

# Impacto de los sólidos suspendidos totales sobre la obstrucción en emisores de riego localizado de alta frecuencia

## Impact of total suspended solids on the emitters clogging of localized high-frequency irrigation

Luis D. Sánchez\*, Christian A. Viáfara§ \*\*

*\*Instituto Cinara, Universidad del Valle*

*\*\*Escuela de ingeniería de los recursos naturales y del ambiente, Universidad del Valle  
luis.sanchez@correounivalle.edu.co, § Christian.viafara@gmail.com*

Recibido: 18 de Junio de 2013 - Aceptado: Julio 10 de 2014

### Resumen

Este estudio a escala piloto evaluó el impacto de los sólidos suspendidos totales, SST, sobre la obstrucción en emisores de riego localizado de alta frecuencia, RLAF, empleando como tratamiento para mejorar la calidad de agua un filtro de grava de flujo ascendente con mantas sintéticas (FGAC Manta). El efluente de dicho tratamiento alimentó cuatro tipos de sistemas RLAF: Lyn, Autocompensado, Microjet y Cinta de riego, para evaluar la incidencia del aporte de los SST sobre cada uno de ellos. Para ello se evaluó el riesgo de obturación, el coeficiente de uniformidad (Cu), la concentración de sólidos depositados en las paredes de los conductos y el tamaño de partícula que ingresó a los RLAF. Los resultados mostraron que cuanto mayor fue la concentración de SST, menor fue el tiempo de riego alcanzado por las tecnologías RLAF. La relación de los SST aportados a los RLAF con el tamaño de partícula que ingresó a los conductos y emisores presentó partículas hasta de 129 micras, que contribuyen a la obturación de los emisores. El régimen laminar contribuye a la deposición de sólidos en los conductos de los emisores de las tecnologías RLAF afectando el Cu.

**Palabras claves:** *Coeficiente de uniformidad, riego localizado de alta frecuencia, sólidos suspendidos.*

### Abstract

In this pilot study was evaluated the impact of total suspended solids, TSS, take in to account the obstruction on emitters of localized high frequency irrigation technologies, LHFI, using as a treatment upflow gravel filter with synthetic blankets (UGF-Sb) to improve the water quality to the LHFI. The effluent from such treatment systems fed four types of LHFI: lyn, pressure compensate, microjet and drip tape, to assess the impact of TSS on each of them. In this study was evaluated: the clogging risk, uniformity coefficient (Uc) of each LHFI technology, the deposited solids on the walls of the ducts and the influent particle size to the LHFI. Results showed that for greater concentration of TSS, was lower the irrigation time achieved by each LHFI technologies. The relationship between TSS and particle size effluent in LHFI indicated that maximum particle size introduced to the LHFI was 129 microns, which contribute to the emitter clogging. The laminar flow contribute to the deposition of solids in the ducts with impacts on Uc.

**Keywords:** *localized high frequency irrigation, total suspended solids, uniformity coefficient.*

## 1. Introducción

El riego localizado de alta frecuencia (RLAF), es un método de irrigación eficiente por sus características de aplicación localizada del agua y alta frecuencia (Pizarro, 1996; Noble, 2007). Este sistema ofrece múltiples ventajas comparativas frente a otros, especialmente en lo relacionado con la optimización de la producción agrícola y el uso eficiente del agua (OPS, 2005; Phillips, 1995). Sin embargo el problema de las obturaciones de los emisores y su impacto negativo sobre la uniformidad y la producción de los cultivos, hace indispensable el uso de tecnologías de filtración eficientes que mejoren la calidad física y biológica del agua, (Sánchez *et al.* 2009). El tratamiento de agua utilizando filtración en gravas de flujo ascendente se ha empleado con éxito para reducir la concentración de sólidos suspendidos totales (Sánchez, *et al.* 2009) y por consiguiente el riesgo de obturación por factores físicos de calidad de agua en los emisores de riego localizado.

La formación de películas biológicas, resultantes de la interacción entre bacterias formadoras de mucílago y sólidos suspendidos totales (SST), puede ser considerada como un factor de taponamiento parcial y total de goteros de las líneas de riego, (Oliveira, *et al.* 2009). Los aspectos críticos relacionados con el taponamiento de goteros cuando se utilizan aguas de baja calidad, tienen relación con: el recorrido que debe hacer el agua dentro del emisor antes de llegar al orificio de salida (por ejemplo la Cinta de riego presenta un tramo largo y sinuoso, mientras que, el Microjet tiene un tramo corto y recto); la existencia de regiones de flujo en régimen laminar; las bajas velocidades de flujo y el tipo de rejilla para regular la entrada de partículas y evitar el taponamiento del orificio de salida del emisor, (Capra & Scicolone 2004). La sedimentación de partículas coloidales y de origen mineral que se depositan sobre las paredes de los conductos del emisor forman agregados de mayor tamaño que pueden causar obstrucción, siendo afectados por el régimen flujo en el conducto, la velocidad de flujo y el diámetro, (Abbot, 1985; Rodrigo *et al.* 1997). De acuerdo con Abbot 1985; Adin & Sacks 1987 y Rodrigo *et al.* 1997, en régimen

de flujo turbulento se produce menor obturación porque la sedimentación de las partículas es baja. Pero la concentración y la variación de los SST a través del tiempo también pueden tener un efecto considerable en la obstrucción de los emisores.

Teniendo en cuenta que los sólidos suspendidos afectan el rendimientos de los sistemas RLAF, el objetivo de esta trabajo se orientó a evaluar a escala piloto impacto del aporte de SST sobre la obstrucción de cuatro tipos de emisores, RLAF, empleando como tratamiento para mejorar la calidad de agua un sistema compuesto por un filtro de grava de flujo ascendente con mantas sintéticas.

## 2. Metodología

El agua cruda utilizada en el estudio se captó del río Cauca, que es una fuente superficial de valle, la cual presenta un caudal promedio de 130 m<sup>3</sup>/s (Fernández, *et al.* 2000) con una cuenca altamente intervenida que presenta un uso y manejo inadecuado de los suelos de las laderas, siendo la causa principal del arrastre de sólidos, que genera turbiedades por encima de las 100 UNT, en los períodos de lluvia, (Fernández, *et al.* 2000). En la Figura 1 se presenta un esquema del experimento. Las unidades de tratamiento piloto implementadas para el desarrollo del trabajo fueron las siguientes: 1 Filtro de grava de flujo ascendente en capas (FGAC) con mantas sintéticas en su superficie y una parcela de riego de experimentación con 4 tipos de sistemas RLAF (una línea por cada sistema RLAF.) con emisores de tipo: Microjet (compacto, con amplia gama de radio de tiro, diámetro del orificio de salida 74 µm, presión 8,4 mca, y caudal de 14l/h.), Autocompensado (con recorrido sinuoso, caudal constante independiente de la presión, diámetro del orificio de salida 130 µm, presión 8,4 mca y caudal 1,6l/h), Lyn (no autocompensado, recorrido sinuoso, diámetro del orificio de salida 130 µm caudal 1,6 l/h y presión 8,4mca) y Cinta de riego (deflector en el orificio para evitar taponamiento, diámetro del orificio de salida 74 µm recorrido sinuoso, presión 8,4mca y caudal de 0,2 l/h) que son los de mayor aplicación en la región, (Sánchez, *et al.* 2009; en este trabajo se evaluaron dos laterales por múltiple para el Lyn, Microjet y Autocompensado y 6 para la

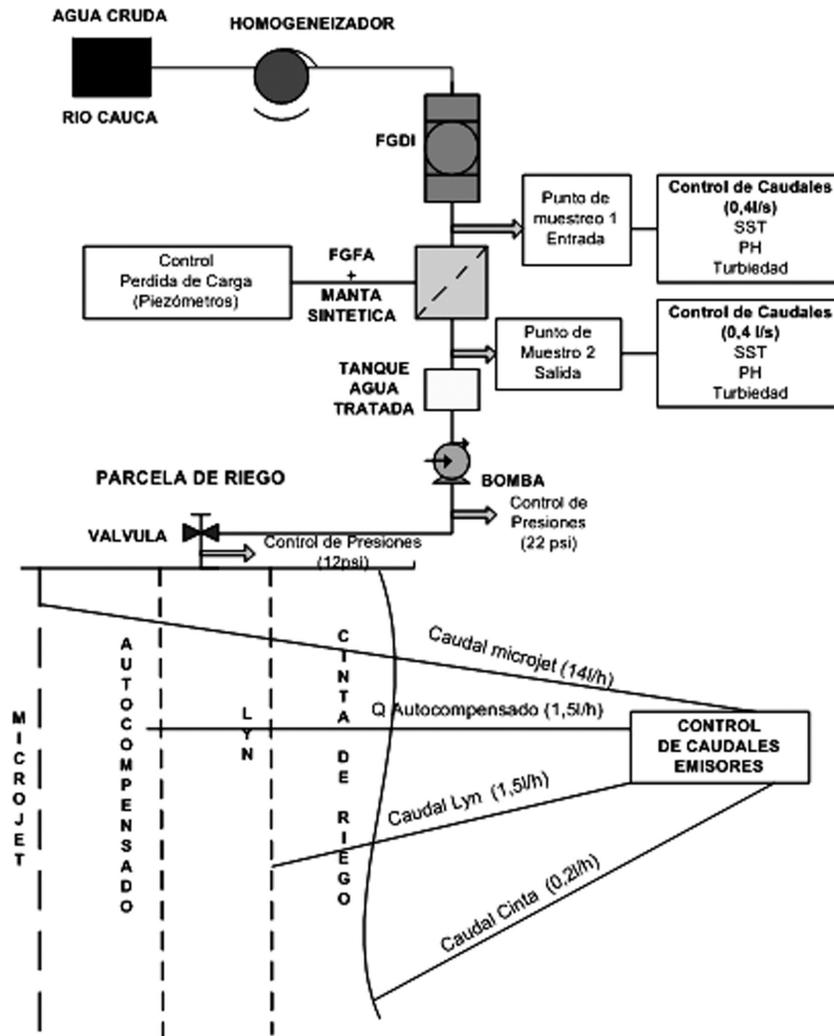


Figura 1. Línea piloto de tratamiento y red de riego con los cuatro tipos de emisores.

cinta). La tecnología de filtración y la parcela de riego operaron de manera continua. La parcela de riego fue alimentada por el efluente de la unidad FGAC-Manta. La operación fue continua y el criterio empleado para determinar su finalización y definir el tiempo total de operación de cada tecnología (tiempo de operación del sistema RLAF hasta su suspensión por obstrucción.) fue

el descenso del Coeficiente de Uniformidad,  $C_u$ , por debajo del valor límite de cada tecnología de riego. El valor límite del  $C_u$  se estableció teniendo en cuenta los criterios de Pizarro, (1996) considerando:  $C_u$  del 85% para el Lyn, Microjet y Autocompensado y un  $C_u$  del 75% para la Cinta de riego. Las características de la red de riego se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Características de la red de riego

Emisores	Presión de Trabajo.(psi)	No. Emisores	$q(l/h)$	$Q_{ateral}(l/h)$	Longitud del lateral (m)
Microjet	8.4	15	14	210	15
Autcom.	8.4	75	1.6	120	15
Lyn	8.4	50	1.6	80	15
Cinta	8.4	150	0.2	30	15

Teniendo en cuenta que durante la operación de un sistema de filtración se pueden distinguir tres fases que corresponden a la fase de maduración, la fase de filtración efectiva y la ruptura de la eficiencia, se tuvo en cuenta el efecto del periodo de maduración sobre el Cu. El periodo de maduración hace referencia al proceso de acondicionamiento que se da al comienzo de una carrera de filtración durante el cual los medios filtrantes comienzan a capturar partículas y a través del tiempo se vuelve más eficiente en la remoción de partículas adicionales. (Crittenden *et al*, 2012).

Los valores de SST, fueron evaluados de acuerdo al criterio establecido por Nakayama & Bucks (1986), quienes establecen el riesgo de obturación para SST de la siguiente forma: bajo riesgo, para valores de SST < 50 mg/l, riesgo medio para valores de SST entre 50 y 100 mg/l y alto riesgo para valores de SST > 100 mg/l. Se tomaron 30 muestras de SST afluentes y efluentes.

Para evaluar el desempeño de las cuatro tecnologías RLAF frente a las concentraciones de sólidos provenientes de la unidad de tratamiento se calcularon las siguientes variables: el Cu, la concentración de masa sólidos aportados por el sistema, el tamaño de partícula y los SST acumulados en las paredes de los conductos de cada una de las cuatro tecnologías RLAF evaluadas. El cálculo del Cu se realizó mediante la Ec. (1) propuesta por Pizarro (1996):

$$Cu = \frac{q_{25}}{q_m} * 100 \quad (1)$$

Donde:  $q_m$  = caudal medio de los emisores evaluados;  $q_{25}$  = caudal medio de los emisores que constituyen el 25% que reciben el más bajo caudal.

La cantidad de masa de sólidos aportada al sistema se calculó mediante la Ec. (2)

$$M = (C) * (Q) * t \quad (2)$$

Dónde:  $M$ : Cantidad de sólidos aportados (mg);  $Q$  = Caudal requerido por cada línea de riego (reportado en cada aforo, sumatoria de todos los emisores) (l/h);  $C$  = concentración promedia de sólidos efluentes del sistema (mg/l);  $t$  = tiempo

de operación del sistema (h).

El Tamaño de partícula ( $d$ ), se determinó por el equipo Mastersizer 2000 Ver.5.60, para rangos de tamaños entre 0,020 a 2.000 m. Las muestras se tomaron del efluente del FGAC-Manta para un total de 5 muestreos. Los SST se distribuyeron para cada tamaño de partícula según cada % de volumen obtenido en cada ensayo acorde a lo reportado por Lin *et al* (2008).

La concentración de sólidos depositados en los conductos de riego se calculó de la siguiente forma: al final de la operación del sistema riego, se desinstaló cuidadosamente cada línea RLAF de la parcela de riego y se cortaron 3 secciones de igual longitud (15 cm) de cada conducto de las cuatro tecnologías evaluadas de la parte inicial, central y final de cada una de ellas. Posteriormente cada sección de 15 cm se abrió y se lavó cuidadosamente con 100 ml de agua destilada. El volumen de 100 ml con agua destilada y solidos desprendidos en el lavado se acumuló en un vaso de precipitados. Con el agua obtenida en el lavado se calculó la cantidad de SST, que permitió conocer el valor estimado de los sólidos acumulados en las paredes de los conductos. El diámetro de cada conducto (16 mm) y el material (polietileno) son los mismos para los cuatro conductos, por lo que estos no se consideran como variables que incidan en los resultados de la prueba. Los resultados obtenidos se expresaron en términos de mg/l por metro lineal de tubería, como un indicativo de un valor más representativo de la cantidad total de sólidos adheridos en toda la longitud de la línea de riego.

Dos tipos de error fueron analizados en las mediciones: a) el error asociado a los SST en la entrada y la salida del filtro, observando si la diferencia entre la entrada y la salida es positiva; para ello se hizo la prueba de cola superior, verificando la normalidad para el vector  $\bar{d}$  (eficiencia de remoción) haciendo el siguiente contraste de hipótesis:  $H_0: \bar{d} = 0$ ;  $H_a: \bar{d} > 0$ . Sobre esa base se definió el error estándar de la estimación para  $\bar{d}$  como:

$$SE = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Donde  $S$  es la varianza de los resultados de la eficiencia y  $n$  es el número de datos; b) el error asociado a la medición de caudales en los sistemas RLAF. La expresión para estimar el error ( $\delta$ ) se relaciona en la Ec. 4 y fue derivada de la expresión para muestreo aleatorio simple con un nivel de significancia  $Z\alpha$  del 0,05%. Se estimó el error absoluto que permite conocer en términos de unidades en cuanto se está alejando el valor de la estimación con respecto al valor real y el error relativo que es un indicador que permite comparar los errores en las líneas de riego.

$$\delta = \frac{Z \alpha / 2 * S}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

### 3. Resultados y discusión

El sistema de filtración trabajó con un caudal de operación de 0.4 l/s y una velocidad de filtración de 0.5 m/h, operó continuamente y no se realizaron lavados de la unidad debido a que el sistema no

alcanzó a su máximo nivel de pérdida de carga. La parcela experimental operó con un caudal de 0,12 l/s y una presión de 12 psi. El tiempo total de operación del sistema fue de 628 horas de riego continuo.

Los percentiles para las concentraciones de sólidos suspendidos de entrada (afluente) y salida (efluente) del sistema de filtración se presentan en la figura 2a en donde la línea punteada indica el riesgo de obturación bajo para los emisores en este parámetro de calidad de agua, (Pizarro *et al* 1996). Los porcentajes de remoción de sólidos suspendidos de la unidad FGAC-Manta registrados durante todo el período de operación del sistema se muestran en la Figura 2(b). El error estándar obtenido para la estimación de las eficiencias de SST en el sistema FGAC-Manta fue de 6.3% para un nivel de confianza del 95%.

Los resultados evidencian que el agua de entrada en el 90% de las muestras presentó riesgo de obturación bajo y el efluente del filtro el 95% de las

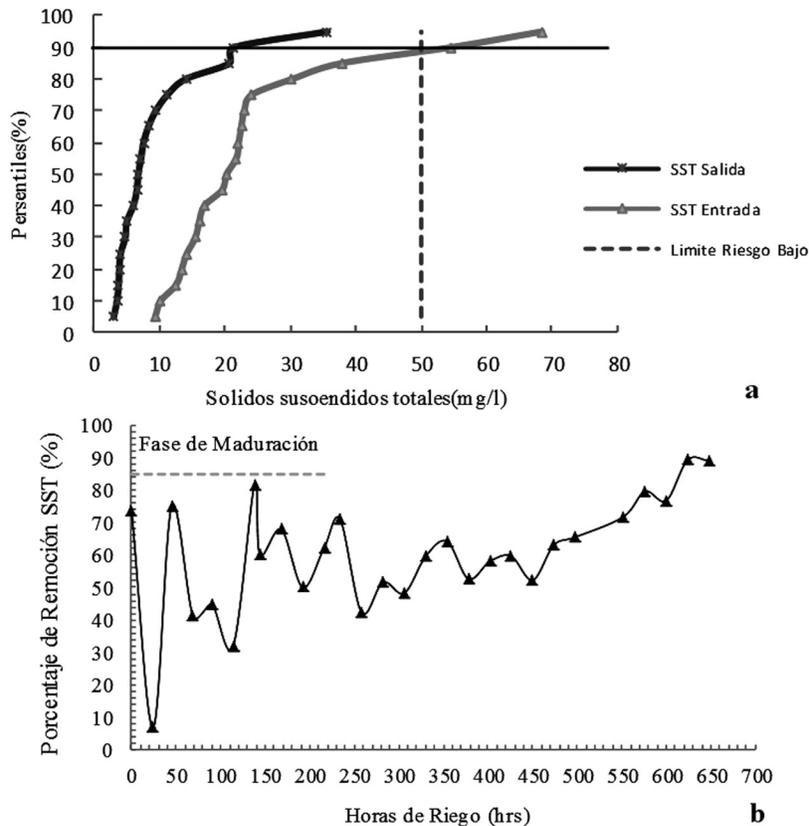


Figura 2. a) Riesgo de obstrucción por sólidos SST b). Porcentaje de remoción de SST

muestras presentó una concentración inferior a 35 mg/l con un valor medio de 5mg/l. (Ver figura 2a)

Durante las primeras 220 horas el sistema presentó un comportamiento inestable con variaciones en la eficiencia de remoción en períodos cortos de tiempo, indicando la presencia de maduración del sistema de filtración. Los resultados indicaron que el 90% de los datos durante la operación presentó valores de SST inferiores a 21.3 mg/l y solo el 10% de las veces registró valores superiores a esta concentración. Por lo que el sistema de tratamiento garantizó bajo riesgo de obstrucción a los sistemas RLAF. (ver figura 2a)

### 3.1 Impacto del aporte de la masa de sólidos sobre el coeficiente de uniformidad.

En la Tabla 2 se presentan las concentraciones de SST efluentes del sistema FGAC-Manta durante el tiempo total de operación y durante la fase de maduración. Se aprecia que la mayor cantidad de SST aportados a la red de riego se presentó

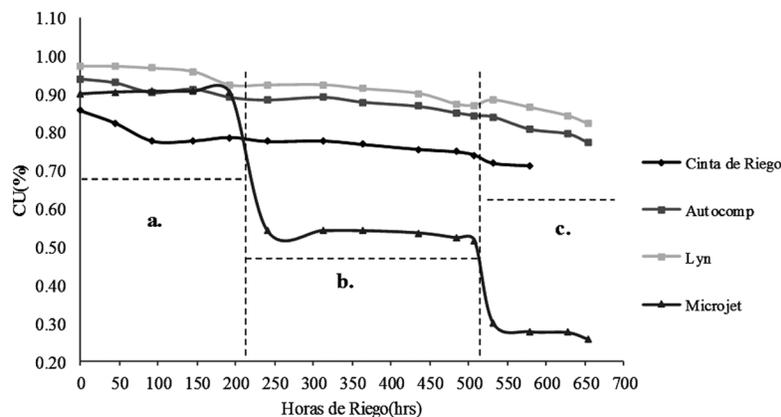
durante la maduración de la unidad (57% de la concentración total) debido a las bajas eficiencias de remoción de SST del sistema FGAC-Manta en este período de tiempo.

### 3.1.1 Comportamiento del Cu frente al aporte de sólidos suspendidos.

La Figura 3 describe el comportamiento del Cu en función del tiempo de operación de las líneas RLAF. Durante la prueba, el Cu presentó comportamientos similares en los 4 sistemas RLAF en determinados tiempos de riego, a estas equivalencias se les denominó fases (a,b y c). En la *Fase a*, comprendida entre la hora 0 y 220 de operación la cantidad de masa aportada corresponde a la maduración de la unidad. En esta fase de poca eficiencia en la remoción de SST, se presentan descensos del Cu significativos en el Microjet (del 90% al 54%) y la Cinta de riego (del 86 al 79%). El hecho de que cada emisor Microjet presente requerimientos de caudal elevados (14 l/h), permite la circulación de mayores cantidades

**Tabla 2.** Concentración SST aportados por el efluente del sistema de filtración, concentración de SST acumulados en las redes de los conductos de las líneas de riego y régimen de flujo.

Emisor	a. SST aportados durante todo el tiempo de operación (mg).	SST aportados en el período de maduración. (mg)	% de SST aportados en la maduración	b. SST acumulados por metro de tubería. mg/l/m
Microjet	1,277,488	811,825	64	889
Cinta	316,814	190,651	60	2,131
Lyn	533,363	293,165	55	2,402
Autocomp.	685,393	380,380	55	1304
Total SST mg	2,813,058	1,676,021	60	



**Figura 3.** Curvas del CU de los emisores evaluados. a. Fase de maduración aporte considerable de masa de sólidos b. estabilidad relativa del % CU. 300 hrs. c. Fase crítica para el descenso de % CU

de SST por sus orificios, por ello existe una mayor probabilidad de deposición de partículas en su interior, con tendencia a la obstrucción. La Cinta de riego al igual que el Microjet presentó un descenso drástico en su Cu entre la hora 0 y la 100. Este resultado puede tener relación no solo con el porcentaje de remoción de SST de la unidad si no también con los diámetros del orificio de salida de estos emisores (74 $\mu$ m) ya que son más pequeños que los del Lyn y el Autocompensado (125  $\mu$ m), por tal razón en esta fase de poca remoción de sólidos, puede haberse generado obstrucción en estos sistemas, indicando que estos sistemas de riego son bastante sensibles a las variaciones en las concentraciones de SST. La *fase b* comprendida entre la hora 220 y la 520, las cuatro líneas de riego mostraron un comportamiento relativamente estable en su Cu. Esta tendencia se explica porque después de la maduración las eficiencias de remoción de SST fueron mejores con valores entre el 49-65%, reduciendo así la concentración de SST aportados a las líneas de riego. En la *Fase c* después de la hora 520 hasta el final de la operación del sistema los sistemas RLAF, presentaron al igual que en la fase a, descensos significativos del Cu, Este comportamiento se explica ya que, para este tiempo de operación los SST afluentes pudieron haber formado aglomerados que saturaron los canales de conducción internos y los orificios de salida de cada uno de los emisores, alterando el Cu considerablemente hacia el final de la operación en cada una de las líneas RLAF evaluadas. Los emisores que tienen mayor diámetro en su orificio de salida (Lyn y Autocompensado) presentaron comportamientos más estables en su Cu sin descensos críticos y mayor tiempo de operación, a diferencia de la Cinta y el Microjet, que presentan los diámetros más pequeños y que alcanzaron menor tiempo de operación y comportamientos del Cu con descensos más pronunciados.

El error absoluto fue mayor en el Microjet (0,47 l/h) y se puede explicar por el mayor caudal por emisor al tener el menor número por línea, para los otros sistemas RLAF el error fue bajo (entre 0,005 y 0,009 l/h) por el efecto del mayor número de emisores por línea. El error relativo fue mayor para la cinta de riego (23,2%) debido a que se tomó una muestra del total de los orificios por la

complejidad de tomarlos todos. El error relativo del Microjet fue del 11,2% y se explica por menor número de emisores por línea (mayor caudal por emisor). Los menores errores relativos se obtuvieron para el Lyn y el Autocompensado con valores de 2,2 % y 5,5% respectivamente.

### 3.1.2 Relación entre el CU y la masa aportada de SST

La Figura 4 evidencia relación inversa ( $r^2$  entre 0,89-0,93) entre el Cu y la masa de SST aportada por el efluente del sistema FGAC-Manta para los emisores Lyn, Cinta y Autocompensado; es decir que, a medida que el sistema FGAC-Manta aporta mayor cantidad de SST el coeficiente de uniformidad tiende a disminuir su valor. Este comportamiento confirma que los SST impactan la obstrucción de los emisores de RLAF cuando se emplean fuentes superficiales como abastecimiento de agua en sistemas de riego. El emisor Microjet presentó menor correlación lineal porque tuvo un comportamiento escalonado indicando que la obstrucción de uno o dos emisores de riego puede alterar de manera significativa su Cu.

### 3.2 Deposición de SST en los conductos de riego

La acumulación progresiva de SST no solo se presenta en los emisores, una gran cantidad de sólidos también se adhiere en las paredes de los conductos de riego. En la Tabla 2 se presenta la cantidad de SST acumulados en los conductos de riego. La mayor concentración de SST adheridos o acumulados en las líneas de riego se encontró en los conductos de la Cinta y el Microjet con un total de 2131 mg/l\*m y 2402 mg/l\*m respectivamente, particularmente estas líneas alcanzaron su Cu límite en menor tiempo de operación que el Lyn y el Autocompensado (241 h el Microjet y 436 h la Cinta). La menor concentración de sólidos adheridos se presentó en el emisor Lyn con una concentración de 889 mg/l\*m, particularmente este emisor logró el mayor tiempo de operación antes de llegar a su Cu límite (628h). Estos resultados indican que existe una relación proporcional entre la acumulación de sólidos en los conductos y el descenso del Cu y una relación inversamente

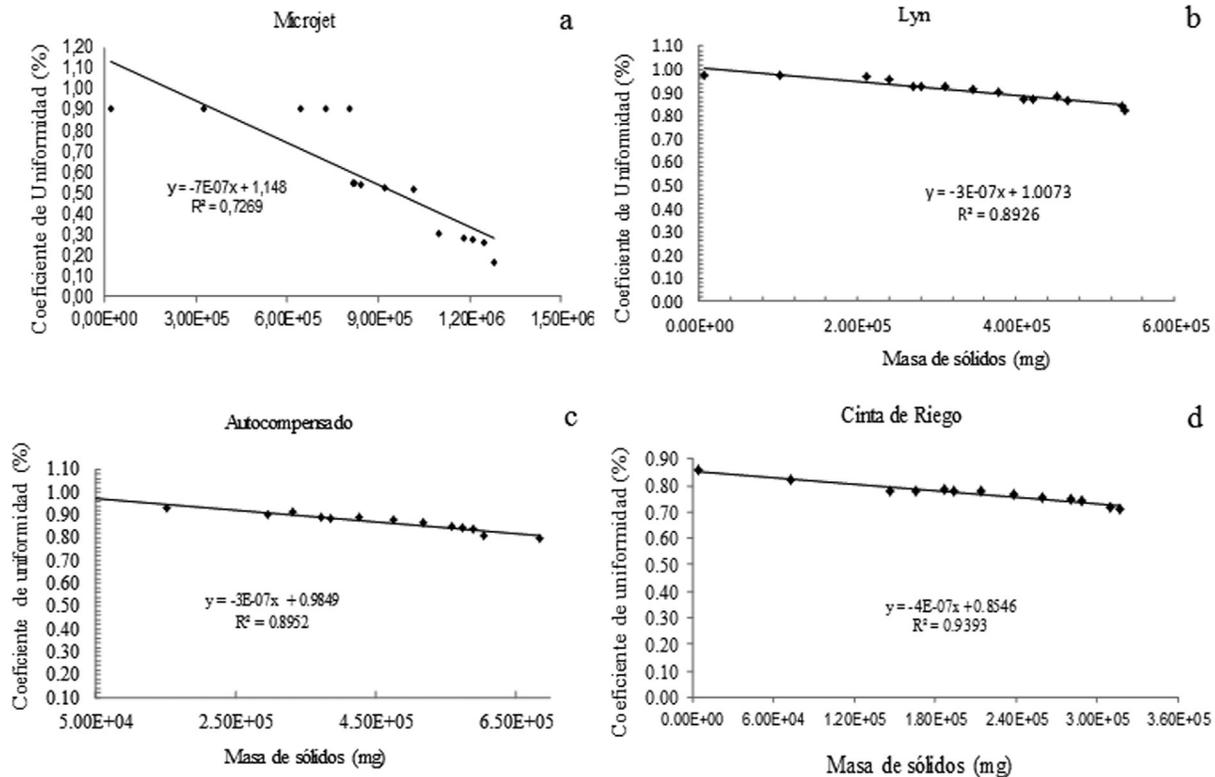


Figura 4. a). Relación Masa de SST vs CU en Microjet , b). Relación Masa de SST vs CU en Lyn. c). Relación Masa de SST vs CU en Cinta. d) Relación Masa de SST vs CU en Autocompensado.

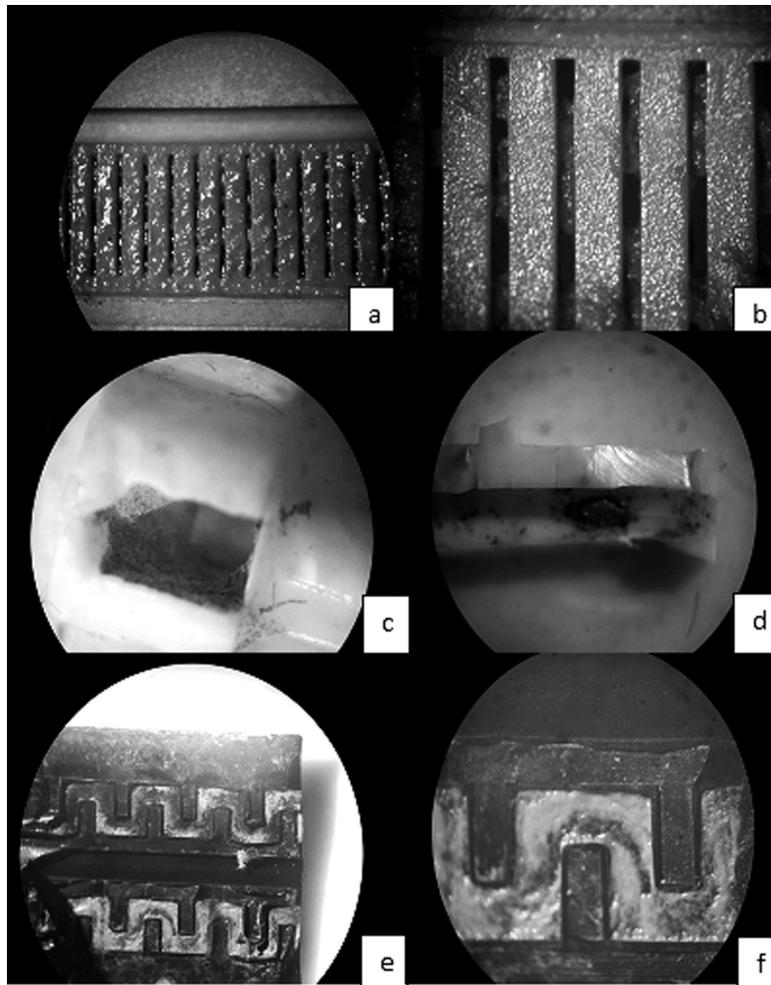
proporcional entre la acumulación de SST y el tiempo operación de las redes de riego. A mayor concentración de sólidos por metro de tubería, mayor será el descenso del Cu y menor el tiempo de operación de las redes de riego.

### 3.3.1 Acumulación de sólidos en los emisores

Al finalizar la operación del sistema se analizaron los emisores que presentaron mayor riesgo de obstrucción en cada una de las tecnologías evaluadas. Para ello se inspeccionó cuidadosamente el interior de cada uno de ellos y se registró en fotografías el efecto de la aglomeración de partículas en su interior. Las imágenes se tomaron cortando longitudinalmente el conducto y realizando el despiece de los insertados. La imágenes se registraron con una cámara digital de 12 MP, con la ayuda de un estereoscopio con una magnificación de 10-20x.

La Figura 5 (a y b) muestran una gran cantidad de partículas sólidas adheridas a un emisor

Autocompensado. Las partículas más pequeñas van adhiriéndose a las más grandes formando una barrera a manera de gel causando un efecto de cernidor en la rejilla impidiendo el libre flujo del agua hacia los ductos de conducción y puede alterar el Cu de manera progresiva tal como se presenta en la Figura 3. En el emisor Microjet se hallaron partículas adheridas en el canal de conducción y en la cámara de salida de un emisor (ver figuras 5b y 5c). Esta acumulación progresiva de sólidos va reduciendo la capacidad hidráulica del emisor impactando de manera directa en el Cu. El mayor caudal por emisor genera mayores velocidades de flujo en la salida del Microjet (ver Tabla 1), hecho que puede facilitar la evacuación de sólidos con diámetros inferiores al orificio de salida, sin embargo esta condición de flujo también puede permitir que algunos sólidos en suspensión con diámetros mayores se queden retenidos a la salida del emisor provocando su repentina obstrucción. Al respecto Puig-Bargués (2003), afirma que la sensibilidad de este emisor a las obturaciones frente a una misma calidad de



**Figura 5.** a). Acumulación de partículas en las rejillas de un emisor Autocompensado. b) Obstrucción por sólidos en un emisor Autocompensado. c) y d) Acumulación de sólidos en un emisor Microjet. e) y f) Acumulación de sólidos en los ductos internos de la Cinta de riego. (fotos en estereoscopio con magnificación de 10-20x)

agua depende del diámetro de la sección mínima de paso y de la velocidad del agua a través de esta sección. Los sólidos retenidos pueden ser partículas de diferente tamaño incluyendo arcillas y limos (0,5-2 micras) que pudieron estar presentes en el efluente correspondiendo a una concentración de 8 mg/l de SST. (Ver Figura 6)

La acumulación de partículas en los emisores de la cinta de riego presenta de manera particular el comportamiento de un modelado fluvial, (ver Figuras 5e y 5f)), donde la deposición de sedimentos se asemeja a la acumulación de sedimentos en los meandros de las redes fluviales sinuosas. Este efecto se conoce como acreción

vertical, que es el proceso de crecimiento de deposición de sólidos en sentido perpendicular a la dirección del flujo (Arche, 2010). Según Gómez *et al.* (2009) la velocidad de transporte y la sedimentación de partículas en canales abiertos no solamente dependen de las características de fluido, y de los sólidos suspendidos sino también de las características del canal. Por lo tanto, la sinuosidad del interior de la cinta puede generar en el centro del canal y en las orillas o partes convexas velocidades de flujo diferentes, siendo menor el flujo en el punto más cercano a las esquinas de canal permitiendo de esta manera la sedimentación y acumulación de sólidos a similitud de los canales abiertos.

### 3.4 Impacto del tamaño de las partículas en la obturación

La relación de los SST aportados a los RLAF y el tamaño de partícula que ingresó a los conductos y emisores se presentan en la Figura 6, para las 600 horas de operación. La Figura 6 fue construida a partir de muestras tomadas cada 100 horas de operación y corresponde a valores promedios de SST asignados a cada fracción de partículas. Los resultados muestran que al sistema RLAF ingresó un amplio rango de tamaño de partículas. Para una concentración de SST de 30 mg/l, (la cual es la concentración que corresponde al 90% de los SST que ingresaron al sistema), el tamaño máximo de partícula que ingresó fue de 129  $\mu\text{m}$ . Para evitar obturaciones en los emisores la literatura recomienda que el afluente a los emisores no permita el paso de partículas cuyos diámetros sean superiores a 1/10 del diámetro de la sección mínima de paso en goteros, (Nakayama, *et al.* 1979; Abbot 1985). Teniendo en cuenta ese criterio y el diámetro mínimo de paso de los emisores (el Microjet y la Cinta 74  $\mu\text{m}$ ; Auto-compensado y Lyn de 125  $\mu\text{m}$ ) entonces el tamaño de partícula hacia los emisores debe ser de 7,4 y 12,5  $\mu\text{m}$  respectivamente, eso implica que una concentración afluente de SST inferior a 14 mg/l puede ser requerida para minimizar el riesgo de

obturación de los emisores (ver Figura 6). Este resultado indica que la concentración de SST hacia los emisores de riego debe ser inferior al recomendado por Pizarro, (1996), para prevenir el riesgo de obturación en los sistemas RLAF. Adicionalmente la reducción del Cu que marcó la diferencia entre las tecnologías RLAF empleadas se puede explicar por la variación en el tamaño de las partículas, porque los SST en el período de observación, representaron un amplio rango de tamaños que superan el criterio para evitar la obstrucción en los emisores. Adicionalmente en todos los sistemas RLAF el régimen de flujo fue laminar ( $Re$  entre:  $1,95E-11$  y  $0,15$ ) con velocidades de sedimentación bajas ( $v_s < 1,6$  mm/s) favoreciendo la deposición, acorde con los reportes de Capra & Scicolone (2004).

### 4. Conclusiones

El sistema FGFAC-Manta, presentó un buen desempeño para reducir el riesgo de obturación de los emisores RLAF, ya que el efluente de SST el 90% de las veces presentó bajo riesgo obturación. Sin embargo, la fase de maduración de la unidad de filtración, causó un impacto negativo en la obstrucción de los emisores, ya que permitió el ingreso de grandes cantidades de SST que contribuyeron al descenso del

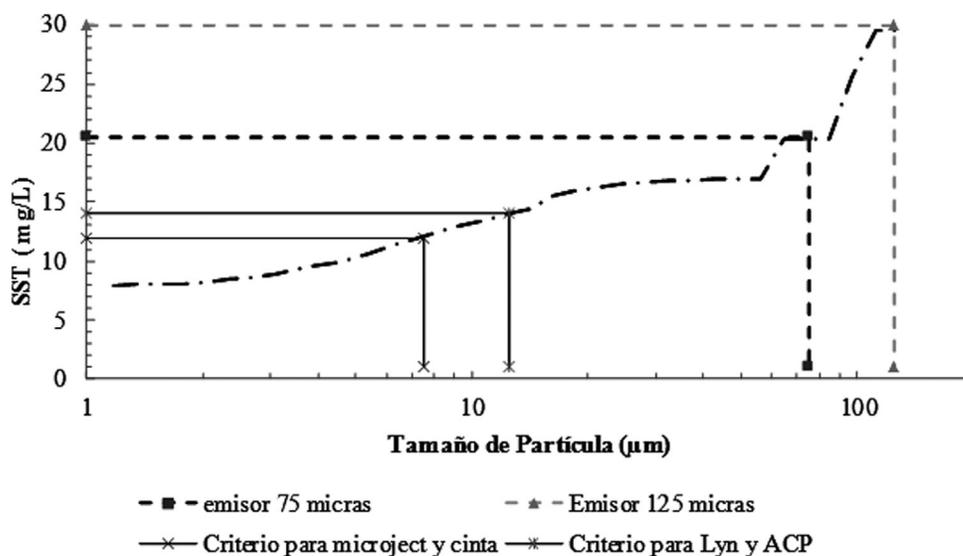


Figura 6. Relación entre sólidos suspendidos totales y distribuidos por tamaño de partícula

coeficiente de uniformidad de las cuatro tecnologías de riego evaluadas.

Las tecnologías de riego: Lyn, Cinta y Autocompensado alimentados con efluentes del sistema FGAC-Manta, alcanzaron tiempos de operación superiores a 400 horas de riego continuo con efluentes de SST inferiores a 21,3 mg/l el 90% del tiempo. El Microjet presentó el menor desempeño con 241 h de tiempo de riego.

Se observó que cuanto mayor fue la concentración de SST que ingresó a las líneas de riego (SST aportados por el sistema y SST por metro de tubería) menor fue el tiempo de riego acumulado por cada una de las tecnologías RLAF antes de llegar a su Cu límite. Este comportamiento indica que la concentración de SST depositados en los conductos de los emisores RLAF y los sólidos aportados por el sistema, presentan una relación inversamente proporcional con el tiempo total de riego obtenido en cada uno de los emisores. Hecho que corrobora la relación entre de los SST con la obstrucción y la uniformidad de los emisores de riego, siendo un parámetro clave para seguimiento.

La relación de los SST aportados a los RLAF con el tamaño de partícula que ingresó a los conductos y emisores presentó tamaños hasta de 129 micras que contribuyen a la obturación de los emisores. Para prevenir reducciones del Cu en el Microjet y Cinta, tamaños de partículas de 7,4  $\mu\text{m}$  deben ser garantizados, para lo cual los SST deben ser de 12 mg/l, mientras que para auto compensado y Lyn  $d = 12,5 \mu\text{m}$ , los SST afluentes fueron de 14 mg/l. Por lo tanto, la relación SST y curva de distribución de tamaño de partículas pueden ayudar a explicar el descenso del Cu en los emisores RLAF.

## 5. Referencias Bibliográficas

- Abbot, J. S. (1985). Emitter clogging causes and prevention. *ICID Bulletin*. 34 (2), 11-20.
- Adin, A. & Sacks, M. (1987). *Water quality and emitter clogging relationships in wastewater irrigation*. Proceeding of Water Reuse, Symposium, Denver, Colorado, 517-530.
- Arche A. (Editor). (2010). *Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. CSIC Textos Universitarios 46, Madrid. 233-240 pp
- Capra, A., & Scicolone, B. (2004). Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 68(2), 135-149.
- Crittenden, J. C., Trussell, R. R., Hand D. W., Howe K. J. & Tchobanoglous G.: *MWH's Water Treatment: Principles and Design*, John Wiley & Sons Third Edition, pp., 1727, 2012.
- Fernández, J., Latorre, J., & Vargas V. (2000). *Uso de mantas sintéticas y naturales en filtración lenta en arena*. CINARA-Universidad del Valle. Santiago de Cali.
- Gómez, M., & Herrera, B. (2001), *Evaluación del cambio de en las propiedades en mantas sintéticas no tejidas antes y después de su uso continuo en FLA*. Trabajo de grado. Universidad del Valle. Cali
- Lin E., D Page D., Pavelic P (2008) . A new method to evaluate polydisperse kaolinite clay particle removal in roughing filtration using colloid filtration theory. *Water Research*, 42, p 669-676
- Nakayama, F.S., & Bucks, D. (1986). *Trickle irrigation for crop production: design, operation and management*. Elsevier, Amsterdam.
- Noble, N. 2007. *Practical answers technical information online. Micro-Irrigation*. En: Practical Antion, [http://practicalaction.org/practicalanswers/product\\_info.php?cPath=24\\_78&products\\_id=56](http://practicalaction.org/practicalanswers/product_info.php?cPath=24_78&products_id=56).
- Oliveira, R., Alves, A., Zapata, O. L., Rodríguez, J.A., Vinicius, C., & Astoni, D. (2009). Taponamiento de goteros y del filtro de discos con agua residual sanitaria de una laguna de maduración. *Revista Facultad Nacional de Agronomía*, 62(1), 4957-4966.
- OPS (Organización Panamericana de la Salud) (2005). *Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas*, OPS/CEPIS: Lima. 28 p.

Phillis. K. P. (1995). *Long-term operation of microirrigation filtration system*. Proceedings of the fifth International Irrigation Congress. Orlando, Florida. 579-584.

Pizarro, C. (1996). *Riego localizado de alta frecuencia: Calidad de agua para riego*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Puig-Burgués, J.(2003). *Utilización de aguas residuales en los sistemas de riego localizado: Embozamiento y Filtración*. Tesis Doctoral.

Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Lleida. España.

Rodrigo, J., Hernandez, J., Perez, A., Gonzales, J.F (1997) . *Riego localizado*. Ediciones Mundi-Prensa y MAPA-IRYDA, Madrid.

Sánchez. L, Latorre. J, Valencia V. (2009) Mejoramiento de la calidad del agua de riego por filtración en múltiples etapas (FIME). *Revista Agronomía Colombiana*. 27(3), 407-415.