punto medio, ya que, se aforaron emisores antes y después de dicho punto.
3. Se decide aforar los goteros que se encuentran a (20, 40 y 80) % de la longitud del lateral y
4. En el cuarto y último procedimiento se resuelve aforar los goteros ubicados a (20, 40 y 60) % de la longitud del lateral, vale la pena mencionar que el máximo de goteros aforados en las propuestas son iguales o menores a los resultados obtenidos con la ecuación 52.

$$n = \frac{N * Z^2 * S^2}{d^2 * (N-1) + (Z^2 * S^2)}$$ Ecuación 52.

Dónde:

N = Número total de emisores.

Z^2 = Seguridad del 95% con coeficiente de 1.96.

S^2 = Varianza

d = Error esperado 0.13 (l/h)

4.9 Procedimiento para el análisis de resultados

Los datos arrojados en este trabajo se analizaron en hojas de cálculos de Excel del programa de Microsoft, en la cual se graficaron algunos resultados, pero los valores de las regresiones, coeficiente de determinación y cuadrado medio del error, de estos gráficos se ajustaron con los valores la herramienta cftools (curve fitting tool) de Matlab.

5. Resultados y Discusión

5.1 Características del suelo

Se pueden ver en el cuadro 2, algunas propiedades de los suelos estudiados, las cuales son similares con los resultados publicados por García (2005) especialmente la clase textural del suelo.

Cuadro 2. Algunas características del suelo de los lotes objeto de estudio.

Lote	Profundidad (cm)	CC [1]	PMP [2]	Kh [3] (cm/h)	Rangos Kh (cm/h)	Clase textural
Lote 1a	0 - 30	28.80	15.55	1.72	0.65-1.9	fr.a.A.[4]
	31- 60	25.93	13.85	0.58	0.65-1.9	fr.a.A.
Lote 1b	0 - 30	48.99	30.32	1.88	0.25-0.75	a.[5]
	31- 60	44.23	27.46	3.27	0.25-0.75	a.
Lote 2	0 - 30	34.85	18.21	0.96	0.65-1.9	fr.a.A.
	31- 60	29.16	15.87	4.14	0.65-1.9	fr.a.A.

1 Capacidad de campo
2 Punto de marchitez permanente
3 Conductividad hidráulica (permeámetro de carga constante)
4 Franco arcillo arenoso
5 Arcilla

En el cuadro 3, se presenta la densidad aparente (Da), densidad real (Dr), a dos profundidades, para establecer las diferentes porosidades.

Cuadro 3. Porosidad densidad aparente y real del suelo objeto de estudio

Lote	Profundidad (cm)	Da (gr./Cm^3)	Dr. (gr./Cm^3)	P[1] (%)	Micro[2] (%)	Macro[3] (%)
Lote 1a	0 - 30	1.28	2.41	47	17	30
	31 - 60	1.50	2.46	39	15	24
Lote 1b	0 - 30	1.11	2.51	56	30	25
	31 - 60	1.39	2.59	46	28	18
Lote 2	0 - 30	1.29	2.39	46	21	25
	31 - 60	1.41	2.47	43	18	25

1 Porosidad (Ecu. 7)
2 Microporosidad (Ecu. 8)
3 Macroporosidad (Ecu. 9)

Los datos de la densidad aparente a profundidad de 0 a 30 cm se determinaron con el uso del cilindro de volumen conocido, diseñado por Unland (muestra inalterada) el cual se adapta a suelos no pedregosos, cuando se usa cilindro con diámetro de 7.5 cm o más. Y no se tomaron los resultados del método con terrón parafinado porqué genera valores más altos de densidad aparente, debido principalmente a que el terrón no incluyen el espacio natural entre terrones en el suelo, ya que el volumen medido corresponde a un terrón secado al aire, por lo que este volumen puede ser mucho menor que el de terrón a la humedad de campo, pues se contrae al secarse (Aguilera y Martínez 1996).

5.2 Selección del emisor

De acuerdo a los resultados mostrados en la figura 6 y cuadro 4, los goteros de 8 (l/h) fueron los seleccionados, por presentar mejor coeficiente de determinación (R^2), mejor uniformidad de aplicación y menor coeficiente de variación.

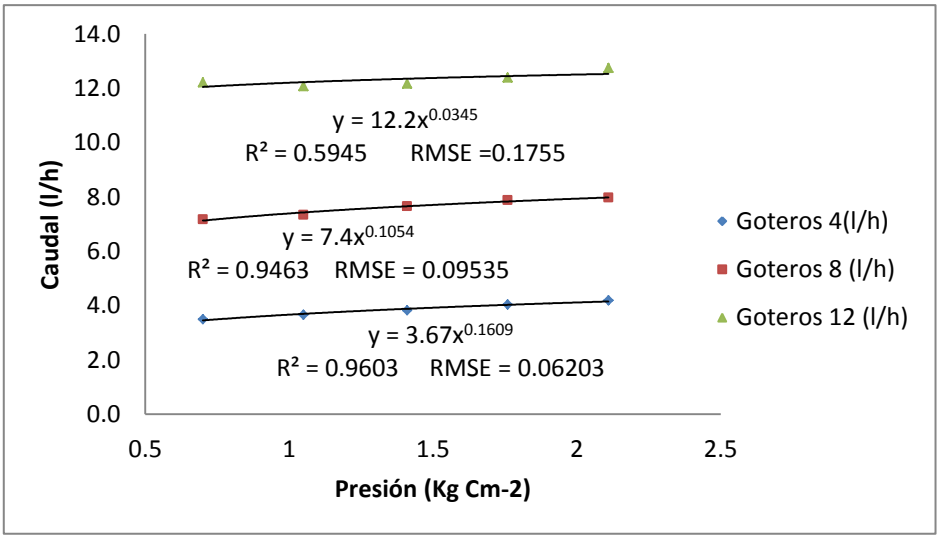


Figura 6. Ecuación de los emisores y Coeficiente de determinación R^2.

Cuadro 4. Coeficiente de Variación (C_v) y Uniformidad de aplicación (C_{UE}) de los goteros probados en campo.

Gotero	Presión (Kg Cm-2)	Caudal Mínimo (l/h)	Caudal Promedio (l/h)	S_x [1]	C_v [2]	C_{UE} [3]
4 (l/h)	2.11	3.68	4.19	0.38	9.08%	76.9%
	1.76	3.56	4.03	0.42	10.30%	76.0%
	1.41	3.36	3.82	0.38	9.91%	76.1%
	1.06	3.24	3.66	0.37	9.99%	76.9%
	0.70	2.92	3.49	0.46	13.16%	68.9%
8 (l/h)	2.11	7.60	7.97	0.35	4.40%	90.4%
	1.76	7.36	7.82	0.28	3.62%	90.2%
	1.41	7.28	7.66	0.24	3.09%	91.4%
	1.06	6.92	7.34	0.27	3.50%	90.0%
	0.70	6.52	7.17	0.36	5.00%	85.0%
12 (l/h)	2.11	12.48	12.74	0.35	2.76%	94.5%
	1.76	12.16	12.38	0.31	2.54%	95.1%
	1.41	12.00	12.17	0.28	2.32%	95.6%
	1.06	11.76	12.06	0.25	2.09%	94.7%
	0.70	11.84	12.22	0.30	2.44%	94.0%

1 Desviación Estándar
2 Coeficiente de Variación
3 Coeficiente de Uniformidad de aplicación Keller y Karmeli (1975).

El análisis de igualdad de varianza realizado en los goteros de 8 y 12 (l/h) muestra con un nivel de significancia del 95% que no existen evidencias significativas entre los dos goteros.

Basados en los resultados obtenidos (Cuadro 5.) de la magnitud del diámetro húmedo en cada lote (1a, 1b y 2), se decidió seleccionar para el primer lateral un espaciamiento constante de 0.40 m y para el segundo, espaciamientos distintos de 0.40 m en los primeros 10 m y 0.35 m hasta el final; los dos laterales tienen espaciamiento inicial de 0.35 m, lo que aseguró ubicar una toma de presión cada 10 metros.

Cuadro 5. Diámetro húmedo de los emisores probados

Sitio de prueba	Volumen de agua aplicado (l)	Goteros (l/h)			Goteros (l/h)		
		4	8	12	4	8	12
		Diámetro Húmedo (cm) Experimental			Diámetro Húmedo (cm) Simulado ecuación 9.		
Lote 1a	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6.0	39.3	42.5	43.0	49.4	56.0	59.0
	9.0	44.5	47.0	47.3	54.0	61.0	65.0
	12.0	47.3	49.5	49.5	57.0	65.0	69.0
Lote 1b	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6.0	28.8	30.3	30.8	43.0	48.0	52.0
	9.0	33.0	33.5	34.0	47.0	53.0	57.0
	12.0	35.8	36.5	38.0	50.0	56.0	60.0
Lote 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	6.0	30.5	30.8	31.3	43.0	48.0	52.0
	9.0	33.5	34.5	35.0	47.0	53.0	57.0
	12.0	37.0	38.8	40.5	50.0	56.0	61.0

Arbat *et al* (2010), trabajando con un rango de distancias entre emisores de 0.3 a 1.2 metros en sistemas de riego por goteo subsuperficial para el cultivo de maíz, concluyeron que no hay diferencias entre el rendimiento del grano de maíz y la productividad de agua en condiciones de riego, por tal motivo estos rangos de espaciamientos son aceptables.

Relacionando los diámetros húmedos formados experimentalmente por cada emisor con volúmenes fijos (Cuadro 5), se puede afirmar que el diámetro formado por un gotero de 4 l/h es igual al de un gotero de 12 l/h con un erros inferior al 9% y el diámetro húmedo formado con un gotero de 8 l/h es igual al de un gotero de 12 l/h con un error inferior al 4.5 % en los tres lotes, además la ecuación 9 generó diámetros húmedos muy superiores a los resultados de campo.

Claramente, el volumen de agua aplicado por riego también afecta el ancho y profundidad del volumen de suelo humedecido y por lo tanto influye en el espaciamiento óptimo del emisor. (Schwartzman and Zur, 1986)

Acar *et al*, (2009) trabajando con emisores de descarga de 2 y 4 l/h llega a la conclusión que no hay efecto significativo sobre el humedecimiento vertical, ni horizontal dentro del perfil del suelo, como tampoco sobre el humedecimiento en la superficie del mismo.

La conductividad hidráulica en los lotes 1a, 1b y 2, y los diámetros húmedos formados por cada emisor en los mismos lotes (Cuadro 2 y 5), tienen una relación inversa, ya que, valores de conductividad hidráulica baja dan diámetros húmedos más grandes y viceversa.

Un incremento en la conductividad hidráulica de saturación ($\mathbf{K_{sat}}$) en orden de magnitud (suelo ligero), disminuiría un 30% el diámetro húmedo y aumentaría un 180% en profundidad humedecida. Una disminución de ($\mathbf{K_{sat}}$) en orden de magnitud incrementaría aproximadamente un 50% en diámetro húmedo y reduciría la profundidad en 60%. Duplicar la descarga del emisor extendería un 10% el diámetro húmedo del suelo y reduciría un 30% la profundidad humedecida (Schwartzman and Zur, 1986).

El efecto de grandes cambios en la descarga del emisor se espera que sea más pronunciada en suelos pesados en comparación con los suelos ligeros (Schwartzman and Zur, 1986; Ainechee *et al* 2009).

5.3 Relación del volumen aplicado y diámetro húmedo

Se hizo una relación para determinar una ecuación que predijera con mayor exactitud el diámetro húmedo formado en cada suelo, hasta con un volumen de aplicación de 12 litros y se determinó que una ecuación cuadrática es la que mejor se ajusta, en comparación con una exponencial o una gaussiana, teniendo como referencia el coeficiente de determinación de cada ecuación.

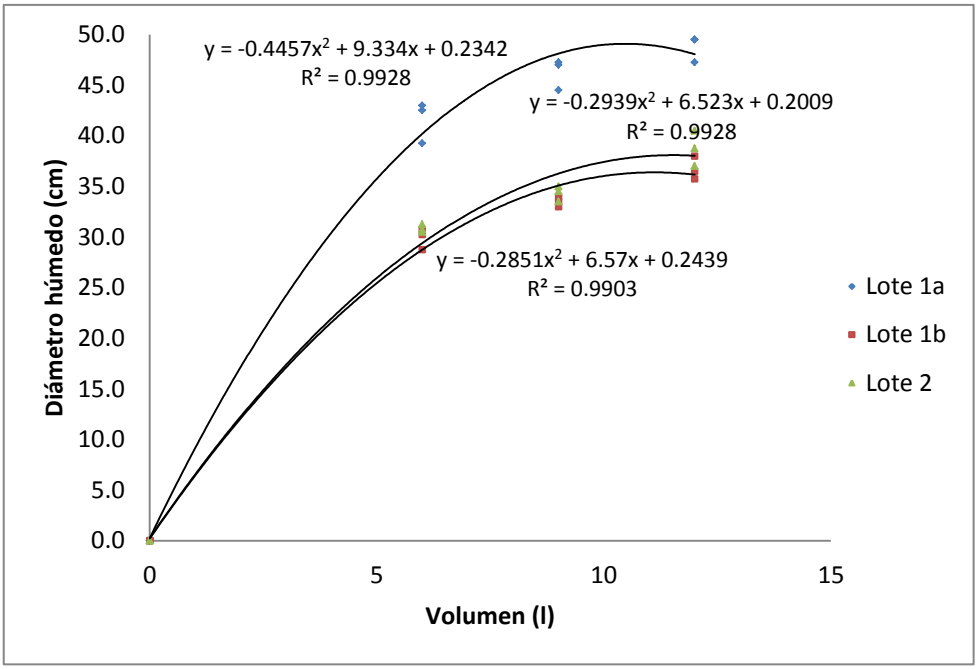


Figura 7. Ecuación del volumen aplicado versus diámetro húmedo.

5.4 Presión a lo largo de los laterales

Registradas las presiones en las 5 tomas, ubicados cada 10 metros (m) a lo largo de la tubería de polietileno (PE) en los dos laterales evaluados (Tradicional y Propuesta), se establece la distribución de la misma (Cuadro 6 y 7.)

Cuadro 6. Distribución de presiones en el lateral con espaciamientos constantes de 0.40 metros con pendiente cero (Tradicional).

Promedio Presión (PSI)	Presión (Kg Cm^{-2})	% Longitud	Pérdidas	Pérdidas Acumuladas
26.00	1.83	0		
17.00	1.20	20	48.32%	48.32%
12.00	0.84	40	26.85%	75.17%
9.13	0.64	60	15.44%	90.60%
8.00	0.56	80	6.04%	96.64%
7.38	0.52	100	3.36%	100.0%

Cuadro 7. Distribución de presiones en el lateral con espaciamientos distintos (0.40 y 0.35) metros con pendiente cero (Propuesto).

Promedio Presión (PSI)	Presión (Kg Cm^{-2})	% Longitud	Pérdidas	Pérdidas Acumulada
26.00	1.83	0		
16.50	1.16	20	50.00%	50.00%
11.00	0.77	40	28.95%	78.95%
7.63	0.54	60	17.76%	96.71%
7.13	0.50	80	2.63%	99.34%
7.00	0.49	100	0.66%	100.00%

Como se puede ver en los cuadros 6 y 7 en los primeros 10 metros de los laterales (20% L) se pierde entre el 48.32 y 50% de la presión total y en los primeros 20 metros del lateral (40% L) se localiza la presión media del sistema y ocurre entre el 75.17 y 78.95% de las pérdidas totales. Estos resultados son análogos a los publicados por Boswell (1990), citado por Andrade (2009), el cual dice: “que la caída media de la presión total se produce en los primeros 22% de la longitud y la presión media está a 38% de la longitud de entrada, cuando el lateral está a nivel. El autor añade que en el punto de presión media, ya se ha producido 74% de pérdida de presión total, es decir el 62% de la longitud total de la manguera de goteros es

responsable solo del 26% de la pérdida de presión que ocurre a lo largo de todo el lateral".

De igual forma en los últimos 10 metros del lateral (80% y 100% L) ocurre entre el 3.36 y 0.66% de las pérdidas totales, resultados equivalentes a los publicados por Valiantzas (2005), en el cual manifiesta que: "En el últimos 20% de la longitud de la manguera de goteros contribuye aproximadamente con el 1% del total de las pérdidas por fricción a lo largo del lateral."

5.5 Pérdidas por fricción y menores

Las pérdidas por fricción de la columna 2 de los cuadros 8 y 9, se calcularon con la ecuación 53, la cual es una relación matemática entre la ecuación 13 de DW y la ecuación 24 del factor de fricción ($\boldsymbol{f}$) de Blasius. Para cambiar $\boldsymbol{f}$ por una magnitud constante, que depende de la temperatura del agua, la cual fue registrada cada hora y arrojó un valor promedio de 18° Celsius, ésta ecuación esta dada por:

$$H_f = 0.000789 * \frac{Q^{1.75}}{D^{4.75}} * L \qquad \text{Ecuación 53.}$$

Los resultados de las filas 3 y 4 en los cuadros 8 y 9 se calcularon teniendo en cuenta el número de salidas del lateral y el exponente del caudal, con estos se determinó el factor de corrección por salidas múltiples (Christiansen y Scaloppi) posteriormente se multiplicó por las pérdidas por fricción en una tubería cerrada (fila 2).

Cuadro 8. Pérdidas por fricción en el lateral tradicional

Ecuaciones utilizadas con diferentes f (Espaciamiento 0.4 metros)					
	DW-BK[1]	DW-B.[2]	DW-Bag.[3]	DW-Swa.[4]	HW-C=145[5]
Método SBS	6.86	6.85	6.53	6.73	6.45
P. T. cerrada Θ	18.65	18.63	17.65	18.35	18.20
P. F-C ρ	6.86	6.28	5.95	6.19	6.46
P. Fa-S Ж	6.85	6.27	5.94	6.18	6.45

1 Darcy-Weisbach con Blasius para un f Constante
2 Darcy-Weisbach con f Blasius distinto en cada segmento
3 Darcy-Weisbach con f Bagarello (1997)
4 Darcy-Weisbach con f Swamee (1993)
5 Hazen-Williams con c = 145
Θ Pérdidas por fricción en tubería cerrada
ρ Pérdidas por fricción con F de Christiansen
Ж Pérdidas por fricción con Fa de Scaloppi.

Cuadro 9. Pérdidas por fricción en el lateral propuesto.

Ecuaciones utilizadas con diferentes (Espaciamiento 0.4 y 0.35 metros)					
	DW-BK	DW-B.	DW-Bag.	DW-Swa.	HW-C=145
Método SBS	8.77	8.77	8.33	8.62	8.37
P. T. cerrada	23.26	23.28	21.92	22.94	22.99
P. F-C	8.54	7.84	7.39	7.73	8.15
P. Fa-S	8.53	7.84	7.38	7.72	8.15
P. Fa-S-P Ю	8.63	7.93	7.47	7.82	8.22
P. C-F-C Ъ	8.61	7.90	7.45	7.79	8.19

Ю Pérdidas por fricción con F de Christiansen ponderado.
Ъ Pérdidas por fricción método equivalencias.

Comparando el método SBS utilizando los diferentes factores de fricción (f); el factor de f de Blasius como constante y distinto en cada segmento tienen una mayor exactitud, seguido por el f de Swamee y por último el f de Bagarello. Utilizando el f de Bagarello el error es inferior al 5% en comparación a los valores de Blasius, y Utilizando el f de Swamee el error es inferior al 1.6 %.

Resultados similares a los publicados por Bagarello *et al* (1995), en el, hacen una comparación del factor de fricción (***f***), en un enfoque empírico y semi-teórico, en el cual concluyen: que los dos enfoques permite estimar las pérdidas de carga por unidad de longitud, y los errores de estimación son inferiores al 5%. Asimismo Valiantzas, (2005) utilizando la ecuación explicita de Swamee y Jain (1976) para el cálculo del factor de fricción en diversas simulaciones de riego por goteo, concluye que es suficiente precisa con un error máximo de $\pm$ 1%

Basados en los resultados del Cuadro 8 y 9, la ecuación que mejor predice las pérdidas de carga utilizando los factores de salidas múltiples (Christiansen y Scaloppi) es la DW-BK, seguida por la ecuación HW-C, y en último lugar está la ecuación DW-Bag, lo que nos indica que el factor de fricción de Bagarello no es adecuado para ser utilizado en este tipo de tuberías.

Utilizando el factor de salidas múltiples de Christiansen ponderado, explicado en la metodología. En la columna 2 del Cuadro 9, el error en la estimación de las pérdidas por fricción en la tubería con espaciamientos distintos es inferior al 1.65%, de igual forma el error al estimar las pérdidas por fricción utilizando el procedimiento de equivalencia (fila 6) es inferior al 1.9%, y utilizando los factores de salidas múltiples de Christiansen y Scaloppi el error es inferior al 2.75 %, vale la pena recalcar que estos factores de Christiansen y Scaloppi fueron desarrollados para tuberías con espaciamientos constantes.

Cuadro 10. Pérdidas menores por conexión en el lateral Tradicional.

Longitud (%)	(Pm)[1] (m)	(H_{f1})[2] (m)	(H_{f2})[3] (m)	(α)[4]	(H_m)[5] (m)	(Hm/Hf)[6] %	(PF1)[7] (m)	(PF2)[8] (m)
0	18.28							
20	11.95	3.13	4.69	0.474	1.96	62.76%	13.19	13.59
40	8.44	2.03	3.05	0.474	1.19	58.65%	8.73	8.90
60	6.42	1.13	1.70	0.474	0.61	54.04%	6.69	6.74
80	5.62	0.47	0.71	0.474	0.23	47.96%	5.72	5.71
100	5.19	0.09	0.13	0.474	0.03	39.37%	5.50	5.49
Suma		6.86 m	10.28 m		4.03 m			

1 Presión leída en el manómetro
2 Pérdidas por fricción ecuación 53
3 Incremento de las pérdidas por fricción con ecuación 42
4 Coeficiente de pérdidas localizadas ecuación 40
5 Pérdidas menores ecuación 37
6 Relación de pérdidas menores y de fricción
6 Presión por fórmula PF1= Pm - (H_{f1} + Hm)
7 Presión por fórmula PF2= Pm - (H_{f2})

Comparando la columna 2 y 8 del cuadro 10, se puede afirmar que el error al utilizar la suma de los resultados de las ecuaciones 37 y 53 para predecir la disminución de presión causada por las pérdidas por fricción y localizadas en el lateral, es inferior al 6.8% en el primer tramo (20% L) e inferior al 1.8% en el resto de la longitud del lateral, teniendo de referencia como presión máxima 18.28 metros. De igual forma comparando la presión de la columna 9 y la presión manométrica (columna 2), se puede afirmar que la estimación de la presión genera errores inferiores al 8.95% en el primer tramo (20% L) e inferior al 2.6% en el resto de la longitud del lateral.

De la misma forma, contrastando la columna 2 y 8 del cuadro 11, se puede afirmar que el error al utilizar la suma de los resultados de las ecuaciones 37 y 53 para predecir la disminución de presión causada por las pérdidas por fricción y localizadas en el lateral, es inferior al 3.3% todo el lateral, así

mismo confrontando la presión de la columna 9 y la presión manométrica (columna 2), se puede afirmar que la estimación de la presión genera errores inferior al 4.0% todo el lateral.

Cuadro 11. Pérdidas menores por conexión en el lateral Propuesto.

Longitud (%)	$(Pm)^1$ (m)	$(H_{f1})^2$ (m)	$(H_{f2})^3$ (m)	$(\alpha)^4$	$(H_m)^5$ (m)	$(Hm/Hf)^6$ %	$(PF1)^7$ (m)	$(PF2)^8$ (m)
0	18.28							
20	11.6	3.98	5.97	0.474	2.58	64.82%	11.72	12.32
40	7.73	2.59	3.89	0.474	1.80	69.50%	7.20	7.71
60	5.36	1.49	2.24	0.474	0.96	64.43%	5.28	5.50
80	5.01	0.60	0.90	0.474	0.34	56.67%	4.42	4.46
100	4.92	0.11	0.17	0.474	0.05	45.45%	4.84	4.84
Suma		8.77m	13.78		5.73 m			

Analizando la columna 6 de los cuadros 10 y 11 de pérdidas menores entre los laterales tradicional y el propuesto, se puede afirmar que en los primeros 10 metros (20%L) del lateral se producen entre el 49 y 45% de las pérdidas localizadas y en los primeros 20 metros (40% L) del lateral, ya ha ocurrido entre el 78 y 76% de las pérdidas localizadas respectivamente. Asimismo en los dos laterales (tradicional y el propuesto), en los últimos 10 metros (80-100% L), las pérdidas localizadas son inferiores al 1%. Similar a lo que ocurre con las pérdidas de carga por fricción. Así mismo, las columnas 3 y 6 de los cuadros 10 y 11 muestran una directa proporcionalidad entre las pérdidas por fricción y las localizadas, ya que a mayor pérdida por fricción mayor serán las pérdidas localizadas.

En el lateral propuesto se incrementan las pérdidas por fricción y localizadas en un 10.5 y 9.30% respectivamente, en comparación al lateral tradicional teniendo de referencia la presión de operación del sistema (18.28 m), éste aumento se debe a que el lateral propuesto conduce mayor caudal por tener 14 emisores más que el tradicional.

Al aumentar las pérdidas por fricción con los resultados de la ecuación 42 se puede afirmar, que es una buena y práctica aplicación para predecir la pérdida de presión, pues su error fue ligeramente superior al generado con la ecuación 40. Su único inconveniente esta en el cálculo de la longitud equivalente de pérdidas de carga por conexión ($\boldsymbol{fe}$), ya que se determina con un gráfico que debe ser reajustado, y para tal efecto se propone la figura 8 para determinar el valor de longitud equivalente por conexión ($\boldsymbol{fe}$) en tuberías de diámetro interno de 13.5 mm.

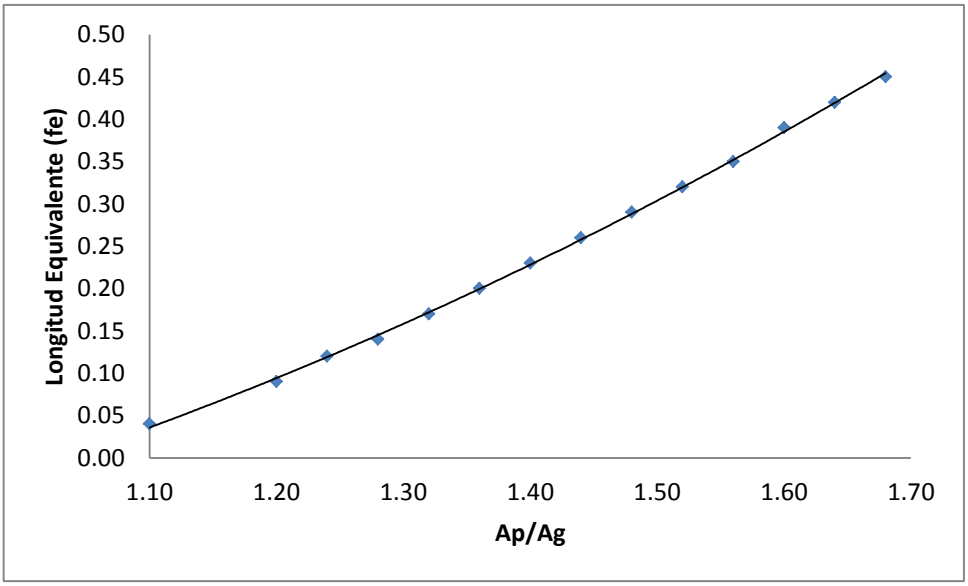


Figura 8. Longitud equivalente por conexión de emisor.

Otra forma de calcular la longitud equivalente por conexión ($\boldsymbol{fe}$), sin necesidad de utilizar la figura 8, es usando la ecuación 54.

$$\boldsymbol{fe = 0.2883 * (\frac{Ap}{Ag})^2 - 0.0795 * \left(\frac{Ap}{Ag}\right) - 0.2255}$$ Ecuación 54.

5.6 Uniformidad de aplicación

La columna 8 del cuadro 12, es el promedio entre las diferencias de coeficientes de uniformidad en las dos repeticiones (columna 4 y 7), y en ella se observa que el lateral con espaciamiento distinto (propuesto) mejora la uniformidad de aplicación entre un 0.23 y 2.37% en comparación con el lateral de espaciamiento constante (tradicional); pero para establecer si esta mejora en la uniformidad es importante, se realizó una prueba de hipótesis de varianzas sobre los dos laterales, y se determinó con un nivel de significancia del 95% que no existen evidencias significativas entre estos dos laterales.

Asimismo se puede afirmar que la ecuación 50 ubicada en la fila 6 columna 1 del cuadro 12, genera errores en su aplicación, pues ésta no toma en cuenta los valores del caudal mínimo ni el promedio cuando los emisores son auto compensados, solo los valores del coeficiente de variación proporcionados por el fabricante.

Cuadro 12. Coeficientes de uniformidad en los dos laterales.

Ecuaciones de (Cu)	*Primer repetición*			*Segunda repetición*			MJ[4]
	L.T[1] En %	L. P[2] En %	Diferencia (L.P – L.T)[3] En %	L.T[1] En %	L. P[2] En %	Diferencia (L.P – L.T) [3] En %	
Ecuación 44	96.76	97.25	0.49	96.67	96.63	-0.04	0.23
Ecuación 45	75.35	78.87	3.52	77.91	79.13	1.22	2.37
Ecuación 46	93.94	94.96	1.02	93.87	93.75	-0.12	0.45
Ecuación 48	77.76	80.52	2.76	80.46	81.82	1.36	2.06
Ecuación 49	79.97	82.78	2.81	82.72	84.11	1.39	2.10
Ecuación 50	96.95	96.95	0.00	96.95	96.95	0.00	0.00

1. Lateral Tradicional
2. Lateral Propuesto
3. Diferencia de uniformidad entre el lateral Propuesto y Tradicional
4. Mejora promedia en el coeficiente de uniformidad con lateral propuesto.

5.7 Propuesta de aforo.

5.7.1 Primer Procedimiento

Con la utilización de la ecuación 52 se determinó el número de emisores a aforar, para el lateral con espaciamiento constante fueron 24 goteros y para el lateral con espaciamiento distinto 21 goteros. En las figuras 9 y 10 se observa el comportamiento de los diferentes coeficientes de uniformidad, con 50 muestras aleatorias de tamaño n = 5 y n = 25 respectivamente. En estas figuras se observa que el coeficiente de uniformidad de Christiansen es el que menos se ve afectado cuando las desviaciones cambian y su valor no fue inferior a 92%; la utilización de ésta ecuación sobrestimaría su medición pues no tiene en cuenta el funcionamiento del emisor; de igual forma se evidencia que cuando el tamaño de la muestra aumenta, es más probable encontrar valores de desviaciones y medias cercanos a la de los laterales probados.

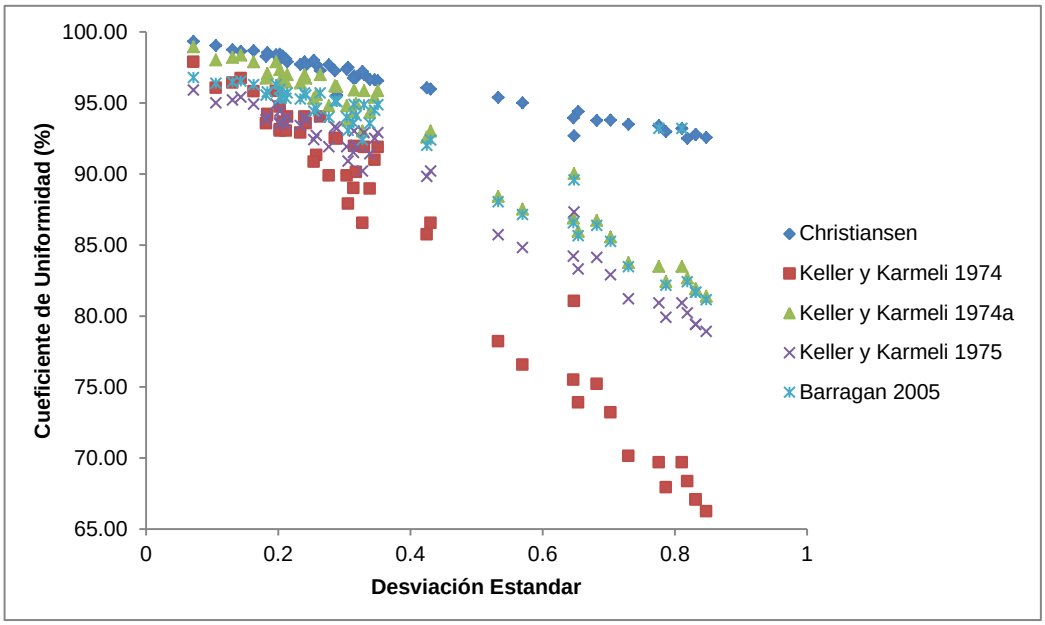


Figura 9. Comportamientos de los coeficientes de uniformidad con n=5

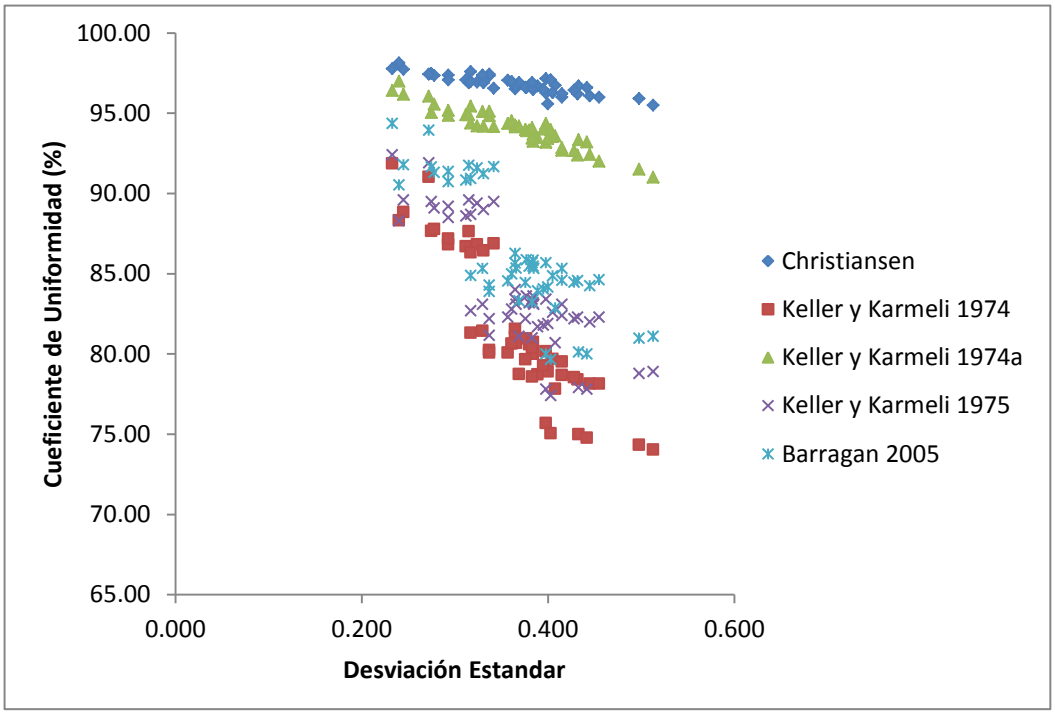


Figura 10. Comportamientos de los coeficientes de uniformidad con n=25

Comparando los coeficientes de uniformidad obtenidos en los dos laterales en el cuadro 12, con los arrojados con el primer procedimiento para no aforar

todos los emisores, se puede afirmar que su utilización es inexacta al momento de predecir la uniformidad, ya que la probabilidad de encontrar errores inferiores al 5% es de tan solo 55% en el lateral tradicional y 61% en el lateral propuesto, utilizando todas las fórmulas de las figuras 9 y 10.

5.7.2 Segundo y tercer procedimiento.

La utilización del segundo y tercer procedimiento para predecir la uniformidad de aplicación en el lateral tradicional sin necesidad de aforar todos los goteros, con dos repeticiones generó errores inferiores al 4.1 y 3.7 % respectivamente (Cuadro 13). Igualmente, en el lateral propuesto, el uso del segundo y tercer procedimiento para estimar la uniformidad de aplicación, con dos repeticiones generó errores inferiores al 6.2 y 6.4 % respectivamente (Cuadro 14)

Para establecer si los errores en predicción de la uniformidad de aplicación con el segundo y tercer procedimiento son relevantes, se realizó una prueba de hipótesis de varianzas con los dos laterales (tradicional y propuesto), contra las varianzas de los procedimientos mencionados anteriormente, en ella se comprobó con un nivel de significancia del 95% que no existen evidencias significativas entre los procedimientos de aforo a (25-50-75 y 20-40-80) % de la longitud del lateral, lo que indica que las varianzas en estos dos procedimientos son iguales a la de los dos laterales probados.

Cuadro 13. Uniformidad en procedimientos de aforo en el lateral tradicional

	Lateral Tradicional (espaciamiento constante 0.4 metros) Primera repetición				
	Christiansen	Keller y Karmeli 1974	Keller y Karmeli 1974 p.	Keller y Karmeli 1975	Barragán 2005
Real (medición completa)	96.76	75.35	93.94	77.76	79.97
2do Procedimiento[1]	96.10	73.81	91.96	77.81	80.02
3er Procedimiento[2]	97.01	79.03	94.39	81.18	83.45
4to Procedimiento[3]	97.60	90.06	96.29	90.68	92.84
Error 2do Procedimiento	0.66%	1.54%	1.98%	0.05%	0.05%
Error 3er Procedimiento	0.25%	3.68%	0.45%	3.42%	3.48%
Error 4to Procedimiento	0.84%	14.71%	2.35%	12.92%	12.87%
	Lateral Tradicional (espaciamiento constante 0.4 metros) segunda repetición				
	Christiansen	Keller y Karmeli 1974	Keller y Karmeli 1974 p.	Keller y Karmeli 1975	Barragán 2005
Real (medición completa)	96.67	77.91	93.87	80.46	82.72
2do Procedimiento[1]	95.80	81.61	93.65	84.49	86.79
3er Procedimiento[2]	96.23	78.07	93.46	80.99	83.25
4to Procedimiento[3]	97.15	91.97	96.53	92.37	94.38
Error 2do Procedimiento	0.87%	3.70%	0.22%	4.03%	4.07%
Error 3er Procedimiento	0.44%	0.16%	0.41%	0.53%	0.53%
Error 4to Procedimiento	0.48%	14.06%	2.66%	11.91%	11.66%

1 Aforo a 25 50 y 75 % de la longitud total
2 Aforo a 20 40 y 80 % de la longitud total
3 Aforo a 20 40 y 60 % de la longitud total

5.7.3 Cuarto procedimiento.

Puede verse en el cuadro 13 y 14, que la utilización de este procedimiento de aforo a (20-40-60) % de la longitud del lateral, generó errores inferiores al 14.8% en los dos laterales (tradicional y propuesto). Este error del 14.8% en la estimación de la uniformidad, mostró evidencias importantes en la prueba de hipótesis de varianza con un nivel de significancia del 95%, lo cual indica que la hipótesis nula de varianzas iguales se rechaza. Por lo anterior para predecir el coeficiente de uniformidad (aplicación) en laterales de riego

tradicional y propuesto se recomienda utilizar el segundo y tercer procedimiento.

Cuadro 14. Uniformidad en procedimientos de aforo en el lateral Propuesto

	Lateral Propuesto (espaciamiento de 0.4 y 0.35 metros) primera repetición				
	Christiansen	Keller y Karmeli 1974	Keller y Karmeli 1974 p.	Keller y Karmeli 1975	Barragán 2005
Real (medición completa)	97.25	78.87	94.96	80.52	82.78
2do Procedimiento	97.10	77.92	93.11	81.13	83.40
3er Procedimiento	97.01	78.36	92.88	81.79	84.07
4to Procedimiento	97.26	79.08	94.82	80.86	83.12
Error 2do Procedimiento	0.15%	0.95%	1.85%	0.61%	0.62%
Error 3er Procedimiento	0.24%	0.51%	2.08%	1.27%	1.29%
Error 4to Procedimiento	0.01%	0.21%	0.14%	0.34%	0.34%
	Lateral Propuesto (espaciamiento de 0.4 y 0.35 metros) segunda repetición				
	Christiansen	Keller y Karmeli 1974	Keller y Karmeli 1974 p.	Keller y Karmeli 1975	Barragán 2005
Real (medición completa)	96.63	79.13	93.75	81.82	84.11
2do Procedimiento	96.34	85.25	94.06	87.87	90.15
3er Procedimiento	95.81	84.64	93.09	88.16	90.43
4to Procedimiento	97.17	93.35	97.24	93.07	94.97
Error 2do Procedimiento	0.29%	6.12%	0.31%	6.05%	6.04%
Error 3er Procedimiento	0.82%	5.51%	0.66%	6.34%	6.32%
Error 4to Procedimiento	0.54%	14.22%	3.49%	11.25%	10.86%

6. Conclusiones

La propuesta de espaciamiento distinto para laterales de riego, mejora entre un 0.23 y 2.37% la uniformidad de aplicación en comparación con el espaciamiento constante utilizado, pero la prueba de hipótesis de varianza, muestra que con un nivel de significancia del 95% no existen evidencias significativas entre estos dos laterales.

La conductividad hidráulica tiene efectos inversos en la formación del diámetro húmedo, pues a mayor conductividad hidráulica menor será el diámetro húmedo formado en el suelo y viceversa. Lo contrario ocurre con el caudal aplicación por emisor, pues a mayor descarga más rápido se alcanzará su diámetro húmedo.

Se seleccionó el gotero autocompensado de 8 litros por hora, porque presentó mejor coeficiente de determinación (R^2) y uniformidad de aplicación, además su coeficiente de variación es bajo y cercano al suministrado por el fabricante.

La empresa NANDANJAIN debería verificar el proceso de fabricación de los goteros de 4 litros por hora, ya que manifiestan en sus catálogos que este gotero tiene coeficiente de variación no mayor a 4% y en la práctica estos arrojaron variaciones del 10.5%.

La utilización del segundo y tercer procedimiento de aforo para reducir el número de lecturas y predecir la uniformidad de aplicación a (25-50-75) % y

a (20-40-80) % de la longitud del lateral, generan errores entre los siguientes rangos: Máximo de 6.6% y mínimo de 0.16% en los laterales evaluados.

El factor para tuberías con salidas múltiples de Scaloppi (ecuación 34) no limita su aplicación a lo siguiente "x = relación entre la distancia del inicio de la primer salida y el espaciamiento constante entre salidas consecutivas. Intervalos ($0 < x < 1$)", ya que se hizo una simulación con valores de x mayores a 1, y se concluyó, que el error de estimación de las pérdidas por fricción en este tipo de tuberías tiende a cero cuando el valor de x es muy grande.

La ecuación 53 Darcy-Weisbach con el factor de fricción de Blasius como constantes, es la ecuación que se debe aplicar para determinar las pérdidas por fricción en este tipo de tuberías, ya que fue la que mejor estimó las pérdidas por fricción en comparación con la misma ecuación de Darcy-Weisbach con otros factores de fricción y la ecuación de Hazen-Williams.

En la ecuación 53 hay que tener en cuenta la temperatura del agua, porque esta afecta su viscosidad y el coeficiente de la ecuación, ya que al ingresar temperaturas de 2 y 4 grados diferentes a la temperatura real, genera errores en la estimación de las pérdidas por fricción del orden del 1.26 y 2.45% respectivamente.

Las pérdidas menores en los laterales tradicional y propuesto equivalen al 59% y 65% de las pérdidas por fricción respectivamente, además la

distribución de las pérdidas localizadas a lo largo del lateral son similares a las pérdidas por fricción.

Para mejorar la uniformidad de aplicación de los laterales de riego por goteo en invernadero, se debería evaluar en un modelo CFD la conexión en forma de cruz que se inserta a un gotero para suministrar agua a cuatro sitios, pues con este dispositivo la uniformidad de aplicación se reduce hasta en un 15% en el mismo lateral.

Literatura citada

ACAR, B.; TOPAK, R.; MIKAILSOY, F. (2009). Effect of applied water and discharge rate on wetted soil volume in loam or clay-loan soil from an irrigated trickle source, African Journal of Agricultural Research Vol. 4, No 1, 049-054 p.

AGUILERA, C. M.; MARTÍNEZ, E. R. (1996). Relación suelo planta agua atmósfera, Universidad Autónoma Chapingo, México, Cuarta edición corregida, 75 pp.

AINECHEE, G.; BOROOMAND-NASAB, S.; BEHZAD, M. (2009). Simulation of soil wetting patter under point source trickle irrigation. Journal of applied sciences Vol. 9, No. 6, 1170-1174 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. (2003). ASAE EP405.1 Design and installation of microirrigation systems: St. Joseph, 2003, 6 p.

ANDRADE, L. A. (2009). Estudo da uniformidade de emissão de agua utilizando Diferentes espaçamentos entre gotejadores na linha lateral Tesis para obtener el grado de Doctor, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO, Brasil. 105 p.

ÁNGELES, M. V. (2003). Sistema de Cómputo para el diseño de sistemas de Riego. Tesis para obtener el grado de Doctor, Universidad Autónoma del estado de México, Toluca, México, 147 p.

ÁNGELES, M. V. (2008). Fundamentos de Hidráulica para diseño y Revisión de Riego Presurizado, Universidad Autónoma Chapingo, México, Segunda reimpresión, 149 p.

ANWAR, A. A. (1999a). Factor G for Pipelines with Equally Spaced Multiple Outlets and Outflow, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, Vol. 125 No. 1, 34-38 p.

ANWAR, A. A. (1999b). Adjusted Factor Ga for Pipelines with Multiple Outlets and Outflow, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 125 No. 6, 355-359 p.

ARBAT. P. G.; LAMM, F. R.; ABOU-KHEIRA A. A. (2010). Effects on soil water redistribution, corn yield, and water productivity, American Society of Agricultural and Biological Engineers, Vol. 26, No. 3, 391-399 p.

ARBAT. P. G. (2005). Desarrollo y validación de un modelo de simulación de la dinámica del agua en el suelo. Aplicación al diseño agronómico y al manejo en riego localizado. Tesis para obtener el grado de Doctor, Universitat de Lleida, Lérida España, 165 p

BAGARELLO V.; FERRO V.; PROVENZANO G.; PUMO D. (1995). Experimental study on flow-resistance law for small-diameter plastic pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 121 No. 5, 313-316 p.

BAGARELLO V.; FERRO V.; PROVENZANO G.; PUMO D. (1997). Evaluating pressure losses in drip irrigation lines. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*., ASCE, Vol. 123 No. 1, 1-7 p.

BARRABAN, J.; BRALTS, V.; WU, I.P. (2005). Assessment of emission uniformity for microirrigation design. Byosystems Engineering. ELSEVIER, Vol. 93, No. 1, 89-97 p.

BROWN, G. O. (2002). The history of the Darcy-Weisbach Equation for pipe flow resistence. (Edit.). Environmental and water resources history. Washington, D.C.: Proceedings of ASCE Civil Engineering Conference and Exposition 2002 ASCE, 34-43 p.

CUENCA, R. H. (1989). *Irrigation systems design: An engineering approach*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. ASAE

CHINEA. R. R.; DOMINGUEZ. A. (2006). Total Friction Loss along Multiple Outlets Pipes with Open End. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 132 No. 1, 31-40 p.

CHRISTIANSEN, J. E. (1942). ‘‘Irrigation by sprinkling.’’ *California Agriculture Experiment Station Bull. No. 670*, University of California, Davis, California 124 p.

DEMIR. V.; YURDEM. H.; DEGIRMENCIOGLU. A. (2007). Development of Prediction Models for Friction Losses in Drip Irrigation Laterals equipped with Integrated In-line and On-line Emitters using Dimensional Analysis. Biosystems Engineering, Vol. 96, No. 4, 617– 631p.

Detar, W. R. (1982). Modified graphical determination of submain size. TRANSACTIONS of the ASAE, Vol. 25 No. 3, 695-696 p.

GARCÍA C. I.; BRIONES S. G. (2009). Sistemas de Riego por Aspersión y Goteo, Ed. Trillas, Segunda Edición, México. 277 p.

GARCÍA, R. C. (2005). Levantamiento nutrimental edáfico para la optimización del fertirriego. Estudio de caso: laboratorio de ingeniería de riego, uach. Tesis para optar el título de Ingeniero en Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo.

HANAFI. M.; EL-BERRY. M.; ABU-HABSA A. R, BISHARA B.L, (2006). A simple model for designing microirrigation lateral with the microtube as an emission point. Misr J. Ag. Eng., Vol. 23, No 1, 96 – 107 p.

HATHOOT H. M.; AI-AMOUD A. I.; MOHAMMAD F. S.; Analysis and Design of Trickle-Irrigation Laterals. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 192, No.5, 756-767 p.

HOWELL, T. A.; BARINAS, F. A. 1980. Pressure losses across trickle irrigation fittings and emitters. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Vol. 23, No. 4, 928-933 p.

JUANA, L.; RODRIGUEZ-SINOBAS, L.; LOSADA, A,: (2002). Determining minor head losses in drip irrigation laterals I: Methodology, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 128, No. 6, 376-384 p.

JUAREZ B. E.; RICO R. A. (2010). Mecánica de Suelos, Tomo 3, Flujo del Agua en el Suelo, Editorial Limusa, México. 256 p.

JUAREZ B. E.; RICO R. A. (2011). Mecánica de Suelos, Tomo 1, Fundamentos de Mecánica de Suelo, Editorial Limusa, México. 302 p.

KANDELOUS M. M.; ŠIMÙNEK J.; VAN GENUCHTEN M. T.; MALEK K. (2011) Soil Water Content Distributions between Two Emitters of a Subsurface Drip Irrigation System SSSAJ: Vol. 75, No. 2, 488-497 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. (1974). Trickle Irrigation design parameters. Transactions of the ASAE, St. Joseph, Vol. 17, No. 4, 678-684p .

LAFOLIE F.; GUENNELON R.; VAN GENUCHTEN M. T. (1989) * Analysis of Water Flow under Trickle Irrigation: II. Experimental Evaluation. Published in Soil Sci. Soc. Am. J. 53, 1318-1323 p.

MARTÍNEZ E.R. (1991). Riego Localizado, Universidad Autónoma Chapingo, primera edición, México. 161 p.

PROVENZANO G.; PUMO D. (2004). Experimental analysis of local pressure losses for micro irrigation laterals. J. Irr. and Drain. Engrg., ASCE, Vol. 130 No. 4, 318-324 p.

RAMÍREZ d. C. F. (1994). Simulación numérica de la dinámica del agua en el suelo. Aplicación al diseño de sistemas de riego LAF. Tesis para obtener el grado de Doctor, Universitat de Lleida. Lleida, 118 p.

SCALOPPI, E. J. (1988). Adjusted F factor for multiple-outlet pipes. Journal of irrigation and drainage engineering: ASCE, Vol. 114, No. 1, 169-174 p.

SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. (1986). Emitter spacing and geometry of wetted soil volume, Journal of Irrigation and Drainage Engineering: ASCE, Vol. 112, No. 3, 242-253 p.

SWAMEE. P. K. (2001). Desing of high-rise pumping mains. Technical note ELSEVIER.Urban water 3 (2001) 317-321 p.

SWAMEE. P. K. (1998). Desing of pipelines to transport neutrally buoyant capsules. Journal of hydraulic engineering, Vol. 24, No. 11, 155 -1160 p.

VALIANTZAS, J. D. (2005). Modified Hazen-Williams and Darcy-Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation lateral. Journal of irrigation and drainage. ASCE, Renton, Vol. 131, No. 4, 342-350 p.

WU I. P.; YUE R. (1993).Drip Lateral Design Using Energy Gradient Line Approach. American Society of Agricultural Engineers 0001-2351 / 93/ 3602- Vol. 36, No 2, 389-394 p.

YILDIRIM, G., (2006). “Hydraulic Analysis and Direct Design of Multiple Outlets Pipelines Laid on Flat and Sloping Lands” Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol.132, No. 6, 537-552 p.

Apéndice A. Lista de Materiales utilizados

A. Materiales de topografía para nivelar el soporte del lateral

- Teodolito de precisión.
- Cinta métrica.
- Mira.
- Libreta de apuntes.
- Marcador (marca todo).

B. Materiales para establecer textura del suelo

- Hidrómetro de Bouyoucos ASTM 152.
- Probeta de 1000 ml.
- Piceta.
- Agitador mecánico (mezcladora eléctrica).
- Agitador manual de base perforada.
- Vasos de precipitado.
- Termómetro.

Reactivo: Agente dispersante (hexametafosfato de sodio 5%).

C. Materiales para determinar capacidad de campo y punto de marchitez permanente

- Olla de presión (capacidad de campo).
- Membrana de presión (punto de marchitez permanente).
- Compresor con motor.
- Vaso de 25 cm^3.
- Suelo tamizado por la malla 2 mm.
- Anillo de retención de 6 cm de diámetro y 1 cm de altura.
- Platos de presión.
- Estufa de secado.

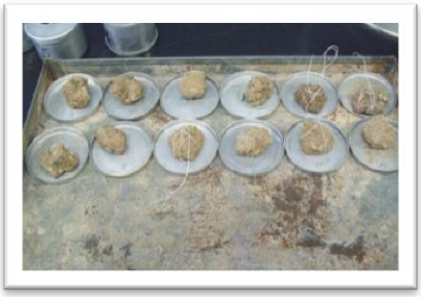
D. Materiales para hallar conductividad hidráulica

- Suelo tamizado por la malla 2 mm con perforaciones circulares.
- Embudos de 7.5 cm de diámetro, 10 cm de alto y tallo de 5 cm con malla de metal con orificios de 2 a 3 mm

- Equipo para carga constante.
- Equipo para compactación.
- Probetas graduadas.
- Cronómetro.

E. Materiales para determinar la densidad aparente

- Terrones de suelo con diámetro máximo de 2 cm.
- Hilo de algodón para sujetar el terrón.
- Parafina a punto de fusión (56 -60 °C).
- Vaso de precipitado de 500 ml.
- Termómetro.
- Estufa
- Balanza digital.
- Volumen del cilindro con volumen conocido.



F. Materiales para establecer la densidad real

- Parrilla eléctrica.
- Vasos de precipitado de 250 ml.
- Agitador de vidrio.
- Agua destilada.
- Peróxido de hidrógeno.

- Tamiz de 2 mm.
- Mortero.
- Picnómetros o matraces aforados.
- Desecador de vacío.
- Bomba de vacío.
- Balanza digital.
- Agua destilada y hervida.
- Embudo de plástico.
- Termómetro.
- Suelo tamizado por malla de 2 mm.

G. Materiales para comprobar la ecuación del emisor y el diámetro húmedo

Compresor.

- Bomba con mezcla de agua y aire.
- Manómetros de glicerina de 30 PSI.
- Goteros de 4, 8 y 12 litros por hora (l/h) con rangos de presión normal de operación de 0.49 a 4.22 kg cm^{-2} (7-60 PSI), y Coeficientes de variación de 0.04, 0.024 y 0.025 respectivamente.

- Cronómetro
- Probetas graduadas de 100 ml.
- Cinta métrica.
- Perforador de tubería de polietileno.

H. Materiales para determinar el coeficiente de uniformidad

- 200 metros de tubería de polietileno (PE) de 16 mm.
- Motobomba marca SIEMES de CP: 3
- Manómetros de glicerina de 30 PSI marca NAANDANJAIN.
- Manómetro de glicerina de 100 PSI marca NAANDANJAIN.
- Tomas de presión
- Probetas de 100 ml
- Llave reguladora de presión
- Cronómetro
- Balde aforado y
- Goteros de 8 l/h auto compensados marca NAANDANJAIN.
- Termómetro marca watlow 93, el cual tiene: Precisión de calibración y concordancia de sensor: ±0.1% de recorrido, ±1°C a 25°C ± 3°C.

Apéndice B Datos de campo lateral Tradicional

Número del Emisor	Promedio del Caudal (l/h)	Suma caudal (l/h)	Velocidad. m/s	Número de Reynolds	f Blasius	f Bagarello	f Swamee
1	8.08	1023.66	1.99	25285	0.02506	0.02372	0.02466
2	8.27	1015.58	1.97	25085	0.02511	0.02377	0.02471
3	8.08	1007.31	1.95	24881	0.02516	0.02383	0.02476
4	7.64	999.22	1.94	24681	0.02521	0.02388	0.02480
5	8.21	991.58	1.92	24492	0.02526	0.02393	0.02485
6	7.96	983.37	1.91	24289	0.02531	0.02399	0.02490
7	7.96	975.41	1.89	24093	0.02536	0.02404	0.02494
8	8.02	967.45	1.88	23896	0.02542	0.02410	0.02499
9	7.89	959.43	1.86	23698	0.02547	0.02415	0.02504
10	7.89	951.54	1.85	23503	0.02552	0.02421	0.02509
11	8.21	943.64	1.83	23308	0.02557	0.02426	0.02514
12	8.15	935.43	1.82	23105	0.02563	0.02432	0.02519
13	7.89	927.28	1.80	22904	0.02569	0.02438	0.02524
14	7.96	919.39	1.78	22709	0.02574	0.02444	0.02530
15	8.46	911.43	1.77	22512	0.02580	0.02450	0.02535
16	8.34	902.97	1.75	22303	0.02586	0.02456	0.02541
17	7.89	894.63	1.74	22097	0.02592	0.02463	0.02546
18	8.08	886.74	1.72	21902	0.02598	0.02469	0.02552
19	8.34	878.65	1.71	21703	0.02604	0.02475	0.02557
20	8.53	870.32	1.69	21497	0.02610	0.02481	0.02563
21	8.34	861.79	1.67	21286	0.02616	0.02488	0.02569
22	7.83	853.45	1.66	21080	0.02623	0.02495	0.02575
23	8.21	845.62	1.64	20887	0.02629	0.02501	0.02581
24	8.08	837.41	1.63	20684	0.02635	0.02508	0.02587
25	8.65	829.33	1.61	20484	0.02641	0.02514	0.02593
26	8.27	820.67	1.59	20271	0.02648	0.02522	0.02600
27	8.27	812.40	1.58	20066	0.02655	0.02529	0.02606
28	8.34	804.13	1.56	19862	0.02662	0.02536	0.02613
29	8.84	795.79	1.54	19656	0.02669	0.02543	0.02619
30	8.72	786.95	1.53	19438	0.02676	0.02551	0.02626
31	8.34	778.23	1.51	19222	0.02684	0.02558	0.02634
32	6.57	769.89	1.49	19016	0.02691	0.02566	0.02640
33	8.15	763.33	1.48	18854	0.02697	0.02572	0.02646
34	8.53	755.18	1.47	18653	0.02704	0.02579	0.02653
35	8.40	746.65	1.45	18442	0.02712	0.02587	0.02660
36	8.59	738.25	1.43	18235	0.02719	0.02595	0.02668
37	8.21	729.66	1.42	18023	0.02727	0.02604	0.02676

38	8.21	721.45	1.40	17820	0.02735	0.02612	0.02683
39	8.02	713.24	1.38	17617	0.02743	0.02620	0.02691
40	8.78	705.22	1.37	17419	0.02751	0.02628	0.02698
41	8.72	696.44	1.35	17202	0.02759	0.02636	0.02707
42	8.21	687.73	1.33	16987	0.02768	0.02645	0.02715
43	8.21	679.52	1.32	16784	0.02776	0.02654	0.02723
44	8.40	671.31	1.30	16581	0.02785	0.02663	0.02732
45	8.34	662.91	1.29	16374	0.02794	0.02672	0.02740
46	6.88	654.57	1.27	16168	0.02802	0.02681	0.02749
47	8.46	647.68	1.26	15998	0.02810	0.02688	0.02756
48	8.59	639.22	1.24	15789	0.02819	0.02698	0.02765
49	8.72	630.63	1.22	15577	0.02829	0.02707	0.02775
50	8.34	621.92	1.21	15361	0.02838	0.02717	0.02785
51	8.40	613.58	1.19	15155	0.02848	0.02727	0.02794
52	8.65	605.18	1.17	14948	0.02858	0.02737	0.02804
53	8.46	596.53	1.16	14734	0.02868	0.02747	0.02814
54	8.27	588.06	1.14	14525	0.02878	0.02758	0.02825
55	8.15	579.79	1.13	14321	0.02889	0.02768	0.02835
56	8.02	571.64	1.11	14120	0.02899	0.02778	0.02845
57	7.01	563.62	1.09	13921	0.02909	0.02789	0.02855
58	8.21	556.61	1.08	13748	0.02918	0.02798	0.02865
59	8.53	548.40	1.06	13546	0.02929	0.02809	0.02876
60	7.07	539.87	1.05	13335	0.02941	0.02820	0.02887
61	8.53	532.80	1.03	13160	0.02950	0.02830	0.02897
62	8.02	524.27	1.02	12950	0.02962	0.02842	0.02909
63	7.58	516.25	1.00	12751	0.02974	0.02853	0.02921
64	8.21	508.67	0.99	12564	0.02985	0.02864	0.02932
65	8.34	500.46	0.97	12361	0.02997	0.02876	0.02945
66	8.40	492.13	0.96	12156	0.03009	0.02888	0.02958
67	8.34	483.73	0.94	11948	0.03022	0.02901	0.02971
68	8.40	475.39	0.92	11742	0.03036	0.02914	0.02985
69	8.34	466.99	0.91	11535	0.03049	0.02927	0.02999
70	8.08	458.65	0.89	11329	0.03063	0.02941	0.03013
71	8.34	450.57	0.87	11129	0.03077	0.02954	0.03027
72	8.27	442.23	0.86	10923	0.03091	0.02968	0.03043
73	8.34	433.96	0.84	10719	0.03106	0.02982	0.03058
74	8.27	425.62	0.83	10513	0.03121	0.02997	0.03074
75	8.15	417.35	0.81	10309	0.03136	0.03012	0.03090
76	7.83	409.20	0.79	10107	0.03152	0.03027	0.03107
77	8.72	401.37	0.78	9914	0.03167	0.03041	0.03123
78	8.34	392.65	0.76	9699	0.03184	0.03058	0.03141
79	8.65	384.32	0.75	9493	0.03201	0.03074	0.03160
80	8.59	375.66	0.73	9279	0.03220	0.03092	0.03179
81	8.59	367.07	0.71	9067	0.03238	0.03109	0.03200

82	8.53	358.48	0.70	8855	0.03258	0.03127	0.03220
83	8.34	349.96	0.68	8644	0.03277	0.03146	0.03242
84	8.34	341.62	0.66	8438	0.03297	0.03164	0.03263
85	7.89	333.28	0.65	8232	0.03317	0.03183	0.03286
86	8.27	325.39	0.63	8037	0.03337	0.03202	0.03308
87	7.58	317.12	0.62	7833	0.03359	0.03222	0.03332
88	7.58	309.54	0.60	7646	0.03379	0.03240	0.03354
89	7.58	301.96	0.59	7458	0.03400	0.03259	0.03377
90	7.96	294.38	0.57	7271	0.03422	0.03279	0.03402
91	8.21	286.42	0.56	7075	0.03446	0.03300	0.03428
92	8.40	278.21	0.54	6872	0.03471	0.03323	0.03456
93	7.83	269.81	0.52	6664	0.03497	0.03347	0.03486
94	8.08	261.98	0.51	6471	0.03523	0.03369	0.03515
95	8.08	253.89	0.49	6271	0.03551	0.03394	0.03547
96	8.34	245.81	0.48	6072	0.03580	0.03419	0.03579
97	8.65	237.47	0.46	5866	0.03611	0.03446	0.03614
98	8.27	228.82	0.44	5652	0.03645	0.03475	0.03652
99	8.34	220.55	0.43	5448	0.03678	0.03503	0.03690
100	8.08	212.21	0.41	5242	0.03714	0.03533	0.03729
101	7.83	204.13	0.40	5042	0.03750	0.03564	0.03769
102	6.95	196.29	0.38	4848	0.03787	0.03594	0.03809
103	8.40	189.35	0.37	4677	0.03821	0.03622	0.03845
104	8.21	180.95	0.35	4469	0.03865	0.03657	0.03888
105	8.21	172.74	0.34	4267	0.03910	0.03693	0.03931
106	7.58	164.53	0.32	4064	0.03958	0.03730	0.03971
107	8.27	156.95	0.30	3877	0.04005	0.03767	0.04005
108	8.27	148.67	0.29	3672	0.04059	0.03808	0.04034
109	8.08	140.40	0.27	3468	0.04118	0.03851	0.04049
110	8.59	132.32	0.26	3268	0.04179	0.03896	0.04040
111	8.27	123.73	0.24	3056	0.04250	0.03946	0.03986
112	8.46	115.45	0.22	2852	0.04324	0.03997	0.03865
113	8.53	106.99	0.21	2643	0.04407	0.04053	0.03632
114	8.21	98.46	0.19	2432	0.04500	0.04112	0.03270
115	7.89	90.25	0.18	2229	0.04599	0.04172	0.02999
116	8.27	82.36	0.16	2034	0.04705	0.04234	0.03151
117	8.34	74.08	0.14	1830	0.04831	0.04303	0.03498
118	7.96	65.75	0.13	1624	0.04978	0.04377	0.03941
119	7.89	57.79	0.11	1427	0.05141	0.04451	0.04484
120	8.34	49.89	0.10	1232	0.05333	0.04527	0.05193
121	8.15	41.56	0.08	1026	0.05583	0.04607	0.06235
122	8.15	33.41	0.06	825	0.05896	0.04678	0.07755
123	8.34	25.26	0.05	624	0.06323	0.04718	0.10256
124	8.40	16.93	0.03	418	0.06988	0.04649	0.15308
125	8.53	8.53	0.02	211	0.08295	0.04055	0.30389

Apéndice C Datos de campo lateral Propuesto

Número del Emisor	Promedio del Caudal (l/h)	Suma caudal (l/h)	Velocidad. m/s	Número de Reynolds	f Blasius	f Bagarello	f Swamee
1	8.27	1162.71	2.26	28719	0.02427	0.02288	0.02394
2	8.34	1154.43	2.24	28515	0.02432	0.02293	0.02398
3	8.34	1146.09	2.22	28309	0.02436	0.02298	0.02402
4	7.71	1137.76	2.21	28103	0.02441	0.02302	0.02406
5	8.34	1130.05	2.19	27912	0.02445	0.02307	0.02410
6	8.46	1121.72	2.18	27706	0.02449	0.02312	0.02414
7	8.27	1113.25	2.16	27497	0.02454	0.02317	0.02419
8	8.34	1104.98	2.14	27293	0.02459	0.02321	0.02423
9	7.96	1096.64	2.13	27087	0.02463	0.02326	0.02427
10	7.96	1088.68	2.11	26891	0.02468	0.02331	0.02431
11	8.53	1080.73	2.10	26694	0.02472	0.02336	0.02435
12	8.46	1072.20	2.08	26483	0.02477	0.02341	0.02440
13	8.27	1063.74	2.06	26274	0.02482	0.02346	0.02444
14	8.27	1055.46	2.05	26070	0.02487	0.02352	0.02449
15	8.65	1047.19	2.03	25866	0.02492	0.02357	0.02453
16	8.40	1038.54	2.02	25652	0.02497	0.02362	0.02458
17	8.34	1030.14	2.00	25444	0.02502	0.02368	0.02463
18	8.53	1021.80	1.98	25239	0.02507	0.02373	0.02467
19	8.59	1013.27	1.97	25028	0.02512	0.02379	0.02472
20	8.84	1004.68	1.95	24816	0.02518	0.02384	0.02477
21	8.84	995.84	1.93	24597	0.02523	0.02390	0.02482
22	8.34	987.00	1.92	24379	0.02529	0.02396	0.02487
23	8.34	978.66	1.90	24173	0.02534	0.02402	0.02492
24	8.34	970.33	1.88	23967	0.02540	0.02408	0.02497
25	8.72	961.99	1.87	23761	0.02545	0.02413	0.02503
26	8.46	953.27	1.85	23546	0.02551	0.02420	0.02508
27	8.72	944.81	1.83	23337	0.02557	0.02426	0.02513
28	8.34	936.09	1.82	23122	0.02563	0.02432	0.02519
29	8.72	927.76	1.80	22916	0.02568	0.02438	0.02524
30	8.72	919.04	1.78	22700	0.02574	0.02444	0.02530
31	8.65	910.33	1.77	22485	0.02581	0.02451	0.02536
32	8.65	901.67	1.75	22271	0.02587	0.02457	0.02541
33	8.46	893.02	1.73	22058	0.02593	0.02464	0.02547
34	8.62	884.56	1.72	21849	0.02599	0.02470	0.02553
35	8.34	875.94	1.70	21636	0.02606	0.02477	0.02559
36	8.72	867.60	1.68	21430	0.02612	0.02483	0.02565
37	8.27	858.88	1.67	21215	0.02618	0.02490	0.02571

38	8.34	850.61	1.65	21010	0.02625	0.02497	0.02577
39	8.27	842.27	1.63	20804	0.02631	0.02504	0.02583
40	8.72	834.00	1.62	20600	0.02638	0.02511	0.02590
41	8.53	825.28	1.60	20385	0.02645	0.02518	0.02596
42	8.27	816.76	1.59	20174	0.02651	0.02525	0.02603
43	8.27	808.48	1.57	19970	0.02658	0.02532	0.02609
44	8.59	800.21	1.55	19765	0.02665	0.02539	0.02616
45	8.59	791.62	1.54	19553	0.02672	0.02547	0.02623
46	8.59	783.03	1.52	19341	0.02680	0.02554	0.02630
47	7.33	774.44	1.50	19129	0.02687	0.02562	0.02637
48	8.72	767.12	1.49	18948	0.02693	0.02569	0.02643
49	8.65	758.40	1.47	18733	0.02701	0.02576	0.02650
50	7.01	749.75	1.45	18519	0.02709	0.02585	0.02658
51	8.53	742.74	1.44	18346	0.02715	0.02591	0.02664
52	8.72	734.21	1.42	18135	0.02723	0.02599	0.02671
53	8.40	725.49	1.41	17920	0.02731	0.02608	0.02679
54	8.40	717.09	1.39	17712	0.02739	0.02616	0.02687
55	8.59	708.69	1.38	17505	0.02747	0.02624	0.02695
56	8.72	700.11	1.36	17293	0.02756	0.02633	0.02703
57	8.46	691.39	1.34	17077	0.02764	0.02642	0.02712
58	7.96	682.93	1.33	16868	0.02773	0.02650	0.02720
59	8.65	674.97	1.31	16672	0.02781	0.02659	0.02728
60	8.02	666.32	1.29	16458	0.02790	0.02668	0.02737
61	8.72	658.29	1.28	16260	0.02798	0.02677	0.02745
62	8.72	649.58	1.26	16045	0.02808	0.02686	0.02754
63	9.09	640.86	1.24	15829	0.02817	0.02696	0.02764
64	8.34	631.77	1.23	15605	0.02827	0.02706	0.02774
65	8.59	623.43	1.21	15399	0.02837	0.02716	0.02783
66	8.72	614.84	1.19	15187	0.02847	0.02726	0.02793
67	8.72	606.13	1.18	14971	0.02857	0.02736	0.02803
68	8.46	597.41	1.16	14756	0.02867	0.02746	0.02813
69	8.59	588.95	1.14	14547	0.02877	0.02757	0.02823
70	8.40	580.36	1.13	14335	0.02888	0.02767	0.02834
71	8.40	571.96	1.11	14127	0.02898	0.02778	0.02845
72	8.40	563.56	1.09	13920	0.02909	0.02789	0.02855
73	8.65	555.16	1.08	13712	0.02920	0.02800	0.02867
74	8.72	546.51	1.06	13499	0.02932	0.02811	0.02878
75	8.53	537.79	1.04	13283	0.02943	0.02823	0.02890
76	8.27	529.26	1.03	13073	0.02955	0.02835	0.02902
77	8.65	520.99	1.01	12868	0.02967	0.02846	0.02914
78	8.53	512.34	0.99	12655	0.02979	0.02859	0.02927
79	8.78	503.81	0.98	12444	0.02992	0.02871	0.02940
80	8.40	495.03	0.96	12227	0.03005	0.02884	0.02953
81	8.65	486.63	0.94	12020	0.03018	0.02897	0.02966

82	8.59	477.98	0.93	11806	0.03032	0.02910	0.02981
83	8.34	469.39	0.91	11594	0.03045	0.02924	0.02995
84	8.21	461.05	0.89	11388	0.03059	0.02937	0.03009
85	7.96	452.84	0.88	11185	0.03073	0.02950	0.03023
86	7.96	444.88	0.86	10989	0.03086	0.02964	0.03038
87	8.15	436.93	0.85	10792	0.03100	0.02977	0.03052
88	8.40	428.78	0.83	10591	0.03115	0.02991	0.03068
89	8.15	420.38	0.82	10383	0.03130	0.03006	0.03084
90	7.96	412.23	0.80	10182	0.03146	0.03021	0.03100
91	7.89	404.27	0.78	9986	0.03161	0.03036	0.03117
92	8.34	396.38	0.77	9791	0.03177	0.03051	0.03133
93	7.96	388.04	0.75	9585	0.03194	0.03067	0.03151
94	8.53	380.08	0.74	9388	0.03210	0.03083	0.03169
95	8.59	371.56	0.72	9178	0.03229	0.03100	0.03189
96	8.59	362.97	0.70	8965	0.03247	0.03118	0.03209
97	8.34	354.38	0.69	8753	0.03267	0.03136	0.03231
98	8.72	346.04	0.67	8547	0.03286	0.03154	0.03252
99	8.53	337.33	0.65	8332	0.03308	0.03174	0.03275
100	8.27	328.80	0.64	8121	0.03329	0.03194	0.03298
101	8.21	320.53	0.62	7917	0.03350	0.03213	0.03322
102	6.95	312.32	0.61	7714	0.03372	0.03233	0.03346
103	8.15	305.37	0.59	7543	0.03391	0.03251	0.03367
104	8.27	297.22	0.58	7341	0.03414	0.03272	0.03392
105	7.77	288.95	0.56	7137	0.03438	0.03293	0.03419
106	8.34	281.18	0.55	6945	0.03462	0.03315	0.03446
107	7.58	272.84	0.53	6739	0.03488	0.03338	0.03475
108	8.40	265.26	0.51	6552	0.03512	0.03360	0.03503
109	8.34	256.86	0.50	6345	0.03541	0.03385	0.03535
110	8.40	248.53	0.48	6139	0.03570	0.03410	0.03568
111	8.02	240.13	0.47	5931	0.03601	0.03437	0.03603
112	7.64	232.11	0.45	5733	0.03632	0.03464	0.03637
113	8.53	224.46	0.44	5544	0.03662	0.03490	0.03672
114	8.21	215.94	0.42	5334	0.03698	0.03520	0.03711
115	8.08	207.73	0.40	5131	0.03734	0.03550	0.03751
116	8.72	199.64	0.39	4931	0.03771	0.03581	0.03792
117	8.34	190.93	0.37	4716	0.03813	0.03615	0.03836
118	8.34	182.59	0.35	4510	0.03856	0.03650	0.03880
119	8.40	174.25	0.34	4304	0.03901	0.03686	0.03923
120	8.34	165.85	0.32	4097	0.03950	0.03724	0.03965
121	8.21	157.52	0.31	3891	0.04001	0.03764	0.04003
122	8.46	149.31	0.29	3688	0.04055	0.03805	0.04032
123	8.27	140.84	0.27	3479	0.04115	0.03849	0.04049
124	8.34	132.57	0.26	3274	0.04177	0.03895	0.04041
125	7.77	124.23	0.24	3069	0.04246	0.03943	0.03991

126	8.46	116.46	0.23	2877	0.04315	0.03991	0.03885
127	8.46	108.00	0.21	2668	0.04397	0.04046	0.03667
128	7.89	99.54	0.19	2459	0.04488	0.04104	0.03320
129	8.08	91.64	0.18	2264	0.04581	0.04162	0.03016
130	8.21	83.56	0.16	2064	0.04688	0.04225	0.03110
131	8.40	75.35	0.15	1861	0.04811	0.04292	0.03439
132	8.34	66.95	0.13	1654	0.04955	0.04366	0.03870
133	8.59	58.61	0.11	1448	0.05123	0.04443	0.04421
134	8.46	50.02	0.10	1236	0.05330	0.04526	0.05180
135	8.53	41.56	0.08	1026	0.05583	0.04607	0.06235
136	8.53	33.03	0.06	816	0.05913	0.04681	0.07844
137	8.40	24.51	0.05	605	0.06371	0.04718	0.10574
138	8.40	16.11	0.03	398	0.07076	0.04628	0.16088
139	7.71	7.71	0.01	190	0.08508	0.03904	0.33627

Apéndice D Datos para el Coeficiente de Uniformidad lateral Tradicional y Propuesto en las dos repeticiones.

Gotero	***Primera repetición***		***Primera repetición***		***Segunda repetición***		***Segunda repetición***	
	Lateral Tradicional		Lateral Propuesto		Lateral Tradicional		Lateral Propuesto	
	Caudal (l/h)	$(V_i - \overline{V})$	Caudal (l/h)	$(V_i - \overline{V})$	Caudal (l/h)	$(V_i - \overline{V})$	Caudal (l/h)	$(V_i - \overline{V})$
1	8.84	0.65	8.91	0.69	9.09	0.73	8.91	0.60
2	8.78	0.59	8.91	0.69	8.84	0.48	8.84	0.54
3	8.72	0.53	8.84	0.62	8.84	0.48	8.84	0.54
4	8.72	0.53	8.84	0.62	8.78	0.41	8.84	0.54
5	8.72	0.53	8.72	0.50	8.72	0.35	8.78	0.47
6	8.72	0.53	8.72	0.50	8.72	0.35	8.78	0.47
7	8.65	0.46	8.67	0.45	8.72	0.35	8.78	0.47
8	8.65	0.46	8.65	0.43	8.72	0.35	8.72	0.41
9	8.65	0.46	8.65	0.43	8.72	0.35	8.72	0.41
10	8.65	0.46	8.65	0.43	8.72	0.35	8.72	0.41
11	8.59	0.40	8.65	0.43	8.72	0.35	8.72	0.41
12	8.59	0.40	8.65	0.43	8.72	0.35	8.72	0.41
13	8.59	0.40	8.59	0.37	8.72	0.35	8.72	0.41
14	8.59	0.40	8.59	0.37	8.72	0.35	8.72	0.41
15	8.59	0.40	8.59	0.37	8.72	0.35	8.72	0.41
16	8.53	0.34	8.59	0.37	8.72	0.35	8.72	0.41
17	8.53	0.34	8.53	0.31	8.72	0.35	8.72	0.41
18	8.53	0.34	8.53	0.31	8.72	0.35	8.72	0.41
19	8.53	0.34	8.53	0.31	8.72	0.35	8.72	0.41
20	8.53	0.34	8.53	0.31	8.72	0.35	8.72	0.41
21	8.53	0.34	8.53	0.31	8.65	0.29	8.72	0.41
22	8.53	0.34	8.53	0.31	8.65	0.29	8.65	0.35
23	8.46	0.27	8.53	0.31	8.65	0.29	8.65	0.35
24	8.46	0.27	8.53	0.31	8.65	0.29	8.65	0.35
25	8.46	0.27	8.46	0.24	8.65	0.29	8.65	0.35
26	8.46	0.27	8.46	0.24	8.65	0.29	8.65	0.35
27	8.40	0.21	8.46	0.24	8.65	0.29	8.59	0.28
28	8.40	0.21	8.46	0.24	8.65	0.29	8.59	0.28
29	8.40	0.21	8.46	0.24	8.62	0.26	8.59	0.28
30	8.40	0.21	8.46	0.24	8.59	0.22	8.59	0.28
31	8.40	0.21	8.46	0.24	8.59	0.22	8.59	0.28
32	8.40	0.21	8.46	0.24	8.59	0.22	8.59	0.28
33	8.40	0.21	8.46	0.24	8.59	0.22	8.59	0.28
34	8.40	0.21	8.46	0.24	8.59	0.22	8.59	0.28

35	8.34	0.15	8.43	0.21	8.59	0.22	8.59	0.28
36	8.34	0.15	8.40	0.18	8.59	0.22	8.59	0.28
37	8.34	0.15	8.40	0.18	8.59	0.22	8.59	0.28
38	8.34	0.15	8.40	0.18	8.59	0.22	8.59	0.28
39	8.34	0.15	8.40	0.18	8.59	0.22	8.59	0.28
40	8.34	0.15	8.40	0.18	8.59	0.22	8.53	0.22
41	8.34	0.15	8.40	0.18	8.53	0.16	8.53	0.22
42	8.34	0.15	8.40	0.18	8.53	0.16	8.53	0.22
43	8.34	0.15	8.40	0.18	8.53	0.16	8.53	0.22
44	8.34	0.15	8.40	0.18	8.53	0.16	8.53	0.22
45	8.34	0.15	8.40	0.18	8.53	0.16	8.53	0.22
46	8.34	0.15	8.38	0.17	8.53	0.16	8.53	0.22
47	8.34	0.15	8.34	0.12	8.53	0.16	8.53	0.22
48	8.34	0.15	8.34	0.12	8.53	0.16	8.48	0.17
49	8.34	0.15	8.34	0.12	8.53	0.16	8.46	0.16
50	8.34	0.15	8.34	0.12	8.53	0.16	8.46	0.16
51	8.34	0.15	8.34	0.12	8.53	0.16	8.46	0.16
52	8.34	0.15	8.34	0.12	8.46	0.10	8.46	0.16
53	8.34	0.15	8.34	0.12	8.46	0.10	8.46	0.16
54	8.34	0.15	8.34	0.12	8.46	0.10	8.46	0.16
55	8.27	0.08	8.34	0.12	8.46	0.10	8.46	0.16
56	8.27	0.08	8.34	0.12	8.46	0.10	8.40	0.09
57	8.27	0.08	8.34	0.12	8.46	0.10	8.40	0.09
58	8.27	0.08	8.34	0.12	8.46	0.10	8.40	0.09
59	8.27	0.08	8.34	0.12	8.46	0.10	8.40	0.09
60	8.27	0.08	8.34	0.12	8.46	0.10	8.40	0.09
61	8.27	0.08	8.34	0.12	8.46	0.10	8.40	0.09
62	8.27	0.08	8.34	0.12	8.40	0.04	8.40	0.09
63	8.27	0.08	8.34	0.12	8.40	0.04	8.40	0.09
64	8.27	0.08	8.27	0.05	8.40	0.04	8.40	0.09
65	8.27	0.08	8.27	0.05	8.40	0.04	8.40	0.09
66	8.27	0.08	8.27	0.05	8.40	0.04	8.34	0.03
67	8.21	0.02	8.27	0.05	8.40	0.04	8.34	0.03
68	8.21	0.02	8.27	0.05	8.40	0.04	8.34	0.03
69	8.21	0.02	8.21	0.01	8.40	0.04	8.34	0.03
70	8.21	0.02	8.21	0.01	8.40	0.04	8.34	0.03
71	8.21	0.02	8.21	0.01	8.40	0.04	8.34	0.03
72	8.21	0.02	8.21	0.01	8.40	0.04	8.34	0.03
73	8.21	0.02	8.21	0.01	8.40	0.04	8.34	0.03
74	8.21	0.02	8.21	0.01	8.40	0.04	8.34	0.03
75	8.21	0.02	8.21	0.01	8.40	0.04	8.34	0.03
76	8.21	0.02	8.21	0.01	8.34	0.03	8.34	0.03
77	8.21	0.02	8.21	0.01	8.34	0.03	8.34	0.03
78	8.21	0.02	8.21	0.01	8.34	0.03	8.34	0.03

79	8.21	0.02	8.21	0.01	8.34	0.03	8.34	0.03
80	8.15	0.04	8.21	0.01	8.34	0.03	8.34	0.03
81	8.15	0.04	8.15	0.07	8.34	0.03	8.34	0.03
82	8.15	0.04	8.15	0.07	8.34	0.03	8.34	0.03
83	8.15	0.04	8.15	0.07	8.34	0.03	8.34	0.03
84	8.15	0.04	8.15	0.07	8.34	0.03	8.34	0.03
85	8.15	0.04	8.15	0.07	8.34	0.03	8.34	0.03
86	8.08	0.11	8.15	0.07	8.34	0.03	8.34	0.03
87	8.08	0.11	8.15	0.07	8.34	0.03	8.34	0.03
88	8.08	0.11	8.15	0.07	8.34	0.03	8.27	0.03
89	8.08	0.11	8.08	0.13	8.34	0.03	8.27	0.03
90	8.08	0.11	8.08	0.13	8.34	0.03	8.27	0.03
91	8.08	0.11	8.08	0.13	8.34	0.03	8.27	0.03
92	8.08	0.11	8.08	0.13	8.34	0.03	8.27	0.03
93	8.08	0.11	8.08	0.13	8.34	0.03	8.27	0.03
94	8.08	0.11	8.08	0.13	8.34	0.03	8.27	0.03
95	8.02	0.17	8.08	0.13	8.34	0.03	8.27	0.03
96	8.02	0.17	8.02	0.20	8.34	0.03	8.21	0.09
97	8.02	0.17	8.02	0.20	8.34	0.03	8.21	0.09
98	8.02	0.17	7.96	0.26	8.27	0.09	8.21	0.09
99	7.96	0.23	7.96	0.26	8.27	0.09	8.21	0.09
100	7.96	0.23	7.96	0.26	8.27	0.09	8.21	0.09
101	7.96	0.23	7.96	0.26	8.27	0.09	8.21	0.09
102	7.96	0.23	7.96	0.26	8.27	0.09	8.15	0.16
103	7.96	0.23	7.96	0.26	8.27	0.09	8.15	0.16
104	7.89	0.29	7.96	0.26	8.27	0.09	8.15	0.16
105	7.89	0.29	7.89	0.32	8.27	0.09	8.08	0.22
106	7.89	0.29	7.89	0.32	8.27	0.09	8.08	0.22
107	7.89	0.29	7.89	0.32	8.27	0.09	8.02	0.28
108	7.89	0.29	7.83	0.39	8.27	0.09	8.02	0.28
109	7.89	0.29	7.83	0.39	8.27	0.09	7.96	0.35
110	7.89	0.29	7.83	0.39	8.21	0.15	7.96	0.35
111	7.83	0.36	7.83	0.39	8.21	0.15	7.96	0.35
112	7.83	0.36	7.83	0.39	8.21	0.15	7.96	0.35
113	7.83	0.36	7.83	0.39	8.21	0.15	7.96	0.35
114	7.83	0.36	7.77	0.45	8.21	0.15	7.96	0.35
115	7.64	0.55	7.71	0.51	8.15	0.22	7.96	0.35
116	7.58	0.61	7.64	0.58	8.15	0.22	7.96	0.35
117	7.58	0.61	7.58	0.64	8.15	0.22	7.96	0.35
118	7.58	0.61	7.58	0.64	8.08	0.28	7.89	0.41
119	7.58	0.61	7.58	0.64	8.08	0.28	7.89	0.41
120	7.58	0.61	7.58	0.64	8.02	0.34	7.89	0.41
121	7.07	1.12	7.52	0.70	8.02	0.34	7.89	0.41
122	7.01	1.18	7.20	1.02	7.96	0.41	7.89	0.41

123	6.95	1.24	6.88	1.33	7.96	0.41	7.77	0.54
124	6.88	1.31	6.82	1.40	7.96	0.41	7.77	0.54
125	6.57	1.62	6.82	1.40	7.96	0.41	7.77	0.54
126					7.96	0.41	7.71	0.60
127					7.96	0.41	7.71	0.60
128					7.96	0.41	7.71	0.60
129					7.89	0.47	7.64	0.66
130					7.89	0.47	7.63	0.68
131					7.77	0.60	7.58	0.73
132					7.77	0.60	7.58	0.73
133					7.71	0.66	7.58	0.73
134					7.71	0.66	7.58	0.73
135					7.64	0.72	7.58	0.73
136					7.58	0.79	7.58	0.73
137					7.33	1.04	7.52	0.79
138					7.01	1.35	7.52	0.79
139					6.95	1.42	7.01	1.29