



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CENTRO DE INVESTIGACIONES EN
ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS
CIACUA**



**Universidad
de los Andes**

PAVCO S.A.
Una empresa AMANCO



CÁTEDRA PAVCO

**Efecto Hidráulico de la Película Biológica sobre el
Coeficiente de Rugosidad k_s en tuberías de agua
potable**

Bogotá, Junio de 2004

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	2
1.1	PERSONAL QUE PARTICIPÓ EN EL PROYECTO.....	2
1.2	OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2	MODELACIÓN	4
2.1	MODELACIÓN MATEMÁTICA	4
2.1.1	Ecuaciones de Colebrook-White y Darcy-Weisbach.....	4
2.2	MODELO FÍSICO	6
2.2.1	Tuberías en serie	7
2.2.2	Tanques de almacenamiento y recirculación	7
2.2.3	Motobomba	8
2.2.4	Tubo de Pitot.....	8
2.2.5	Tablero de piezómetros.....	10
2.2.6	Dispositivos internos para la medición de biopelícula	10
2.2.7	Descripción de las mediciones	11
2.2.8	Nutrientes.....	12
2.2.9	Metodología específica	12
2.2.10	Métodos de medición de biopelícula	12
3	CALIBRACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD ABSOLUTA K_s.....	15
3.1	METODOLOGÍA	15
3.1.1	Alistamiento de datos experimentales.....	15
3.1.2	Cálculo del coeficiente de rugosidad absoluta k_s	16
3.1.3	Coficiente de determinación R^2	17
3.2	FILTRADO DE LOS COEFICIENTES CALCULADOS	19
3.2.1	Criterio 1: Coficiente de Determinación R^2	19
3.2.2	Valores frontera del espectro factible de k_s	19
4	RESULTADOS OBTENIDOS.....	20
4.1	FASE I	20
4.2	FASE II.....	22
4.3	FASE III	24
4.4	AGREGACIÓN DE RESULTADOS	25
5	EVOLUCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD ABSOLUTA RESPECTO A LA FORMACIÓN DE BIOPELÍCULA	27
6	ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS.....	30
7	CONCLUSIONES.....	33
7.1	BIOPELÍCULAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.....	33
7.2	HIDRÁULICA DEL SISTEMA Y PARÁMETROS AFINES:	33
8	REFERENCIAS.....	34



1 INTRODUCCIÓN

La formación de películas biológicas en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable, es uno de los fenómenos que más interés y preocupación ha despertado, tanto en la comunidad científica como en los miembros de los organismos cuya función es administrar y/o proteger el recurso agua.

A pesar de los procesos avanzados de potabilización del agua, un gran número de microorganismos permanece dentro del líquido, lo cual hace inevitable que se presenten ciertos procesos microbiológicos dentro del sistema de distribución y por ende, la formación de una película biológica.

En estudios realizados con biopelículas en tuberías de alcantarillado, se ha encontrado que los coeficientes de fricción de las tuberías (n de Manning y k_s), se ven afectados en gran medida, ya sea disminuyendo o aumentando su magnitud, respecto de sus valores iniciales (tubería seca).

En la presente investigación, se intenta determinar el efecto que tiene la formación de una película biológica, sobre el coeficiente de rugosidad absoluta k_s , utilizando un modelo físico de laboratorio, con tuberías de PVC para agua potable.

En el primer semestre del año 2003, se realizó un proyecto de grado titulado “Influencia del crecimiento de biopelículas sobre la rugosidad absoluta en tuberías presurizadas. Modelo físico y conceptual” [Ref. 2]. En este trabajo, se concluyó que la formación de una película biológica traía como consecuencia un aumento significativo en el coeficiente de rugosidad absoluta. Sin embargo, solo se realizaron mediciones durante 80 días, lo cual puede no ser un tiempo adecuado para representar las condiciones de operación reales de los acueductos.

Durante el segundo semestre del año 2003, el grupo de investigación de la Cátedra PAVCO, haciendo uso del mismo modelo físico, continuó con esta investigación con el fin de completar un tiempo de recirculación que representara mejor las condiciones de operación de un sistema de alcantarillado. En este informe se muestra la evolución en la formación de la película biológica, en las tuberías de PVC, y su efecto en el valor de rugosidad absoluta k_s .

1.1 PERSONAL QUE PARTICIPÓ EN EL PROYECTO

Director Cátedra PAVCO: Juan Saldarriaga Valderrama

Asistentes Graduados: Manuel Antonio Serna
Mario Moreno Castiblanco

Monitores de Investigación: Susana Lara Mesa



Emmanuel Cáceres de Kerchove

1.2 OBJETIVO GENERAL

Determinar la variación del coeficiente de rugosidad absoluta k_s , debido a la formación de una película biológica, en tuberías de PVC de agua potable, utilizando un modelo físico. También se pretende evaluar el crecimiento y la fijación de la biomasa en las paredes de la tubería.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto sobre el coeficiente de rugosidad absoluta en relación al tiempo de circulación del agua potable dentro de la tubería y al crecimiento de la biopelícula adherida a las paredes.
- Realizar un seguimiento y caracterización de la película biológica que se forma en las paredes de la tubería, teniendo en cuenta su espesor y sus características microbiológicas.

2 MODELACIÓN

2.1 MODELACIÓN MATEMÁTICA ¹

2.1.1 Ecuaciones de Colebrook-White y Darcy-Weisbach

Mediante el uso de la ecuación de Colebrook-White (Ecuación 2-8) conjuntamente con la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 2-5) se puede desarrollar el siguiente procedimiento con el fin de obtener las ecuaciones necesarias para llevar a cabo cálculos en tuberías simples. Se inicia con una ecuación de conservación de la energía para una tubería que parte de un tanque.

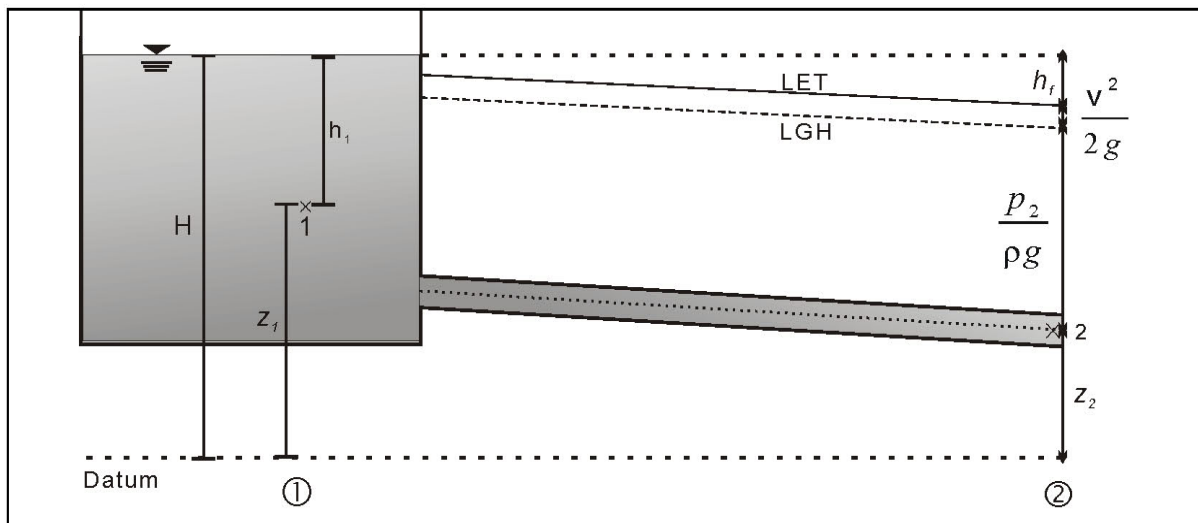


Figura 2-1 Esquema representativo de una tubería. El punto 1 se localiza bastante dentro del tanque de tal manera que su velocidad sea aproximadamente 0. El punto 2 se localiza aguas abajo en el flujo dentro de la tubería. Fuente (Ref. 3)

A partir de la Figura 2-1, que corresponde a una tubería simple alimentada por un tanque de nivel constante, se puede plantear la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2, para llegar a la siguiente ecuación:

$$h_1 + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_f + \sum h_m \quad 2-1$$

Si el punto 2 corresponde a la salida de la tubería, caso muy común en este tipo de análisis, ocurren tres cosas en la ecuación anterior. En primer lugar, el término de la cabeza de velocidad desaparece, ya que se supone que en la salida el flujo pierde su velocidad. En segundo lugar, y como consecuencia de lo anterior, el término de sumatoria de pérdidas

¹ Ver Ref. 3

menores debe incluir un término de pérdidas por salida. Por último, la presión en la salida es igual a la atmosférica (presión manométrica nula); luego:

$$\frac{v_2^2}{2g} = 0; \quad \frac{p_2}{\rho g} = 0 \quad 2-2$$

Es claro que para el punto 1, $h_1 + z_1 = H$, donde H es la altura del nivel de la superficie del tanque con respecto al *datum*. Luego:

$$H = z_2 + h_f + \sum h_m \quad 2-3$$

De esta última expresión se puede obtener la siguiente ecuación, la cual describe las pérdidas por fricción en función de las otras variables:

$$h_f = H - z_2 - \sum k_m \frac{v_2^2}{2g} \quad 2-4$$

Si el punto 2 no corresponde a la salida de la tubería, la parte derecha de la ecuación 2-1 tendría que incluir un término de cabeza de velocidad y la sumatoria de las pérdidas menores no debería incluir un término de pérdidas por salida. Adicionalmente, debería incluir la cabeza de presión en el punto 2.

Mediante la ecuación de Darcy-Weisbach (Ecuación 2-5), que también predice las pérdidas por fricción, se puede despejar el factor de fricción f :

$$f = \frac{2gdh_f}{l v^2} \quad \text{Ecuación de Darcy-Weisbach} \quad 2-5$$

Lo cual implica que:

$$\sqrt{f} = \frac{\sqrt{2gdh_f}}{\sqrt{l}v} \quad 2-6$$

y que:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{v\sqrt{l}}{\sqrt{2gdh_f}} \quad 2-7$$

Al reemplazar la ecuación 2-7 en la ecuación 2-8 se obtiene:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad \text{Ecuación de Colebrook-White} \quad 2-8$$

$$\frac{v\sqrt{l}}{\sqrt{2gdh_f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51v\sqrt{l}}{Re \sqrt{2gdh_f}} \right) \quad 2-9$$

El número de Reynolds en esta última ecuación puede reemplazarse por:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad 2-10$$

Por consiguiente, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{v\sqrt{l}}{\sqrt{2gdh_f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51\nu v\sqrt{l}}{vd \sqrt{2gdh_f}} \right) \quad 2-11$$

Finalmente, si se despeja la velocidad se encuentra una ecuación explícita para esa variable:

$$v = \frac{-2\sqrt{2gdh_f}}{\sqrt{l}} \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51\nu\sqrt{l}}{d\sqrt{2gdh_f}} \right) \quad 2-12$$

Esta última ecuación es la base para la solución de todos los problemas relacionados con tuberías simples. En el Capítulo 3 se explica en detalle la utilización de estas ecuaciones, para la determinación del coeficiente de rugosidad absoluta k_s .

2.2 MODELO FÍSICO

El modelo físico está constituido por tres tuberías en serie de 0.50, 6 y 3 m de longitud y un diámetro de ocho pulgadas, característico de las redes de distribución de agua potable. Estas tuberías en serie de resistencia a presión de 200 Pa, se conectan con dos tanques A y B de dimensiones internas 1 m de ancho por 1 m de largo, por 1.6 m de altura (Ver Figura 2-2).

Del tanque B sale la tubería de realimentación del sistema, de diámetro 4 pulgadas, que se conecta a una bomba que aprovecha el exceso de cabeza hidráulica del tanque B (altura desde el nivel del tanque a la superficie superior de la tubería de 8'') para impulsar el flujo

hacia el tanque A de nuevo. El caudal que llega al tanque A para recircular está controlado por medio de una válvula. Este caudal es medido indirectamente a partir de la velocidad media de flujo obtenida con un tubo de Pitot superior conectado a un par de piezómetros, localizado en la tubería principal (de longitud 6m).

El sistema está provisto de piezómetros en ciertas secciones, llevados en su extremo libre a un tablero de medición, que se utilizan para determinar la cabeza piezométrica a la que la sección está sometida. Adicionalmente, el sistema está provisto de dispositivos internos para la medición de la película bacteriana que se formará en las tuberías a través del tiempo. A continuación se describe el funcionamiento de todos los dispositivos del sistema:

2.2.1 Tuberías en serie

Las tres tuberías en serie de 8 pulgadas son las tuberías que se estudian. El parámetro objeto de investigación, la rugosidad absoluta k_s , corresponde a las condiciones geométricas y de flujo del tramo de tubería más largo (6 m). Los tramos de tubería de entrada y salida del sistema sirven para estudiar la influencia del crecimiento de biopelícula sobre las pérdidas menores y los coeficientes de pérdidas menores en uniones, a la entrada y en la descarga final. Con el fin de obtener la variación de la línea de gradiente hidráulico en el tiempo, en función del crecimiento de biopelícula, se calculan las pérdidas de energía totales del sistema.

2.2.2 Tanques de almacenamiento y recirculación

Dos tanques de dimensiones internas 1 m x 1 m x 1.6 m fueron construidos con ladrillo tolete común, pañetados, y debidamente impermeabilizados con el fin de evitar pérdidas diferentes a las causadas por el cambio de rugosidad de la tubería debido a la biopelícula. Se llamará el tanque de descarga de la bomba “Tanque A”, y “Tanque B” a aquel del que la bomba hace la succión. Ver Figura 2-2.

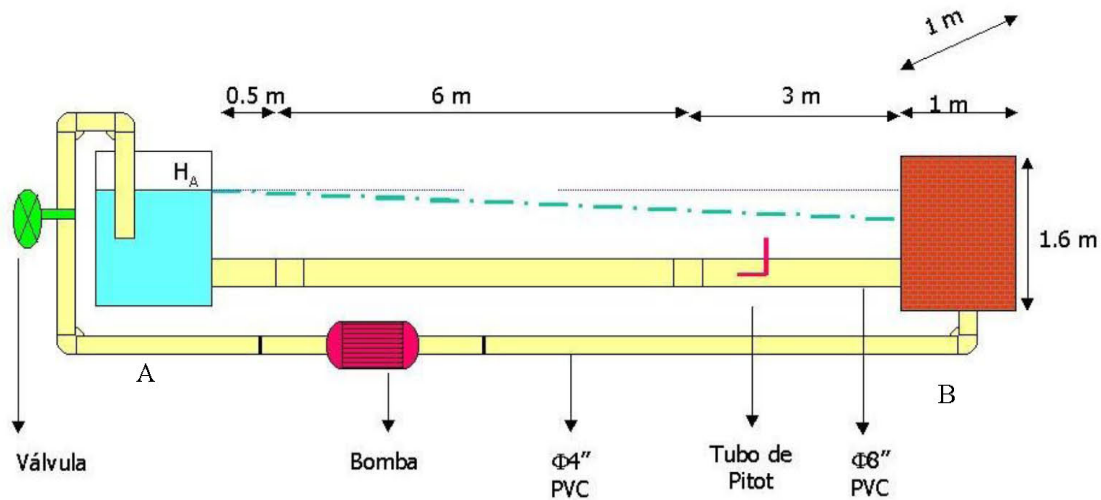


Figura 2-2. Esquema general del modelo físico. Fuente (Ref. 2)

2.2.3 Motobomba

Según Echavarría [Ref. 2], se seleccionó una se utilizó una motobomba autocebante de motor marca Siemens y de 1462 W de potencia. La función de esta motobomba es tomar el flujo del tanque B, para descargarlo en el tanque A por medio de las tuberías en serie de 4 pulgadas; y recircularlo constantemente durante el lapso de tiempo que el ciclo de pruebas lo demande.

2.2.4 Tubo de Pitot

Con el fin de medir la velocidad del flujo en las tuberías, se utilizó un tubo de Pitot. Como se muestra en la Figura 2-3, éste está compuesto por dos tubos de bronce concéntricos, los cuales están conectados a dos piezómetros, en los cuales se mide una diferencia de cabeza piezométrica.

El tubo central mide la presión de estancamiento en su punta abierta. Si los cambios de elevación son insignificantes, se tiene que:

$$p_3 = p + \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \quad 2-13$$

donde p y V son la presión y la velocidad del fluido aguas arriba del punto 2. El tubo exterior tiene varios orificios pequeños, de modo que mide la presión estática. Si la diferencia de elevación entre 1 y 4 es insignificante, entonces $p_4 = p_1 = p$.

Combinando estas dos ecuaciones se llega a que,

$$p_3 - p_4 = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \quad 2-14$$

Que se puede ordenar para obtener:

$$V = \sqrt{2(p_3 - p_4) / \rho}$$

$$V = \sqrt{2 \cdot \frac{\gamma(Z_3 - Z_4)}{\rho}}$$

y finalmente: $V = \sqrt{2g(Z_3 - Z_4)}$ 2-15

Donde Z_3 y Z_4 representan las cabezas piezométricas de los piezómetros conectados a los puntos 3 y 4 respectivamente.

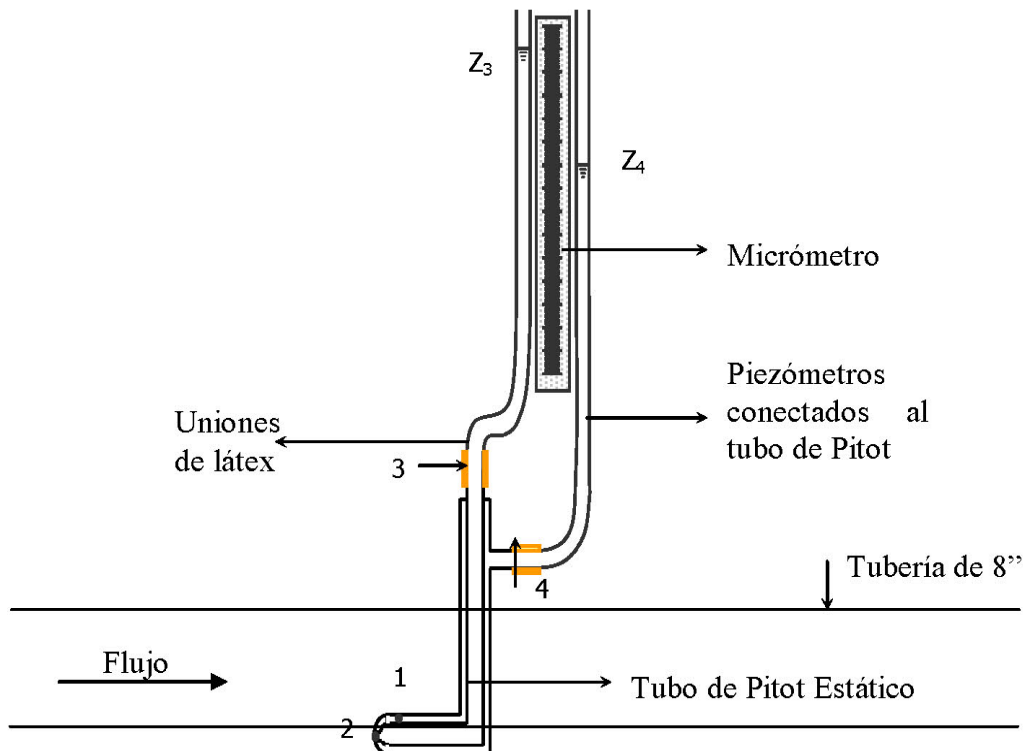


Figura 2-3. Tubo de Pitot estático conectado a los piezómetros cuyas cabezas (Z_3 y Z_4) se relacionan para obtener el valor de la velocidad media de flujo. (Fuente Ref. 2).

2.2.5 Tablero de piezómetros

La función primordial del tablero de piezómetros es indicar la diferencia de cabeza piezométrica que existe entre los puntos de interés del sistema. Dichos puntos se ubican en las siguientes secciones de la serie de tuberías:

Punto 1: Ubicado aguas abajo de la primera unión Z, es decir, en el extremo de aguas arriba de la tubería principal (la de 6m).

Punto 2: Ubicado aguas abajo de la tubería principal, es decir antes de la segunda unión Z.

Cada piezómetro está conectado con un punto por un extremo, y por el otro extremo, abierto a presión atmosférica, llega al tablero de medición de presiones diferenciales.

Al leer las diferencias de cabeza piezométrica entre cada una de las secciones, se obtienen las pérdidas de energía causadas por la fricción en cada tramo sobre el sistema, por lo tanto, para cada caudal, existirá una Línea de Gradiente Hidráulico.

2.2.6 Dispositivos internos para la medición de biopelícula

Se realiza un corte longitudinal de 20 cm de largo, en una tubería de PVC de 3 pulgadas de diámetro, de tal forma que el arco de el tramo de PVC corresponda a 1/3 de la circunferencia de la tubería.

La sección en PVC se amarra a la pared interna de la tubería de agua potable de 8 pulgadas (Ver Figura 2-4). En este tramo de PVC también se genera la biopelícula, por esta razón se extrae y se lleva a un laboratorio para intentar medir el espesor de la película biológica y documentar su crecimiento con el paso del tiempo.



Figura 2-4. Dispositivo aguas debajo de la tubería, colonizado por biopelícula.

2.2.7 Descripción de las mediciones

La Figura 2-5 muestra esquemáticamente el procedimiento cíclico llevado a cabo durante las semanas de prueba.

El ciclo de medición de parámetros bajo efectos de los nutrientes comenzó el día 7 de abril, que corresponde a la parte superior del esquema y continúa hacia la derecha. A medida que se lleva a cabo el proceso de medición particular (diario) de pérdidas de energía, existe un crecimiento hipotético de biopelícula dentro del sistema, representado por las barras de color amarillo en la Figura 2-5. Al culminar un período de 5 semanas, el sistema se despresuriza para llevar a cabo el muestreo y medición de biopelícula. El ciclo se repite una vez más con el fin de asociar el espesor de la biopelícula en micras o su cantidad en peso seco en mg/cm^2 , a la rugosidad absoluta que se encuentra estable hacia el final de cada ciclo.

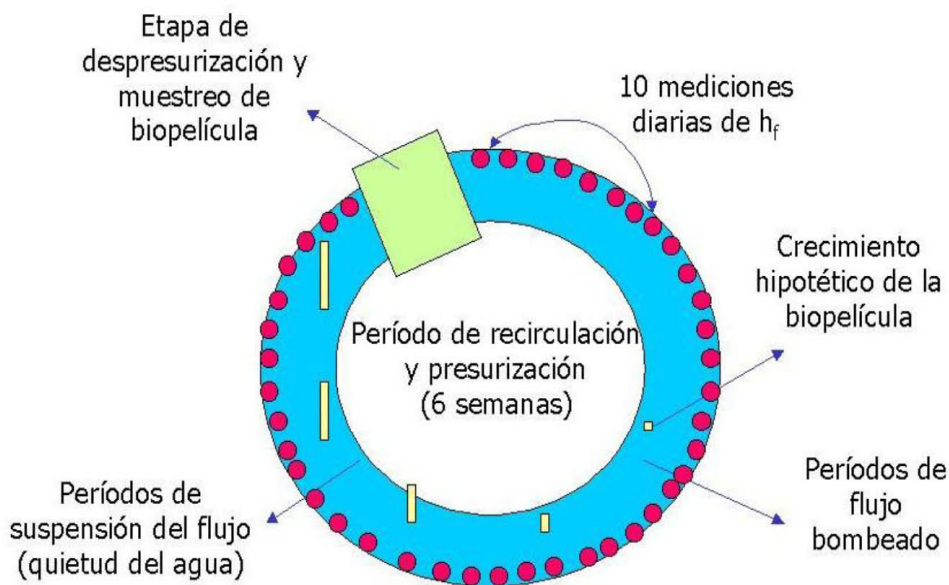
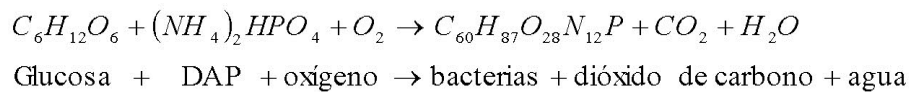


Figura 2-5. Ciclo general de mediciones. Fuente (Ref. 2)

Las horas de circulación se tendrán durante las horas del día en que se hace la prueba específica diaria, el sistema estará sin flujo durante la noche y las horas de no circulación durante el día. Se tendrá un estado de sequedad del sistema al final de las x semanas el cual tiene una duración de 3 horas. La desecación es gradual y viene acompañada con la despresurización, esto debido a que se hace con el fin de lograr manipular los dispositivos de medición de la biopelícula.

2.2.8 Nutrientes

Los nutrientes más comunes en un sistema de distribución de agua potable son el nitrógeno y el fósforo, junto con algunos compuestos orgánicos que están presentes en menor proporción. Para simular la presencia de dichos nutrientes en el actual modelo físico de tuberías de distribución presurizadas, se utiliza Fosfato diamónico como fuente de fósforo y nitrógeno; y una mínima cantidad de glucosa (panela) como compuesto orgánico. El fosfato diamónico se conoce comercialmente como DAP. La cantidad de nutriente inicial se calculó a partir de la estequiometría de producción de bacterias aerobias, (Ecuación 2-16).



Ecuación 2-16. Producción de bacterias aerobias consumidoras de nitrógeno y potasio.

Como resultado del balance de la ecuación estequiométrica, se obtiene que la proporción de nutrientes inicial debe ser $C/N/P = 1/4.2/0.84$ para garantizar la presencia bacteriana de los sistemas de distribución.

Durante la primera semana de recirculación se añadió, día a día, la cantidad de nutriente diluido conservando la proporción hallada (es decir 30g de DAP por cada 7g de glucosa). Luego, se encontró que la dosis óptima diaria para conservar el olor nulo del agua era de 25g de DAP por cada 7g de glucosa, lo cual cambia la proporción de nutrientes a $C/N/P = 1/3.5/0.7$.

2.2.9 Metodología específica

El procedimiento que se sigue a diario para obtener un resultado de rugosidad absoluta k_s , para cada uno de 10 caudales, se describe en la Figura 2-6.

2.2.10 Métodos de medición de biopelícula

El dispositivo de extracción de biopelícula es llevado a los laboratorios del CIMPAT (Centro de Investigaciones en Microbiología y Parasitología Tropical), donde se extraen pequeñas capas de PVC y se ubican en un vidrio de Petri que se introduce al estereoscopio.

El estereoscopio es una clase de microscopio electrónico que permite medir elementos de orden de magnitud celular, a partir de un haz de luz que entra por la parte inferior de la plataforma y una escala (en este caso micrométrica) ubicada en el lente. Es posible ubicar el vidrio de Petri y enfocar la muestra de tal forma que se observa fácilmente la cantidad de unidades que ocupa la película bacteriana vista en perfil, sobre la escala micrométrica.

El método de medición anterior corresponde al espesor de la biopelícula como tal, cuando aún está hidratada. Otro método útil para medir la cantidad de biopelícula, es la cantidad en peso seco (mg) por unidad de área raspada de la pared interior de la tubería principal. Esta medida, a pesar de no tener en cuenta la hidratación a la que estaba sometida la biopelícula, parece más apropiada que la primera, ya que la película que se forma en tuberías de distribución de agua potable no siempre tiene un espesor continuo, crece de forma diferencial o “parchosa”, según las condiciones del sistema.

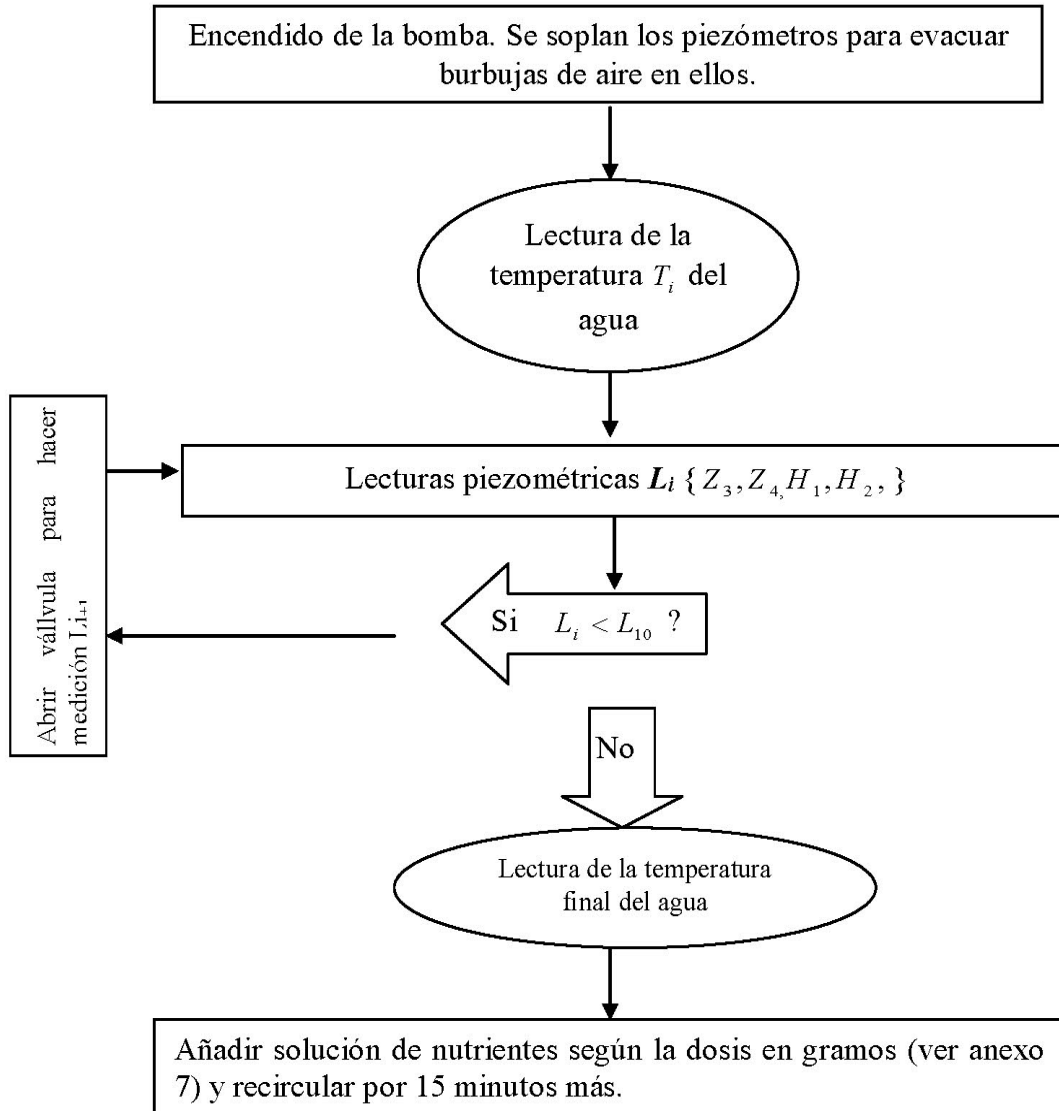


Figura 2-6 Diagrama de Flujo del proceso de realización de pruebas

2.2.10.1 Metodología de medición de la calidad del agua: detección y enumeración de bacterias.

El monitoreo en laboratorio de los niveles bacterianos de un sistema de agua potable es esencial para el control de la calidad del agua. La forma clásica de enumerar las bacterias presentes en el agua es haciendo un *recuento de placas*, que consiste en esparcir un volumen conocido de muestra de agua sobre un medio de cultivo de laboratorio, y contar el número de colonias visibles que se han desarrollado luego de un tiempo determinado. Es preciso recalcar que los recuentos de placas suelen subestimar el número total de bacterias presentes en un sistema de distribución de agua.

Para el caso de nuestro modelo físico, el recuento de placas se realizó en las instalaciones del CIMIC (Centro de Investigaciones Microbiológicas) de la Universidad de los Andes. Los medios de cultivo utilizados fueron el SPC para hallar bacterias aerobias mesofílicas y bacterias sulfito reductoras, el agar MacConkey para encontrar coliformes, y el agar Malta con antibiótico para el recuento de hongos y levaduras. Cada uno de los medios de cultivo tiene un color característico que cambia a medida que los microorganismos prósperos van formando colonias al alimentarse de él.

3 CALIBRACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD ABSOLUTA k_s

En este capítulo se explicará el procedimiento utilizado para la determinación del Coeficiente de Rugosidad Absoluta de la tubería con la formación de biopelícula. Se estimó un espectro factible entre $1.25 \cdot 10^{-6}$ m y $3 \cdot 10^{-4}$ m. Para la calibración se utilizaron tanto los datos crudos del trabajo de investigación de Echavarría [Ref. 2], como los nuevos datos recolectados por el grupo de investigación de la Cátedra PAVCO durante el segundo semestre del año 2003.

3.1 METODOLOGÍA

Debido a que los procesos microbiológicos que se presentan en la película biológica que se forma en las tuberías se ven afectados por factores tales como velocidad de flujo, nivel de nutrientes del agua, tiempo de recirculación del agua, tiempos de secado de la biopelícula debido a fallas en el montaje físico, se debe tener un manejo e interpretación adecuada de los resultados que se obtienen experimentalmente. A pesar de que la rugosidad absoluta de un material es un parámetro cuya magnitud debe ser constante, cuando se incluye el efecto de una biopelícula, se presenta un proceso de formación, estabilización, desprendimiento y reformación que se ve reflejado en los valores de rugosidad absoluta de la tubería. Debido a los procesos que sufre la película biológica, se realiza un seguimiento diario de estos valores óptimos, pero no se especifica un valor absoluto y único de rugosidad.

La calibración del Coeficiente de Rugosidad Absoluta (k_s) para cada prueba consiste en hallar el parámetro de máximo indicador de ajuste para las 10 condiciones (Velocidad, Pérdidas por fricción, Temperatura) que se miden en una prueba. Es decir, el valor de k_s que reproduzca con mayor exactitud, utilizando las ecuaciones físicamente basadas para tuberías a flujo lleno, el valor de pérdidas por fricción, la velocidad de flujo y la temperatura que se miden en el modelo físico. En este trabajo se utilizó como indicador de ajuste el Coeficiente de Determinación R^2 .

3.1.1 Alistamiento de datos experimentales

Para hallar el valor óptimo del Coeficiente de Rugosidad Absoluta se requiere que los datos observados de los piezómetros y del termómetro, sean procesados para hallar dicho parámetro.

3.1.1.1 Lectura de piezómetros conectados a la tubería de PVC

Estos piezómetros se utilizan para medir la caída de presión (pérdidas) a lo largo del tramo de tubería de 8" de diámetro nominal (0.196 m de diámetro interno real), y de 5.225 m de separación entre los piezómetros. Según esto, se tiene:

$$H_2 - H_1 = h_{f \text{ experimental}} \quad 3-1$$

3.1.1.2 Lectura de piezómetros del tubo de Pitot

Estos piezómetros se utilizan para medir la cabeza de velocidad en una sección de la tubería, con lo cual se puede calcular la velocidad promedio en la sección transversal. Según esto, se tiene:

$$V = \sqrt{2g(Z_3 - Z_4)} \quad 3-2$$

3.1.1.3 Lectura de Temperatura

Debido a que uno de los parámetros de la ecuación de Colebrook-White es la viscosidad cinemática del agua, la cual depende de la temperatura del líquido, se deben hacer mediciones de temperatura al inicio y al final de cada prueba.

Solo son necesarios dos datos de temperatura debido a que según Echavarría [Ref. 2], la variación de la temperatura durante las pruebas tiene un comportamiento prácticamente lineal.

Para determinar el valor de la viscosidad cinemática se utiliza la ecuación 3-3, la cual expresa el valor de la viscosidad en términos de la temperatura del agua. Para determinar esta ecuación, se utilizaron unos datos teóricos de viscosidad y temperatura [Ref. 4], con los cuales se hizo una regresión de tipo exponencial que representa muy bien el comportamiento de las variables.

$$\nu = 0.000001695 * e^{-0.025563127 * T} \quad 3-3$$

3.1.2 Cálculo del coeficiente de rugosidad absoluta k_s

Para determinar el coeficiente de rugosidad absoluta para cada una de las 10 condiciones (Velocidad, Pérdidas, Temperatura), que se miden en cada prueba, se utiliza como base la ecuación de Colebrook-White combinada con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$\nu = \frac{-2\sqrt{2gdh_f}}{\sqrt{f}} \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51\nu\sqrt{f}}{d\sqrt{2gdh_f}} \right) \quad 3-4$$

De la anterior ecuación, se conocen todos los términos, excepto el valor de k_s , y además se conoce un valor de pérdidas por fricción experimental (h_f). Para determinar el valor óptimo de cada prueba se sigue el siguiente proceso:

1. Se debe buscar un valor de rugosidad absoluta único, que represente las 10 condiciones (Velocidad, Pérdidas por fricción, Temperatura), ya que es de esperarse, que por lo menos durante una prueba el valor de rugosidad absoluta sea constante.
2. En la ecuación 3-4 se conocen todos los términos excepto el valor de k_s , el cual se podría determinar utilizando cualquier herramienta computacional o simplemente dejando la ecuación explícita para la variable k_s . Sin embargo, la metodología que se utilizó es un poco diferente, ya que no se hallaron los valores de k_s , partiendo de los datos ya conocidos, sino que se hallaron unos valores teóricos de h_f , para lo cual se probaron 200 valores de k_s que se encuentran en el rango factible de $1.25 \cdot 10^{-6}$ m a $3 \cdot 10^{-4}$ m.
3. Según lo anterior, para cada una de las 10 condiciones (Velocidad, Temperatura), se prueban 200 valores de k_s simultáneamente, que arrojan 2000 valores de pérdidas por fricción teóricos (h_{fi}^*) por prueba (200 por cada una de las 10 condiciones). Es decir, por cada k_s se hallan 10 valores teóricos de h_{fi}^* por día de prueba.
4. A cada uno de los 10 valores teóricos de pérdidas por fricción (h_{fi}^*), le corresponde un valor experimental de pérdidas (h_{fi}), por cada uno de los 200 k_s probados. Por cada k_s se halla un coeficiente de determinación R^2 .
5. El valor óptimo de k_s por prueba es aquel que tenga el mayor ajuste, según el coeficiente de determinación R^2 .

3.1.3 Coeficiente de determinación R^2

Se define el *COEFICIENTE DE DETERMINACIÓN* como:

$$R^2 = \frac{S_{y^*}^2}{S_y^2} \quad \text{o bien} \quad R^2 = 1 - \frac{S_e^2}{S_y^2} \quad 3-5$$

donde S_y se define como la Varianza debida a la Regresión, y S_e es la Varianza Residual.

3.1.3.1 Varianza Residual

Para cada valor de pérdidas por fricción en el tramo de prueba de tubería (h_f), se tiene una diferencia (residuo) entre el valor medido (h_{fi}) y el valor teórico calculado con cada uno de los valores de k_s que se encuentran en el rango previamente establecido (h_{fi}^*).

Se define la **VARIANZA RESIDUAL** como la media de todos los residuos elevados al cuadrado:

$$S_e^2 = \frac{\sum_i (h_{f_i} - h_{f_i}^*)^2}{n} \quad 3-6$$

Si la varianza residual es grande los residuos serán grandes y la dependencia será pequeña, por lo tanto, el ajuste será malo.

Si la varianza residual es pequeña (cerca de cero), la dependencia será grande y por lo tanto, el ajuste será bueno.

3.1.3.2 Varianza debida a la Regresión

Esta varianza muestra en qué medida mejora la descripción de una variable a través de la otra. La **VARIANZA DEBIDA A LA REGRESIÓN** es la varianza de los valores teóricos, es decir de los h_{fi}^* , y se define como:

$$S_{y^*}^2 = \frac{\sum_i (h_{f_i}^* - \bar{h}_f)^2}{n} \quad 3-7$$

Por otro lado, se tiene que:

$$S_{y^*}^2 + S_e^2 = S_y^2 \quad 3-8$$

Así pues, cuando aumenta la varianza debida a la regresión, disminuye la varianza residual y por lo tanto, el ajuste es bueno. Finalmente, la interpretación del valor del coeficiente de determinación R^2 , se debe hacer teniendo en cuenta que:

1. $0 \leq R^2 \leq 1$
2. Si $R^2 = 1$ todos los residuos valen cero y el ajuste es perfecto
3. Si $R^2 = 0$ el ajuste es inadecuado.

3.2 FILTRADO DE LOS COEFICIENTES CALCULADOS

Para la escogencia del coeficiente de rugosidad absoluta k_s , se realiza una filtración completa de los valores obtenidos en el proceso de calibración. En este proceso, se tienen en cuenta dos criterios: El valor del coeficiente de determinación R^2 y los valores extremos del espectro factible.

3.2.1 Criterio 1: Coeficiente de Determinación R^2

Con el fin de optimizar los resultados encontrados, se utiliza el coeficiente de determinación R^2 que permite explicar la correlación entre los valores teóricos y los valores experimentales. Siguiendo los principios estadísticos bajo los cuales funciona el coeficiente R^2 , se deben tener las siguientes consideraciones:

- El coeficiente de determinación R^2 , debe ser siempre mayor a cero.
- Todas las pruebas de calibración que arrojen valores de R^2 negativos no se deben tener en cuenta.
- Las pruebas que arrojen estos resultados son aquellas en las cuales, probablemente se han cometido errores en la toma de datos.

3.2.2 Valores frontera del espectro factible de k_s

Es posible que algunos resultados presenten valores de R^2 mayores a 0; sin embargo, si el valor óptimo calculado del coeficiente de rugosidad absoluta (k_s) corresponde a uno de los dos valores de frontera (1.25×10^{-6} m, 3×10^{-4} m), es posible que el valor matemático óptimo se encuentre por fuera de este rango. Esto puede considerarse un error, ya que se podrían presentar dos situaciones extremas:

- Si el valor calculado corresponde al extremo inferior del rango, es posible que el valor óptimo matemático sea muy bajo, incluso menor a cero, lo cual se considera erróneo y físicamente imposible por las características del coeficiente de rugosidad absoluta (k_s). Por esta razón, estos valores no se tienen en cuenta.
- Si el valor calculado corresponde al extremo superior del rango, es posible que el valor óptimo matemático sea muy alto, lo cual, debido a las características típicas y conocidas de los materiales como el PVC, también se debe considerar erróneo. Por esto, tampoco deben ser tenidos en cuenta estos valores.

4 RESULTADOS OBTENIDOS

Con el proceso de filtrado se obtiene un valor de k_s óptimo para cada día de recirculación. El siguiente paso es intentar identificar y caracterizar la posible relación entre la rugosidad absoluta y la formación de película biológica. Según esto, se identificaron tres ciclos de pruebas, que se describen a continuación:

1. FASE I (70 días de recirculación): Este primer ciclo de pruebas corresponde al periodo comprendido entre el mes de marzo y el mes de junio del año 2003. Durante esta fase se llevó a cabo la investigación de Echavarría (Ref. 2). Se utilizaron los datos experimentales de esta investigación, pero se aplicó la metodología de calibración expuesta en el Capítulo 3.
2. FASE II (100 días de recirculación): Este ciclo de pruebas comenzó en el mes de septiembre de 2003 y finalizó en la mitad del mes de noviembre. Se caracteriza porque se reiniciaron las pruebas después de dos meses de suspensión. Sin embargo, durante estos dos meses el sistema se recirculó, aunque en una menor proporción que lo realizado en la Fase I; también se proporcionó nutrientes al agua, por lo que la biopelícula permaneció en las paredes de la tubería.
3. FASE III (35 días de recirculación): Este ciclo comprende la última etapa de pruebas en el modelo físico. El período se inicia en noviembre 15, y finaliza el 17 de diciembre de 2003, día en el cual se realizó la última prueba experimental.

A continuación, se describe en forma más detallada, los resultados obtenidos en cada una de las tres fases o ciclos de prueba.

4.1 FASE I

Esta fase corresponde al primer ciclo de pruebas que se llevó a cabo en el modelo físico, construido durante la investigación de Echavarría (Ref. 2). Como se ha explicado anteriormente, la metodología de calibración utilizada en esta investigación es diferente a la empleada en el trabajo de Echavarría. Sin embargo, se hizo uso de los datos experimentales obtenidos en ese trabajo, con el fin de incluirlos en el nuevo proceso de calibración. Para la presentación gráfica de los resultados, se graficó el Diagrama de Moody teórico, basado en la Ecuación de Colebrook-White, y se graficaron los pares $(Re, f_{\text{teórico}})$ de cada una de las pruebas, luego de realizar el proceso de calibración. Es decir, por cada prueba existen 10 pares $(Re, f_{\text{teórico}})$, que corresponden a un valor de k_s , y por lo tanto la nube de puntos que se observa en las gráficas, es el resultado de graficar varias curvas de rugosidad relativa (k_s/D) , con los valores de rugosidad absoluta óptimos de cada prueba.

De esta manera, se intenta mostrar la bondad de la metodología utilizada en esta investigación, ya que los puntos se encuentran dentro del diagrama de Moody. Se puede ver el rango de rugosidad relativa dentro del cual se comporta la tubería con la formación de

biopelícula, y por ende, el rango de rugosidad absoluta que se obtiene al finalizar el proceso de calibración. Para la FASE I, se muestran los resultados en la Figura 4-1.

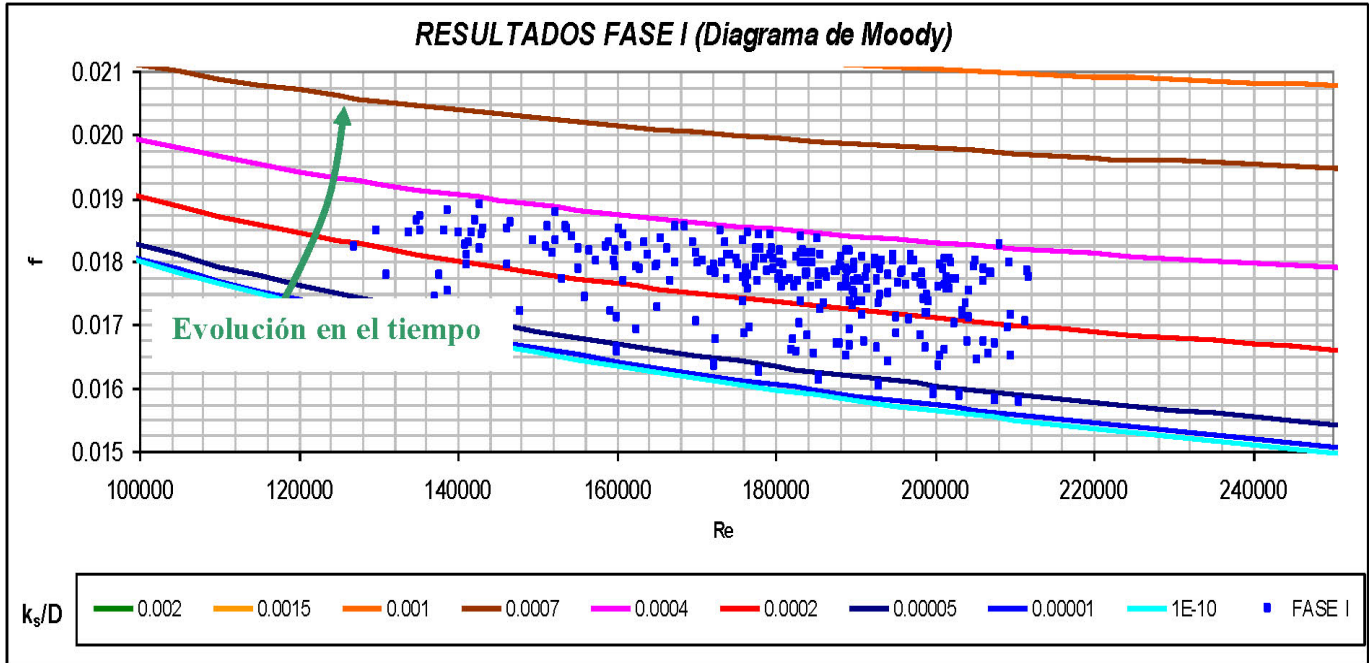


Figura 4-1 Resultados obtenidos en la Fase I

Como era de esperarse, durante los primeros días de pruebas, los valores obtenidos en la calibración se acercan al valor teórico de rugosidad absoluta del PVC ($1.5 \cdot 10^{-6}$ m). Las primeras pruebas arrojan resultados de rugosidad relativa (k_s/D) menores a 0.00005, que corresponden a valores de k_s del orden de 10^{-6} m. Luego, con el paso del tiempo, la mayoría de puntos (Re , f teórico) se concentran entre la línea de 0.0002 y la de 0.0004, las cuales corresponden a un rango de k_s que va desde $4 \cdot 10^{-5}$ hasta $8 \cdot 10^{-5}$ m.

La variación a través del tiempo, del coeficiente de rugosidad absoluta k_s , se puede entender con las curvas resultantes del proceso de filtrado, de donde se obtienen los coeficientes óptimos, es decir, los que tienen mayor indicador de ajuste R^2 (Ver Figura 4-2).

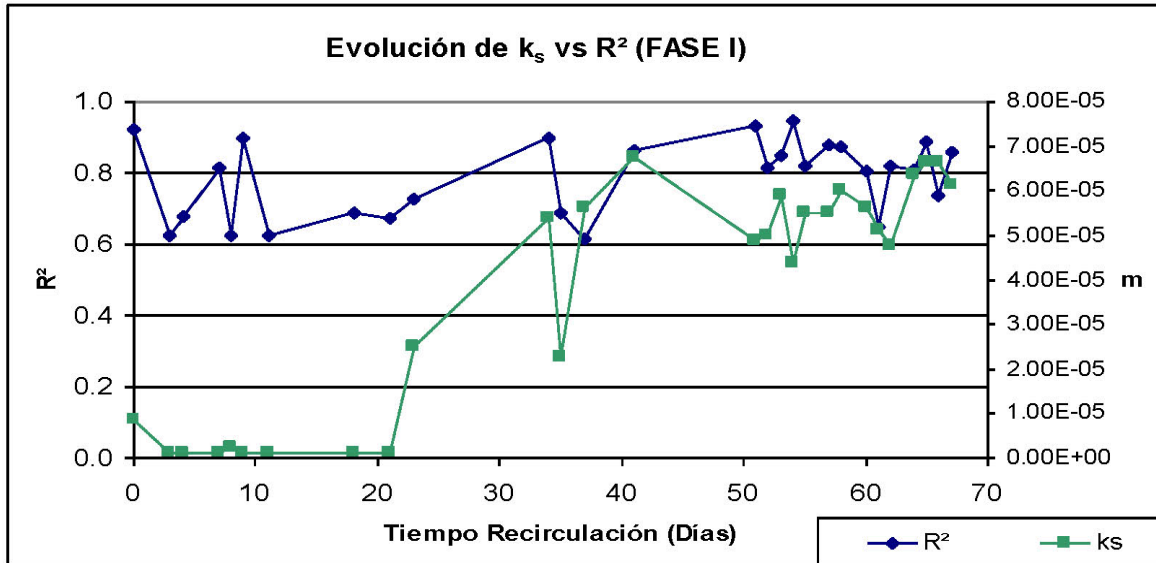


Figura 4-2 Se muestra la variación del Coeficiente de Rugosidad Absoluta con el tiempo junto con su valor de R^2 óptimo para la FASE I

A pesar de que algunos puntos no conservan la tendencia creciente del coeficiente de rugosidad absoluta, la tendencia general de la gráfica muestra que el coeficiente aumenta de manera gradual y varía dentro de un rango muy pequeño.

4.2 FASE II

Esta fase corresponde al segundo ciclo de pruebas, que se inició en septiembre y finalizó en la segunda semana de noviembre. Desde el día 27 de junio no se realizaron pruebas, y durante un corto período de tiempo, no se recirculó el agua en el sistema. Posteriormente, el sistema se continuó recirculando y alimentando con la dosis de nutrientes ya establecida. Sin embargo, algunas condiciones variaron respecto de la primera fase de la investigación.

En este segundo ciclo de investigación, se hicieron pruebas utilizando un rango más amplio de caudales (por ende, de número de Reynolds). En la primera fase, el número de Reynolds varió desde 125000 hasta 215000, mientras que en la segunda fase, se amplió este rango desde 50000 hasta 275000. Esto permitió encontrar resultados, que fueran válidos en un rango más grande de caudales.

Siguiendo el mismo proceso, explicado en el numeral anterior, se graficaron los resultados sobre el Diagrama de Moody (Ver Figura 4-3). Se observa una transición entre los resultados obtenidos en la etapa final de la primera fase, y una dispersión mayor de los puntos sobre el diagrama. No es posible determinar una zona donde se encuentren concentrados la mayoría de los puntos, pero es notorio el aumento en los valores del factor de fricción y en el rango de rugosidad relativa (0.0002-0.0015). En términos de rugosidad

absoluta, se tiene que al finalizar la segunda fase, la tubería presenta un valor de rugosidad cercano a $2.5 \cdot 10^{-4}$ m.

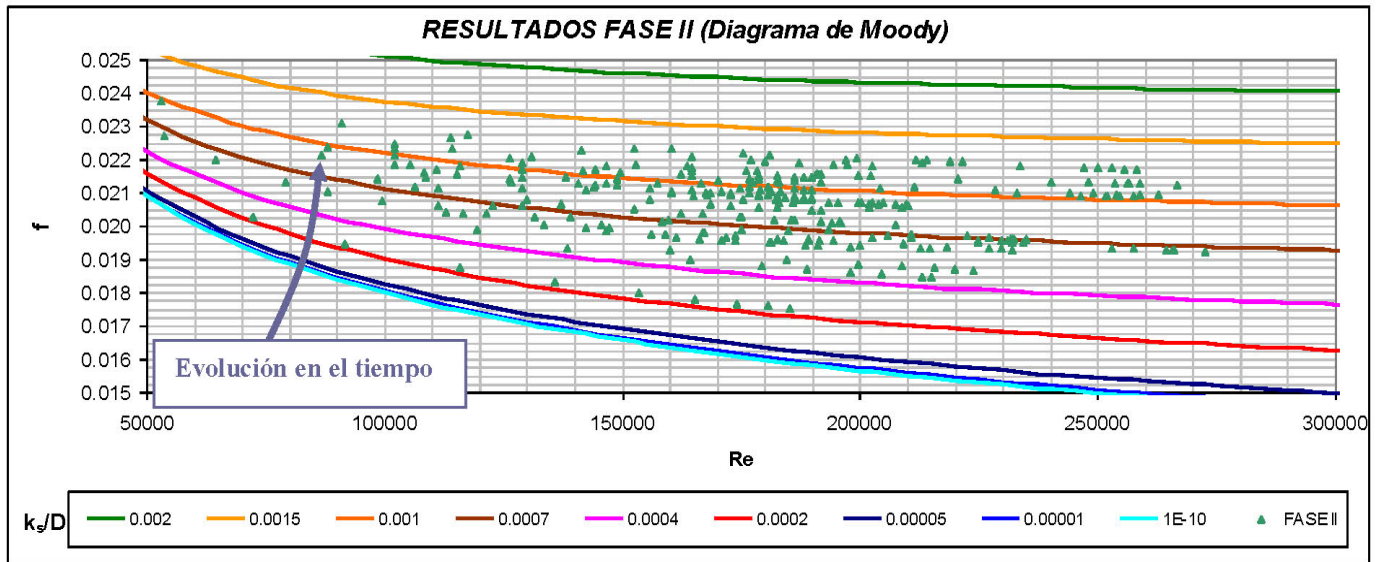


Figura 4-3 Resultados obtenidos en la Fase II

La variación a través del tiempo, del coeficiente de rugosidad absoluta k_s , se puede entender con las curvas resultantes del proceso de filtrado, de donde se obtienen los coeficientes óptimos, es decir, los que tienen mayor indicador de ajuste R^2 (Ver Figura 4-4).

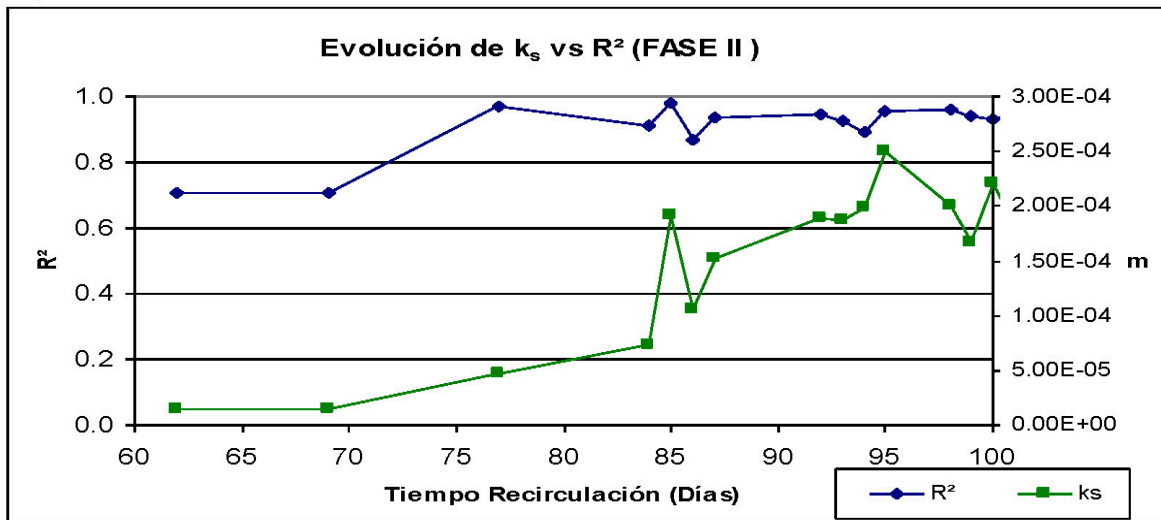


Figura 4-4 Se muestra la variación del Coeficiente de Rugosidad Absoluta con el tiempo junto con su valor de R^2 óptimo para la FASE II

Durante la segunda fase de pruebas, el valor del coeficiente de rugosidad absoluta, continúa con una tendencia a crecer, e incluso la magnitud del valor pasa de ser de 10^{-5} m a 10^{-4} m. Parece ser que los días en los cuales no hubo recirculación de agua en el sistema, no afectaron el espesor de la película biológica, pero es posible que haya perdido uniformidad.

Se descarta que haya alcanzado algún nivel de sequedad pues en todo momento el sistema estuvo presurizado. Sin embargo, la poca recirculación y alimentación afectan los procesos que se llevan a cabo en la biopelícula, por lo que es posible que esto sea un factor influyente en el comportamiento de la rugosidad absoluta.

4.3 FASE III

Esta fase corresponde al último ciclo de pruebas que se llevó a cabo en el modelo físico. Se caracteriza porque antes del inicio de éste, se realizó una medición de la biopelícula y el sistema estuvo sin recirculación, durante 3 días aproximadamente, debido a problemas de disponibilidad con el equipo del laboratorio de microbiología.

En esta última etapa se logra una estabilización en los resultados obtenidos, ya que la mayoría de puntos (Re , $f_{teórico}$), se encuentran dentro de un rango de rugosidad relativa que va desde 0.001 hasta 0.0015, es decir, la rugosidad absoluta varía de $2 \cdot 10^{-4} m$ hasta $3 \cdot 10^{-4} m$. Estos valores muestran que la variación en las condiciones de la tubería no es significativa durante este período. (Ver Figura 4-5). Sin embargo, es claro que la rugosidad absoluta aumenta de manera significativa, respecto de las condiciones iniciales de la tubería ($k_s = 1.8 \cdot 10^{-6} m$). Para entender estos cambios, se debe tener en cuenta la evolución y las condiciones bajo las cuales se desarrolla la biopelícula en la tubería. Esto se explica en detalle, en el capítulo 5.

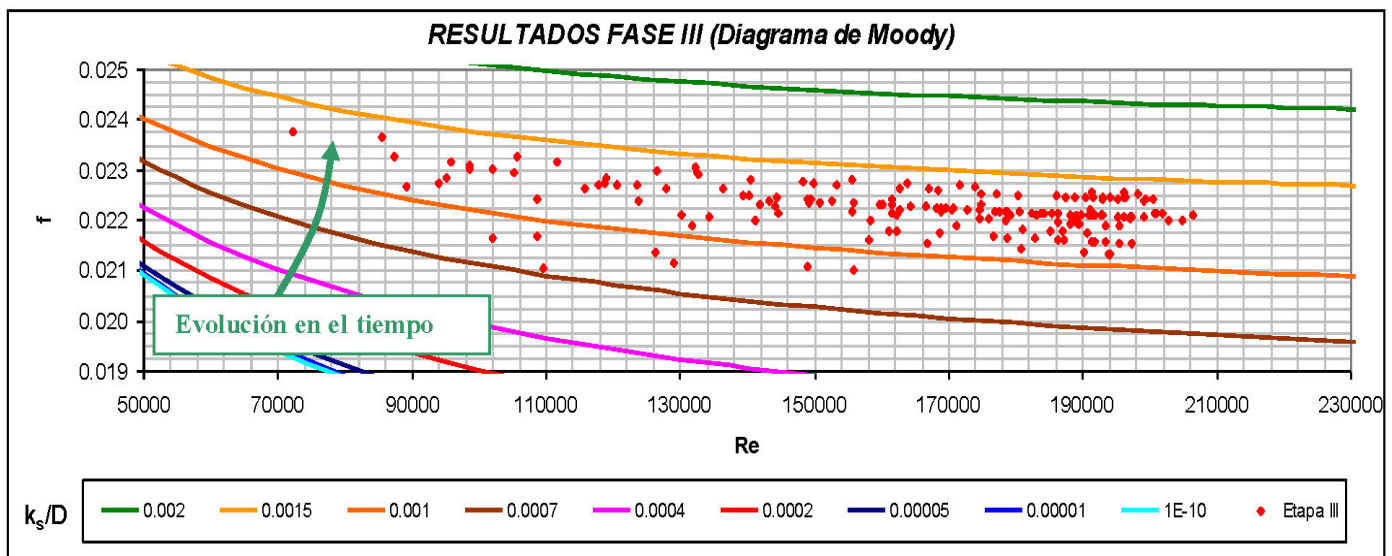


Figura 4-5 Resultados obtenidos en la Fase III

La variación a través del tiempo, del coeficiente de rugosidad absoluta k_s , se puede entender con las curvas resultantes del proceso de filtrado, de donde se obtienen los coeficientes óptimos, es decir, los que tienen mayor indicador de ajuste R^2 (Ver Figura 4-6).

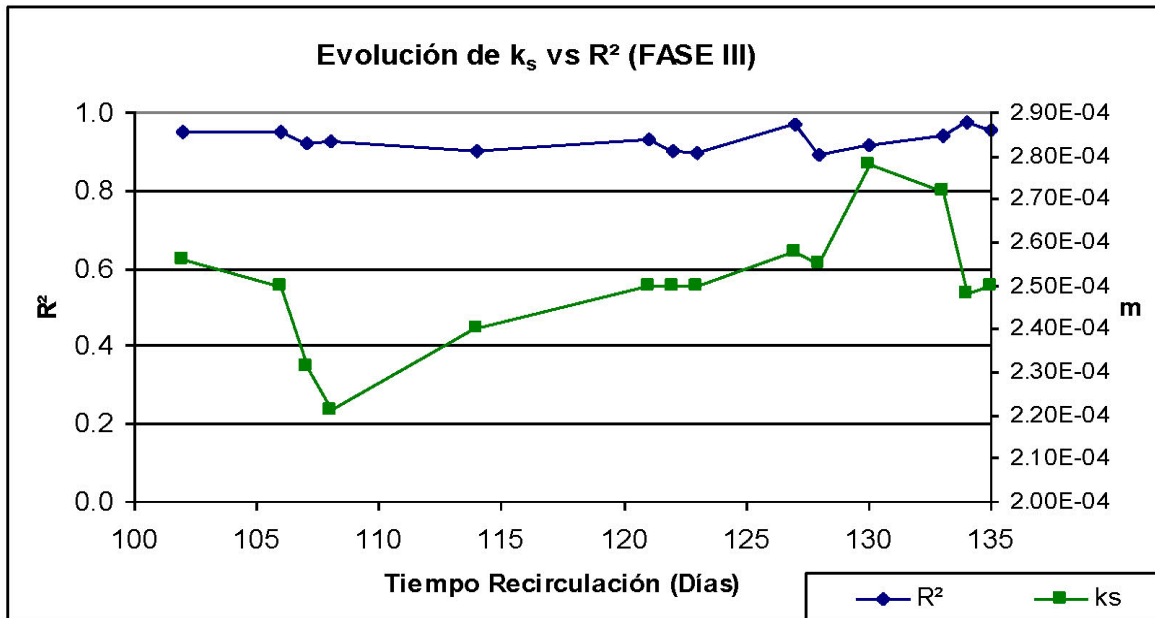


Figura 4-6 Se muestra la variación del Coeficiente de Rugosidad Absoluta con el tiempo junto con su valor de R² óptimo para la FASE III

Durante la última fase de pruebas, se logra una estabilización en los valores calculados de rugosidad absoluta. La tendencia a crecer se mantiene pero no es representativa, pues en los últimos 45 días de pruebas los resultados oscilan en un rango entre $2,3 \cdot 10^{-4}$ m y $2,7 \cdot 10^{-4}$ m. Así mismo, como se muestra en el capítulo 5, la biopelícula alcanza una aparente estabilidad en sus condiciones.

4.4 AGREGACIÓN DE RESULTADOS

Luego de ejecutar el proceso de calibración y filtrado de los coeficientes de rugosidad absoluta k_s , para cada una de los tres ciclos de investigación, se realiza el proceso de agregación, con el cual se pueden interpretar, de una manera más global, los resultados obtenidos. En la Figura 4-8 y en la Figura 4-7 se presentan los resultados finales, luego del proceso de agregación de los resultados parciales en cada fase.

La Figura 4-8 muestra la evolución del coeficiente de rugosidad absoluta a través del tiempo. Se observa cómo va aumentando el valor del coeficiente, debido a la formación de biopelícula; sin embargo, también se muestra el efecto que tuvo la disminución del espesor de la biopelícula (por ende, de la rugosidad de la tubería) durante el período de suspensión de pruebas experimentales.

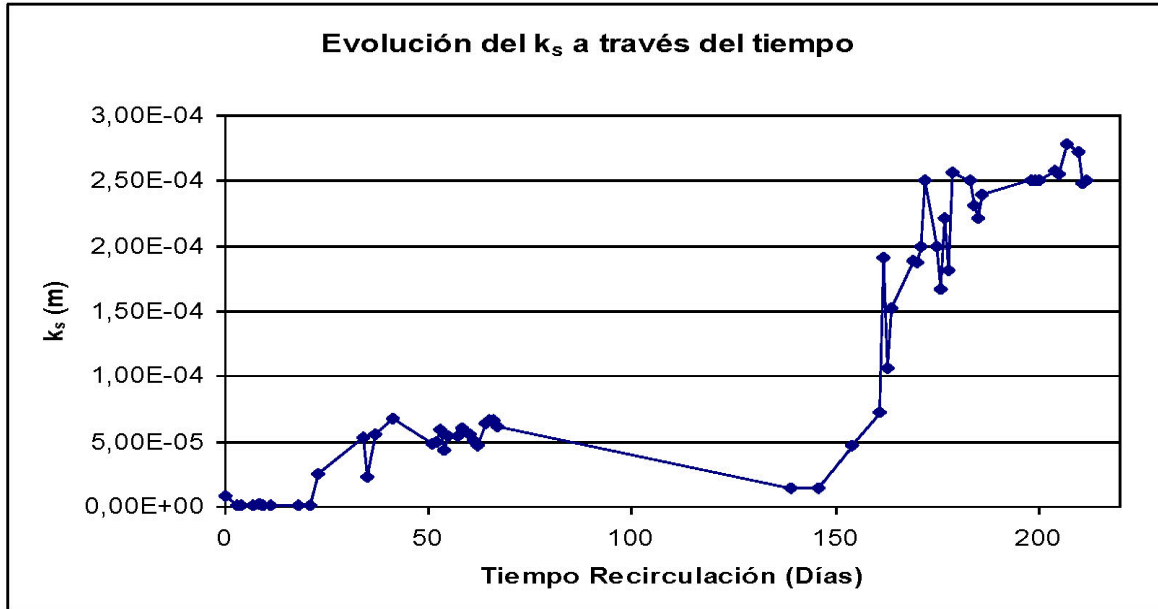


Figura 4-7 Variación temporal del coeficiente de rugosidad k_s del proceso de agregación final

En la Figura 4-8 se observa cómo el coeficiente de rugosidad relativa, y por lo tanto el coeficiente de rugosidad absoluta, se va incrementando con el aumento en el tiempo de recirculación. Sin embargo, esta evolución debe relacionarse con las condiciones y características de la película biológica en cada instante de tiempo. Este análisis se presenta en el capítulo 5.

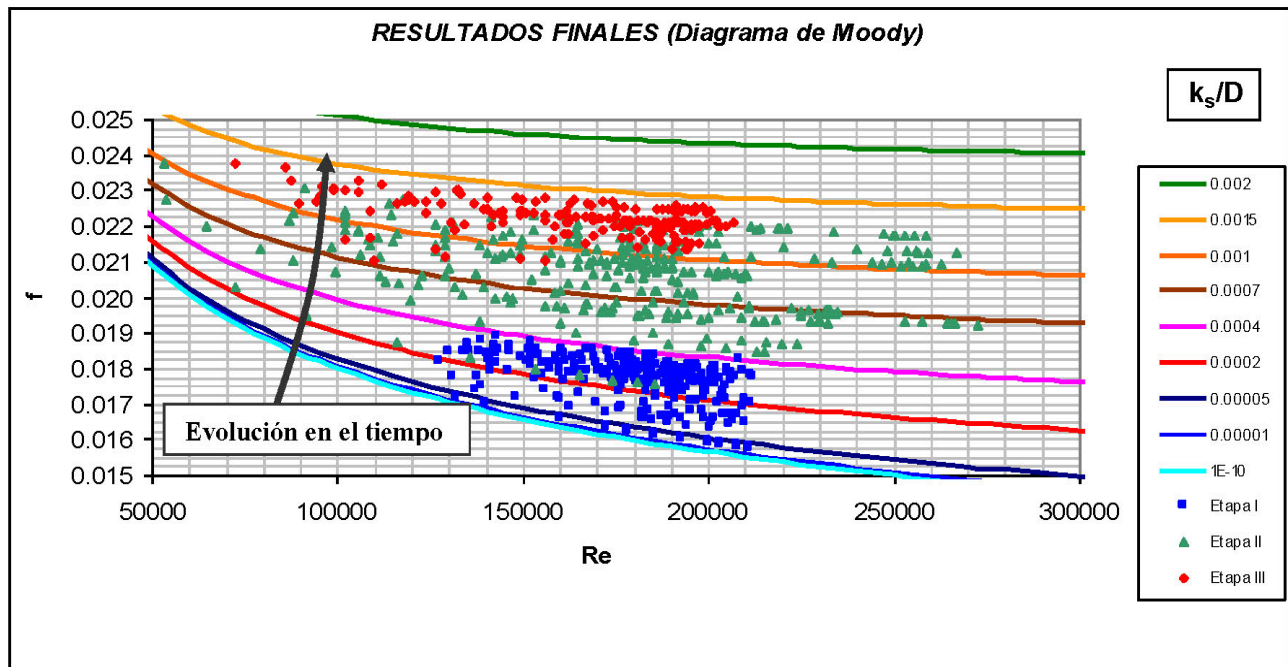


Figura 4-8 Variación temporal del factor de fricción y la rugosidad relativa luego del proceso de agregación final

5 EVOLUCIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD ABSOLUTA RESPECTO A LA FORMACIÓN DE BIOPELÍCULA

En este capítulo se describe la evolución y el efecto que tiene la formación de la biopelícula, sobre el coeficiente de rugosidad absoluta (k_s) a través del tiempo de recirculación.

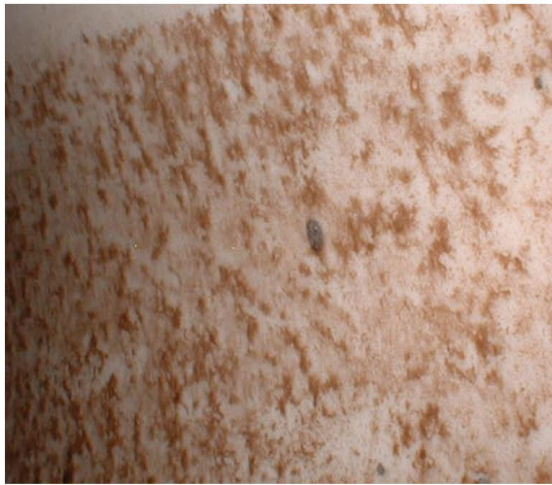
Debido a que al finalizar la primera fase de la investigación, se presentó un intervalo de tiempo (aproximadamente 7 días) durante el cual no se tuvo recirculación, ni alimentación adecuada del modelo físico, se definieron dos períodos de recirculación: Uno que comprende la Fase I, con un total de 70 días de recirculación, y uno que comprende las fases II y III, con 135 días de recirculación, para un total de 205 días de recirculación. Sin embargo, se debe aclarar que durante la Fase II, las pruebas comenzaron después de transcurridos 62 días, desde que se reiniciaran los procesos de recirculación y alimentación con nutrientes.

Durante las tres fases de la investigación, se llevaron a cabo jornadas de medición de la biopelícula que se desarrolló en los dispositivos instalados en la tubería de PVC. Con esto se buscaba llevar un registro de la formación y evolución de la película biológica, con el fin de relacionarlo con los resultados obtenidos del coeficiente de rugosidad absoluta k_s . Los resultados obtenidos se presentan, a continuación, en la Tabla 5-1:

Fase	Recirculación R (Días)	Espesor en paredes (μm)	k_s aproximado (m)
I	37	40	5.5×10^{-5}
I	59	80	6.0×10^{-5}
I	67	130	6.13×10^{-5}
II	155	200	2×10^{-4}
III	184	200	2.4×10^{-4}
III	205	Registro fotográfico	2.5×10^{-4}

Tabla 5-1. Evolución del espesor de biopelícula

A continuación, se presenta una serie de fotografías, que muestran el seguimiento que se realizó del proceso de formación, crecimiento y estabilización de la película biológica que se formó en las paredes de la tubería de agua potable:

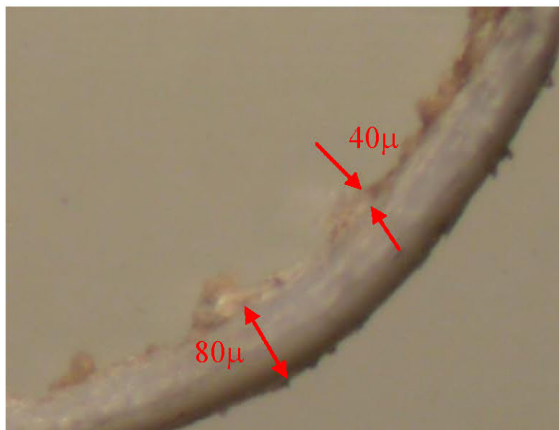


Antes

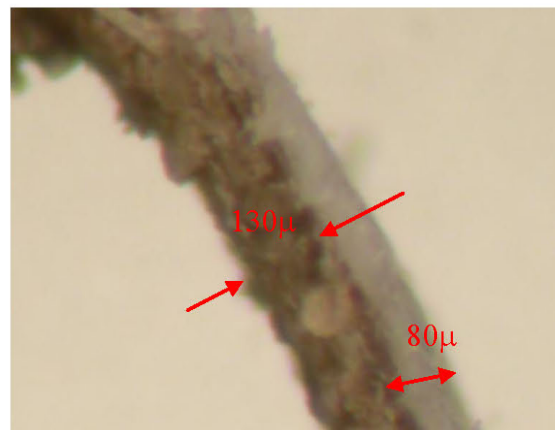


Después

Figura 5-1 Evolución de la biopelícula. Fuente (Ref. 2)



Antes



Después

Figura 5-2 Evolución del espesor de biopelícula, después de 67 días de recirculación. Fuente (Ref. 2)

Durante las fases II y III del proyecto se continuó el proceso de seguimiento de la película biológica, donde la característica principal es que se logró una estabilización en las características de ésta, es decir, en su espesor y aspecto.

En la Figura 5-3 y en la Figura 5-4 se observa cómo la biopelícula mantiene un aspecto similar con el paso del tiempo, aunque en la Fase III aparentemente pierde un poco de consistencia y uniformidad. Esto podría explicar el aumento en el coeficiente de rugosidad absoluta k_s .

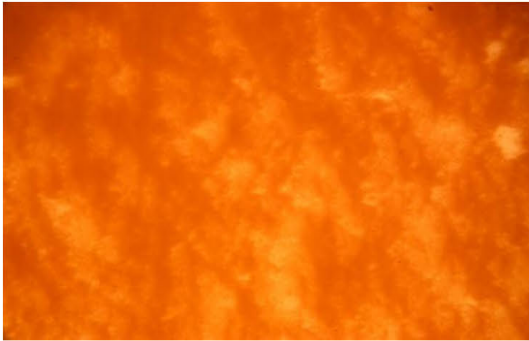


Figura 5-3. Izquierda: Fotografía de la microestructura de la biopelícula formada en los dispositivos de muestreo. Derecha: Aspecto de la biopelícula en el dispositivo, después de 155 días de recirculación en la Fase II

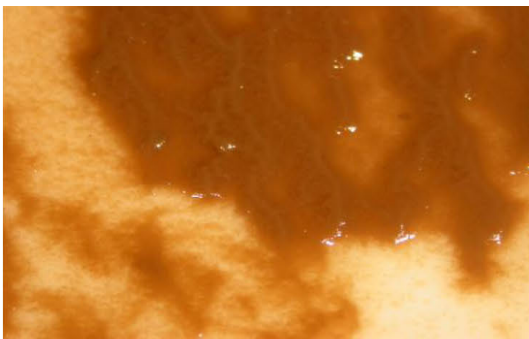


Figura 5-4. Izquierda: Fotografía de la microestructura de la biopelícula formada en los dispositivos de muestreo. Derecha: Aspecto de la biopelícula en el dispositivo, después de 184 días de recirculación en la Fase III

Finalmente, en la última semana de pruebas se retiró el dispositivo, pero no se pudo observar en el laboratorio, sin embargo se fotografió el dispositivo para tener el registro de la biopelícula. Aunque en la Figura 5-5 se observa poca uniformidad en la biopelícula, la tubería de prueba presentaba una biopelícula más uniforme como se ve en las esquinas del dispositivo.



Figura 5-5. Fotografías del estado de la biopelícula en uno de los dispositivos de medición, luego de 205 días de recirculación en la Fase III.

6 ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS²

Para tener una referencia de la variación en las condiciones del agua y el efecto que tiene esto en su calidad, se realizó estudio de una muestra de agua del sistema con el fin de determinar las características del agua recirculante. El recuento se llevó a cabo para cuatro muestras diferentes:

- Agua potable utilizada para el llenado inicial del sistema.
- Agua circulante en el modelo en la séptima semana.
- Agua del sistema cuando éste se encuentra en periodo de estancamiento.
- Biopelícula (raspada de los tanques, semana 7)

A continuación se presentan en la Tabla 6-1 los resultados del recuento de microorganismos de cada una de las muestras:

Tabla 6-1. Recuento microbiológico de organismos en las 4 muestras analizadas.				
Análisis	1. Muestra de agua potable	2. Agua circulante	3. Agua estancada	4. Biopelícula
Recuento de bacterias aerobias mesófilas (SPC)	2.4x10 ² UFC/ml (C.E)	23x10 ⁴ UFC/ml (C.E)	>10 ⁴ UFC/ml (C.E)	>10 ⁵ UFC/ml (C.E)
Recuento de bacterias sulfito reductoras (SPS)		15x10 ⁴ UFC/ml	22x10 ⁴ UFC/ml (C.E)	>10 ⁵ UFC/ml (C.E)
Recuento de coliformes relacionados		Lactosa (+) 69x10 ² UFC/ml Lactosa (-) 45x10 ² UFC/ml	Lactosa (+) 13x10 ³ UFC/ml Lactosa (-) 57x10 ² UFC/ml	Lactosa (+) >10 ³ UFC/ml Lactosa (-) >10 ² UFC/ml
Recuento de hongos y levaduras		Hongos: 12x10 ² UFC/ml Levaduras: 13x10 ³ UFC/ml	Hongos: >10 ² UFC/ml Levaduras: >10 ² UFC/ml	Hongos: >10 ² UFC/ml Levaduras: >10 ² UFC/ml

² Tomado de Echavarría [Ref. 2]

Es evidente que la cantidad de microorganismos presentes en las muestras 2, 3 y 4 dan la idea de un agua aparentemente residual.

A continuación se muestra en las fotografías de la Figura 6-1 la comparación del aspecto macroscópico del agua con los microorganismos que fueron capaces de crecer en ella en el laboratorio.

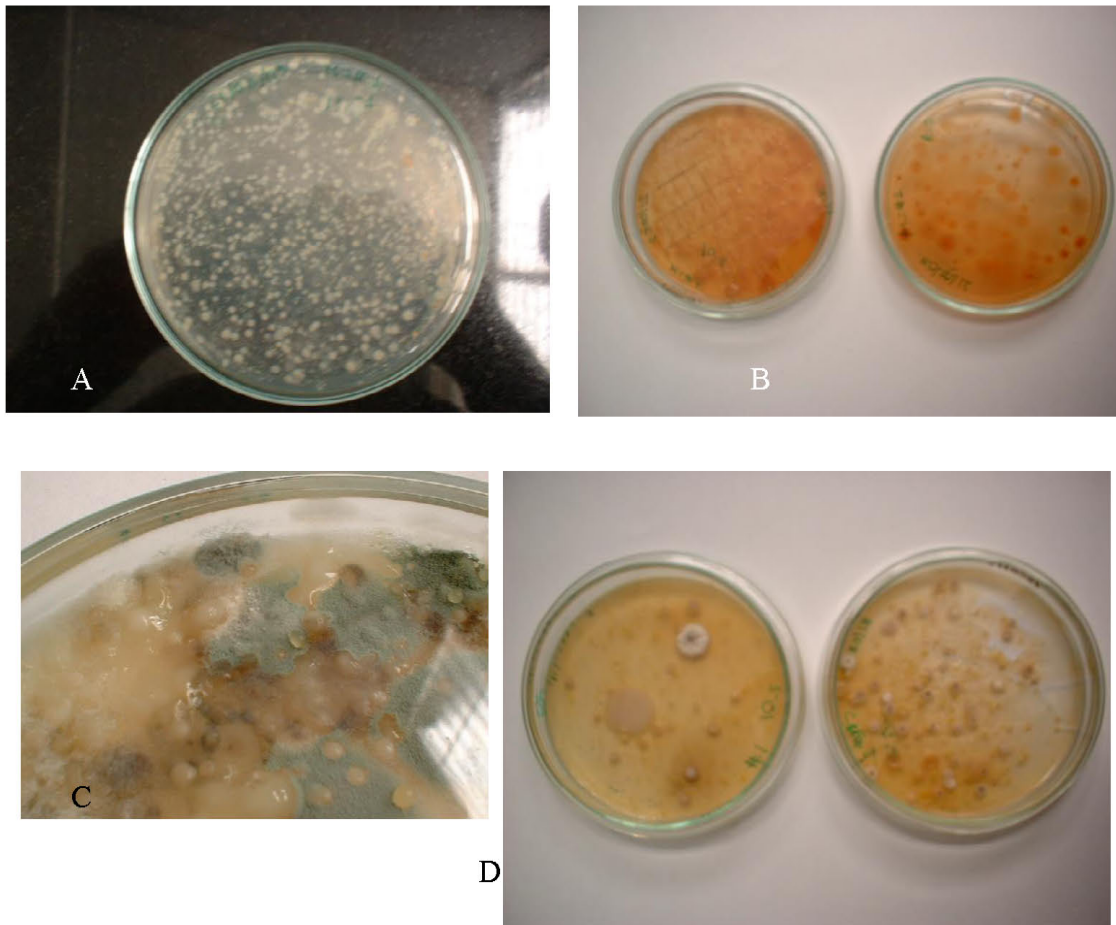


Figura 6-1. Placas de Petri en las que se cultivaron: A) Bacterias aerobias totales mesofílicas, B) Coliformes positivas (rojas) y negativas (blancas), C) Hongos (verdes mohosos) y levaduras (blancas y esféricas), D) Bacterias sulfito reductoras.

Para el agua estancada, la formación de colonias aumenta con relación a la que se presenta en la Figura 6-1 para el agua recirculante.

Los microorganismos hallados en el estudio microbiológico no son todos los que pueden encontrar en una muestra de agua, sin embargo son los parámetros típicos a nivel celular que diferencian la calidad de las aguas.



El recuento muestra la presencia de bacterias anaerobias en pequeñas proporciones, esto indica que bajo las biopelículas cuyos espesores son mayores de 30 a 40 micras, se han desarrollado colonias de bacterias anaerobias. Al mismo tiempo y debido al espesor de 200 micras que se obtuvo finalmente, se puede aprobar la existencia de un manto protector contra agentes biológicos.

Dado que los resultados obtenidos del recuento de microorganismos evidencian la gran cantidad de microorganismos patógenos que se encontraban en el sistema tanto en el momento del llenado con agua potable, se concluye que la calidad del agua no es óptima inclusive después de ser “purificada” en la planta de tratamiento de agua potable y enviada a los usuarios.

7 CONCLUSIONES

7.1 BIOPELÍCULAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

- La formación de películas biológicas en las paredes de las tuberías de un sistema de distribución de agua potable es un hecho incuestionable, el cual no requiere de mucho tiempo para generarse y desarrollarse. En la tubería de PVC utilizada en esta investigación, se detectó una biopelícula de espesor considerable después de 70 días de recirculación de agua en el sistema.
- El rápido proceso de formación de biopelículas contrasta con la alta resistencia de éstas a los cambios en las condiciones del agua que transporta la tubería. Pueden existir eventos y épocas de sequedad en la biomasa fijada en las paredes de las tuberías, pero una vez formada ésta, no se degenera a menos que se apliquen técnicas para desprenderla.
- Las características físicas de la película biológica pueden variar de acuerdo con las condiciones de operación y calidad del agua en el sistema, pero los componentes químicos y microbiológicos no presentan una gran variación a lo largo del tiempo.
- Durante los 212 días de recirculación de agua en el sistema, se alcanzó un espesor de biopelícula máximo de 200 μm .

7.2 HIDRÁULICA DEL SISTEMA Y PARÁMETROS AFINES:

- El principal efecto hidráulico que tiene la formación de película biológica en las paredes de las tuberías de agua potable, es un aumento considerable en el valor del coeficiente de rugosidad absoluta k_s .
- Las condiciones variables a las cuales se somete el modelo físico, afectan directamente las características de la biopelícula, y por ende la rugosidad absoluta. Por lo anterior, no se recomienda un valor único de rugosidad absoluta, pero es claro que por lo menos ésta pasa de tener una magnitud de 10^{-5} m, a tener un orden de magnitud de 10^{-4} m.
- Los valores óptimos, de rugosidad absoluta, calculados presentan coeficientes de determinación (R^2) que oscilan en un rango entre 0,6 y 0,99. El tener un gran número de resultados con coeficientes de determinación mayores a 0,9 genera alguna confiabilidad en los datos de campo y en el método de calibración utilizado.



8 REFERENCIAS

Ref. 1 CHOW, Ven Te. Open Channel Hydraulics. Mc Graw Hill. 1956.

Ref. 2 ECHAVARRÍA, M.A. Influencia del crecimiento de biopelículas sobre la rugosidad absoluta en tuberías presurizadas. Modelo físico y conceptual. Proyecto de Grado. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, 2003.

Ref. 3 SALDARRIAGA, J. Hidráulica de Tuberías. Mc Graw Hill. 2000. Páginas

Ref. 4 STREET, R. Elementary Fluid Mechanics. John Wiley & Sons. 7ª Edición. 1996.



ANEXOS



ANEXO 1

(Esquema del montaje de la prueba para la determinación del coeficiente de rugosidad absoluta k_s)



ANEXO 2

(Datos experimentales de las pruebas realizadas)