

CARACTERIZACIÓN DE UN FILTRO LENTO DE ARENA CON UN PREFILTRO DE FLUJO HORIZONTAL DE GRAVA

Roque A. Román Seda¹, María I. Ortiz Soto², Javier Cardona³, Ismael Pagán Trinidad⁴

RESUMEN: Se ha realizado una evaluación de campo de una planta de purificación de agua para una comunidad rural de Puerto Rico que tenía un historial de contaminación fecal crónico en su agua de beber. Se diseñó, construyó y se comenzó operaciones de una planta consistente fundamentalmente de dos Prefiltros de Flujo Horizontal de Grava en paralelo seguidos de dos Filtros Lentos de Arena también en paralelo. Los resultados de cuatro simulaciones de campo de eventos extremos de turbiedad y el muestreo rutinario llevado a cabo durante aproximadamente seis meses han demostrado que esta tecnología sencilla es capaz de producir agua potable consistentemente aún durante a eventos extremos de turbiedad. La tecnología de Filtros Lentos de Arena acoplados a Prefiltros de Flujo Horizontal de Grava ha quedado demostrada como una tecnología apropiada que puede ser utilizada por otras comunidades rurales con problemas similares de contaminación fecal en su agua cruda.

INTRODUCCION

Un estudio de calidad de agua potable realizado por la Agencia de Protección Ambiental Federal de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés), Región de Nueva York, y el Departamento de Salud de Puerto Rico (PRDOH, por sus siglas en inglés) en 1986 (U.S.Environmental Protection Agency, 1987) revelaron que más del 60% de las comunidades rurales en Puerto Rico tienen un problema de contaminación fecal crónica en su agua potable. En respuesta a este problema, investigadores del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez diseñaron y construyeron una planta de purificación de agua para la comunidad Río Piedras del Sector Cañ Alto, en San Germán, Puerto Rico, la cual consiste de aproximadamente 250 personas.

Se necesitaba adoptar una tecnología de tratamiento que fuese apropiada para un entorno rural, que requiriese de relativamente poca supervisión y destreza de parte de los operadores, y que fuese económica y sencilla. La tecnología escogida consistió de un Prefiltro Horizontal de Grava (PFHG) acoplado a un Filtro Lento de Arena (FLA), los cuales han sido utilizados exitosamente para estos propósitos en comunidades de Asia, África y Latinoamérica (ENSIC, 1990).

La tecnología de los FLA ha sido utilizada desde comienzos del siglo XIX cuando en 1826, James Simpson construyó un FLA que utilizaba agua del río Thames. Un estudio epidemiológico luego del brote de cólera de 1854 en Londres demostró que aquellas personas que utilizaban el agua de estos FLA no habían sido afectadas por la epidemia (Huisman, y Wood, 1974). De ahí en adelante el uso de los FLA creció y se difundió a través de toda Europa y eventualmente llegó hasta los Estados Unidos. El diseño básico de los FLA ha cambiado muy poco desde el siglo XIX. El uso de los FLA fue disminuyendo a medida que las comunidades fueron creciendo y la capacidad de filtración de éstos ya no era suficiente. Además, el área requerida en los FLA para satisfacer esa demanda era exageradamente grande. Fue entonces necesario desarrollar otras técnicas de filtración que pudiesen satisfacer las necesidades de comunidades grandes. Poca supervisión, actividades de mantenimiento muy sencillas y poco conocimiento técnico para su operación son sólo algunas de las ventajas de los FLA sobre otras técnicas de filtración desarrolladas recientemente. La sencillez de esta tecnología, en combinación con su ya demostrada capacidad de producir agua potable segura para consumo humano, la hacen muy apropiada para ser utilizada en comunidades rurales pequeñas aisladas de los centros urbanos. En regiones tropicales donde ocurren eventos de lluvia extremos, los FLA alimentados con aguas superficiales están sujetos a grandes cargas de sólidos y material suspendido lo cual hace que éstos se tupan rápidamente reduciendo así la duración de las tandas de filtración. Por tal razón es de suma importancia que los FLA situados en regiones tropicales tengan algún tipo de tratamiento previo que reduzca la carga de sólidos y material suspendido que llega a los mismos. Los Prefiltros Horizontales de Grava (PFHG) han sido probados tanto a escala de laboratorio así como a escala real. Los resultados muestran que esta tecnología puede mejorar sustancialmente la operación de los FLA, especialmente en eventos extremos de lluvia (Wegelin, 1986).

¹ Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, P.O. Box 9041, Mayagüez, PR 00681-9041, rroman@ce.uprm.edu.

² Estudiante Graduado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, P.O. Box 9041, Mayagüez, PR 00681-9041.

³ Estudiante Graduado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, P.O. Box 9041, Mayagüez, PR 00681-9041.

⁴ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, P.O. Box 9041, Mayagüez, PR 00681-9041, ipagan@ce.uprm.edu.

El propósito fundamental del proyecto ha sido demostrar la capacidad y confiabilidad de estos sistemas para producir agua potable segura bajo todo tipo de condiciones operacionales, incluyendo eventos extremos de turbiedad que son frecuentes en cuerpos de agua superficiales en los países tropicales como Puerto Rico.

La planta de tratamiento de agua diseñada y construida por la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez ha operado continuamente desde el 28 de diciembre de 1999. La planta de purificación de agua como tal consiste de dos prefiltros de flujo horizontal de grava (PFHG) trabajando en paralelo, seguido por dos filtros lentos de arena (FLA), también en paralelo. El agua filtrada pasa entonces a una unidad de desinfección con tabletas de cloro, y luego a un tanque de distribución de agua. Finalmente el agua es transportada a las casas de la comunidad a través de un sistema de distribución de agua.

El sistema entero es alimentado por gravedad, no utiliza electricidad alguna, y, excepto por las tabletas de cloro para la desinfección, no utiliza otros químicos. La planta de purificación PFHG-FLA representa lo que es considerado una tecnología apropiada para un ambiente rural. Es muy simple de operar, necesita poca supervisión, y puede operarse por personas entrenadas de la misma comunidad.

Cuatro pruebas de simulación de campo fueron realizadas de enero a marzo del 2000. Observaciones rutinarias y los correspondientes análisis fueron realizados desde diciembre de 1999 a junio del 2000. Se realizaron análisis de agua de la entrada y salida de los PFHG y los FLA así como del tanque de almacenamiento y distribución de agua.

Las pruebas de validación de campo han simulado eventos de turbiedad extremos introduciendo cantidades medidas de sedimentos recolectados del fondo de la fuente de agua cruda de la quebrada Río Piedras, a la entrada de los Prefiltros durante cuatro horas consecutivas. Un total de cuatro corridas de simulación de campo fueron realizadas, con turbiedades promedio en el afluente del Prefiltro de 41.5, 126.69, 415.86, y 30.94 Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU). Se tomaron muestras a tiempo cero, 30, 60, 120, 180, 240, 300 y 360 minutos tanto a la entrada del prefiltro, la entrada del FLA, así como a la salida del FLA. Se tomó además una muestra al final de las simulaciones del efluente del tanque de almacenamiento y distribución de agua.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La Figura 1 muestra una descripción esquemática del sistema completo de purificación de agua de la Comunidad Rural Río Piedras en el sector Cañ Alto, carretera estatal 361, Km. 5.0, en San Germán, Puerto Rico (Figura 2). Hay una nueva toma de agua que controla el flujo de agua que viaja por gravedad al sistema (Figura 3).

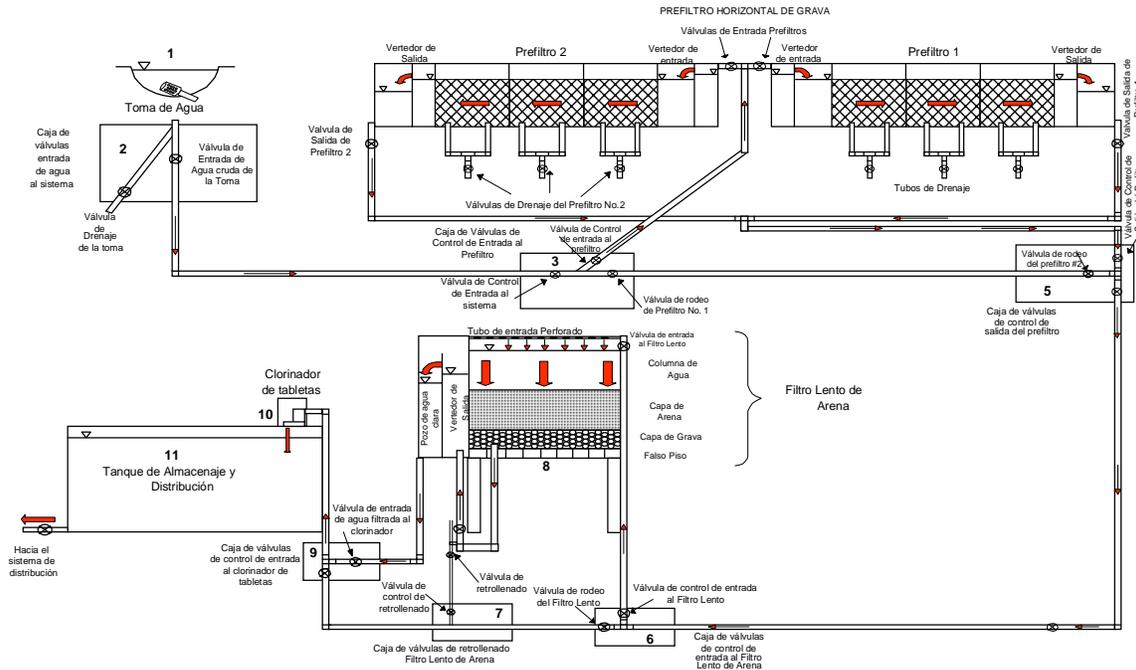


Figura 1: Esquema Integrado del Sistema de Purificación de Agua Proyecto de Demostración de Tecnología Filtros lentos de arena. Comunidad Río Piedras, San Germán, Puerto Rico.

El agua fluye a través de válvulas de control de entrada hasta el prefiltro de flujo horizontal de grava (PFHG) (Figura 4). Una vez allí, el agua fluye a través de tres cámaras de grava gruesa que capturan el exceso de sedimentos producidos por eventos de lluvia en la toma de agua. El rol del prefiltro es bajar la turbiedad del afluente al filtro lento de arena (FLA) a 25 NTU o menos, permitiéndole así al FLA que produzca tandas de filtración más largas. El agua fluye a través de los prefiltros, sale por los extremos de estos, se vuelve a unir en un solo caudal, y viaja a través de las válvulas de control del efluente hasta el FLA (Figura 5).



Figura 2: Vista Panorámica del Sistema de Purificación de Agua



Figura 3: Vista Aguas Arriba de la Nueva Toma de Agua

El agua entra entonces a los dos FLA (Figura 1) a través de una tubería que distribuye la entrada de agua, viaja verticalmente por gravedad a través de un lecho de arena de un metro de profundidad donde las partículas son retenidas en la superficie por una capa biológica llamada la piel del filtro o “schmutzdecke”. La porosidad de la piel del filtro es tan apretada que la remoción de partículas y bacterias es sumamente alta.

El agua sale del FLA a través de un falso piso, entra en la cámara del vertedor de salida donde el flujo es medido mediante un vertedor tipo “V”, y cae a un pozo de agua clara común para ambos filtros.

El agua entra en una unidad de desinfección con tabletas de cloro, dosifica el agua, y entra en el tanque de distribución de agua donde reside un tiempo de contacto suficiente para que el cloro mate las bacterias, y para que satisfaga la demanda diaria de la comunidad instantáneamente mediante flujo por gravedad.



Figura 4: Prefiltro de flujo Horizontal de Grava 1 – Vista longitudinal



Figura 5: Filtro Lento de Arena (derecha) Adyacente al Tanque de Almacenamiento y Distribución de Agua (izquierda)

PRUEBAS DE CAMPO Y RESULTADOS PARA LA TURBIEDAD

Discusión de Resultados para la turbiedad

Las pruebas de validación de campo han simulado eventos de turbiedad extremos introduciendo cantidades medidas de sedimentos recolectados de la fuente de agua cruda de la quebrada Río Piedras, a la entrada de los prefiltros durante cuatro horas consecutivas. Un total de cuatro corridas de simulación de campo fueron realizadas, con turbiedades promedio en el afluente del prefiltro de 41.5, 126.69, 415.86, y 30.94 Unidades Nefelométricas de Turbiedad (NTU). Se tomaron las muestras a tiempo cero, 30, 60, 120, 180, 240, 300 y 360 minutos del influente del prefiltro, el afluente del FLA, y el efluente del FLA. Una muestra se tomó al final de las simulaciones del afluente del prefiltro para verificar la turbiedad residual, y del efluente del tanque de distribución de agua para determinar la calidad del agua tratada con cloro. Se resumen los resultados de estas simulaciones de campo en la Figura 6 y en la Tabla I.

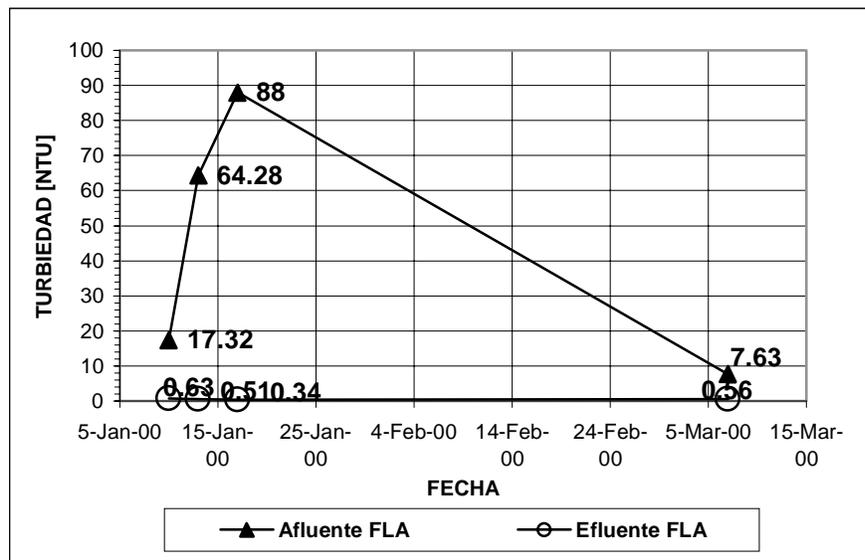


Figura 6: Resumen de Simulaciones de Campo – Turbiedad – Corridas 1, 2, 3 & 4

Tabla I: Datos de Validación de Campo – Corridas No. 1, 2, 3 & 4 – Turbiedad

Fecha	Entrada Prefiltro	Salida Prefiltro	Remoción PROM PHG	Entrada FLA	Salida FLA	Remoción PROM FLA	Cumple con DR ESTD Agua?
10/1/2000	41.53	20.59	50.43%	17.32	0.63	96.36%	SI
13/1/2000	130.59	54.78	58.05%	68.53	0.50	99.26%	SI
17/1/2000	420.52	100.19	76.17%	92.50	0.34	99.63%	SI
4/3/2000	25.49	7.71	69.75%	7.71	0.56	92.76%	SI

Los resultados han mostrado que el prefiltro ha reducido consistentemente la carga de turbiedad al FLA entre 50-76%, y el FLA produjo agua filtrada de forma consistente con una turbiedad por debajo de 1 NTU, lo cual cumple con las Normas de Calidad de Agua Potable Rico para filtros lentos de arena en comunidades rurales de Puerto Rico. Los resultados microbiológicos se discuten más adelante.

Nuestros resultados muestran que hasta turbiedades de entrada cerca de los 50 NTU el prefiltro producirá agua con turbiedades menores de 25 NTU, lo cual ayudará prevenir una obstrucción prematura del filtro lento de arena. Se observó que, no importa cuan alta sea la turbiedad del afluente al FLA, el efluente filtrado de este permanece consistentemente por debajo de los requisitos de 1 NTU ó menos.

Las primeras tres corridas de simulación de campo se realizaron durante la misma tanda de filtración del FLA. Por lo tanto es significativo notar que, aunque la turbiedad promedio del afluente al Prefiltro aumentó de corrida en corrida (41.53, 130.59, y 420.52), la turbiedad del efluente del FLA disminuyó consistentemente (0.63, 0.51, y 0.34 NTU). Esto es evidencia clara que una piel del filtro saludable se estaba desarrollando en la superficie de la arena, y que estaba aumentando la eficiencia de filtración con el tiempo, como era esperado.

Nuestras pruebas de validación de campo ampliamente demuestran que un prefiltro de flujo horizontal de grava acoplado a un filtro lento de arena pueden producir agua potable de forma consistente en términos del estándar de calidad de agua para turbiedad. Esta tecnología se puede utilizar por consiguiente confiablemente en comunidades rurales en Puerto Rico que todavía no hayan resuelto su problema de agua potable contaminada, y qué todavía no estén en conformidad con la Regla de Filtración de Agua Superficial establecida por la Agencia de Protección Ambiental Federal de los Estados Unidos.

VALIDACION DE CAMPO PARA PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS

Discusión de resultados para parámetros microbiológicos

Como fue anteriormente señalado, se realizaron cuatro pruebas de validación de campo induciendo los eventos de turbiedad extremos al afluente del prefiltro de flujo horizontal de grava durante cuatro horas consecutivas cada uno. Se tomaron muestras de entrada al prefiltro tanto para coliformes totales como fecales. Se tomaron además muestras de la entrada y salida del FLA para los mismos parámetros. En las corridas 3 y 4, también se tomaron las muestras del agua a la salida del tanque de distribución de agua de la comunidad rural Río Piedras.

Resultados para Coliformes fecales

Se analizaron las muestras de agua para coliformes fecales a la entrada y salida del prefiltro, así como la entrada y salida del filtro lento de arena para las cuatro corridas de validación de campo. Se muestran los resultados de esos análisis en las Figuras 7-10.

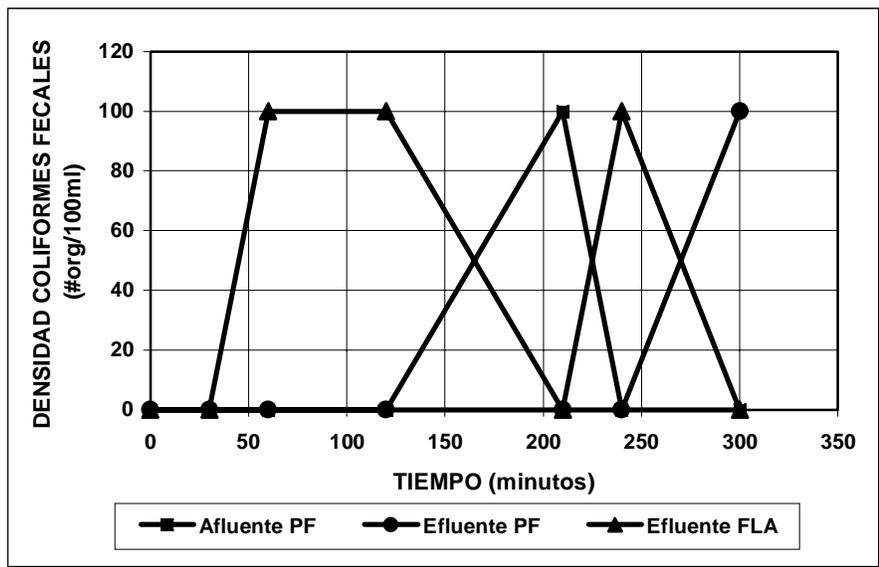


Figura 7: Validación de Campo – Corrida No. 1 – Coliformes Fecales

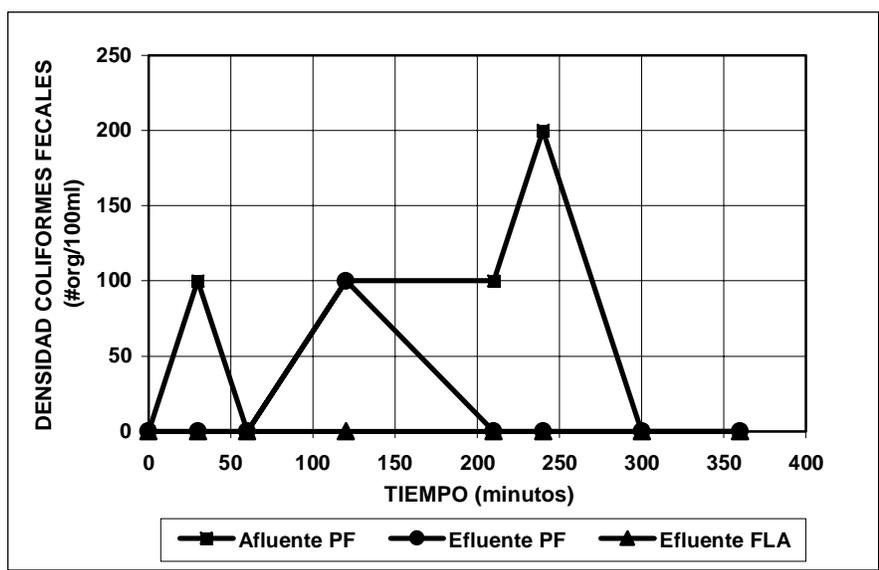


Figura 8: Validación de Campo – Corrida No. 2 – Coliformes Fecales

Como puede observarse el filtro lento de arena consistentemente reduce los niveles de coliformes fecales a cero, con algunas excepciones. Para los pocos eventos que algunas bacterias de coliformes fecales pudieron penetrar el sistema, el uso apropiado de desinfección con cloro debe disminuir esos niveles a cero, y así hacer el agua apta para consumo humano.

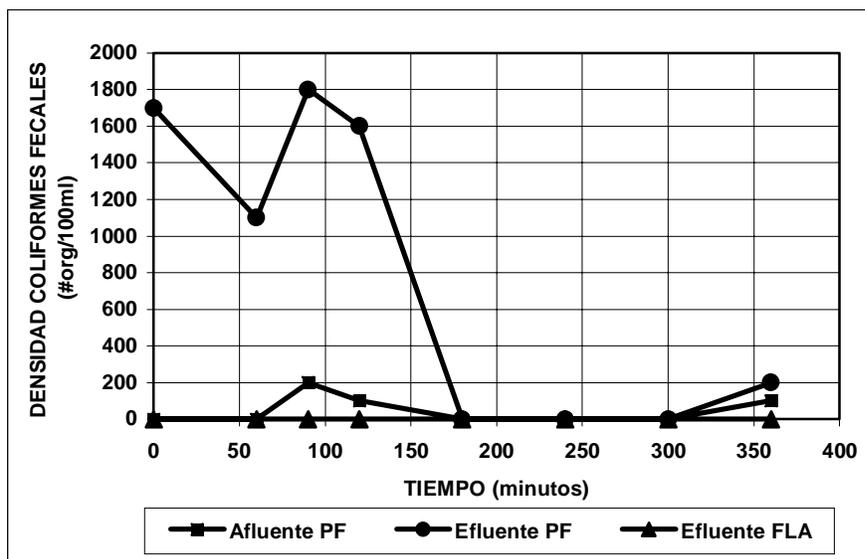


Figura 9: Validación de Campo – Corrida No. 3 – Coliformes Fecales

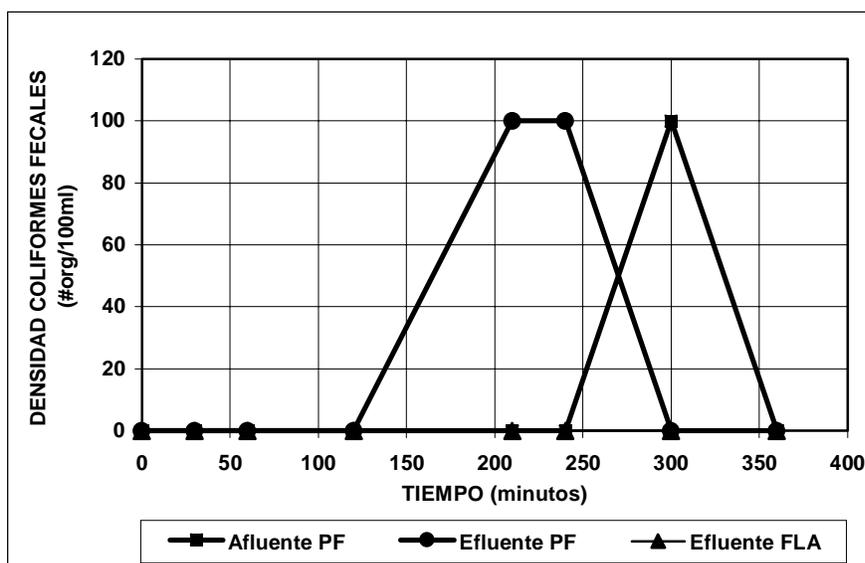


Figura 10: Validación de Campo – Corrida No. 4 – Coliformes Fecales

Resultados para Coliformes totales

Las reducciones en coliformes totales logradas por el prefiltro no fueron tan significativas como para los coliformes fecales, pero esto era de esperarse. La función primordial del prefiltro es reducir la turbiedad por debajo de 25 NTU antes de que el agua alcance el FLA.

Las densidades de salida en el FLA fluctuaron de cero a 800 organismos/100 mL, y en algunos casos estos fueron demasiado numerosos para contarlos. Posibles causas para esto podrían ser escapes esporádicos de bacterias del filtro lento de arena debido a una piel de filtro subdesarrollada, y/o escapes esporádicos de bacterias previamente alojadas en el FLA. Los eventos diferentes de cero se deben a la presencia de bacterias dispersas que escaparon la piel del filtro del FLA. Pero la magnitud de estas densidades es tal que ciertamente puede reducirse a cero con la desinfección con cloro. Claro está, esto implica que la desinfección con tabletas de cloro juega un papel muy importante protegiendo la salud y calidad de agua potable que se produce, y que supervisar los niveles de bacterias en el efluente del tanque de distribución de agua es una necesidad absoluta operacional. No obstante, la calidad del efluente producida por el sistema de purificación de agua es tal que la desinfección con cloro no debe tener ningún problema en reducir esas densidades a cero.

La evidencia de contaminación bacteriana se encontró en el efluente del tanque de distribución de agua, en ocasiones con densidades más altas de bacterias que las que se observaron en el efluente del filtro. Esta observación tiene dos explicaciones las cuales pudimos verificar en el campo:

1. El proceso de desinfección con cloro no era adecuado. Esto fue verificado, encontrando que durante un periodo de tiempo no había ninguna tableta de cloro en el clorinador. El coordinador de la comunidad fue notificado y subsecuentemente se colocaron las tabletas necesarias en el clorinador. A pesar de que se tomaron estas medidas encontramos que la desinfección con cloro no era eficaz. Un factor que pudo causar esta condición fue que el clorinador de tabletas estaba defectuoso, ya que no podía sostener bien las tabletas. Las tabletas se podían atascar en las columnas alimentadoras del clorinador, evitando el contacto de las tabletas con el agua, y contribuyendo así a un proceso ineficaz de desinfección con cloro. Esto requirió la instalación de un nuevo sistema de clorinación el cual ya está en operación.
2. El tanque de distribución de agua necesitaba ser limpiado. Se pudo observar que las paredes del tanque no estaban adecuadamente limpias. La comunidad reconoció que ellos no habían limpiado el interior del tanque durante más de un año. Por consiguiente, aún cuando la desinfección con cloro trabajaba adecuadamente, una penetración de bacterias en el efluente del tanque se producía debido a la contaminación dentro del interior de este. La comunidad fue informada de este problema y la limpieza del tanque fue realizada. Desde entonces la calidad bacteriológica del agua ha cumplido con los estándares de calidad de agua potable para coliformes fecales y totales y el cloro residual ha estado en los niveles recomendados.

RESULTADOS DEL MUESTREO RUTINARIO Y ANÁLISIS DE ENTRADA DE AGUA CRUDA Y SALIDA DE AGUA POTABLE

Discusión de Resultados para la turbiedad

Los resultados observados durante el muestreo rutinario para turbiedad fueron muy similares a los observados en las cuatro simulaciones de campo. (Figura 11) El nivel de turbiedad más alto observado durante el muestreo del PFHG fue de 49 NTU, mientras que el de entrada al FLA fue de 9.1 NTU. Estos niveles observados no son extremadamente altos, lo que justifica la realización de las simulaciones de campo. Al igual que en los eventos de turbiedad extrema, durante el muestreo rutinario operacional el FLA nunca falló en producir agua con niveles de turbiedad por debajo del estándar de 1 NTU. Este hecho comprueba que el sistema PFHG-FLA puede producir agua con niveles muy bajos de turbidez durante periodos largos de tiempo.

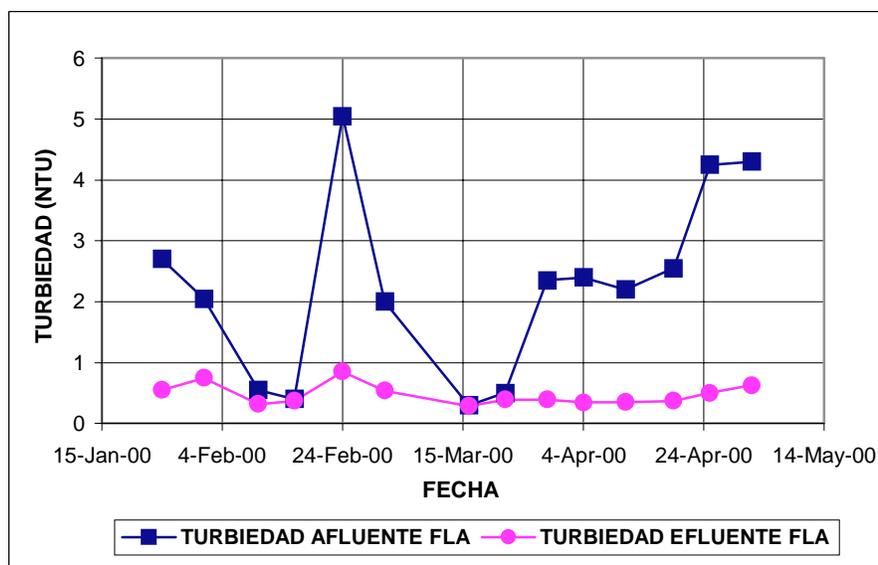


Figura 11: Datos Turbiedad Muestreo Rutinario – Filtro Lento de Arena

Discusión de resultados para parámetros microbiológicos

Resultados para Coliformes totales: Al igual que en las simulaciones de campo, durante el muestreo rutinario pudimos observar variaciones amplias en las densidades de bacterias de coliformes totales. Observamos una reducción consistente en la densidad de coliformes totales, con algunas excepciones. Los escapes de bacterias de el FLA son ocasionales y en concentraciones lo suficientemente bajas para ser manejadas adecuadamente por el sistema de clorinación con tabletas.

Resultados para Coliformes fecales: Las densidades de coliformes fecales observadas están por debajo de las

densidades de coliformes totales (Figura 12). Aun así es de suma importancia que estos sean removidos del agua. Los escapes del sistema de este tipo de bacterias son ocasionales también y en concentraciones manejables por el clorinador de tabletas. La inspección y limpieza recurrente del tanque de distribución de agua y la optimización y supervisión adecuadas del proceso de desinfección con tabletas de cloro es absolutamente esencial para la producción consistente de un agua potable segura (Figura 13).

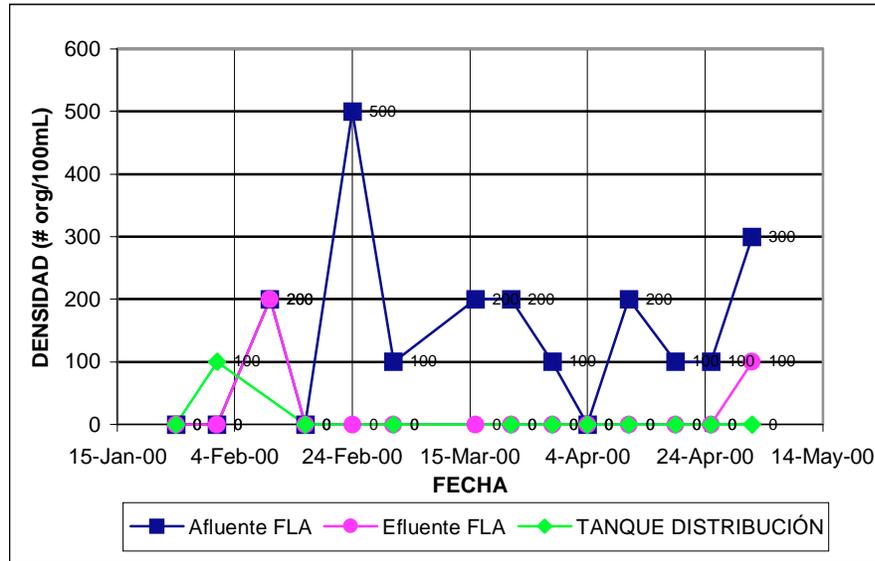


Figura 12: Muestreo Rutinario de Coliformes Fecales

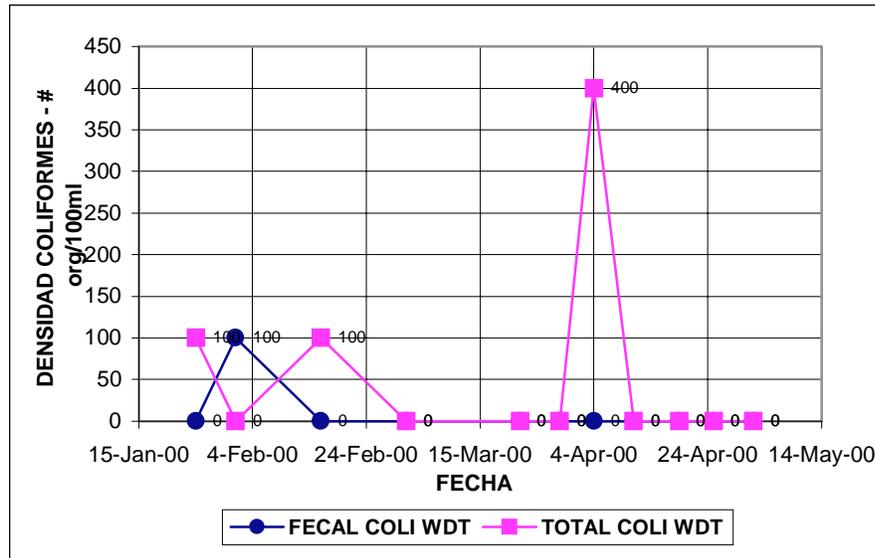


Figura 13: Tanque de Distribución de Agua – Coliformes Fecales y Totales

RESULTADOS DE BALANCES DE AGUA EN EL TANQUE DE DISTRIBUCIÓN PARA ESTIMAR LA DEMANDA DE AGUA DE LA COMUNIDAD

El estimado de la demanda de agua requerida por la comunidad fue realizado considerando un balance de agua en la entrada, salida e interior del tanque de distribución de agua. Se midió el flujo de agua a la salida de los FLA. Los vertedores de salida de cada FLA fueron calibrados y se pudo establecer una relación entre la altura de agua sobre el vértice del vertedor y el flujo volumétrico pasando en ese momento sobre el mismo. De esta manera se estimó el flujo que sale de cada filtro simplemente mediante la medición de altura de agua sobre el vértice. La suma del flujo de agua saliendo de cada filtro es el flujo total de agua entrando al sistema de distribución.

En adición, se midió el cambio en el nivel de agua en el tanque de distribución de agua. Conociendo el área transversal del tanque y midiendo el cambio en la profundidad del agua dentro del tanque se pudo estimar la

disminución ó aumento en el volumen total almacenado para un periodo de tiempo dado. Sumando o restando esta cantidad (dependiendo si hay aumento o disminución) al volumen total de agua filtrada producida dentro del tiempo entre lecturas, se puede calcular el consumo total de agua por la comunidad (volumen de agua en la salida del tanque). Se tomó como base de cálculo unas 250 personas (que son aproximadamente los que componen la Comunidad Río Piedras) y se dividió el consumo total entre este. Los resultados muestran una demanda por persona de unos 91.4 galones (346 litros) por persona por día. Los estimados fluctúan entre los 70.8 y 129.3 galones (268 y 489 l) por persona por día. El promedio de diseño para la zona urbana en Puerto Rico es 80 galones (303 l) por persona por día. Entendemos que este nivel de consumo es excesivo, por lo cual se recomendó que la comunidad adopte prácticas de conservación de agua.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

1. Las cuatro pruebas de validación de campo han mostrado que el prefiltro puede reducir la turbiedad del afluente por un 50-75% a los niveles debajo de 25 NTU para turbiedades del afluente menores de 50 NTU. Los datos de la investigación sugieren que eventos con niveles de turbiedad sobre 50 NTU serán muy raros.
2. No obstante, aún cuando la turbiedad del afluente es mayor de 50 NTU, y aún cuando el nivel de turbiedad del afluente al FLA es mayor que 25 NTU, este último ha podido de forma consistente producir un efluente de 1 NTU ó menos. El FLA ha podido producir agua de calidad potable desde el punto de vista de turbiedad en todas las observaciones durante todas las cuatro corridas. Nuestros estudios demuestran que la peor consecuencia que podría tener un evento extremo de turbiedad prolongado sería tapan el filtro en un periodo corto de tiempo.
3. El Prefiltro puede contribuir a reducir los niveles de Coliformes totales y Coliformes fecales, pero como era esperado, es el Filtro lento de arena el que tiene la responsabilidad de bajar los niveles de bacterias a cero o cerca de cero.
4. Los niveles de bacterias que escapan el FLA están dentro de la capacidad del clorinador de tabletas de reducir éstos a cero, siempre y cuando el clorinador se opere y optimice adecuadamente y el Tanque de distribución de agua se limpie regularmente.
5. Las densidades de coliformes fecales a la salida del FLA eran cero la mayoría del tiempo, lo cual es el parámetro de preocupación real desde un punto de vista de salud pública. El clorinador de tabletas no debe tener ningún problema en eliminar aquellos coliformes fecales que escapan el filtro.
6. El prefiltro de flujo horizontal de grava acoplado al filtro de lento arena que juntos constituyen la planta de purificación de agua de la Comunidad Río Piedras en el sector Cañ Alto en San Germán, Puerto Rico, ha demostrado su capacidad para proporcionar agua de calidad potable o cercana a esta en todo momento, y producirá agua potable en conformidad con los reglamentos federales y estatales siempre y cuando éste sea complementado con un proceso eficaz de desinfección con cloro.
7. El muestreo de campo rutinario y el análisis correspondiente han demostrado que el FLA puede producir consistentemente agua potable con una turbidez menor de 1 NTU y densidades de coliformes totales y fecales a niveles manejables dentro de la capacidad de un sistema de desinfección con tabletas de cloro para reducirlos a cero, cumpliendo así con los estándares de agua potable estatales y federales.
8. Nuestros resultados demuestran que la tecnología de Prefiltros Horizontales de Grava acoplados a Filtros Lentos de Arena siguen siendo una tecnología apropiada para purificar el agua en comunidades rurales con problemas crónicos de contaminación fecal en su agua de beber.

RECOMENDACIONES

Finalmente, se presentan las recomendaciones que surgen de este estudio:

1. Se recomendó al Departamento de Salud de Puerto Rico que el nuevo clorinador de tabletas se instale lo más pronto posible. Un nuevo sistema de desinfección con tabletas de cloro se instaló durante el verano del 2000.
2. El proceso de desinfección con cloro debe optimizarse para producir el efluente requerido con el residual de cloro deseado.

3. El tanque de distribución de agua debe limpiarse una ó dos veces por año para prevenir los crecimientos biológicos dentro del tanque que pueden convertirse en una fuente de bacterias en el agua filtrada. El tanque de distribución de agua fue limpiado por la Comunidad durante el otoño del 2000, con el compromiso de la comunidad de realizar esa limpieza recurrentemente por lo menos una vez al año.
4. La tecnología de Prefiltros de Flujo Horizontal de Grava acoplados a Filtros Lentos de Arena ha mostrado ser apropiada y factible para sistemas de purificación de agua y de suministro de agua rurales que tienen problemas de contaminación fecal, y debe proporcionar a las comunidades rurales en Puerto Rico, Estados Unidos y de otros países un agua potable saludable y segura.
5. La demanda de agua estimada para la comunidad es muy alta y por lo tanto deben tomarse las medidas necesarias para conservar el agua. Un proyecto ha sido aceptado por la Corporación de Desarrollo Rural de Puerto Rico para instalar medidores de agua y válvulas de conexión de servicio y renovar completamente la infraestructura de tuberías de distribución, con las que la comunidad podrá adoptar una tarifa de servicio de agua potable basada en consumo.
6. Las comunidades rurales de Puerto Rico y de otras partes del mundo con problemas similares de contaminación fecal crónica en su agua de beber pueden adoptar esta tecnología para limpiar su agua y proveer a sus residentes agua potable segura.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Región II de la Agencia de Protección Ambiental Federal de los Estados Unidos por su iniciativa de proponer, auspiciar y financiar este proyecto para mejorar la calidad del agua potable entre las comunidades rurales de Puerto Rico. Se reconoce también al Departamento de Salud de Puerto Rico por convertirse en un vehículo mediante el cual se nos proporcionaron los fondos necesarios para terminar el proyecto. Los autores dedican con gratitud este proyecto y sus resultados a la persona que fue el padre intelectual del proyecto, - Robert Williams, jubilado, anteriormente Jefe, Departamento de Suministro de Agua Potable, U.S.E.P.A., Región II, Nueva York, Nueva York.

REFERENCIAS

- ENSIC, Environmental Sanitation Information Center (1990). *Surface water filtration for rural areas: Guidelines for design, construction, operation and maintenance*. Bangkok, Tailandia, pp.27-35.
- Huisman, L. y W. Wood (1974). *Slow Sand Filtration*. World Health Organization.
- U.S. Environmental Protection Agency, Region II (1987). *Non-PRASA Public Water Systems Report*. Water Management Division. Caribbean Field Office. pp.1-4.
- Wegelin, M. (1986). *Horizontal-Flow Roughing Filtration: A design construction and operation manual*. IRCWD, Dübendorf, Switzerland, pp. 1-16.

