

XX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA**BARRANQUILLA, COLOMBIA, 8 AL 10 DE AGOSTO DE 2012****Factores que Favorecen la Generación y Crecimiento de Algas en Redes de Distribución de Agua Potable***Sara C. Gacharná y Juan G. Saldarriaga*

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,
Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

<sc.gacharna41@uniandes.edu.co>, <jsaldarr@uniandes.edu.co>

RESUMEN

Las redes de distribución de agua potable (RDAP) requieren un cierto nivel de mantenimiento, por esto una inadecuada desinfección puede llevar al crecimiento de microorganismos. Hoy en día, las nuevas tuberías de PVC son blancas y pueden llegar a ser transparentes dejando pasar la luz solar, permitiendo la generación de algas y cianobacterias. Resulta de gran importancia determinar si se produce el crecimiento de estos organismos bajo ciertas condiciones y de esta manera entender el efecto hidráulico de este crecimiento en RDAP. Para llevar a cabo este estudio se utilizó un montaje de recirculación que simula las condiciones de una RDAP. Para ello se mantuvo desinfectado el sistema y el agua se recirculó constantemente. Además, el tanque fue alimentado con fosfato diámonico (DAP) para proporcionar los nutrientes suficientes. Para poder evaluar el crecimiento de estos organismos se realizó una Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y se hicieron 2 pruebas hidráulicas semanales durante 82 días. Al finalizar esta investigación no se evidenció crecimiento de algas y cianobacterias en la superficie interna de la tubería, resultados que son coherentes con los hidráulicos. Paralelamente se logró establecer que la rugosidad calculada con las ecuaciones tradicionales no es confiable pues actualmente los materiales están fabricados con una nueva tecnología que los hace cada vez más lisos, por lo tanto estos análisis no reflejan la rugosidad real.

PALABRAS CLAVES: Algas, redes de distribución de agua potable, Rugosidad.

INTRODUCCIÓN

Problemática actual

Las redes de distribución de agua potable son sistemas de tuberías complejos que requieren un cierto nivel de mantenimiento. Al minimizar los costos de operación de mantenimiento a la RDAP puede causar el desarrollo de biopelículas, y crecimiento de algas y cianobacterias. Para complicar las cosas, algunas tuberías de PVC blancas son transparentes a la luz solar, proporcionando luz para ayudar al crecimiento de las algas y a las cianobacterias. Nutrientes más luz solar pueden causar desarrollo de estos organismos en sistemas de distribución de agua potable. Las algas y cianobacterias se acumulan en las paredes de las tuberías y luego una vez que éstas se establecen en el sistema de tuberías son difíciles de quitar sin costosos químicos y limpieza a fondo (Clark *et al.*, 1996).

Lo que permite el crecimiento y desarrollo de algas y cianobacterias dentro de los sistemas de distribución de agua potable es la disponibilidad de nutrientes que se transporta en ella. Esta contaminación se debe a diferentes actividades humanas que han llevado a la fertilización excesiva de muchos cuerpos de agua, lo que conlleva a una proliferación excesiva de algas y cianobacterias de agua dulce (WHO, 2003).

Es así como resulta de gran importancia, tratar de recrear el ambiente de las redes de acueducto lo más cercano posible a la realidad para establecer los factores tanto ambientales como hidráulicos que influyen en el desarrollo de las mismas. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue determinar si en una tubería de PVC blanco bajo condiciones de luz solar puede efectuarse el crecimiento de algas y de esta manera entender el efecto hidráulico del crecimiento de algas en sistemas de distribución de agua potable.

Algas y Cianobacterias

El término cianobacteria se refiere a organismos unicelulares, microscópicos, algunos de los cuales forman colonias y así llegan a tamaños visibles a simple vista como partículas diminutas de color verde-azul. Estos organismos están usualmente finamente dispersos a través del agua y pueden causar turbidez considerable si alcanzan altas densidades. Al igual que las cianobacterias, algunos tipos de algas son unicelulares; este es el caso de las Diatomeas. Además, un gran número de especies de algas son organismos macroscópicos y multicelulares que pueden llegar a crecer e incluso alcanzar cientos de metros (Van den Hoek *et al.*, 1995). Las algas y cianobacterias se encuentran en abundancia tanto en condiciones ambientales normales como en medios extremos de temperatura, pH, concentración salina, y radiación (Seckbach, 2007).

Desarrollo de algas y cianobacterias en RDAP

Las cianobacterias se encuentran entre los organismos más primitivos de la tierra, pues su origen se estima hace unos 3500 millones de años. El crecimiento de cianobacterias y las algas está ligado, invariablemente, a la eutrofización de las aguas. Las dos sustancias consideradas como las más importantes en este crecimiento son compuestos nitrogenados y fosfatos. Éstos junto con el dióxido de carbono, son generalmente las materias primas cuya disponibilidad determina la cantidad y calidad del crecimiento de estos organismos (Geldreich, 1996).

Este crecimiento puede afectar el agua potable pues la mayoría de los componentes en las redes de distribución pueden llegar a ser excelentes entornos microbianos. Sin embargo, la persistencia y la proliferación de microorganismos en estos sistemas están influenciadas por varios factores (Geldreich, 1996). La mayoría de las superficies expuestas son colonizadas por microorganismos que forman biopelículas (Ridgway & Olson, 1981).

Existen datos que muestran el desarrollo de biopelículas que contienen algas y cianobacterias (Allen *et al.*, 1980). Por esta razón, las algas y las cianobacterias han sido implicadas en la producción de sedimentos en los suministros de aguas industriales, causando coloración del

agua, induciendo la corrosión de concreto y de metales, reduciendo la potabilidad del agua tratada por su presencia en los sistemas de distribución, interfiriendo con el tratamiento químico del agua, y causando enfermedades en humanos y animales (Matheson, 1952).

Como la mayoría de las algas no pueden crecer y multiplicarse sin luz, las únicas algas que pueden ser encontradas en las tuberías de los sistemas de distribución serían en primer lugar, aquellas que no se remueven en el proceso de tratamiento, en segundo lugar, aquellas que tienen la capacidad de crecer en la oscuridad; y tercero, las que se desarrollan en un depósito descubierto que contenga agua tratada.

Finalmente, se estima que los actuales tratamientos de agua no son 100% eficaces en la eliminación de las algas y cianobacterias (Steynberg *et al.*, 1998; Steynberg *et al.*, 1996). Por esta razón algunas de ellas son capaces de penetrar en los sistemas de agua potable. Puesto que las algas pueden viajar por todo el camino desde el origen hasta el punto final, los niveles detectados en el agua de la llave son exclusivamente de algas que no se eliminan por el tratamiento (Codony *et al.*, 2003).

Factores que determinan el crecimiento de algas y cianobacterias

La disponibilidad de nutrientes, luz, y una mezcla de condiciones como el tiempo de residencia del agua, la temperatura, las condiciones hidráulicas, material de la tubería, tipo y concentración del desinfectante, y características físicas de las algas, son unos de los mayores determinantes del crecimiento en los sistemas de distribución de agua potable. La interacción de estos factores son complejos y variables, y a su vez pueden determinar la biomasa y la composición de estos organismos a lo largo de la RDAP.

Evidencia del crecimiento de alga y cianobacterias en RDAP

Existen varios estudios en los cuales se ha encontrado evidencia del crecimiento de algas en los sistemas de distribución de agua. En un principio este problema se ha venido presentando con una mayor recurrencia en los sistemas de irrigación o de riego en el sector agrícola. En ellos se demuestra que debido al espesor de los tubos de PVC blancos, estos permiten la filtración de luz solar y en ellos se puede establecer el crecimiento de algas (Clark *et al.*, 1996).

No obstante este ha sido un campo poco estudiado al interior de los sistemas de distribución de agua potable, porque aunque hay crecimiento de algas este es muy limitado; en los últimos años se han realizado unas investigaciones que han arrojado resultados positivos en cuando el crecimiento de estos organismos.

Actualmente hay dos estudios sobre la presencia de algas o sus toxinas en biopelículas en tuberías de agua potable. Estos estudios, utilizando microscopía electrónica de barrido en una superficie de la tubería, encontraron fragmentos de diatomeas y otros fragmentos de algas o “microfósiles” embebidos o incrustados en la biopelícula. Por otra parte, otros autores han encontrado que algunas algas pueden crecer heterotróficamente en la oscuridad, y se han encontrado cianobacterias en bajos niveles en aguas subterráneas. Además, las toxinas de las algas se mantienen relativamente estables en la oscuridad, y pueden durar por lo menos una semana en el agua (EPA, 2002).

Adicionalmente, en España se llevó a cabo el análisis de agua de la llave y en éste se encontró evidencia del crecimiento de algas. En esta investigación experimental se aislaron cepas de cianobacterias que se encuentran dentro del grupo *Cyanophyta*. En él se tomaron muestras de agua directamente de la llave, luego se realizó filtración por membrana de las muestras correspondientes y se llevaron a incubar en medio R2A. Allí se estableció que efectivamente hay crecimiento de estos organismos en los sistemas de distribución de agua potable. Este fenómeno se puede deber a la circulación del agua y a la resistencia de estos microorganismos a los desinfectantes como el cloro, por medio de las esporas (Codony *et al.*, 2003).

MODELO FÍSICO

A fin de simular las características de una RDAP y cumplir con el objetivo del estudio se usó un montaje de recirculación en el cual fue posible medir las pérdidas por fricción en la tubería y evaluar generación y el crecimiento de algas y cianobacterias.

El modelo utilizado se encuentra constituido por dos tanques (un tanque de almacenamiento y un tanque elevado vertical), los cuales están conectados entre sí por una tubería. El sistema de tubería usado es: un tubo de PVC Biaxial de 80 metros de longitud sin uniones y 6 pulgadas de diámetro nominal. Esta tubería de PVC cuenta con un diámetro exterior de 168.28 mm, un diámetro interior de 159.04 mm y un espesor de pared de 4.62 mm.

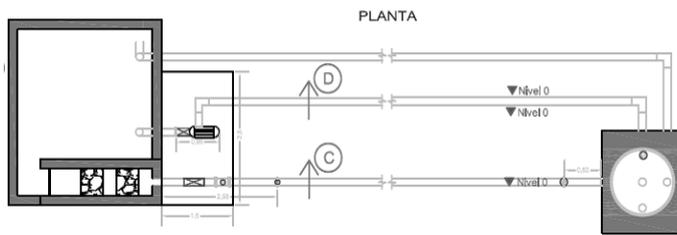


Figura 1.- Vista en planta del modelo.

En la Figura 1 se muestra el esquema general del modelo, así como su vista en planta:

Como se aprecia en la Figura 1 la tubería sale del tanque elevado número 1 (tanque elevado) y llega al tanque de almacenamiento. El tanque elevado es el encargado de suministrar una altura piezométrica suficiente para poder alcanzar las velocidades requeridas para realizar las

pruebas. El tanque de llegada o tanque de almacenamiento, construido en concreto, recibe la descarga de agua proveniente de la tubería para luego ser recirculada hacia el tanque elevado por medio de una motobomba. En el tanque de llegada, la tubería se conecta a un vertedero rectangular con el cual se puede medir el caudal que está fluyendo a través del mismo.

La tubería, al final, tiene una válvula de control de caudal que se encuentra a 0,53 m de la llegada del tubo al tanque de almacenamiento. Aguas arriba de la válvula, se encuentra un tramo de tubería aproximadamente de 1,07 m en el cual se encuentra ubicado el caudalímetro y luego a 0,98 m se halla situado el sensor de presión.

Aspectos hidráulicos

Para evaluar los aspectos hidráulicos, el sistema está provisto de tres piezómetros ubicados tanto al comienzo como al final de la tubería al lado de las mangueras que se conectan al sensor de presión (Figura 2), mediante los cuales es posible determinar las pérdidas por fricción y además hacer una comparación entre unos datos manuales como automatizados. Un posible crecimiento de algas incrementaría estas pérdidas por fricción. Los piezómetros se encuentran ubicados a una distancia de 66,08 metros entre ellos.



Figura 2.- Distribución de los piezómetros en la tubería.

El sensor diferencial de presión se encuentra ubicado aguas abajo de la tubería. A este se le conectaron dos mangueras; una manguera ubicada aguas abajo de una rejilla que permite alcanzar un flujo turbulento hidráulicamente liso, y otra manguera aguas arriba de los

testigos extraíbles.

Con el fin de determinar el efecto que tienen las algas y las cianobacterias en las pérdidas por fricción, se tomaron lecturas piezométricas y del sensor de presión aproximadamente de dos veces a la semana.

Para calcular las pérdidas por fricción y pérdidas menores se realizaron 17 pruebas para cada toma de datos, variando el caudal de tal forma que se pudieron obtener diferentes valores del

número de Reynolds. De esta manera, se pudo conocer la rugosidad relativa de la tubería y por consiguiente se pudo determinar si ésta se ve afectada a lo largo del estudio por el crecimiento de la película de algas.

Aspectos microbiológicos

Para llevar a cabo la medición cualitativa de las algas fue necesario la instalación de testigos extraíbles en los últimos tres metros de la tubería, con los cuales se pudo efectuar el análisis de crecimiento progresivo de la película de algas al interior de la tubería de PVC.

Para realizar la determinación cualitativa del crecimiento de algas en la tubería, se realizaron dos metodologías. La primera consistió en instalar un testigo extraíble aguas abajo de la tubería (testigo de borde), el cual se asegura de tal forma que permita su fácil extracción. Este testigo es una sección extraída de la misma tubería que coincide con el orificio realizado y que permanece sumergido en el agua por el diámetro interno, mientras que por el diámetro externo se encuentra sujeto a una tapa cuyo diámetro interno es igual al externo del mismo. Adicionalmente, se instalaron dos abrazaderas en la parte exterior de cada tapa, para evitar que la presión interna desprendiera el testigo.

La segunda metodología consistió en tener testigos de centro, al mismo tiempo con el testigo de borde de la primera metodología; estos testigos de centro están formados por unos agujeros rectangulares en la parte superior de cada una de las tuberías, en donde las partes del material extraídas fueron fijadas al igual que el testigo de borde a unas tapas más grandes y estas fueron fijadas a su vez a unas abrazaderas. Estos testigos fueron instalados aguas arriba del testigo de borde, a fin de no alterar la medición de las pérdidas de energía (Figura 3).



Figura 3.-Testigos extraíbles.

DISEÑO EXPERIMENTAL

Suministro de nutrientes

A fin de favorecer el crecimiento de las algas en la tubería, es necesario suministrar la cantidad apropiada de nutrientes.

A lo largo de la investigación se añadieron 55.63 gramos de fosfato diamónico (DAP), cuya fórmula química es $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$, cada ocho días en el tanque de almacenamiento, a fin de cumplir los requerimientos mínimos de nutrientes. A medida que fue progresando el estudio, se empezó a observar el desarrollo y crecimiento de algas en distintas estructuras del montaje con excepción de la tubería, por lo tanto la dosis de DAP no fue modificada. Mediante el empleo de estos nutrientes, fue posible simular las condiciones de crecimiento de algas que en un sistema real de distribución de agua potable se produciría en períodos muy largos.

Recirculación diaria

A fin de lograr un crecimiento de algas la tubería del montaje, el agua se recirculó diariamente durante un periodo de 8 horas, tratando de simular un sistema de distribución de agua a presión. La recirculación del sistema se realizó con una apertura mínima de las válvulas de control de caudal, garantizando una velocidad aproximada de 0.5 m/s. Esta velocidad permitió en tesis anteriores el crecimiento de biopelículas, por lo tanto se usó como referencia para permitir el crecimiento de las algas y cianobacterias.

Mantenimiento del cloro residual libre mínimo en el sistema

Para la cloración del sistema se decidió usar hipoclorito de calcio HTH granular. Como la idea era simular un sistema de distribución de agua potable, fue necesario mantener una concentración de cloro mínimo dentro del modelo; según el RAS la concentración de cloro residual libre aceptable dentro de cualquier punto de la red es de 0.3 – 2 mg/L. Partiendo de esto, se decidió mantener una concentración de 0.5 mg/L para el diseño experimental de estudio.

Pruebas microbiológicas: Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Se realizó Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), utilizando el microscopio electrónico de barrido de La Universidad de los Andes. Para ello se tomaron muestras de la superficie interna de los testigos, usando el método de escobillón, para llevarlas a observación. También se tomaron muestras de las paredes del tanque de almacenamiento, de las estructuras de disipación (llamados gaviones), y además se realizaron análisis a muestras de agua tanto del tanque de almacenamiento como de la tubería de 6”.

Para realizar la observación en el microscopio se utilizó el método de platina de enfriamiento. Este método consiste en un portamuestras de temperatura controlada que al acoplarse al microscopio permite enfriar/calentar la muestra en un intervalo de temperatura que va desde -25°C hasta +50°C a 300 Pa (Laboratorio de Caracterización MEB). Este método es muy útil en microscopios de presión variable o de bajo vacío, en los cuales se hace necesario controlar la evaporación del agua de las muestras húmedas, como las tomadas para este estudio, ya que mediante el enfriamiento de éstas, la evaporación del agua puede hacerse más lenta o detenerse completamente dependiendo de la presión en la cámara (Laboratorio de Caracterización MEB).

RESULTADOS

Los resultados corresponden a los datos tomados durante 12 semanas, exactamente 82 días de recirculación del montaje.

Pruebas microbiológicas

Para el análisis microbiológico MEB se procedió a tomar muestras de los testigos extraíbles y demás estructuras del montaje.

Pared del tanque de almacenamiento

En la Figura 4 se pueden observar estructuras de algas de agua dulce. Esta microfotografía corresponde a una muestra tomada de la pared del tanque de almacenamiento, ubicada cerca al vertedero. En ella se puede ver filamentos alargados muy uniformes que parecen ser de la cianobacteria *Phormidium* (Figura 5). Estos organismos son similares en morfología a *Lyngbya* y *Oscillatoria*. Los filamentos son largos, cilíndricos, y pueden ser curvados o en forma de espiral. Finalmente, estas estructuras son delgadas y firmes (*The Silica Secchi Disk Database*).

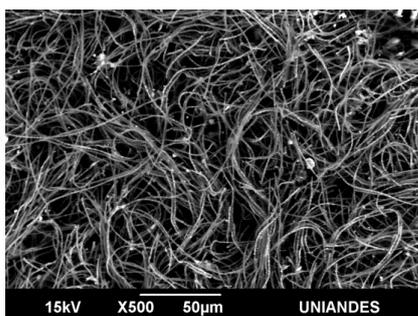


Figura 4.-Estructuras de algas, muestra tomada de pared del tanque de almacenamiento.

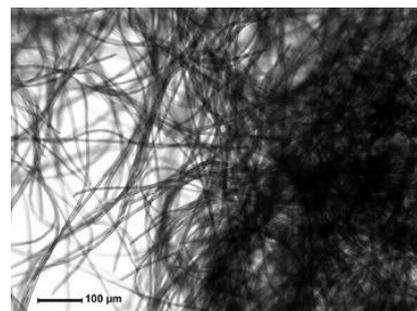


Figura 5.-*Phormidium kützing*: cianobacteria larga y cilíndrica, que puede ser curvada o en forma de espiral.

Estructuras de disipación de energía

En la Figura 6 se puede observar una microfotografía tomada a las muestras tomadas del gavión 1 del montaje. En la imagen se puede ver las mismas estructuras que se encontraron en la muestra anterior de la pared del tanque (Figura 4). Además, de esas estructuras, se puede observar diatomeas, las cuales se pueden identificar absolutamente por su morfología característica (Figura 6). Estas células se agrupan en colonias unidas por un material mucilaginoso que estas secretan a través de sus poros (*The Silica Secchi Disk Database*).

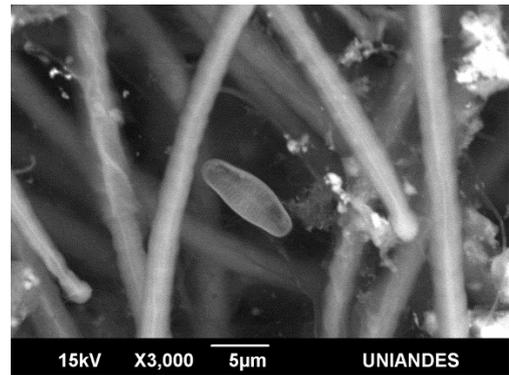


Figura 6.-Microfotografía de la muestra tomada del gavión 1.

Testigos extraíbles, de centro y de borde

En la Figura 7 se puede observar la muestra tomada del testigo de borde en donde se aprecian estructuras que se pueden deber al enfriamiento de la muestra, en donde se congela todo el espécimen. Estas formas pueden deberse a restos de agua congelada, pero también pueden ser estructuras pertenecientes a algún tipo de hongo filamentososo, o alguna cianobacteria. Además, al realizar la toma de muestras, usando el método de escobillón a cada testigo, no se observó una película bacteriana, de algas o de cianobacterias, a simple vista. La posible ausencia de microorganismos en la superficie interna de la tubería puede ser la razón por la cual no hay evidencia de algún microorganismo en varias de las fotografías que fueron tomadas a la microscopía realizada en los testigos.

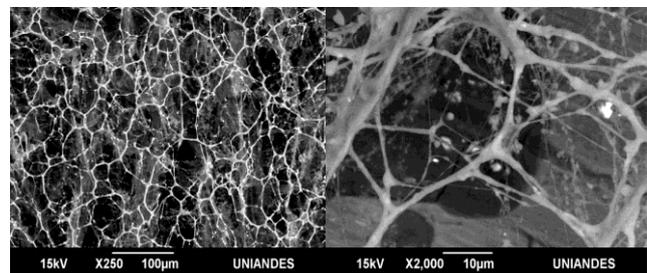


Figura 7.-Microfotografía de los testigos. Izq.: testigo de borde. Der.: testigo de centro número 29.

Pruebas hidráulicas

Durante el tiempo de recirculación del agua en el montaje, se tomaron 2 lecturas piezométricas semanales. Simultáneamente se tomaron lecturas automáticas en el programa de computador, tanto del sensor diferencial de presión como del caudalímetro; esto para cada uno de los caudales que se probaron. Además se midió la altura de la lámina de agua del vertedero y la temperatura. Con esta información se calculó el factor de fricción (f) en cada medición y el número de Reynolds, que posteriormente fueron ubicados en el Diagrama de Moody. De esta manera se pudo conocer la rugosidad de la tubería, observando si esta presentó alguna variación durante el tiempo de estudio a causa del crecimiento de las algas o cianobacterias.

Pérdidas por fricción

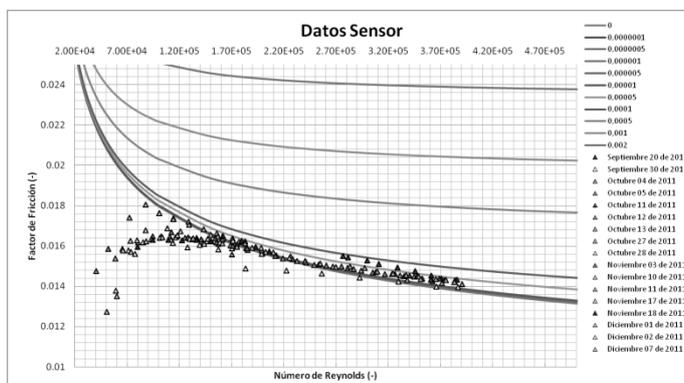


Figura 8.-Factor de fricción vs. Número de Reynolds en la tubería de PVC Biaxial, datos tomados en el segundo semestre 2011.

En la Figura 8 se puede observar un grupo de datos que se encuentran en un rango de tiempo que va desde Septiembre 20 de 2011 hasta Diciembre 7 de 2011. Cuando el Número de Reynolds es mayor, así como su caudal, el factor de fricción aumenta de igual manera. Por el contrario cuando el flujo es menor y por consiguiente el Número de Reynolds es menor, su factor de fricción decrece en comparación con los anteriores y estos no se ajustan de manera apropiada al Diagrama de Moody.

De esta forma se puede observar que cada vez que se tienen caudales mayores se obtienen rugosidades absolutas mayores comparadas a las obtenidas cuando se miden datos con caudales más bajos, pero que se encuentran dentro de lo normal para este tipo de material. Las rugosidades correspondientes a Números de Reynolds menores, llegan a ser muy pequeñas e incluso negativas comparadas con los valores reportados para el PVC.

Diagrama de Moody basado en las diferentes ecuaciones desarrolladas.

A lo largo de la historia se han desarrollado diferentes ecuaciones que describen el FTHL; sin embargo, desde su aparición, estas inducen a un error mínimo el cual ha ido aumentando debido a la creación de nuevos materiales para las tuberías que son mucho más lisos de los utilizados durante los estudios que dieron pie al desarrollo de las diferentes ecuaciones.

Las ecuaciones que expresan el límite inferior de la zona de transición, zona de especial interés para este estudio, se ilustran a continuación y se muestran gráficamente en la Figura 9 dentro del diagrama de Moody. En ella se pueden ver ligeras variaciones entre los resultados obtenidos por las diferentes ecuaciones.

Además de poder observar estas diferencias entre las ecuaciones se procedió a analizar los datos obtenidos durante el estudio en el nuevo Diagrama de Moody, para poder tener un mejor entendimiento acerca del comportamiento del factor de fricción y de la rugosidad obtenida.

En la Figura 9 se puede observar la forma en que algunos datos se ubican en el límite del Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso (FTHL) establecido por Prandtl (Figura 9, línea naranja), mientras que hay otros puntos que se ubican tanto por encima de este límite como por debajo de éste.

Teniendo en cuenta el comportamiento de los puntos que representan los datos registrados durante el tiempo del estudio, se puede apreciar que todos se encuentran debajo del límite del FTHL establecido por Colebrook-White (Figura 9, línea roja); por lo tanto la totalidad de los datos se encuentran por fuera de la zona de transición en el Diagrama de Moody (Figura 9).

Estos resultados son coherentes con los resultados obtenidos en el Diagrama de Moody convencional (Figura 8), aunque en la Figura 8 no se pueden observar de manera clara los límites de las diferentes ecuaciones y cómo se distribuyen los datos con respecto a estos autores.

Análisis de Rugosidad

Al obtener datos de las mediciones experimentales de presión y caudal, se pudo realizar el cálculo respectivo para adquirir el factor de fricción y luego la rugosidad absoluta de la tubería de PVC Biaxial de 6 pulgadas de diámetro. Al observar estos datos de rugosidad se pueden apreciar que cuando se toman datos con caudales mayores se obtienen K_s mayores comparadas con las obtenidas cuando las pruebas se realizaban con caudales más pequeños. En este último caso, se obtuvieron rugosidades muy pequeñas, cercanas a cero, inclusive rugosidades negativas.

Debido a este fenómeno se procedió a llevar a cabo otro tipo de análisis encontrando una variable a para entender mejor el comportamiento de estas rugosidades.

Una vez obtenida la rugosidad (K_s), de la manera tradicional, se procedió a calcular la variable a de la siguiente manera:

$$a = Re\sqrt{f}10^{-1}/(2.035\sqrt{f}) \quad [1]$$

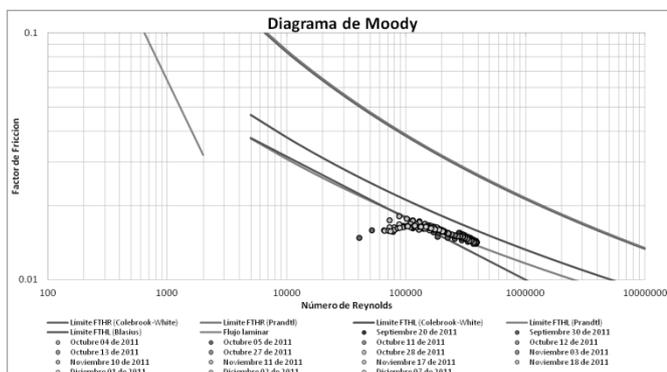


Figura 9.- Diagrama de Moody, comprobación del ajuste de los datos en la zona de transición.

Una vez obtenidos estos resultados se procede a realizar una gráfica a vs. Número de Reynolds (Figura 10). En la imagen se puede observar como los datos siguen una regresión tipo potencial y se encuentran dentro de un rango que va desde cero hasta 3.65. A medida que aumenta el Número de Reynolds la variable a también asciende, pero este fenómeno de crecimiento se puede observar mejor y más acentuado cuando el Re es menor. Por lo tanto, cuando éste va aumentando el a se eleva pero con una tendencia a estabilizarse.

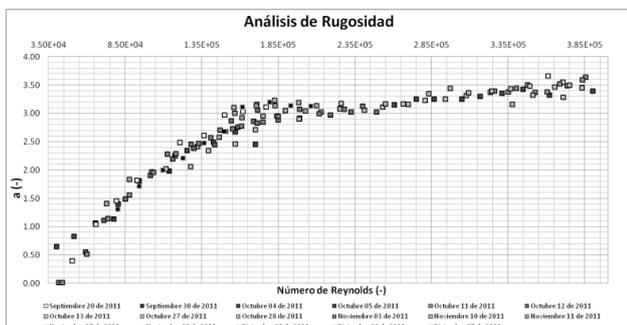


Figura 10.- Esquema de análisis de rugosidad, a vs. Número de Reynolds.

Estos resultados de la variable a nunca sobrepasan el número 4, ni mucho menos el 5.21, número establecido por Colebrook-White como límite del FTHL. Esto es coherente con los resultados obtenidos en los análisis anteriores, pues en ellos se establece este mismo efecto en el que los datos no sobrepasan la línea límite del FTHL establecida por Colebrook-White (Figura 8; Figura 9).

Por otro lado para las rugosidades positivas obtenidas a partir de los datos registrados en cada una de las mediciones, se procedió a realizar otro análisis adicional. Una vez calculada la variable a para K_s positivas se realizó un nuevo procesamiento de datos para obtener una nueva rugosidad. Este cálculo se realizó siguiendo utilizando la siguiente ecuación:

$$k_s = 3.7d \left[10^{-1/(2.035\sqrt{f})} - \frac{a}{Re\sqrt{f}} \right] \quad [2]$$

Una vez obtenidos estos datos se realizó el diagrama de K_s obtenido a partir de la variable a (K_s') vs. K_s obtenido de la manera normal y tradicional, con una línea con un ángulo de 45° (Figura 11). En él se puede observar que las rugosidades obtenidas son cero o muy cercanas a este número.

En la Figura 11 se puede observar que todos los puntos se encuentran sobre la línea horizontal de las abscisas, mostrando que el K_s' es igual o muy cercano a cero. De esta forma el análisis muestra que la rugosidad de la tubería no se está percibiendo y podría deberse al PVC y la forma en que está hecha o al método tradicional en que se está realizando el análisis hidráulico para calcular la rugosidad absoluta. En otras palabras las pérdidas por fricción están sobreestimadas con las fórmulas actuales y por lo tanto el diseño de una red es más costoso.

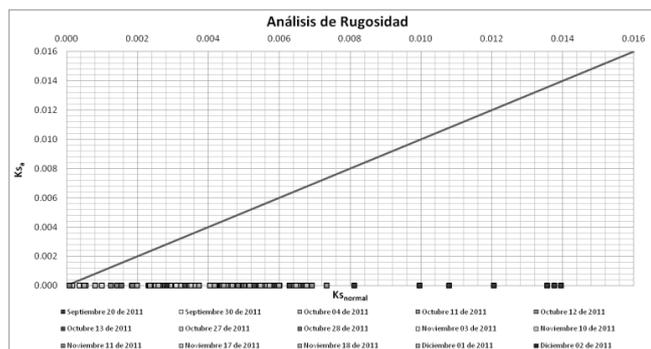


Figura 11.- Esquema de análisis de Rugosidad, Rugosidad calculada a partir de a vs. Rugosidad normal.

CONCLUSIONES

Aspectos microbiológicos

Se probó tanto la presencia como el crecimiento de algas y cianobacterias dentro del montaje de recirculación utilizado para este estudio, mediante las pruebas de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB). En ellas se pudo observar diferentes estructuras pertenecientes a algún tipo de

cianobacteria. Estas fueron comparadas con varias microfotografías pertenecientes a la Base de Datos de *Connecticut College* llamada *The Silica Secchi Disk Database*.

En los resultados obtenidos del análisis de los testigos, se pueden observar otras estructuras filamentosas que posiblemente son organizaciones que pertenecen a fragmentos de agua congelada debido al método usado para realizar la observación en el microscopio.

Se puede concluir ya que si se detallan los resultados hidráulicos, la rugosidad absoluta que se obtuvo a lo largo de las pruebas es mucho menor a las reportadas en diferentes estudios con respecto a la rugosidad de una tubería con biopelícula. Por el contrario esta rugosidad hallada se encuentra tanto dentro de los valores normales como por debajo de estos. Por lo tanto, es de gran importancia afirmar que no hubo crecimiento de algas en la superficie interna de la tubería de PVC Biaxial, y por lo tanto durante el desarrollo de este estudio, no hubo formación de ninguna clase de biopelícula en la tubería.

Aspectos hidráulicos

Los resultados fueron analizados en el Diagrama de Moody tradicional (Figura 8). A partir de estos datos se puede observar un comportamiento muy interesante de las condiciones hidráulicas del montaje. Cuando se tenían caudales relativamente grandes y como consecuencia Números de Reynolds mayores, se obtuvieron factores de fricción a su vez más grandes. Por el contrario cuando se tenían Re menores se obtuvo un descenso en el f . Al calcular la rugosidad a partir de estos factores de fricción obtenidos, se hallaron valores que se encuentran dentro del rango reportado en la literatura, pero también se aprecian valores mucho más pequeños e incluso negativos en algunos casos. Estos resultados se encuentran por debajo, sobre y por encima de la línea límite del FTHL propuesta por Prandtl y Colebrook-White. Esto se puede observar en el Diagrama de Moody tradicional y en el Diagrama de Moody basado en las diferentes ecuaciones desarrolladas (Figura 8; Figura 9).

Cuando se analizan los resultados obtenidos por el cálculo de rugosidad absoluta, se puede ver una relación entre ésta y la ubicación con respecto al límite establecido por Prandtl. Al observar las rugosidades positivas, se observa que los puntos se ubican por encima del límite de 2.51, pero cuando las rugosidades son negativas estos datos se ubican por debajo del límite de 2.51. En último lugar, cuando K_s es tan cercana al cero, estos datos se localizan sobre la línea límite equivalente al valor teórico de 2.51.

Por otro lado el cálculo de la nueva variable a muestra resultados coherentes con el límite establecido por la ecuación de Colebrook-White. En ellos se puede observar un rango de valores entre cero y 3.65, siempre por debajo del 5.21 establecido por este autor (Figura 10). Esto quiere decir que la ecuación es de tipo conservativo y que solo refleja una línea límite entre la zona de transición y el FTHL. Debido a que esta ecuación es conservativa se debe reevaluar.

Finalmente, observando la Figura 11, se pueden apreciar nuevos valores de K_s obtenidos a partir de la variable a calculada. Estos resultados muestran un comportamiento un poco extraño, pues todos los datos de rugosidad K_s' ($K_{s,a}$) son iguales a cero, o tan pequeños que se pueden considerar como cero. Este fenómeno se puede relacionar con el hecho de que hoy en día los materiales con los que están hechas las tuberías, en este caso específico el PVC, llegan a ser tan lisos que el análisis convencional que se utiliza para estudiar la hidráulica se queda grande y ya no se acomoda a las nuevas características. En este caso cuando se calcula la rugosidad, ésta no se percibe. Es por esta razón que una vez realizados estudios posteriores, de tipo experimental, se sugiere plantear una nueva ecuación para así poder realizar un análisis apropiado de la rugosidad para este tipo de materiales de nueva tecnología.

REFERENCIAS

- Allen, M.J., Taylor, R.H. & Geldreich, E.E.** (1980). The occurrence of microorganisms in water main incrustations. *Journal of American Water Works Association*. Vol.72: 614-625.
- Clark, G.A., Lamont, W.J., Marr, C.W. & Rogers, D.** (1996). Maintaining drip irrigation systems. Kansas State University.
- Clark, G.A., Lamont, W.J., Marr, C.W. & Rogers, D.** (1996). Influence of pH and Temperature on the Survival of Coliform and Enteric Pathogens When Exposed to Free Chlorine. *Public Health Reports*. USA. Vol.58.
- Codony, F., Miranda, A.M. & Mas, J.** (2003). Persistence and proliferation of some unicellular algae in drinking water systems as result of their heterotrophic metabolism. *Water SA*. Vol.29: 113-116.
- Geldreich, E.E. (1996). Microbial quality of water supply in distribution systems. CRC Press, Boca Raton.
- Konjoian, P.** (2011). Have algae met their match? OFA Short Course in Columbus, Ohio.
- Matheson, D.H. (1952). The effects of algae in water supplies. *International Water Supply Association*. Pag. 82.
- Ridgway, H.F. & Olson, B.F.** (1981). Scanning electron microscope evidence for bacterial colonization of a drinking-water distribution system. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol.41: 274-287.
- Seckbach, J.** (2007). *Algae and Cyanobacteria in Extreme Environment*. Israel: Springer.
- Steynberg, M.C., Adam, K. & Pieterse, A.J.H.** (1998). An algal monitoring protocol: The strategic link between reservoir and treatment process. *Water, Science and Technology*. Vol.37: 153-159.
- Steynberg, M.C., Pieterse, A.J. & Geldenhuys, J.C.** (1996). Improved coagulation and filtration of algae as a result of morphological and behavioral changes due to pre-oxidation. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. Vol.6: 292-298.
- The Silica Secchi Disk Database.** Andrew Barber director. Connecticut College, United States of America. [Available online]. Recuperado de la base de datos: http://silicasecchidisk.conncoll.edu/Algal-ED_finished.html
- U. S. Environmental Protection Agency EPA.** (2002). Health risks from microbial growth and biofilms in drinking water distribution systems. Washington D.C.
- Van den Hoek, C., Mann, D.G. & Jahns, H.M.** (1995). *Algae: and introduction to phycology*. Cambridge University Press. Cambridge. (40)
- World Health Organization** (2003). *Guidelines for Safe Recreational Water Environments*. Ginebra: WHO Library Cataloguing-in-Publication Data.