

Mejoramiento de la calidad del agua de riego por filtración en múltiples etapas (FiME)

Improving irrigation water quality through multi-stage filtration (MSF)

Luis Darío Sánchez^{1,2}, Jorge Latorre¹ y Viviana Valencia-Zuluaga¹

RESUMEN

El presente experimento, conducido a escala piloto, evaluó algunas técnicas de filtración en múltiples etapas (FiME) para mejorar la calidad de agua en sistemas de riego con el fin de disminuir el riesgo de obturación en los emisores de riego localizado de alta frecuencia (RLAF). Cuatro configuraciones FiME fueron estudiadas en términos de su efecto sobre algunos parámetros fisicoquímicos y microbiológicos del agua que inciden en la obturación de los emisores de riego. El efluente de cada una de dichas tecnologías alimentó cuatro tipos de sistemas RLAF. De acuerdo con los resultados, el filtro lento de arena mostró el mejor desempeño, mientras que el filtro de anillos tuvo el comportamiento más deficiente, presentando parámetros de calidad de agua con riesgo medio de obturación. Habiendo llegado al punto de uniformidad de irrigación mínima admisible después de 4,7 meses de operación, los goteros lyn y autocompensado alcanzaron los mejores tiempos de riego. Se propone una matriz preliminar de selección de tecnología, que define el esquema FiME-RLAF en función del tiempo de operación de riego y la calidad del agua cruda. Se identificó la necesidad de profundizar en la medición del tamaño de partículas como posible causa de obturación de los emisores.

Palabras clave: calidad de agua para riego, riego localizado de alta frecuencia, riesgo de obturación, coeficiente de uniformidad de riego.

ABSTRACT

With the aim of reducing clogging risk in the emitters of localized high-frequency irrigation systems (LHFI), the present experiment, conducted at a pilot scale, evaluated the performance of a series of multi-stage filtration technologies (MSF) in improving irrigation water quality. Four MSF configurations were evaluated in terms of their effect on a series of water physicochemical and microbiological factors that affect emitter clogging. The effluent resulting from the application of each of these technologies fed four types of LHFI systems. The results point at slow sand filtration as the best MSF configuration. In contrast, by producing medium clogging risk water quality parameters, ring filtration exhibited the weakest performance. By reaching minimum admissible irrigation uniformity after 4.7 months, Lyn and self-compensated drip systems showed the best irrigation times. We propose a preliminary MSF-LHFI scheme selection matrix based on time of irrigation operation and raw water quality. The need was seen to develop further studies on particle size as a probable emitter clogging factor.

Key words: irrigation water quality, localized high-frequency irrigation, clogging risk, irrigation uniformity coefficient.

Introducción

El riego localizado de alta frecuencia (RLAF) es un método eficiente por sus características de aplicación localizada del agua y alta frecuencia (Pizarro, 1996; Noble, 2007). El principal problema de los sistemas RLAF es la obturación progresiva de los emisores (Capra y Scicolone, 2007; Goyal y Ramírez, 2007) debido a la presencia de sustancias de origen físico, químico y microbiológico en el agua (Nakayama y Bucks, 1986); este problema está asociado a las características propias de la tecnología: pequeños diámetros de emisión que son necesarios para garantizar bajos caudales (menores a 150 L h^{-1}) y la obturación de los emisores que afecta la

uniformidad de riego, la cual está relacionada de manera directa con la uniformidad de producción y el crecimiento de las plantas (Te Velde, 2001; Andersson, 2005).

Investigadores como Puig-Bargués *et al.* (2005) mencionan que los sistemas de riego localizado son muy exigentes en calidad de agua, por lo cual el agua de riego debe tratarse antes de ser distribuida para disminuir el riesgo de obturación. Otros autores como Nakayama y Bucks (1986) y Pizarro (1996) han planteado diferentes parámetros para la calidad del agua en sistemas de riego, con el fin de de-

Fecha de recepción: 11 de junio de 2009. Aceptado para publicación: 6 de noviembre de 2009

¹ Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Instituto Cinara, Cali (Colombia).

² Autor de correspondencia. luisanc@univalle.edu.co

TABLA 1. Parámetros de calidad de agua para evaluar el riesgo por obturación en sistemas RLAF.

Parámetro	Unidad	Riesgo		
		Bajo	Medio	Alto
Físico				
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg L ⁻¹	< 50	50 - 100	> 100
Químico				
pH		< 7,0	7,0 - 8,0	> 8,0
Sólidos disueltos (SD)	mg L ⁻¹	< 500	500 - 2.000	> 2.000
Manganeso (Mn)	mg L ⁻¹	< 0,1	0,1 - 1,5	> 1,5
Hierro (Fe)	mg L ⁻¹	< 0,1	0,1 - 1,5	> 1,5
Biológico				
Mesófilos	ufc/100 mL ⁻¹	< 1·10 ⁶	1·10 ⁶ - 5·10 ⁶	> 5·10 ⁶

Fuente: Nakayama y Bucks (1986).

terminar el riesgo de obturación en riego localizado. Los parámetros y los valores de referencia requeridos para disminuir el riesgo se presentan en la Tab. 1.

El tratamiento de agua para riego localizado en los distritos de riego en Colombia se lleva a cabo a nivel centralizado y a nivel predial o individual. En los sistemas centralizados se cuenta con infraestructuras de pre-tratamiento, existiendo captación, aducción, sedimentación, conducción, almacenamiento y distribución; esto convierte el mejoramiento de la calidad del agua de riego en una responsabilidad individual en el predio. Tapia y Osorio (1999) presentan una guía con tratamientos convencionales para el mejoramiento de la calidad de agua para riego, donde se indica el tipo de filtro (filtro de anillos, de mallas, de grava e hidrociclones) según la fuente hídrica por utilizar para el sistema de riego.

Existe una tecnología empleada con éxito para el tratamiento de agua de consumo humano, la cual se ha visto con potencial para ser usada en sistemas de riego localizado. Esa tecnología es la FiME, que consiste en una combinación de la filtración en gravas y la filtración lenta en arena que permite el tratamiento de agua con considerables niveles de contaminación (Galvis *et al.*, 1999). Este método de tratamiento puede ser operado y mantenido por personal con bajos niveles de escolaridad. La FiME puede generar beneficios sociales y económicos al pensar en ella con fines de uso combinado (suministro de agua potable y agua para riego) a nivel centralizado (Sánchez *et al.*, 2007); básicamente los costos de construcción varían entre US\$27 y US\$46 por persona, representando entre 25 y 40% de los costos totales de los sistemas de abastecimiento de agua, mientras que los costos de operación y mantenimiento (excluyendo el soporte) pueden variar entre US\$1,3 y 4,1 centavos por persona a la semana, lo cual parece accesible

para una persona que vive con menos de un dólar por día (Sánchez *et al.*, 2007).

El estudio desarrollado a escala piloto evaluó comparativamente la tecnología de filtración en múltiples etapas (FiME) para mejorar la calidad de agua en sistemas de riego, con el fin de disminuir el riesgo de obturación en los emisores de sistemas de riego localizado de alta frecuencia (RLAF). Se estudió la eficiencia de remoción de parámetros físico-químicos y microbiológicos que inciden en la obturación de los emisores de riego localizado, en cuatro sistemas de tratamiento de agua (tres configuraciones FiME y un sistema de filtrado convencional, FC). Adicionalmente, se evaluó el comportamiento hidráulico y la influencia de la calidad del agua efluente de los sistemas de tratamiento en cuatro módulos de parcelas de riego, cada uno con cuatro tipos de sistemas RLAF. Las variables de observación fueron de dos tipos: 1) de calidad de agua (para la evaluación de los sistemas de tratamiento) y 2) uniformidad de riego, para los sistemas RLAF.

Materiales y métodos

Las unidades piloto de tratamiento de agua y de sistemas de riego se instalaron y operaron en la Estación de Investigación y Transferencia del Instituto Cinara, ubicada en predios de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Emcali E.I.C. E.S.P. en Puerto Mallarino, en la ciudad de Cali, Colombia. Las configuraciones de tratamiento operaron con agua del río Cauca y fueron las siguientes:

1. Filtro grueso dinámico + filtro grueso ascendente en capas (FGDi + FGAC).
2. Filtro grueso dinámico + filtros gruesos ascententes en serie (FGDi + FGAS₂).

3. Filtro grueso dinámico + filtro grueso ascendente en capas + filtro lento en arena (FGDi + FGAC + FLA).
4. Filtro grueso dinámico + filtro convencional de anillos (FGDi + FC).

Estos tratamientos operaron de forma continua, y sus efluentes se condujeron a tanques de almacenamiento que alimentaron cuatro módulos de parcelas de riego, cada uno con cuatro sistemas RLAF, correspondientes a: microjet, gotero lyn, gotero autocompensado, y cinta de riego (Fig. 1). Cabe anotar que no se contó con un cultivo asociado al sistema de riego, puesto que se pretendía estudiar el impacto de la calidad del agua en la uniformidad de aplicación del caudal vertido por los emisores, mas no en el suelo ni en la planta.

La frecuencia de muestreo para los parámetros de calidad de agua fue de dos veces por día, considerando como puntos de muestreo el afluente y el efluente de las cuatro configuraciones de tratamiento. Los parámetros medidos fueron: sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos (SD), pH, hierro total (Fe), manganeso (Mn) y mesófilos. Estos parámetros fueron determinados según las técnicas establecidas por APHA-AWWA-WPCF (2005).

El parámetro de seguimiento evaluado en las redes de riego localizado fue el caudal vertido por los emisores, para los cuales se determinó el coeficiente de uniformidad (CU), mediante la ecuación (1) y utilizada por Fontela *et al.* (2002), Liotta (2006) y Patel y Rajput (2007):

$$CU = \frac{q_{25\%}}{q_a} \times 100 \quad (1)$$

donde:

CU: coeficiente de uniformidad de riego (%).

$q_{25\%}$: caudal medio del 25% de los emisores que reciben menos caudal en la prueba ($L h^{-1}$).

q_a : caudal medio de los emisores evaluados en la prueba de campo ($L h^{-1}$).

Las parcelas de riego operaron en forma continua, y el criterio para determinar la finalización de las mediciones en una parcela de riego fue el descenso del CU por debajo del nivel tecnológico del emisor. El valor de referencia definido en esta investigación para el CU, según el tipo de emisor, fue el siguiente (Pizarro, 1996; Goyal y Ramírez, 2007): a) Microjet, gotero lyn y el gotero autocompensado: 80%, y b) Cinta de riego: 75%. La obturación de los emisores se definió midiendo el caudal en los emisores con una frecuencia diaria. El diámetro y la cantidad de emisores aforados en cada tipo de sistema RLAF evaluado se presentan en la Tab. 2.

Las mediciones se realizaron en dos periodos de tiempo diferentes para poder obtener un buen aforo de los caudales en los emisores de cada parcela de riego. En el primer periodo se trabajó con las configuraciones FGDi + FGAC y FGDi + FGAS₂, mientras que en el segundo periodo se trabajó con las configuraciones FGDi + FGAC + FLA y FGDi + FC. Debido a que no se pudieron estudiar simultánea-

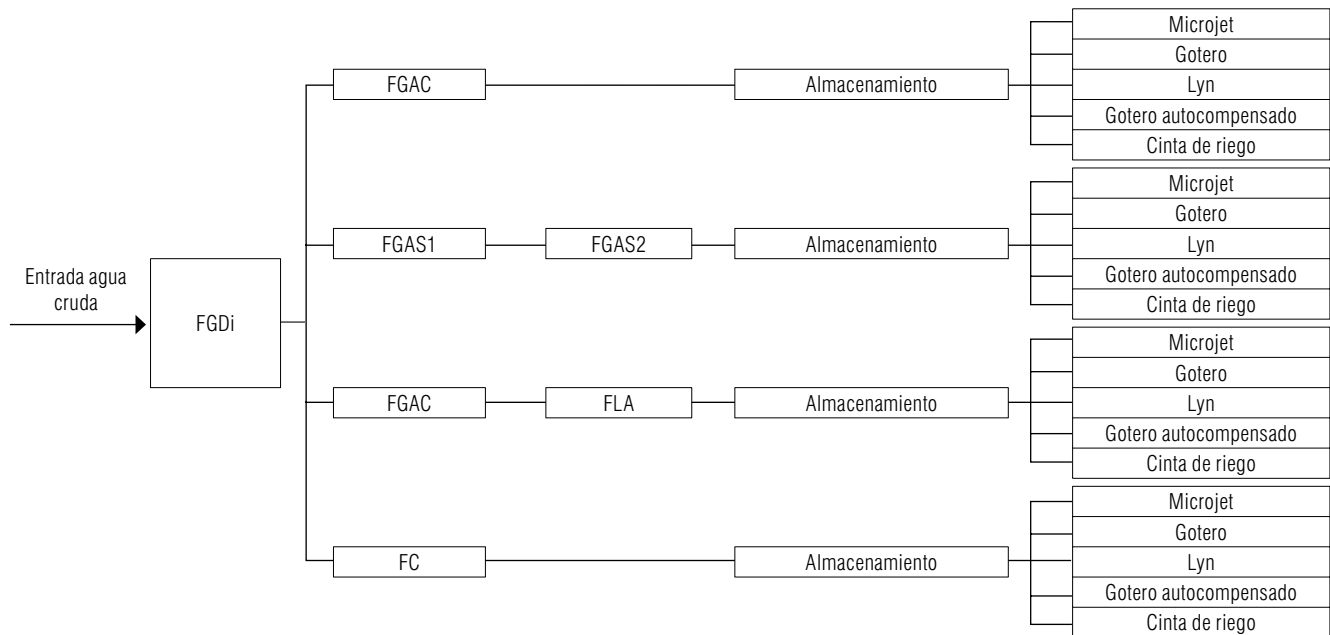


FIGURA 1. Líneas piloto de tratamiento y parcelas de riego. FGDi, filtro grueso dinámico; FGAC, filtro grueso ascendente en capas; FGAS, filtros gruesos ascendentes en serie; FLA, filtro lento en arena; FC, filtro convencional de anillos.

TABLA 2. Emisores aforados según sistema de riego.

Técnica de riego	Tamaño de orificio del emisor (μm)	No. emisores totales por parcela (población)	No. emisores aforados (muestra) ^{a b}
Microjet	74	10	10
Gotero lyn	130	120	120
Gotero autocom-pensado	130	120	120
Cinta de riego	74	700	70

^a El método de aforo en cada emisor fue el volumétrico.

^b En la metodología usada por Fontela *et al.* (2002) y Liotta (2006) se aforan 16 emisores en cada módulo de riego, independientemente del tamaño del área irrigada. En este caso se está aforando un número mayor de emisores incluso en el caso de la cinta de riego.

mente las cuatro configuraciones FiME-RLAF, se analizó estadísticamente la diferencia en la calidad del agua cruda que alimentó a cada par de configuraciones FiME-RLAF, en los dos periodos, en especial para los parámetros que mostraron las mayores diferencias, como fue el caso de los SST, Fe y mesófilos. El contraste de las hipótesis se realizó comparando el efecto del valor medio de los parámetros medidos en el agua cruda en los dos periodos, utilizando la prueba paramétrica *T student* y la prueba no paramétrica de *Kolmogorov-Smirnof*, con un nivel de confiabilidad de 95%. Posteriormente, la calidad del agua efluente de cada sistema de tratamiento se sometió a un análisis de covarianza (Ancova), el cual analiza los resultados y los compara teniendo en cuenta las diferencias de calidad de agua que se tuvieron en el afluente de los sistemas de tratamiento.

Resultados y discusión

En la Tab. 3 se presentan los resultados de la calidad del agua cruda para los dos periodos de riego, considerando solo los parámetros que inciden en la obturación de los sistemas de riego.

Para analizar las configuraciones de los sistemas de tratamiento se compararon inicialmente las aguas crudas que los alimentaron, porque no se pudieron operar los cuatro sistemas al mismo tiempo. La comparación de las medias en el agua cruda mediante las pruebas *T student* y *Kolmogorov-Smirnof* arrojó resultados similares: la primera prueba mostró que las aguas crudas fueron diferentes en cuanto a los parámetros de Fe y mesófilos, y la segunda indicó que además de estos dos parámetros, en términos de SST las aguas tampoco fueron estadísticamente iguales. Dado que la prueba *T* asume que la muestra proviene de una población con distribución normal, se realizó la prueba de bondad de ajuste para las variables medidas en el agua cruda en cada uno de los dos periodos. Esta prueba indicó que la única variable que no proviene de una distribución normal, con $P \leq 0,05$, fue la variable SST medida en el agua cruda que abasteció las tecnologías FGD_i + FGAC + FLA y FGD_i + FC.

TABLA 3. Variación de calidad de agua en agua cruda, periodo I y II de riego.

Parámetro/Periodo	FGDi + FGAC FGDi + FGAS ₂	FGDi + FGAC + FLA FGDi + FC
SST (mg L ⁻¹)	Mín	37
	Máx	691
	Media	158,9
	DS	121,9
pH (Unidades)	Mín	6,65
	Máx	7,82
SD (mg L ⁻¹)	Mín	83
	Máx	160
	Media	122,1
	DS	28,2
Mn (mg L ⁻¹)	Mín	0,010
	Máx	0,020
	Media	0,014
	DS	0,005
Fe (mg L ⁻¹)	Mín	0,10
	Máx	1,75
	Media	0,66
	DS	0,49
Mesófilos (unidades Log)	Mín	5,65
	Máx	6,49
	Media	6,50
	DS	0,35

SD, desviación estándar; FGD_i, filtro grueso dinámico; FGAC, filtro grueso ascendente en capas; FGAS₂, filtros gruesos ascendentes en serie; FLA, filtro lento en arena; FC, filtro convencional de anillos.

Debido a que las pruebas estadísticas indicaron que las aguas crudas de los dos periodos fueron estadísticamente diferentes para Fe, mesófilos y SST, entonces fue necesario realizar un análisis de covarianza para cada parámetro (que incluye los valores medidos en las aguas crudas como covariable) con el fin de comparar el comportamiento de los efluentes de las cuatro tecnologías de tratamiento en su conjunto, considerando el efecto de la no aplicación simultánea del agua cruda. Este Ancova no se pudo realizar para los SST ya que se demostró estadísticamente que los datos no tenían una distribución normal.

Comportamiento y remoción de parámetros asociados a la obturación de emisores de riego en los sistemas de tratamiento

El comportamiento del agua tratada para los dos periodos se sintetiza en la Tab. 4, considerando los seis parámetros de calidad de agua que inciden en la obturación de los emisores de riego; se muestran los resultados de la media, mediana y desviación estándar obtenidas del análisis estadístico para cada uno de los parámetros de calidad de agua, medidos en los efluentes de cada uno de los sistemas de tratamiento evaluados. Según los resultados del Ancova, en la Tab. 4 se clasifica el efluente de cada tecnología de tratamiento de agua según dos códigos: uno numérico y otro de colores, para identificar el desempeño de cada una de las cuatro

configuraciones en la remoción de los parámetros de calidad de agua. El código numérico jerarquiza las tecnologías del 1 al 4, siendo 1 el mejor tratamiento y 4 el peor, según la calidad de los efluentes proporcionados.

Este código numérico no aplica cuando los supuestos estadísticos no permitieron la evaluación de los cuatro tratamientos en su conjunto (como en el caso de los SST) o cuando todas las tecnologías mostraron un desempeño igual (en el caso del pH, SD y Mn). El código de colores se representa al final de la Tab. 4.

Para asignar el código de colores se tuvo en cuenta el nivel de riesgo de obturación definido por cada parámetro de

TABLA 4. Tecnologías de tratamiento frente al riesgo de obturación por parámetros de calidad de agua.

SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA	T1	T2	T3	T4
	FGDi+FGAC	FGDi+FGAS1+FGAS ₂	FGDi+FGAC+FLA	FGDi+FC
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (mg L⁻¹)	NA	NA	NA	NA
Media	60,1	41,3	6,4	58,2
Mediana	16,0	16,8	2,0	42,7
DS	68,9	60,6	15,8	66,9
pH (unidad)	NA	NA	NA	NA
Media	-	-	-	-
Mediana	7,15	7,16	7,34	7,11
DS	-	-	-	-
SÓLIDOS DISUELTOS (mg L⁻¹)	NA	NA	NA	NA
Media	97,0	85,4	81,1	113,6
Mediana	98,5	92,0	69,5	100,0
DS	44,1	39,5	32,1	56,7
MANGANESO (mg L⁻¹)	NA	NA	NA	NA
Media	0,021	0,019	0,004	0,013
Mediana	0,005	0,004	0,003	0,006
DS	0,042	0,034	0,003	0,014
HIERRO (mg L⁻¹)	1	4	2	3
Media	0,14	0,57	0,15	0,53
Mediana	0,40	0,40	0,03	0,31
DS	0,28	0,29	0,15	0,47
MESÓFILOS (log/100mL)	2	3	1	4
Media	5,42	5,41	3,98	5,93
Mediana	5,63	5,52	3,87	5,92
DS	0,40	0,40	0,52	0,53

Convenciones numéricas: Del 1 al 4 siendo 1 el mejor tratamiento y 4 el peor. DS, desviación estándar. NA, no aplica.

Nota: No aplica cuando los supuestos estadísticos no permitieron la evaluación de los cuatro tratamientos en conjunto o cuando todas las tecnologías son iguales. FGDi, Filtro grueso dinámico; FGAC, filtro grueso ascendente en capas; FGAS₂, filtros gruesos ascendententes en serie; FLA, filtro lento en arena; FC, filtro convencional de anillos.

Código de colores: Riesgo de obturación bajo-bajo Riesgo de obturación bajo-medio Riesgo de obturación medio

calidad de agua que afecta la obturación del sistema de riego según la Tab. 1, considerando la media y la mediana, además de la igualdad estadística entre tratamientos.

La Tab. 4 indica que la configuración FGD_i + FGAC + FLA mostró el mejor desempeño, siendo esta la más eficiente y, por tanto, la que produjo efluentes con menor riesgo de obturación. Las configuraciones FGD_i + FGAC y FGD_i + FGAS₂ son similares y presentan un buen desempeño en cuanto al riesgo de obturación, pero no mejores que FGD_i + FGAC + FLA; solo en el parámetro de Fe la configuración FGD_i + FGAC + FLA fue igualada estadísticamente por el tren de tratamiento FGD_i + FGAC. De otro lado, FGD_i + FC fue la configuración que mostró el comportamiento más bajo, presentando en cuatro de los parámetros de calidad de agua riesgo medio de obturación con bajo desempeño en los descriptores estadísticos.

Los parámetros de SD y Mn tuvieron bajas concentraciones tanto en el agua cruda de los dos periodos como en los efluentes de los cuatro sistemas de tratamiento; por tanto, las eficiencias de remoción no fueron apreciables y el riesgo de obturación siempre fue bajo. Ninguno de

los efluentes de las cuatro tecnologías reportó riesgo de obturación alto para los sistemas de riego.

Comportamiento hidráulico y calidad de agua en las parcelas RLAF

En la Fig. 2 se presenta, para cada sistema de tratamiento de agua evaluado, el comportamiento del CU, calculado a partir de los caudales aforados en los emisores de los cuatro tipos de parcelas, en función del tiempo de riego acumulado. A partir de las gráficas de la Fig. 2, y teniendo en cuenta los valores de CU mínimos admisibles definidos para esta investigación según el tipo de emisor, se encontraron los tiempos de riego para cada sistema de tratamiento de agua.

Estos tiempos se relacionan en la Tab. 5, la cual indica que, independientemente de la calidad del agua que alimentó las parcelas, el mejor comportamiento hidráulico lo tuvo el gotero lyn, seguido del gotero autocompensado, la cinta de riego y finalmente el microjet. Este orden está acorde con lo esperado en el caso de los goteros autocompensado y lyn, mas no en el caso del microjet y la cinta de riego.

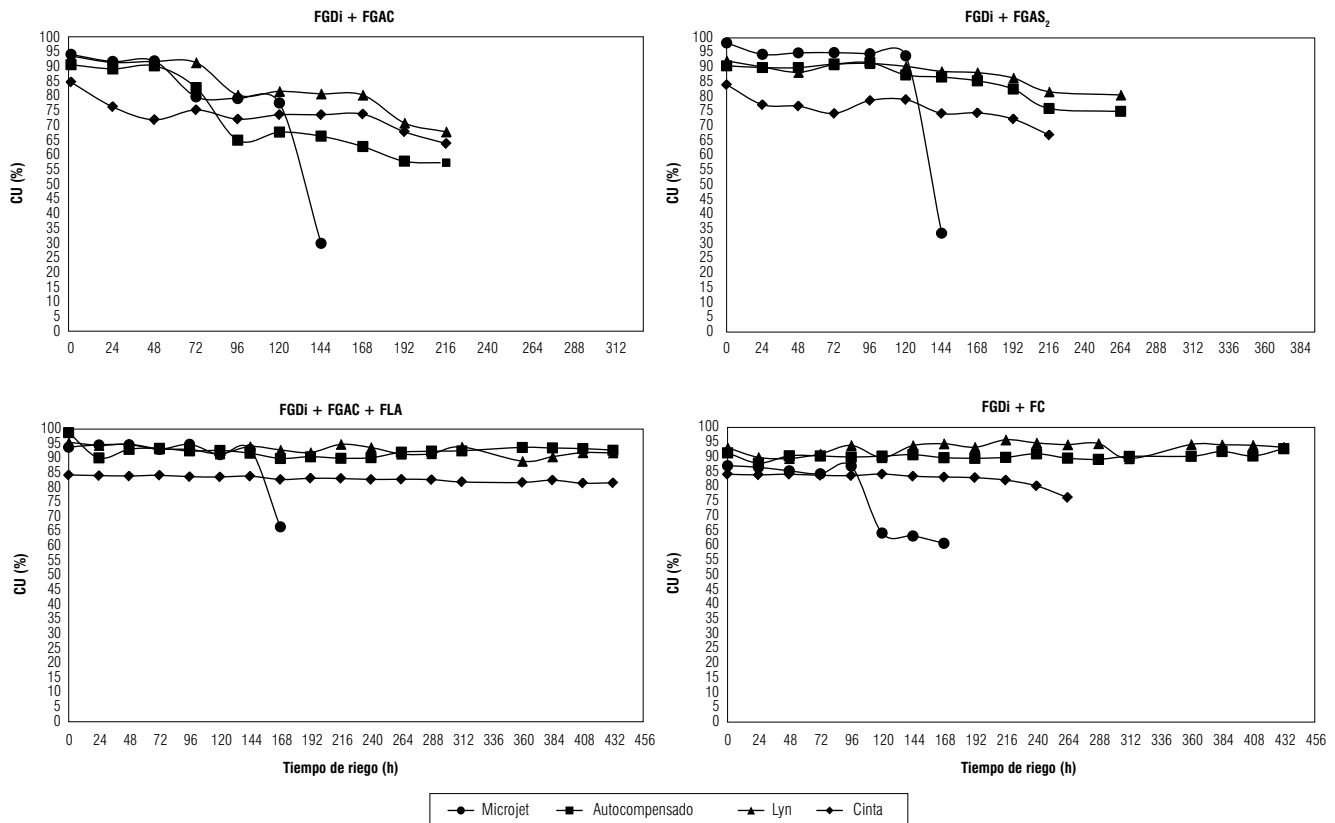


FIGURA 2. Coeficiente de uniformidad (CU) para cada tipo de parcela según tratamiento de agua. FGD_i, filtro grueso dinámico; FGAC, filtro grueso ascendente en capas; FGAS₂, filtros gruesos ascendentes en serie; FLA, filtro lento en arena; FC, filtro convencional de anillos.

TABLA 5. Tiempo de riego antes de CU mínimo admisible por emisor y por tratamiento de calidad de agua.

Emisor/tratamiento	Tiempos de riego (h)			
	FGDi + FGAC	FGDi + FGAS ₂	FGDi + FGAC + FLA	FGDi + FC
Microjet	72	128	156	104
Gotero autocompensado	78	200	>432	>432
Gotero lyn	168	264	>432	>432
Cinta de riego	168	168	>432	264

FGDi, filtro grueso dinámico; FGAC, filtro grueso ascendente en capas; FGAS, filtros gruesos ascendentés en serie; FLA, filtro lento en arena; FC, filtro convencional de anillos.

El gotero lyn alcanzó más horas de riego continuo para todos los tratamientos de agua, por lo cual los resultados son coherentes, ya que este tipo de emisor ha sido introducido en el mercado con la premisa de estar diseñado para trabajar con aguas de baja calidad o aguas residuales. Respecto al gotero autocompensado, el desempeño resultante validó el comportamiento teórico esperado, dado que compensa de manera automática las diferencias de presión que se puedan presentar en la parcela, favoreciendo la distribución homogénea del caudal. Para el microjet se encontró un comportamiento inferior al esperado, ya que, según los fabricantes, es un emisor de mayor nivel tecnológico y de mayor costo que la cinta de riego. La cinta de riego, de la cual se esperaba el menor desempeño por ser la tecnología de menor costo entre las evaluadas, presentó mejores comportamientos que el microjet, a pesar de ser de menor nivel tecnológico.

El comportamiento de los emisores de riego, según la tecnología de tratamiento de agua que los alimentó, indica que todos los emisores de riego, a excepción del microjet, alcanzaron más tiempo de riego continuo antes de llegar a su mínimo valor de CU con los tratamientos FGDi + FGAC + FLA y FGDi + FC. En el caso del microjet, las tecnologías de tratamiento de agua que dieron los mejores resultados fueron FGDi + FGAS₂ y FGDi + FGAC + FLA (Tab. 5).

Entre las posibles causas de obturación, diferentes a la de calidad de agua, que pudieron hacer disminuir el coeficiente de uniformidad en cada una de las parcelas de riego evaluadas, se asocian las siguientes: diámetro del orificio de los emisores, condiciones hidráulicas, número de emisores aforados por parcela y tamaño de partículas en el agua que alimentó a los emisores de riego.

En cuanto al diámetro de los emisores en este estudio, no se presentaron diferencias entre las parcelas, pues para todos los casos el diámetro fue inferior a 0,7 mm (riesgo alto de obturación). Frente a las condiciones hidráulicas, el diseño de las parcelas se realizó de tal manera que se minimizaran las diferencias de presión utilizando laterales de poca

longitud (10 a 14 m) en los que las pérdidas de carga fueron inferiores a 3 mm; adicionalmente, las presiones medidas en la entrada de cada parcela de riego no presentaron variaciones considerables en el tiempo. Sin embargo, el número de emisores medidos por parcela es un aspecto relevante asociado a los resultados de CU, por las siguientes razones:

- para el caso del microjet, la parcela tenía una población de diez emisores, y la muestra aforada fue igual a la población. Esta situación es estadísticamente ideal, pero un solo emisor obturado afecta en gran porcentaje el valor del CU;
- las parcelas de gotero autocompensado y de gotero lyn tuvieron una población de 120 emisores, y de igual manera que en el caso anterior la muestra fue igual a la población. En este caso el efecto de un gotero obturado no afecta de manera importante el valor de CU obtenido en cada medición, y
- para la cinta de riego se aforaron 70 emisores (10% de la población) por lo cual se presenta la misma situación que para los goteros autocompensado y lyn, pues el efecto de un gotero obturado no afecta de manera importante el valor de CU.

Con base en las anteriores consideraciones, y teniendo en cuenta que el emisor microjet presentó los menores tiempos de riego acumulados, se puede considerar que en esta parcela los valores de CU obtenidos pudieron ser más sensibles a la obstrucción de cualquiera de sus orificios.

En lo relacionado con el tamaño de partículas en el efluente de cada uno de los tratamientos de agua, a pesar de que no se hicieron mediciones de ese parámetro, la literatura reporta lo siguiente: Sánchez (1996), al caracterizar las velocidades de asentamiento de partículas en la superficie de filtros lentos, encontró que los tratamientos FGDi + FGAC y FGDi + FGAS₂ permiten pasar partículas menores o iguales a 127 µm. De otra parte, Huisman y Wood (1974) indican que el efluente de un filtro lento (configuración FGDi + FGAC + FLA) puede tener un tamaño de partículas

menor o igual a 20 µm, mientras que Bellamy *et al.* (1985) reportan que un filtro lento retiene 98% de partículas con tamaños entre 6,3 y 12,7 µm, pudiendo ser esta una de las razones por las cuales la configuración FGD_i + FGAC + FLA presentó la mayor duración en horas de riego antes de que se alcanzara el CU límite en todas las parcelas de riego. Debido al tamaño de la ranura del filtro de anillo usado (tecnología FGD_i + FC), su efluente puede facilitar el paso de partículas menores o iguales a 106 µm, pero este sistema proporcionó mejores tiempos de riego que los tratamientos FGD_i + FGAC y FGD_i + FGAS₂ y fue bastante competitivo frente a FGD_i + FGAC + FLA. Este comportamiento es interesante porque el sistema FGD_i + FC representaría la técnica con los menores costos de inversión inicial y de operación y mantenimiento. En futuros trabajos de investigación, el tamaño de partículas en el efluente de las tecnologías de tratamiento deberá ser un parámetro de seguimiento que ayudará a entender mejor el efecto de la calidad del agua sobre los emisores de riego.

La tecnología FGD_i + FGAC + FLA logró un tiempo de operación total de riego equivalente a 4,7 meses con una frecuencia diaria de 3 h de duración, sin que los emisores (autocompensado, lyn y la cinta de riego) lleguen a valores de CU inferiores a los mínimos admisibles, los cuales se pueden tomar como indicadores de lavado de las redes de riego. Este valor es superior a lo encontrado en las comunidades que utilizan fuentes superficiales, donde es común que el lavado de las líneas de riego se realice cada dos o tres meses, para eliminar o prevenir la obturación en los emisores. Con el uso de las tecnologías de tratamiento de agua se disminuiría la frecuencia del lavado de redes de riego,

especialmente cuando se usa la cinta de riego, que puede ser la más usada en comunidades rurales por su bajo costo. La tecnología FGD_i + FGAC + FLA contribuiría también a tener productos agrícolas de mejor calidad microbiológica y con menor riesgo sanitario.

Sobre la base de los resultados y relacionando los tratamientos de agua en función de las horas de riego para cada tecnología de RLAF, una propuesta preliminar de matriz de selección de tecnología FiME-RLAF se relaciona en la Tab. 6.

Esta matriz permite definir, en función de la calidad del agua cruda, cuál esquema tecnológico FiME-RLAF proporciona cierto tiempo de riego, antes de realizar el mantenimiento a las redes de RLAF por obturación de los emisores. Esta matriz de selección es más robusta que la propuesta por Tapia y Osorio (1999), quienes presentan una guía de tipo cualitativo que no profundiza en las variaciones y en los rangos de calidad del agua afluente a los sistemas de riego. Con la matriz propuesta en este trabajo, se definen las tecnologías teniendo en cuenta valores de la calidad de agua cruda y tiempo de operación antes de la obturación de los sistemas RLAF, en sistemas centralizados. Adicionalmente define los parámetros de velocidad de filtración de las tecnologías de tratamiento de agua con valores mucho menos a los reportados por Nakayama y Bucks (1986). Sin embargo, esta propuesta preliminar de selección de tecnología requiere más investigación en términos de los análisis de costo-beneficio para cada tecnología, con las comparaciones entre ellas y analizando su uso combinado para suministro de agua potable y riego.

TABLA 6. Matriz preliminar de selección de tecnología FiME-RLAF según calidad de agua y tiempo de riego.

Turbiedad (UNT)	Mediana	73	FGD _i +FGAC+MICROYET FGD _i +FGAC+ATCP	FGD _i +FC+MICROYET	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +MICROYET FGD _i +FGAC+FLA+MICROYET	FGD _i +FGAC+LYN FGD _i +FGAC+CINTA	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +CINTA	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +ATCP	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +LYN FGD _i +FC+CINTA	FGD _i +FGAC+FLA +ATCP
	P _{90%}	158								FGD _i +FGAC+FLA +LYN
	Máximo	234								FGD _i +FGAC+FLA +CINTA
Sólidos suspendidos (mg L⁻¹)	Mediana	144	FGD _i +FGAC+MICROYET FGD _i +FGAC+ATCP	FGD _i +FC+MICROYET	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +MICROYET FGD _i +FGAC+FLA+MICROYET	FGD _i +FGAC+LYN FGD _i +FGAC+CINTA	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +CINTA	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +ATCP	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +LYN FGD _i +FC+CINTA	FGD _i +FGAC+FLA +LYN
	P _{90%}	386								FGD _i +FGAC+FLA +CINTA
	Máximo	748								FGD _i +FC+ATCP
Hierro total (mg L⁻¹)	Mediana	1,8	FGD _i +FGAC+MICROYET FGD _i +FGAC+ATCP	FGD _i +FC+MICROYET	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +MICROYET FGD _i +FGAC+FLA+MICROYET	FGD _i +FGAC+LYN FGD _i +FGAC+CINTA	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +CINTA	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +ATCP	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +LYN FGD _i +FC+CINTA	FGD _i +FC+ATCP
	P _{90%}	2,44								FGD _i +FC+LYN
	Máximo	2,89								
Mesófilos (Log)	Mediana	6,57	FGD _i +FGAC+MICROYET FGD _i +FGAC+ATCP	FGD _i +FC+MICROYET	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +MICROYET FGD _i +FGAC+FLA+MICROYET	FGD _i +FGAC+LYN FGD _i +FGAC+CINTA	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +CINTA	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +ATCP	FGD _i +FGAS ₁ +FGAS ₂ +LYN FGD _i +FC+CINTA	FGD _i +FC+LYN
	P _{90%}	6,89								
	Máximo	6,95								
DÍAS DE RIEGO*			24 - 32	33 - 42	43 - 52	53 - 62	63 - 72	73 - 90	100 - 144	

*Teniendo en cuenta que cada riego es de 3 h.

Notas: ATCP, autocompensado; FGD_i, filtro grueso dinámico; FGAC, filtro grueso ascendente en capas; FGAS, filtros gruesos ascendentes en serie; FLA, filtro lento en arena; FC, filtro convencional de anillos. Velocidades de filtración: FGD_i, 2 m h⁻¹. FGAC y FGAS₂, 0,60 m h⁻¹. FLA, 0, 15 m h⁻¹.

Conclusiones

El tratamiento FGD_i + FGAC + FLA mostró el mejor desempeño, siendo esta la más eficiente y más estable. De otro lado, FGD_i + FC fue el tratamiento que mostró el comportamiento más deficiente, presentando en la mayoría de los parámetros de calidad de agua riesgos medios de obturación y las más altas concentraciones en sus efluentes.

El mejor comportamiento hidráulico lo tuvo el gotero Lyn, seguido del gotero autocompensado, la cinta de riego y, finalmente, el microjet. Con los goteros autocompensado y lyn, y la cinta de riego, alimentados con agua tratada por FGD_i + FGAC + FLA, se obtuvieron tiempos de riego acumulados de 432 h que permiten más de 144 riegos de 3 h, correspondientes a 4,7 meses de riego, con una frecuencia diaria sin que estos emisores lleguen a valores de CU inferiores a los mínimos admisibles.

Sobre la base de los resultados obtenidos se realizó una propuesta preliminar de matriz de selección de tecnología FiME-RLAF. Esta matriz de selección permite definir, en función de la calidad del agua cruda, cuál esquema tecnológico FiME-RLAF proporciona cierto tiempo de riego, antes de realizar el mantenimiento a las redes de RLAF por obturación de los emisores.

Más investigación es requerida en términos de análisis de costo-beneficio para cada tecnología, comparándolas entre ellas, verificando su uso múltiple entre suministro de agua potable y riego para sistemas centralizados. También es conveniente profundizar en la medición del tamaño de partículas y el desarrollo de biopelículas en los sistemas de riego.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de la Universidad del Valle para el desarrollo de esta investigación. Al personal de la Estación de Investigación del Instituto Cinara en Puerto Mallarino y a Viviana Vargas y Larieth Cruz, de la Universidad del Valle, por su aporte en el análisis estadístico.

Literatura citada

Andersson, L. 2005. Low-cost drip Irrigation on farm implementation in South Africa. Tesis de maestría. Environmental Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Suecia.

APHA-AWWA-WPCF, American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 2005. Standard methods for the examination of water

and wastewater. 21a ed. American Public Health Association, Washington, DC. pp. 92, 106 y 168.

- Bellamy, W.D., G.P. Silverman y D.W. Hendricks. 1985. Filtration of Giardia Cysts and other substances. Vol. 2. Slow sand filtration. Environmental Protection Agency, Water Engineering Research Laboratory, Cincinnati, OH.
- Capra, A. y B. Scicolone. 2007. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. *J. Clean. Prod.* 15(16), 1529-1534.
- Fontela, C., J. Morábito, J. Maffei, S. Salatino, C. Mirábito y L. Mas-trantonio. 2002. Desempeño del riego por goteo en Mendoza. Análisis de los coeficientes de uniformidad y de la salinidad del suelo. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo.
- Galvis, G., J. Latorre y J.T. Visscher. 1999. Filtración en múltiples etapas: tecnología innovativa para el tratamiento de agua. Cinara, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Goyal, M.R. y V.H. Ramírez. 2007. Manejo de riego por goteo. 2a ed. Universidad de Puerto Rico, Mayagüez.
- Huisman, L. y W. Wood. 1974. Slow sand filtration. World Health Organization, Ginebra, Suiza.
- Liotta, M. 2006. Evaluación del coeficiente de uniformidad en equipos de riego presurizado. En: INTA, http://www.inta.gov.ar/sanjuan/info/documentos/reconat/EVALUACION%20DE%20EQUIPOS%20DE%20RIEGO%20PRESURIZADO%20_2_.pdf; consulta: noviembre de 2009.
- Nakayama, F.S. y D.A. Bucks. 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; consulta: junio de 2009.
- Patel, N. y T. Rajput. 2007. Effect of drip tape placement depth and irrigation level on yield of potato. *Agric. Water Manage.* 88(13), 209-223.
- Pizarro C., F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF). Goteo, micro aspersión y exudación. 3a ed. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Puig-Bargués, J., G. Arbat, J. Barragán y F. Ramírez de C. 2005. Hydraulic performance of drip irrigation subunits using WWTP effluents. *Agric. Water Manage.* 77(1-3), 249-262.
- Sánchez, L.D. 1996. Limpieza de la biomembrana en un filtro lento de arena y su efecto al inicio de la carrera de filtración. Tesis de maestría en Ingeniería Sanitaria, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Sánchez, L.D., A. Sánchez, G. Galvis y J. Latorre. 2007. Filtración en múltiples etapas. TOP 15. International Water and Sanitation Centre (IRC), Delft, The Netherlands.
- Tapia C., F. y A. Osorio U. 1999. Conceptos sobre diseño y manejo de riego presurizado. En: Instituto de Investigaciones Agropecuarias, http://www.siar.cl/docs/conceptos_riego_presurizado.pdf; consulta: noviembre de 2009.
- Te Velde, P. 2001. Low cost gravity based drip irrigation reasearch, Zimbabwe. En: Water Conservation and Use in Agriculture, http://www.wca-infonet.org/servlet/BinaryDownloaderServlet?filename=1014033158902_Driplrrigation.pdf&refID=16435; consulta: noviembre de 2009.

