

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL



**BIOPELÍCULAS ALIMENTADAS CON CODB MEDIANTE PASTOS: DINÁMICA DE
CRECIMIENTO Y DESPRENDIMIENTO EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE
AGUA POTABLE**

PROYECTO DE GRADO

PRESENTADO POR:

TATIANA MELISSA VARGAS CASTILLA

ASESOR :

JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA

BOGOTÁ, D. C, 22 de Junio de 2012

AGRADECIMIENTOS

A Dios por toda la luz, la fuerza y las herramientas que ha puesto en mi camino, por ser mi guía día tras día hacia la felicidad y la paz.

A mis padres Carlos Vargas y Martha Castilla, por todas las enseñanzas y la formación llena de valores que me han brindado. A mi hermana Vanessa Vargas por su apoyo, compañía y motivación, por alentarme a luchar por mis sueños y seguir conmigo el camino.

A Juan Saldarriaga por todo su apoyo, enseñanzas y por guiarme en el desarrollo de mi proyecto de grado.

A Jhon Calvo le estoy enormemente agradecida por su colaboración, ilustraciones y apoyo incondicional.

A mis abuelos por todo el amor, la felicidad y la incondicionalidad con que me han acompañado.

A Vircos por su cariño, comprensión y por ser otra madre para mí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2 Contenido del informe.....	3
2. ANTECEDENTES	4
3. MARCO TEÓRICO	6
3.1 Definición de biopelícula.....	6
3.2 Desarrollo y Evolución de la Biopelícula.....	6
3.2.1 Acondicionamiento de superficie.....	7
3.2.2 Adsorción y fijación de microorganismos pioneros.....	7
3.2.3 Maduración.....	7
3.2.4 Cooperación entre especies.....	8
3.2.5 Desprendimiento y nueva colonización.....	9
3.3 Estructura de la Biopelícula dentro de Sistemas de distribución de agua potable.....	10
3.3.1 Morfología general.....	10
3.3.2 Microorganismos presentes.....	10
3.4 Hidráulica de Tuberías.....	11
3.4.1 Consideraciones hidráulicas y regímenes de flujo.....	14
3.5 Factores de Crecimiento de Biopelículas.....	15
3.5.1 Nutrientes.....	16
3.6 Control en la formación de Biopelículas.....	17
3.7 Desprendimiento de biopelículas.....	19
4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO	21
4.1 Planta física.....	21
4.1.1 Tuberías PVC.....	22
4.1.1.1 Testigos.....	23
4.1.1.1.1 Testigos de borde.....	23
4.1.1.1.2 Testigos de centro.....	24
4.1.1.2 Tuberías de vidrio.....	24
4.1.2 Válvulas de control.....	25
4.1.3 Tanque elevado.....	25
4.1.4 Sistema de recirculación.....	26
4.1.4.1 Motobomba.....	26
4.1.5 Tablero piezométrico.....	26
4.1.6 Vertederos.....	26
5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	28

5.1 Fuente de carbono	28
5.2 Aproximación operacional	28
5.2.1 Cloro residual	29
5.3 Control cuantitativo a la formación y desarrollo de biopelículas	30
5.3.1 Medición de testigos	30
5.3.1.1 Cuantificación por método de escobillón	32
5.3.1.2 Velocidad de crecimiento de la biopelícula	33
5.3.2 Aproximaciones hidráulicas de las tuberías en presencia de biopelículas	33
5.3.3 Medidas fisicoquímicas	35
5.4 Control cualitativo a la formación y desarrollo de biopelículas	36
5.4.1 Registro visual	36
5.4.2 Identificación de microorganismos	36
5.5 Comparación con trabajos anteriores.....	36
6. RESULTADOS	37
6.1 Análisis Cuantitativo.....	37
6.1.1 Unidades formadoras de colonia	37
6.1.2 Características en Testigos de Borde.....	38
6.1.3 Características en Testigos de Centro	42
6.1.3.1 Relación entre el espesor de la subcapa laminar viscosa, el espesor de la biopelícula y la rugosidad relativa	47
6.1.4 Efectos de la biopelícula en las pérdidas por fricción	51
6.1.4.1 Diagramas de Moody.....	52
6.1.5 Pruebas fisicoquímicas	54
6.2 Análisis Cualitativo	55
6.2.1 Registro fotográfico	56
6.2.2 Identificación de microorganismos	57
6.3 Análisis Comparativo con estudios anteriores.....	58
6.3.1 Comparación con el trabajo de Trujillo (2011).....	58
6.3.2 Comparación de proyectos con fuentes de CODB diferentes a pasto	61
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
8. BIBLIOGRAFÍA	64
9. ANEXOS	67
9.1 Anexo procedimiento de recirculación diario	67
9.2 Anexo cálculos hidráulicos de las tuberías con presencia de biopelículas	68
9.3 Anexo características relevantes de las tuberías	71
9.4 Anexo base de datos semanal mediciones	72

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Diagrama de Moody.	14
Gráfica 2. Comportamiento ante esfuerzo cortante de la biopelícula.....	18
Gráfica 3. Demanda de Cloro 24 horas. Concentración de 57.6 mg/l de $(\text{ClO})_2\text{Ca}$ (s).....	30
Gráfica 4. Recuento en placa para análisis de mesófilos.	38
Gráfica 5. Espesor de biopelículas formadas en el montaje.	41
Gráfica 6. Velocidad de crecimiento en el montaje según tubería.	42
Gráfica 7. Espesor de biopelículas desarrolladas en los testigos de centro.	46
Gráfica 8. Espesor biopelícula en testigos de centro segundo ciclo.	46
Gráfica 9. Relación entre el espesor de la biopelícula, la subcapa laminar viscosa y la rugosidad relativa de la tubería 1.....	47
Gráfica 10. Relación entre el espesor de la biopelícula, la subcapa laminar viscosa y la rugosidad relativa de la tubería 2.	48
Gráfica 11. Relación entre el espesor de la biopelícula, la subcapa laminar viscosa y la rugosidad relativa de la tubería 2.	48
Gráfica 12. Esquema de caja de bigotes para la tubería con velocidad de 1 m/s.....	49
Gráfica 13. Esquema de bigotes para la tubería con velocidad de 3 m/s.....	50
Gráfica 14. Esquema de bigotes para la tubería con velocidad de 2 m/s.....	51
Gráfica 15. Diagrama de Moody para la tubería con velocidad de 1 m/s.....	52
Gráfica 16. Diagrama de Moody para la tubería con velocidad de 3 m/s.....	53
Gráfica 17. Diagrama de Moody para la tubería con velocidad de 2 m/s.....	54
Gráfica 18. Cloro residual en el sistema de recirculación.....	55
Gráfica 19. Diagrama de Moody continuación datos Trujillo ($v= 1$ m/s).....	58
Gráfica 20. Diagrama de Moody continuación datos Trujillo ($v= 3$ m/s).....	59
Gráfica 21. Continuación datos de Trujillo espesor promedio testigos de centro.....	60
Gráfica 22. Espesor biopelículas testigos de borde (Continuación datos Trujillo).....	60
Gráfica 23. Diagrama de Moody comparativo por fuente de CODB.	61
Gráfica 24. Espesor en testigos de Centro, Comparación con proyectos anteriores.	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Espesor y velocidad de crecimiento de la biopelícula formada en la tubería con velocidad de 1 m/s	39
Tabla 2. Espesor y velocidad de crecimiento de biopelícula formada en tubería con velocidad de 3 m/s	40
Tabla 3. Espesor y velocidad de crecimiento de biopelícula formada en la tubería con velocidad de 2 m/s	41
Tabla 4. Comportamiento de la biopelícula en testigos de centro (velocidad de flujo 1 m/s)	43
Tabla 5. Comportamiento de la biopelícula en testigos de centro (velocidad de flujo 3 m/s)	44
Tabla 6. Comportamiento de la biopelícula en testigos de centro (velocidad de flujo 3 m/s)	45
Tabla 7. Cloro residual en el sistema de recirculación.....	55
Tabla 8. Identificación de microorganismos	57

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuación de caudal por vertedero	27
Cuadro 2. Fórmulas espesor de biopelículas según tipo de testigo.....	32
Cuadro 3. Procedimiento iterativo para la determinación hidráulica.	35
Cuadro 4. Cambio de la viscosidad y densidad del agua con la temperatura.....	68
Cuadro 5. Datos registrados de temperatura por medición.	68
Cuadro 6. Resultados de viscosidad, densidad y viscosidad cinemática para ejemplo.	69
Cuadro 7. Parámetros relevantes para el cálculo hidráulico.....	71

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un bien necesario para la vida, pero también se ha consagrado como fuente de enfermedades y problemas de salud pública puesto que es el habitat predilecto de muchos microorganismos e insectos. Con la implementación de los procesos de potabilización, se mitigaron los problemas de salud asociados con el consumo de agua; sin embargo se identificaron detrimentos en la calidad de la misma, y en la operación de la red durante el proceso de distribución hasta sus destinatarios. Estos detrimentos han persistido en muchos asentamientos humanos hasta la actualidad; en muchos casos se presenta coloración y cambio de las características organolépticas, lo cual genera quejas en los usuarios.

Los problemas en la distribución del agua respecto a su calidad se relacionan con el crecimiento de microorganismos sobrevivientes al proceso de potabilización, y a su asentamiento en las paredes de las tuberías; éstos utilizan como sustrato la materia orgánica que ingresa al medio, y forman asociaciones (también conocidas como biopelículas), para protegerse de las condiciones hostiles que presenta el medio y tener más posibilidades de sobrevivir.

Las biopelículas refugian microorganismos de muchas especies, incluyendo bacterias potencialmente patógenas, bacterias ambientales, protozoos, cianobacterias, virus, hongos y levaduras de alto riesgo para la salud humana, y que además proporcionan olor y sabor desagradable al agua (Batté, Appenzeller 2003).

El principal riesgo de la presencia de biopelículas en redes de distribución de agua potable, radica en que su desprendimiento y posterior dispersión las transporta directamente a los usuarios, generando desde coloración del agua hasta serios problemas de salud. También se han reportado alteraciones en el diseño operacional de la red de distribución por la presencia de biopelículas; incremento de las pérdidas por fricción, reducción de la capacidad hidráulica del sistema, y a largo plazo se ve afectado el factor de fricción de Darcy-Weisbach (Latorre, 2005).

El desprendimiento de películas biológicas en redes de distribución tiene una estrecha relación con el asentamiento de la biopelícula aguas abajo, razón por la cual debe estudiarse los factores que promueven y facilitan el desarrollo de las biopelículas, para evitar su propagación y formación, interrumpir el ciclo de aspersión en la red, y restituir el comportamiento hidráulico de la red (Vargas, 2005).

En investigaciones anteriores se ha descrito que el caso más crítico del comportamiento hidráulico ante biopelículas se presenta en sistemas recirculados, en donde el costo operacional se incrementa notoriamente.

El presente proyecto experimental se guiará a determinar la relación entre la velocidad de flujo, la frecuencia, calidad y cantidad de nutrientes y el crecimiento de la biopelícula, con la consecuente interpretación del comportamiento hidráulico y de la influencia de la rugosidad de la biopelícula en el interior de las tuberías; a fin de proponer condiciones aptas para el desprendimiento de las asociaciones microbiológicas, se enfatizará en acercarse a la realidad las condiciones del modelo de una red de distribución de agua potable, mediante el suministro de un desinfectante residual a las tuberías y alimentando con pasto Kikuyo en un tanque de almacenamiento a manera de simular la materia orgánica presente en las redes de distribución de agua potable.

Las cantidades de nutrientes y cloro residual se variarán a lo largo del procedimiento experimental a fin de determinar los patrones de crecimiento y desprendimiento de la película biológica.

El montaje experimental se realizará bajo condiciones de recirculación para enfatizar las implicaciones hidráulicas de la formación de biopelículas en redes de distribución de agua potable, y se realizará con el factor de material de tubería constante, es decir bajo el material de PVC.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del presente proyecto es determinar la influencia de la velocidad de flujo en el comportamiento de las biopelículas a través del tiempo y de su relación con el factor de fricción de Darcy-Weisbach, y la subcapa laminar viscosa, para evaluar las características de desprendimiento ante diferentes velocidades.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la relación entre el espesor y la velocidad de crecimiento de la biopelícula ante diferentes velocidades de flujo.
- Realizar un paralelo entre la rugosidad absoluta, el espesor de la subcapa laminar viscosa, y el espesor de la biopelícula para diferentes velocidades de flujo.
- Determinar la influencia de la rugosidad de la biopelícula en factores como las pérdidas por fricción y el número de Reynolds, mediante la implementación del Diagrama de Moody, ante diferentes velocidades de flujo.
- Determinar la influencia de la frecuencia y tipo de nutriente con el crecimiento y desprendimiento de la biopelícula.

- Comparar los espesores de la biopelícula de las tuberías en PVC y el diagrama de Moody del presente proyecto con dos trabajos anteriores que implementaron una fuente de Carbono Orgánico Disuelto Biodegradable (CODB) diferente al pasto y que implementaron un montaje similar.
- Comparar los resultados del presente Proyecto de grado con los de Trujillo (2011).
- Registrar el comportamiento de las biopelículas mediante un recuento en placa por método Escobillón y un historial fotográfico de las tuberías.
- Realizar una identificación de las especies que se pueden encontrar típicamente en biopelículas de Bogotá, mediante la identificación de las especies del modelo.
- Evaluar el efecto de la velocidad de flujo y de los nutrientes en el desarrollo y desprendimiento de la biopelícula.

1.2 CONTENIDO DEL INFORME

Inicialmente se presenta una descripción del montaje y del diseño operacional que se planteó para la investigación; el cuál se aproxima a las metodologías implementadas anteriormente en la Universidad de los Andes por el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillado (CIACUA). El sistema de distribución de agua potable recirculado cuenta con dos principales instrumentos de medida; el primero consiste en una aproximación cualitativa y el segundo en una cuantificación de los impactos hidráulicos y microbiológicos dentro de las tuberías.

Las características del montaje se preservaron respecto al proyecto desarrollado por María Ximena Trujillo (2011) con el fin de complementar sus mediciones desde los 126 hasta los 281 días de recirculación. Los resultados encontrados en la presente investigación se contrastaron con los resultados de Trujillo (2011) e investigaciones que utilizaron fuente de CODB diferentes a pasto como Muñoz (2005) que utilizó Fosfato diamónico (DAP) y Donoso (2009) que utilizó panela (glucosa) para alimentar el sistema, con el fin de concluir de manera global respecto a la dinámica de crecimiento y decrecimiento de las biopelículas.

Los resultados de las mediciones de laboratorio cuantificables corresponden a las unidades formadoras de colonias dentro de los testigos y a las características en las zonas centrales y en el borde de las tuberías. De las observaciones encontradas en los testigos se determinó una relación entre el espesor de la subcapa laminar viscosa y el de la biopelícula, la cual se interpreta verazmente al contrastarla con la rugosidad relativa dentro de la tubería. Otra de las características cuantificables se refiere a las pérdidas por fricción presentadas por efecto de las biopelículas encontradas, lo cual se representa mediante la diagramación de la gráfica de Moody y de la interpretación de los registros fisicoquímicos. Las mediciones suplementarias se obtuvieron mediante el análisis cualitativo de las tuberías de vidrio instaladas en el montaje y la identificación de los microorganismos presentes en los testigos, con el fin de soportar los resultados encontrados en el desarrollo de la investigación.

2. ANTECEDENTES

La influencia de las biopelículas en redes de distribución de agua potable ha sido estudiado desde la perspectiva hidráulica en muchos estudios como *“Oscillation Characteristics of Biofilm Streamers in Turbulent Flowing Water as related to drag and pressure drop”* (Paul Stoodley, Zbigniew Lewandowski, John D. Boyle, Hilary M. Lappin-Scott., 1998), en donde se determinó que las biopelículas son flexibles y oscilan en el flujo de agua, y que el desplazamiento aumenta como una función de la velocidad de flujo en una curva sinusoidal.

Otro estudio destacable es *“Drinking water biofilm assessment of total and culturable bacteria under different operating conditions”* (L.C.Simoes, N.Azevedo, A.Pacheco, C.W.Keevil & M.J. Vieira, 2006), el cual determinó que los factores que aumentan la cantidad de biopelícula en términos de las Unidades formadoras de colonias (UFC), son el uso de flujo turbulento ($Re=11000$) en lugar de flujo laminar ($Re=2000$), y el uso de PVC como material de tubería.

La Universidad de los Andes también ha realizado investigaciones acerca del efecto hidráulico de las biopelículas; *“Efecto hidráulico de las biopelículas en tuberías de agua potable”* (Latorre, 2005), quien concluyó que la rugosidad absoluta aumenta al transcurrir los días de recirculación por efecto de la biopelícula, también establece que las pérdidas por fricción se incrementan al transcurrir el tiempo, y *“Comportamiento de biopelículas luego de lavados sucesivos en tuberías de agua a presión”* (Reyes, 2005), en la que se determinó que ante lavados sucesivos se podía obtener un control del crecimiento de las biopelículas.

El estudio del desprendimiento de las biopelículas en redes de distribución de agua potable ha sido conducido anteriormente en varias investigaciones, algunas por la Universidad de los Andes; *“Deterioro de la calidad del agua por el posible desprendimiento de las biopelículas en las redes de distribución de agua potable. Estado del arte”*. (Gelves, 2005), en donde se determinaron las metodologías para el control del crecimiento y el desarrollo de las biopelículas; como el suministro de 0.5 mg/l de Cloro, y el incremento en la velocidad hasta un punto en el que se ejerza una fuerza cortante significativa sobre las células fijadas en la biopelícula, la tesis de grado *“Biopelículas: Mecanismos y procesos para removerlas de los sistemas de distribución de agua potable”* (Murcia, 2009) en donde se establece que el alto flujo del agua altera el crecimiento de la biopelícula, pero no evita que nuevas bacterias se adhieran a la superficie de tuberías, ni que las biopelículas sean removidas por completo.

Las bases teóricas fundamentales para el desarrollo del presente modelo se retoman al proyecto de grado *“Modelación de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con Carbono Orgánico Disuelto Biodegradable”* de María Ximena Trujillo (2011), quien desarrolló mediciones en las primeras etapas del proyecto, y quien concluyó que las propiedades físicas de las biopelículas como la visco-elasticidad le confieren propiedades para deformarse absorbiendo o liberando energía del flujo; también aseguró que la estructura filamentosa aumenta la resistencia que tiene hacia el flujo, también observó que el aumento en

el coeficiente de rugosidad absoluta depende de la velocidad del flujo y de la cantidad de sustrato. Así mismo observó que un aumento en la velocidad del flujo aumenta la velocidad de crecimiento de la biopelícula lo cual se sostiene en otros estudios como Lehtola (2006), Percival (1999), los que comprobaron que un aumento en la velocidad propicia la transferencia de nutrientes entre el medio y la biopelícula.

Otros proyectos que representan un pilar para el análisis de la dinámica de crecimiento de las biopelículas son “Velocidad de desprendimiento de las biopelículas en tuberías de distribución de agua potable” de Luis Fernando Muñoz, 2005, y la tesis de grado de Ángela Donoso “Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de biopelículas en redes de distribución de agua potable” del 2009.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 DEFINICIÓN DE BIOPELÍCULA

Se refiere a biopelículas cuando las bacterias y demás microorganismos en la naturaleza tienden a asociarse para asegurar su existencia y adaptarse a diferentes medios ambientes, integrando en una matriz extracelular de sustancias poliméricas a diferentes especies (Beyenal, 2002); la matriz les confiere propiedades de conexión e intercambio genético entre comunidades. Esta transferencia de genes se realiza horizontalmente y gracias a la cercanía de las comunidades pueden llegar a adquirir características genéticas diferentes a las parentales (Jan Dirk van Elsas, Sarah Turner and Mark J. Bailey, 2002).

Las bacterias coordinan sus actividades en las agrupaciones gracias a la “detección de quórum”, por lo general se adhieren a alguna superficie y en algunas ocasiones se unen a partículas bacterianas flotantes.

Dentro de las películas biológicas los microorganismos pueden compartir nutrientes, y actúan en un ciclo inteligente que opera de manera tal que se aseguran los nutrientes y se evita la superpoblación en las capas más profundas, cuando se acentúan en formas de pilares con canales intermedios como se ilustra en la Figura 1.



Figura 1. Estructura de una biopelícula . Fuente: [Base de datos] disponible en: <http://www.uv.es/casanovm/imagenes/biopelícula%20in%20vivo.jpg>

3.2 DESARROLLO Y EVOLUCIÓN DE BIOPELÍCULA

Los microorganismos presentes en el agua de los sistemas de distribución empiezan a adherirse a las tuberías en dos fases; primero se adsorbe la materia orgánica a nivel molecular para posteriormente acoger a los microorganismos pioneros; la segunda fase es la de crecimiento.

También se pueden observar cuatro fases en la evolución de las biopelículas a través del tiempo; en la primera no existe limitación de sustrato puesto que el espesor de la biopelícula es pequeño y por lo tanto se presenta un crecimiento exponencial; la siguiente fase es de retardo, en donde aumenta el espesor y se presenta una limitación de nutrientes en las capas más profundas. En la tercera fase la tasa de crecimiento se reduce considerablemente por la

limitación de nutrientes. Al alcanzarse un espesor igual a la subcapa laminar viscosa se presenta una cuarta fase de desprendimiento de fracciones de biopelículas que son transportadas por el flujo de agua (Picioeanu C, 2001). En los siguientes índices se describirán las etapas evolutivas de las biopelículas.

3.2.1 ACONDICIONAMIENTO DE SUPERFICIE

Los compuestos orgánicos del agua se acumulan en las superficies limpias (en el caso de los sistemas de distribución de agua potable se depositan en las paredes de las tuberías), formando capas neutralizadoras que cambian las propiedades físicas y químicas de la superficie y facilita la aproximación de las primeras células microbianas. La capacidad de unirse a plásticos, metales y cristales depende de las proteínas específicas de la cubierta, y de los apéndices motrices (Piera, 2003). La capa orgánica le sirve como alimento a las bacterias pioneras (Hernández, 2010).

3.2.2 ADSORCIÓN Y FIJACIÓN DE MICROORGANISMOS PIONEROS

Los microorganismos suspendidos en el agua que se aproximan a las paredes de las tuberías, entran en una zona de velocidad de flujo casi nula, en donde la adhesión a la superficie se da de acuerdo con la naturaleza del medio de soporte, a la carga de la superficie y la concentración de alimento en la capa orgánica (Benito Chen, Yaging Li, 2002).

La colonización inicial de la superficie en las tuberías se presenta en las zonas en donde el esfuerzo cortante es mínimo y con una rugosidad adecuada, la adhesión al sustrato orgánico se puede presentar activamente (flagelos, pili, adhesinas, cápsula y carga de superficie), ó pasivamente (por gravedad, difusión, y dinámica de fluidos) (Piera, 2003).

La unión que se forma entre la superficie acondicionada y las bacterias inicialmente es reversible y depende de la carga eléctrica de las bacterias, presentando atracciones electrostáticas ó hidrofóbicas y fuerzas de Van der Waals, con un movimiento Browniano, sin embargo al evolucionar en el tiempo se presentan nuevas estructuras químicas y físicas que la tornan en una unión irreversible (Piera, 2003).

Cuando se presenta la unión irreversible los apéndices bacterianos están totalmente fijados y se inicia la producción de exopolímeros, toda bacteria que entre a la biopelícula deberá iniciar un proceso de modificación genética para producir nuevas proteínas estructurales y enzimas; lo que le confiere propiedades de resistencia a los desinfectantes. Las proteínas cambian a lo largo de las etapas de desarrollo (Singh, 2002).

3.2.3 MADURACIÓN

Se inician actividades de crecimiento y división celular, lo que permite la formación de exopolisacáridos; los cuales son polímeros polianiónicos limosos, a fin de mantener la unión intercelular y con la superficie.

Los exopolisacáridos constan de glicoproteínas de glucosa, fructosa, manosa, entre otros azúcares, fosfolípidos, ácidos nucleicos, entre otros componentes; que son excretados a través de la pared celular de las bacterias, actuando como portador de cargas que le permiten intercambiar iones, para retener nutrientes, y para proteger a las bacterias (Chmielewski RAN & Frank JF, 2003).

Cuando los nutrientes se concentran las células pioneras se empiezan a reproducir, y las células hijas inician la producción de exopolisacáridos, aumentando la superficie de intercambio iónico y por lo tanto el número de colonias y nutrientes (Hernández, 2010). Esto se puede apreciar en la Figura 2.

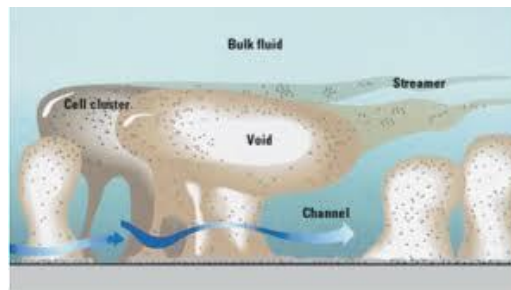


Figura 2. Biopelícula madura. Fuente: [Base de datos] disponible en Photobucket.

Como se ilustra en la Figura 2 los microorganismos se van organizando en forma de pilares con canales intermedios por donde fluye el agua. En una biopelícula madura se pueden encontrar que la mayor parte de su volumen está ocupado por la matriz ligeramente organizada (75-95%) y algunas bacterias (5-25%) (Geesey, 1994).

3.2.4 COOPERACIÓN ENTRE ESPECIES

Gracias a las propiedades de captación física y atracción electrostática que posee el exopolisacárido se atrapan nuevos organismo microscópicos y mediante simbiosis los organismos inmóviles pueden aprovechar los materiales residuales de las especies pioneras y de producir residuos aprovechables para otros microorganismos, a fin de coordinar los recursos bioquímicos de la biopelícula. También es posible desarrollar una biopelícula anaeróbica bajo una capa aeróbica (Piera, 2003).

Gracias a los gradientes cargados que se movilizan por los canales de la biopelícula, se impulsan los nutrientes, enzimas, oxígeno, y otras sustancias a los sitios que lo requieran, y a los alrededores de la biopelícula, donde se encuentran las células factibles, que se reducen con la edad de la biopelícula (en una biopelícula nueva se han encontrado alrededor de 80% de células factibles y en biopelículas antiguas se han detectado solamente 50%) (Wimpenny, 2000).

Se han propuesto tres modelos para explicar el comportamiento de la matriz dentro de la biopelícula: El primero denominado “canal de agua”, propone una transformación fenotípica de las células y una producción de moléculas estructurales de Exopolisacáridos, después de la maduración, en donde se soportan las micro-colonias en una biomasa cónica filamentososa, que forma canales en su base. El segundo modelo es el mosaico heterogéneo, es típico en los sistemas de distribución de agua potable, en donde solo se tiene filamentos que forman canales de agua sin una biomasa cónica. El tercero “Modelo de película densa”, es escaso y se presenta en raras ocasiones, no tiene canales de agua, componiéndose de muchas colonias de la misma especie de bacterias, realizando asociaciones específicas con alguna organización estructural (Hernández, 2010).

3.2.5 DESPRENDIMIENTO Y NUEVA COLONIZACIÓN

Después de la continua división celular, periódicamente algunas células junto con nutrientes, y residuos se desprenderán y repartirán aguas abajo por el flujo de agua, para formar nuevas colonias; los nutrientes y residuos liberados de la matriz pionera serán utilizados para acondicionar la superficie aguas abajo y formar la capa orgánica y así acoger nuevas células (Mayette, 1992).

El desprendimiento se puede presentar mediante cuatro procesos: abrasión, erosión, desprendimiento en masa y depredación. (Kwok W.K, Picioleanu C, Ong S.L, Van Loosdrecht M & Heijnen J.J., 1998). Los dos primeros procesos se refieren a la remoción de pequeños grupos de células de la superficie en la biopelícula; el desprendimiento en masa se refiere a la remoción por fuerzas externas e intensidad del flujo, de grandes fracciones enteras de la biopelícula. La depredación hace referencia a la ausencia de nutrientes, que conducen a un canibalismo de las bacterias más fuertes.

El ciclo de vida de las biopelículas se puede resumir en cinco pasos, que se pueden ver en la Figura 3, en donde se puede observar también el aumento en el espesor de la biopelícula con el tiempo y que con el desarrollo de la película biológica se incrementan el número de colonias presentes.

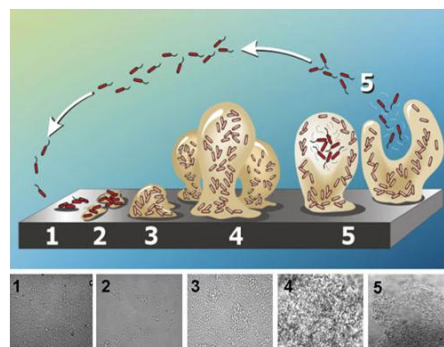


Figura 4. Ciclo de vida Biopelículas. Fuente: [Base de datos] [Consultado el 2 de Abril de 2012]. Disponible en: <http://knol.google.com/k/-/-/3sktw3ldc86j2/rnscvx/biofilm.png>

3.3 ESTRUCTURA DE BIOPELÍCULAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

La estructura de la biopelícula varía de acuerdo con la etapa y con la forma en la que se encuentre; también depende de las condiciones propias de cada sistema de distribución.

3.3.1 MORFOLOGÍA GENERAL

El contenido de cloro altera la composición de las biopelículas, algunas tienden a mantenerse en grupos formando celdas, eliminando a los organismos individuales. Los organismos de las celdas pasan de presentar una forma alargada a una redondeada. La limitación de cloro provoca cambios celulares en el contenido de lípidos, purinas, cationes, membrana citoplasmática, ligados a la resistencia en bacterias gran negativas (Momba, Kfir et al 2000).

También se observa que la actividad en el sistema con cloro es más baja; Al ensayar una mezcla de concentración baja de aminoácidos en dos reactores (el primero sin cloro y el segundo con cloro), usando como fuente de carbono una sustancia húmica, el 60% de las celdas en la biopelícula están respirando en el primer reactor mientras en el segundo sólo el 20% lo hacen (Latorre, 2005).

La estructura también depende de la cantidad de nutrientes disponibles, y del flujo del agua; ante flujos altos, las biopelículas tienden a ser parejas con una superficie lisa y suave, en tuberías de flujo lento, la biopelícula es heterogénea y porosa (Boe-Hansen, 2001).

La adaptación de la biopelícula a su entorno se puede observar ante altos esfuerzos cortantes, en donde se aumenta la producción de sustancias poliméricas extracelulares debido al aumento en la densidad de la biopelícula (Boe-Hansen, 2001). Alguna de las influencias de los factores ambientales también influyen en la morfología; por ejemplo el tipo de microorganismos, la matriz extracelular, y la adherencia a una superficie.

3.3.2 MICROORGANISMOS PRESENTES

La presencia de organismos se encuentra estrechamente limitada por las condiciones ambientales de la zona y por las características regionales, similarmente la composición de microorganismos en el agua fluctúa de un lugar a otro dependiendo del trazo que se le confiera a las líneas de distribución de agua potable; sin embargo la calidad del agua se ve alterada en todos los casos por el desprendimiento y la presencia de agentes patógenos, las condiciones del terreno también representan una variable de contaminación del agua y de los fenómenos de infiltración de materia orgánica que propician la diversidad microbiana.

Se han reportado una gran cantidad de estudios relacionados con la caracterización de los microorganismos presentes en biopelículas de redes de distribución de agua potable; una recopilación de las publicaciones más relevantes se llevó a cabo por el Centro de

Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) en el año 2009, en el que se determinaron 335 microorganismos, de los cuales la mayoría eran bacterias ambientales, seguidas por bacterias patógenas, virus, hongos y levaduras perjudiciales para la salud humana, protozoos y una minoría de cianobacterias (CIACUA, 2009). Entre los principales constituyentes microbiológicos se encuentran las bacterias heterótrofas y la mayoría de organismos que utilizan la materia orgánica biodegradable como fuente nutritiva y energética (Knobelsdorf, 1997).

Típicamente se identifican patógenos de la familia Enterobacteriaceae; organismos como *ycobacterium spp.*, *Legionella pneumophila*, y *P. aeruginosa* pueden adaptarse y persistir en la biopelícula, pues esta suministra entornos nutritivos y también brinda una oportunidad para el uso de estrategias simbióticas (Hernández, 2010). Otros patógenos como *Salmonella*, *Enterobacter* y *Helicobacter pylori* también pueden ser encontrados.

Las principales bacterias que se pueden localizar de acuerdo con la EPA en sistemas de distribución de agua son las de *pseudomonas aeruginosa*, *legionella pneumophila*, *mucobacterium avium*, *klebsiella pneumoniae* y *Escherichia coli*.

Entre los hongos más comunes se observan las especies *Aspergillus* y *Penicillium* altamente riesgosos para la vida humana; entre las levaduras más frecuentes se pueden encontrar las especies *Candida spp.* y *Cryptococcus spp.* Los virus y protozoos típicamente corresponden a aquellos provenientes de heces humanas ó animales (EPA, 1988).

La presencia de microorganismos que no se adaptan a condiciones de escasos nutrientes en sistemas de distribución se atribuye a la presencia de contaminación temporal que permite la adaptación de *Cyptosporidium*, *Giardia*, Virus aún cuando se presenten largos periodos de tiempo sin suministros energéticos ni nutrientes (Hernández, 2010).

Algunos accesorios de los sistemas de distribución de agua potable pueden proveer el crecimiento de cierto tipo de microorganismos, por ejemplo las válvulas cubiertas de caucho proporcionan superficies para el desarrollo de coliformes. Se han determinado ciliados, amebas y flagelados, ooquistes de *cryptosporidium* causante de la criptosporidiosis o diarrea en pacientes inmunosuprimidos (Levinson, 2006).

3.4 HIDRÁULICA DE TUBERÍAS

Al estudiar el comportamiento del agua a través de los sistemas de distribución, se puede abordar mediante las ecuaciones de conservación de masa, energía y momentum basadas en la Física Clásica (Saldarriaga, 2007). Derivándose las ecuaciones básicas de la hidráulica de las pérdidas de energía, se describen los experimentos de Reynolds, la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach y la ecuación del factor de fricción de Colebrook-White (Saldarriaga, 2007).

El experimento de Reynolds consistía en aplicarle tinta a tuberías de diferentes diámetros y caudales, para los que se observaba como se mezclaba la tinta. Consecutivamente se determinaron tres tipos de flujos (Saldarriaga, 2007):

Flujo Laminar: Se refiere al flujo en el cuál el agua se mueve en capas sin que exista intercambio de fracciones de fluido entre ellas, es decir que la masa de agua se transporta en capas unas encima de otras (Saldarriaga, 2007).

Flujo en Transición: Las condiciones del experimento son altamente decisivas para determinar el caudal para el cual este fenómeno se presenta, si la turbulencia remanente en el tanque de entrada es baja, la transición demora en presentarse. Si el grado de aquietamiento inicial es alto, la transición puede presentarse rápidamente. Lo anterior se conserva para cualquier condición de caudal (Saldarriaga 2007).

Flujo turbulento: Ante un movimiento de diferentes velocidades entre capas, se presenta un intercambio de partículas entre las mismas, por lo que el vector de velocidad no está bien definido para las partículas que lo componen. Comúnmente se habla de velocidad promedio para este tipo de flujo, debido a que no es permanente (Saldarriaga, 2007).

Estas postulaciones promovieron la búsqueda de una expresión que describiera los flujos en términos de las fuerzas de presión, las viscosas y las inerciales. Esta expresión se conoce con el nombre de número de Reynolds, que relaciona la velocidad, el diámetro de la tubería y la viscosidad cinemática del fluido en tuberías circulares ante un flujo uniforme.

El número de Reynolds se describe según la Ecuación 1; si este número es menor a 2000, las fuerzas viscosas son las que predominan y el flujo es laminar. El número de Reynolds entre 2000 y 5000, implica un régimen de comportamiento transicional y para valores superiores a 5000 las fuerzas viscosas no tienen mayor influencia, predominando el flujo turbulento.

$$Re = \frac{d * v}{\nu}$$

Ecuación 1. Número de Reynolds. Fuente: (Saldarriaga, 2007).

donde, Re: Número de Reynolds, d: Diámetro de la tubería, v: Velocidad, ν : Viscosidad cinemática (Saldarriaga, 2007).

La rugosidad de la superficie tiende a cambiar con el tiempo, modificando los patrones de flujo, tiempos de residencia, entre otros. Cuando un fluido se encuentra en movimiento siempre que entra en contacto con una pared sólida, según Prandtl, el esfuerzo cortante generado es debido a la viscosidad del fluido, este esfuerzo impacta una zona de dicho flujo llamada capa límite.

La fuerza de presión causada por el esfuerzo cortante explica las pérdidas por fricción en tuberías mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_o = \frac{d}{4} * \rho * g * \frac{H_f}{l}$$

Ecuación 2. Esfuerzo Cortante de Prandtl. Fuente: (Saldarriaga, 2007).

en donde τ_o es el esfuerzo cortante, d es el diámetro de la tubería, ρ la densidad del fluido, g la gravedad, H_f es la pérdida de presión piezométrica y l es la longitud en la que se produce la pérdida.

Cuando un flujo turbulento está en contacto con una superficie sólida, presenta una velocidad cercana a cero e impide la mezcla de las capas de flujo, sobresaliendo las fuerzas viscosas sobre las inerciales, y formando una zona laminar conocida como subcapa laminar viscosa, cuyo espesor se determina por:

$$\delta' = \frac{11.6\nu}{v^*}$$

Ecuación 3. Espesor subcapa laminar viscosa. Fuente: (Saldarriaga, 2007).

donde v^* es la velocidad de corte y ν es la viscosidad cinemática. El espesor de esta capa en relación con la rugosidad caracteriza a los flujos hidráulicamente lisos de los rugosos; cuando $K_s \leq 0,305 \delta'$ el flujo es turbulento hidráulicamente liso, cuando $0,305 \delta' < K_s \leq 6,1\delta'$ el flujo es turbulento transicional, y si por el contrario $K_s > 6,1\delta'$ el flujo es turbulento hidráulicamente rugoso.

Darcy y Weisbach observaron que al fluir el agua en una tubería presentaba una resistencia en forma de fricción, y compilaron sus análisis en la siguiente ecuación:

$$H_f = f * \frac{l}{d} * \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 4. Pérdidas por fricción. Fuente: (Saldarriaga, 2007).

en donde f es el factor por fricción, l es la longitud de la tubería, y v es la velocidad del flujo. La ecuación que describe el factor de fricción es la de Colebrook-White de 1939, se aplica a flujo turbulento y se muestra en la Ecuación 5.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10}\left(\frac{ks}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right)$$

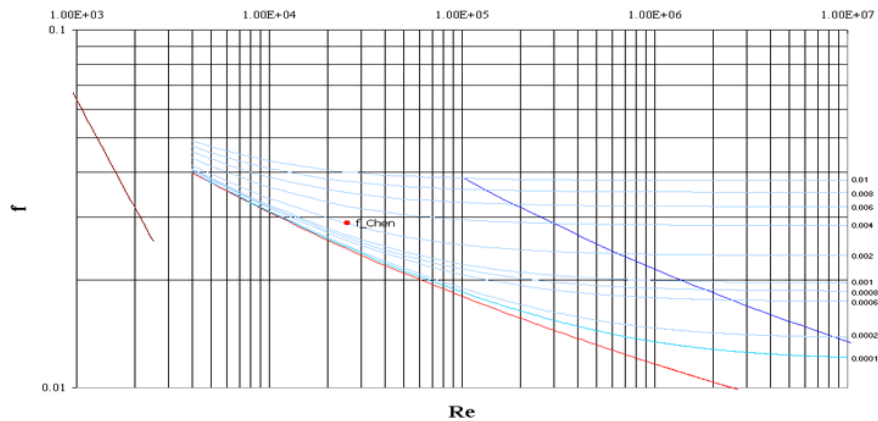
Ecuación 5. Ecuación de Colebrook-White. Fuente: (Saldarriaga, 2007).

en donde ks/d es la rugosidad relativa de la tubería, Re es el número de Reynolds.

El diagrama de Moody, se refiere al trabajo experimental más importante para estudiar la naturaleza del factor de fricción, desarrollado por el ingeniero norteamericano Lewis F. Moody

hacia 1940, basándose en los resultados de Nikuradse y C.F. Colebrook, investigando las pérdidas por fricción en tuberías con rugosidades reales (Saldarriaga, 2007).

El diagrama es una representación en escala doblemente logarítmica del factor de fricción en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería para flujo laminar ($Re < 2000$) hasta flujo turbulento hidráulicamente rugoso, como se muestra en la Gráfica 1.



Gráfica 1. Diagrama de Moody. Fuente: [Base de datos] Disponible en :

<http://www1.ceit.es/asignaturas/Fluidos1/WEBMF/Mecanica%20de%20Fluidos%20I/FAQMFI/FAQ7.htm>.

3.4.1 CONSIDERACIONES HIDRÁULICAS Y RÉGIMENES DE FLUJO

De acuerdo con las condiciones específicas de cada sistema de distribución, se puede caracterizar la predisposición del mismo a la formación y actividad de la película biológica; en estudios anteriores se ha determinado que la incidencia del régimen hidráulico es mucho más significativa que las tasas de materia orgánica presentes en el sistema, para la acción de las biopelículas (Hernández, 2010). Sin embargo no se ha encontrado una expresión que relacione concretamente el crecimiento bacteriano en las biopelículas y los factores hidráulicos (Echavarría, 2003).

Algunas de las características de las tuberías como las pendientes, la elevación, el tamaño entre otras, pueden variar las características de los caudales, y por tanto de las velocidades, lo cual tiene una gran incidencia en la caracterización biológica del sistema en cuestión.

Se ha encontrado que altas velocidades puede aumentar la cantidad de nutrientes y desinfectantes que hacen contacto con las biopelículas, aumentando también el esfuerzo cortante, que incrementa la cantidad de desprendimientos, lo cual se ha aprovechado comúnmente para el control biológico y para el lavado de tuberías (Reyes, 2005). Por el contrario velocidades bajas causan pérdida del desinfectante residual, y propician la aparición de biopelículas (Echavarría, 2003). Se encuentran organizaciones estructurales poco densas y

altas tasas de difusividad. Cuando se habla de velocidades altas se hace referencia a aquellas mayores de 28 cm/s, y velocidades bajas comprenden los 0.8 cm/s.

Se ha observado una dependencia entre el coeficiente de Manning, el espesor de la biopelícula, y la configuración del medio de soporte, en las superficies rugosas se adhieren y desarrollan más rápidamente las biopelículas que en las superficies lisas (Characklis, W., Picologlou, B. & Zilver, N., 1980)

3.5 FACTORES DE CRECIMIENTO DE LA BIOPELÍCULA

Entre algunos de los factores se encuentran la edad y rugosidad de la tubería, la temperatura del agua, las condiciones hidráulicas y el tipo y concentración del desinfectante. A continuación se explicarán los más representativos.

- *Rugosidad:* Las superficies lisas se cubren de microorganismos a una tasa inicial menor que las superficies rugosas, y después de un determinado tiempo la formación de biopelícula se da inevitablemente (Hernández, 2010).
- *Temperatura:* Es el factor más influyente en el crecimiento de las biopelículas en tuberías de agua a presión, ya que afecta las condiciones físicas y químicas del sistema. Se ha reportado que a mayor temperatura mayor desarrollo y crecimiento de microorganismos (LeChevalier, Welch et al 1996); esto puede deberse a que las altas temperaturas promueven las reacciones con los componentes del desinfectante y disminuye el efecto de este. Se ha reportado que cuando un fluido aumenta de 35°C a 40°C, el espesor de la biopelícula aumenta en un 80% (Carvajal L., Gómez Alejandra & Ochoa Santiago., 2006).

Las bacterias crecen en un rango de temperatura entre 15 y 50 °C, y la temperatura óptima para que los microorganismos realicen sus procesos metabólicos es de 15 °C.

- *Condiciones hidráulicas:* determina el espesor máximo que puede alcanzar la biopelícula, que es el espesor de la subcapa laminar viscosa. Cuando se tiene un flujo uniforme se mantiene un espesor de la biopelícula de equilibrio, si la biopelícula alcanza un espesor mayor al de la subcapa laminar viscosa, se inicia un desprendimiento de células planctónicas aptas para la colonización (Gómez, 2008).

Ante altas velocidades el crecimiento de las biopelículas se puede ver obstruido pues se aumenta el contacto con el desinfectante, pero no influencia su adhesión a la superficie de las tuberías, ni logra desprenderlas en su totalidad (Cloete T. E., Westaard D., van Vuuren S.J., 2003). Las fluctuaciones en el flujo modifican las condiciones hidráulicas,

generando nuevos esfuerzos cortantes, que causan así mismo desprendimientos importantes.

Ante un mayor número de Reynolds, y un régimen turbulento, se tienen menores tasas de formación de biopelículas debido a la menor resistencia (menor diferencia entre las fuerzas de atracción célula-superficie y el esfuerzo cortante).

Se debe disminuir el tiempo de residencia para que sea considerablemente menor que el tiempo de adhesión requerido por las células, con el fin de disminuir la posibilidad de adhesión de la biopelícula, y la aparición de características indeseables en el agua (Gómez, 2008).

4.5.1 NUTRIENTES

Existen diversos factores dentro de las tuberías de distribución que favorecen la preservación de nutrientes y proporcionan las condiciones necesarias para el desarrollo de microorganismos (por ejemplo la acumulación de material en la superficie de las tuberías); es indispensable mencionar la capacidad de las bacterias para adaptarse fácilmente a las condiciones de su entorno, acoplando sus necesidades energéticas a la disponibilidad del medio como una medida de evolución.

Las principales fuentes de energía de las biopelículas en sistemas de distribución de agua potable son el carbono orgánico y el amonio, el oxígeno es el aceptor final de electrones que transforma aproximadamente el 50% del carbón absorbido en CO₂ que es una fuente energética de las células, y el 50% restante es usado para crear biomasa, la síntesis está a cargo del carbono, el nitrógeno y el fósforo en una proporción de C:N:P de 100:10:1 (Hernández, 2010).

Otro tipo de nutriente esencial para el desarrollo y formación de la biopelícula es la materia orgánica biodegradable, que se divide a su vez en Carbono Orgánico Disuelto Biodegradable (CODB) que puede ser metabolizado por la bacteria, y Carbono Orgánico Asimilable (COA) utilizado para la generación de biomasa; estos regulan el potencial de recrecimiento de los microorganismos en la red (Momba, Kfir, 2000 & Hernández, 2010). Este es proveniente de las sustancias húmicas que no son muy biodegradables y de los eventos de lluvia que proveen de materia orgánica al sistema.

En varias ocasiones se ha comprobado que controlando la cantidad de materia orgánica biodegradable y el carbono orgánico asimilable se puede controlar y restringir el crecimiento de las biopelículas pero no se puede eliminar totalmente (Vargas, 2004; Boualam, 2003; Falkinham, 2001; LeChevallier, 1996).

Se ha demostrado que el fósforo no se consume en la actividad bacterial y por tanto no representa un factor limitante del crecimiento de la biopelícula; el nitrógeno en cambio representa uno de los factores esenciales para películas biológicas formadas por bacterias

autotróficas, y el elemento fundamental para las actividades celulares es el carbono presente en los ácidos húmicos y en polisacáridos (Hallam, N. B., et al., 2001).

Las principales fuentes de carbono orgánico son los solventes de la tubería, fibra de vidrio-plástico reforzado, lubricantes de válvulas y bombas y partículas de aire; las principales fuentes de fósforo son los fosfatos del agua, las del nitrógeno son los ácidos húmicos y fúlvicos, los nitritos y nitratos del agua, y del azufre son los sulfatos del agua y el ácido sulfúrico.

Una de las medidas adaptativas que exhiben las biopelículas en sistemas de distribución de agua es la utilización como sustrato de los desechos de colonizadores primarios por parte de los microorganismos secundarios que al formar nuevas colonias alimentarán a los microorganismos incorporados; esta es una de las razones por las cuales la escases de nutrientes no elimina la presencia de biopelículas. Otra de las adaptaciones más importantes es la asociación para metabolizar nutrientes disponibles en el medio por medio de enzimas.

El éxito en la disminución del potencial de formación radica en la reducción de nutrientes esenciales (Hernández, 2010). La escases de nutrientes restringe la adhesión de los microorganismos a la superficie, pero no elimina las células suspendidas en el agua.

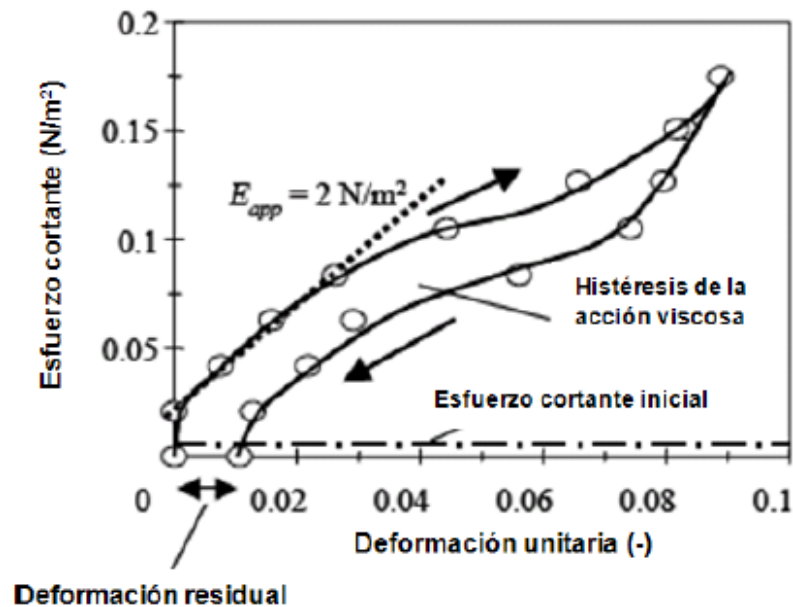
3.6 CONTROL EN LA FORMACIÓN DE BIOPELÍCULA

Las biopelículas se pueden controlar con tratamiento físico, químico y mecánicos (Mittelman, Octubre 1985).

Se ha determinado experimentalmente que las biopelículas cuentan con la propiedad de aumentar su densidad aún bajo presión, presentando alta resistencia al esfuerzo cortante; sin embargo dicha resistencia se puede interferir al revertir el sentido del flujo de agua, debido a que la biopelícula se estructura de manera que resista el flujo en un solo sentido (CIACUA, 2009).

Por debajo del esfuerzo cortante de fluencia, la biopelícula se comporta como un sólido visco-elástico; al aumentar el esfuerzo cortante el comportamiento pasa a ser un fluido visco-elástico y se deforma permanentemente. La biopelícula sufre deformaciones (formación de cuellos), hasta llegar a acumular 20% de deformaciones antes de llegar a la falla (Stoodley P, Wilson S, Cargo R, Piscitelli C, Rupp CJ, 2001).

El comportamiento de una biopelícula se puede asimilar al de cualquier material, en donde existe un punto en el cual no resiste más esfuerzos de cortante, no se presenta ninguna adhesión a la superficie de la tubería, y se inicia el proceso de desprendimiento de la matriz; esto se puede observar en la Gráfica 2.



Gráfica 2. Comportamiento ante esfuerzo cortante de la biopelícula. Fuente: (Stoodley P, Wilson S, Cargo R, Piscitelli C, Rupp CJ, 2001).

Para evitar el crecimiento de las biopelículas se deben considerar alternativas de tratamiento como filtración y ozonización de acuerdo al contenido de Carbono Orgánico Disuelto Biodegradable (CODB), así como el tipo de desinfectante más propicio; entre los que se encuentran el ozono y la luz ultravioleta, aunque Lund y Ormerod en 1995 aseguraron que se producen mayores niveles de biomasa con luz ultravioleta.

Con el uso adecuado de un desinfectante residual en los sistemas de distribución de agua potable, no se produce una relación entre la calidad físico-química del agua y la formación ó recrecimiento de la biopelícula (MNB Momba, N Makala, Abril 2004).

Un mecanismo de control para la formación de biopelículas es evitar los sitios de estancamiento a lo largo del sistema de distribución (MNB Momba, N Makala, Abril 2004). También se debe evitar mantener el material de las tuberías a una edad muy avanzada puesto que esto ocasiona un decaimiento significativo del desinfectante residual.

Un método efectivo para desinfectar el agua es un biocida, que consiste en la circulación del agua por dos electrodos fijos (aleaciones de cobre y plata) con diferencia de potencial, actuando como un ionizador.

Meckes, Haught, Dosani, Clark y Sivaganesan (2000), sustentaron que con el incremento del pH del agua se puede controlar la formación de biopelículas; después de 24 horas de modificado el pH, no se aprecia el efecto, la reducción considerable en la densidad de la biopelícula se muestra con $\text{pH} = 5.0$, y al disminuir el pH se disminuyen en mayor medida la cantidad de microorganismos.

Se ha reportado que el control de las biopelículas, debe consistir en un método integrado combinando diferentes tipos; como un cambio en el régimen de la dosis de desinfectante (LeChevallier et al 1990), y una reducción en materia orgánica (van der Kooji et al. 1995).

3.7 DESPRENDIMIENTO DE BIOPELÍCULA

Referente a la desagregación de la matriz de microorganismos y exopolímeros que produce la liberación de un fragmento de masa; esto se puede realizar mediante mecanismos biológicos, como la presencia de enzimas que degradan la matriz, burbujas de gas al interior de la biopelícula (disminuyen la fuerza interna), reducción de la tasa de crecimiento, disponibilidad de cationes y falta de comunicación entre células (Hunt, Werner, Huang, Hamilton & Stewart, 2004).

Cuando se presenta escases de nutrientes y mucha competencia dentro de la biopelícula el desprendimiento es una opción favorable para colonizar otras secciones de la tubería en la que no exista sobrepoblación (Paula Watnick and Roberto Kolter, 2011).

La redundancia en los sistemas de distribución de agua potable causa cambios en la dirección del flujo, generando desprendimientos del material adherido. Las altas velocidades también ocasionan esfuerzos cortantes adicionales sobre las biopelículas generando desprendimientos. (Gelves, "Deterioro de la calidad del agua por el posible desprendimiento de las biopelículas en redes de distribución de agua potable estado del arte", 2005).

A mayores fuerzas de desprendimiento se forman estructuras de biopelículas lisas y más densas, con una mayor posibilidad de desarrollar estructuras mecánicamente estables y con la matriz de exopolisacáridos comprimida (Rochex, A., Godon, J.J., Bernet, N., Escudíé, R., 2008).

Si se presentan desprendimientos en masa pequeños, los efectos de cortante sobre la biopelícula, al igual que la hidrodinámica del sistema cambia, y la biopelícula se torna más heterogénea y pueden causar más desprendimientos (Telgman, Horn y Morgenroth, 2004). El desinfectante residual no tiene tantos efectos en los desprendimientos en masa como en los desprendimientos de células individuales.

Para desprender una biopelícula el efecto de cortante aplicado debe ser el doble del efecto de cortante inicial (Stoodley P, Wilson S, Cargo R, Piscitelli C, Rupp CJ, 2001). Clasificar la velocidad de desprendimiento de acuerdo a la velocidad de crecimiento; cuando crecen a 0,03 m/s, se presenta el desprendimiento cuando la velocidad es de 1.0 m/s, en otros casos para velocidades de crecimiento iguales a 1 m/s; el desprendimiento se presentaba a 2.5 m/s, y la cantidad de biopelícula desprendida era considerablemente menor que para biopelículas que crecen a velocidades menores (Klapper, I., Rupp, C.J., Cargo, R., Purvedorj, B. and Stoodley, P., 2002). Otros estudios afirman que la velocidad de desprendimiento depende del material de

la tubería siendo para tuberías muy lisas igual a 0.9 m/s y para tuberías rugosas de 1.5 m/s (Friedman, 2001).

Se han reportado velocidades para desprender depósitos disueltos y cohesivos entre 0.6 y 0.9 m/s y para remover tubérculos de las tuberías velocidades mayores a 1.4 m/s (Carrière, Gauthier, Desjardins, y Barbeau, 2005; Vreeburg y Boxall, 2007; Carvajal, Gómez, y Ochoa, 2007). A mayores velocidades se genera menor adhesión de células, y una menor relación de células sésiles (que se encuentran en la biopelícula) a células suspendidas.

4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

De acuerdo con las características físicas presentes en las redes de distribución de agua potable y con el objetivo de comparar la incidencia de las biopelículas en las mismas, se optó por seguir los modelos propuestos en investigaciones anteriores conducidas por la Universidad de los Andes; de acuerdo con los resultados encontrados en tesis previas, se dispuso del modelo propuesto por Ángela Donoso en su tesis “*Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de biopelícula en redes de distribución de agua potable*”; adecuado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes.

El montaje fue modificado recientemente por María Ximena Trujillo en su tesis “*Modelación física de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono orgánico disuelto*”, a fin de ampliar los resultados encontrados por Trujillo; se pretende abordar el mismo modelo de su tesis, que se describirá en la presente sección.

5.1 PLANTA FÍSICA

El modelo modificado por María Ximena Trujillo está constituido por un tanque elevado conectado a tres tuberías en PVC de 4 pulgadas de diámetro; las tuberías de los extremos tienen un tanque de vidrio de 2 pulgadas de diámetro nominal, conectado lateralmente mediante dos Tees con reducción de diámetro; esto se describe detalladamente en la Sección 5.1.1.2 del presente proyecto.

Las tuberías de PVC llegan a unos vertederos que conducen el agua a un tanque de almacenamiento, a este último se conectó una tubería de bombeo en PVC de 4 pulgadas de diámetro que llega al tanque elevado; de este último sale una tubería de rebose de 6 pulgadas de diámetro nominal que llega hasta el tanque de almacenamiento.

La información descrita anteriormente se puede detallar en la vista en planta del modelo en la Figura 5 y en la vista de perfil del modelo de recirculación de la Figura 6.

Figura 5. Vista en planta del modelo experimental

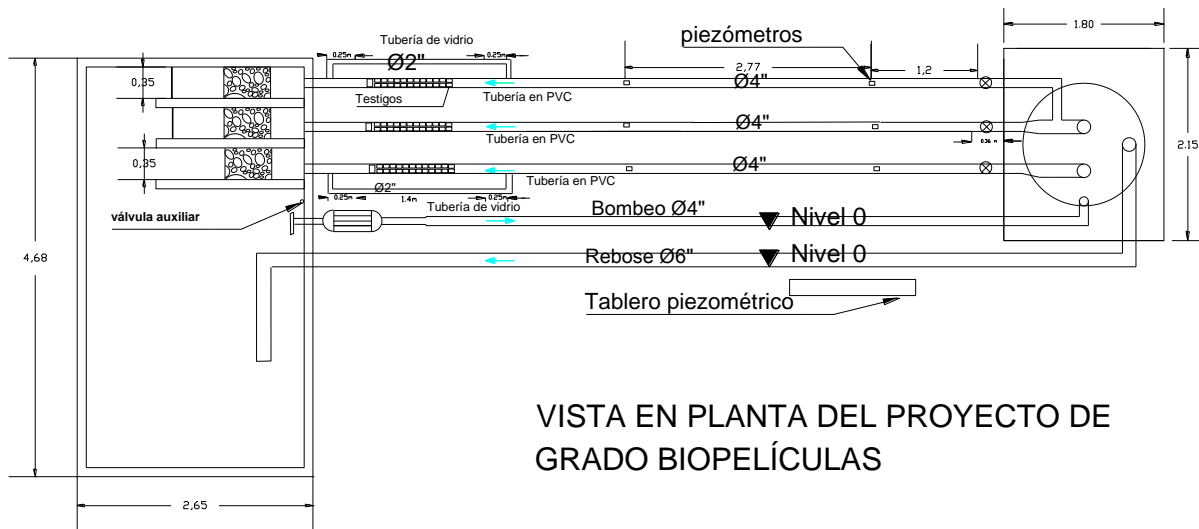
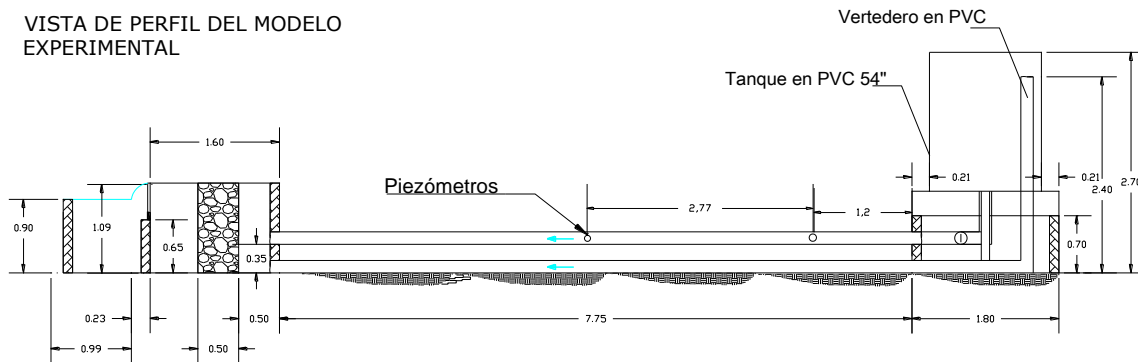


Figura 6. Vista de perfil del modelo experimental.

VISTA DE PERFIL DEL MODELO EXPERIMENTAL



4.1.1 Tuberías de PVC

Se estableció una longitud libre de accesorios desde el tanque elevado igual a 3.97 metros lineales; fue precisamente en dicho punto en el cuál se instalaron los últimos 4 piezómetros para cada tubería, a fin de registrar las pérdidas por fricción aguas abajo. Los 4 piezómetros para registrar las pérdidas por fricción aguas arriba, se ubicaron a 1.2 metros lineales del codo conector entre la tubería y el tanque elevado. Estas medidas fueron establecidas a fin de cumplir con la distancia mínima para que el flujo se estabilice (10 veces el diámetro de la tubería) como se ilustra en la Figura 5.

La disposición espacial de los cuatro piezómetros dentro de la tubería en cada uno de los puntos mencionados anteriormente del montaje, se esboza en la Figura 7.

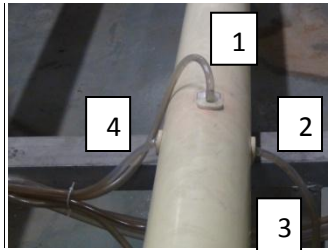


Figura 7. Disposición espacial de los piezómetros en la tubería de PVC.

Como se observa en la Figura 7 se dispusieron los piezómetros de tal manera que el primero quedase en la parte superior del tubo, el segundo en orden ascendente al lado derecho, el tercero en la parte inferior de la tubería y el cuarto al lado izquierdo. Esta numeración se repite aguas abajo, por tanto en la tubería de PVC identificada con el número 1 (ver Figura 8) se tienen los primeros 4 números para los 8 piezómetros; en la tubería número 2 se tienen los piezómetros del número 5 al No.8, y en la tubería número 3 se tienen los piezómetros del número 9 al No. 12.

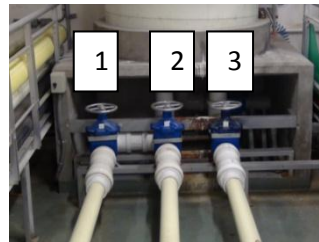


Figura 8. Tuberías de PVC en el montaje.

4.1.1.1 Testigos

Son secciones extraídas de la tubería que permanecen en contacto con el agua por el diámetro interno, mientras que por el externo se adhieren a una tapa y se sujetan a la tubería con una abrazadera por cuestiones de seguridad. Basado en la metodología de (Trujillo, 2011) se conservó la ubicación de los testigos extraíbles aguas abajo de las tuberías, como se ilustra en la Figura 5 .

4.1.1.1.1 Testigos de borde

Es el testigo que se encuentra aguas abajo que tiene una mayor área y se encuentra de manera individual , sus dimensiones comprenden 4 centímetros de ancho y 10 centímetros de largo, como se puede apreciar en la Figura 9.



Figura 9. Testigos de borde y de centro.

4.1.1.1.2 Testigos de Centro

Se refiere a los testigos de menor área que se encuentran ubicados en parejas, tienen 4 centímetros de ancho y 7 centímetros de largo, se dispuso de un espaciamiento entre testigos de 1 centímetro tanto transversal como longitudinalmente. En cada una de las tuberías se instalaron 24 testigos los cuales se pueden observar en la Figura 11 y en la Figura 9.

4.1.1.2 Tubería de vidrio

Se encuentran ubicadas aguas abajo de las tuberías en PVC de los extremos; cada tubería en vidrio se conectó por medio de dos Tees con reducción de 4 a 2 pulgadas y dos codos de 2 pulgadas, unidos por un niple a una tubería de vidrio de 1.34 metros de longitud, como se observa en la Figura 10.



Figura 10. Conexión de los tubos de vidrio a la tubería de PVC.

Las tuberías de vidrio cumplen con el objetivo de caracterizar cualitativamente el crecimiento y el espesor de las biopelículas en el interior de las tuberías de vidrio aunque no necesariamente represente una caracterización del crecimiento de las biopelículas en el sistema, debido a que se prevén cambios de la dirección del flujo; la presencia de reducciones y uniones, generan cambios en las condiciones hidráulicas. La disposición de estos dispositivos se muestra en la Figura 5 y en la Figura 11.



Figura 11. Testigos de centro y tubos de vidrio en el montaje.

4.1.2 Válvulas de control

Cumplen con la función de establecer un caudal para recirculación y variarlo para la toma de medidas de pérdidas por fricción; el caudal que se fluctúa debe limitarse a un flujo turbulento, con números de Reynolds entre 2000 y 80000, que garantiza una ubicación deseable en el diagrama de Moody.

El detalle de las válvulas en el modelo se ilustra en la Figura 5, en esta se puede ver que cada válvula se encuentra a 0.18 metros del codo que conecta a el tanque elevado con la tubería de PVC.

Las válvulas se encontraron a una apertura diferente en recirculación normal para cada tubería; en la identificada con el número 1 y en la número 3, se dispuso una apertura de 5 vueltas es decir están a un 16% abierta, y la identificada con el número 2 se encuentra abierta 31 vueltas, es decir se encuentra a un 100% abierta.

La apertura de la válvula tres se mantuvo de la manera indicada anteriormente hasta el 28 de Febrero de 2012, cuando en la tubería 3 se modificó la velocidad de flujo mediante la medición del caudal con un sensor Ultraflux UF801-P, hasta establecer una velocidad de 2 metros por segundo; esto se obtuvo con una apertura de la válvula de 6 vueltas que se fijo hasta el último día de recirculación del sistema el 15 de Junio de 2012.

4.1.3 Tanque elevado

Su función principal es el de caracterizar una altura piezométrica satisfactoria, para obtener las velocidades necesarias para tomar las pruebas piezométricas y para la recirculación diaria del sistema. En este se dispone un costal de pasto Kikuyo, como fuente de carbono como se puede observar en la Figura 12.



Figura 12. Tanque elevado del montaje.

4.1.4 Sistema de recirculación

Desde el tanque de almacenamiento se dispuso una bocatoma para que el agua sea bombeada hasta el tanque elevado como se muestra en la Figura 6; a continuación se explica el principal componente del sistema de recirculación.

4.1.4.1 Motobomba

Cumple con la función de redirigir la dirección del flujo para recircular el agua en el sistema, el equipo instalado en el sistema fue el mismo utilizado para la tesis de María Ximena Trujillo, la referencia que se proporcionó al sistema se puede observar en la Figura 13.



Figura 13. Bomba del sistema de recirculación.

4.1.5 Tablero piezométrico

Se dispuso al lado de las tuberías de PVC, a una distancia suficiente para la conexión de los piezómetros, a fin de determinar las pérdidas por fricción causadas por la biopelícula. Se realizaron medidas una vez por semana; a fin de realizar comparaciones con trabajos anteriores, se efectuaron 10 pruebas en cada medición, para cada tubería variando el caudal (Trujillo, 2011; Hernández, 2010; Donoso, 2009). El dispositivo se puede observar en la Figura 14.



Figura 14. Tablero piezométrico para la toma de pérdidas por fricción.

4.1.6 Vertederos

De acuerdo con la normativa colombiana RAS 2000, y a la disposición de redes de acueducto que pasan de un ducto a presión por bombeo a un ducto a presión por gravedad, se debe

garantizar el perfecto funcionamiento mediante un tanque para el quiebre de la presión; este debe tener un vertedero y un conducto para el agua vertida. Adicionalmente el vertedero se utiliza para realizar aforos de caudales.

En el sistema se instalaron tres vertederos triangulares pues son más precisos, con un limnómetro mecánico para la toma de la altura de la lámina de agua, como se observa en la Figura 15.



Figura 15. Vertederos con limnómetro.

Ya que el modelo utilizado fue el mismo realizado por María Ximena Trujillo, y las tuberías se mantuvieron constantes, las curvas de calibración de vertederos determinadas en su proyecto de grado son aplicables a las condiciones utilizadas en el presente proyecto de grado. Los resultados determinados con las curvas se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Ecuación de caudal por vertedero.

VERTEDERO	H_0 (cm)	ECUACIÓN
1	10,78	$Q(L/s) = 0,0086(H_L - H_0)^{2,46}$
2	10,61	$Q(L/s) = 0,0047(H_L - H_0)^{2,65}$
3	10,07	$Q(L/s) = 0,01(H_L - H_0)^{2,58}$

en donde H_0 es la altura inicial del vertedero cuando la bomba se encuentra apagada; este valor varía debido a que el nivel del agua no es constante, pues se pueden presentar fugas y también la temperatura fluctúa influyendo en los fenómenos de evaporación. Por tanto el valor de H_0 no es una constante y debe medirse en cada fecha de pruebas piezométricas, para determinar la velocidad del flujo en cada ocasión. Los valores de velocidad enunciados anteriormente solo corresponden a una velocidad promedio determinada con el sensor.

5. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

A fin de comparar los resultados del presente proyecto con trabajos anteriores se seguirán los diseños experimentales establecidos por (Trujillo, 2011; Hernández, 2010; Donoso, 2009); respecto a la determinación de la demanda de cloro y fuente de carbono, con las modificaciones pertinentes que se esbozan a continuación.

5.1 Fuente de Carbono

De acuerdo con las condiciones que se presentan en las fuentes de agua, y a la factibilidad de que se incorporen materiales exógenos provenientes del ambiente, la fuente de carbono con mayor probabilidad de entrar en la red de distribución es *Pennisetum clandestinum* (Pasto Kikuyo), comúnmente encontrado en regiones ecuatoriales como Colombia.

De acuerdo con investigaciones anteriores, una aproximación a la realidad se puede presentar al colocar dos costales con *Pennisetum clandestinum* en los dos tanques de almacenamiento del modelo (Trujillo, 2011; Hernández, 2010; Donoso, 2009); para dichos proyectos el pasto se suministró cada 15 días, puesto que la demanda de carbono en el periodo inicial de crecimiento de las biopelículas es menor (Vergara, F and Cox, G, 2002). El pasto suministrado en una de las medidas del presente montaje se puede apreciar en la Figura 16.



Figura 16. Pasto kikuyu. *Pennisetum clandestinum*

Mientras que al inicio del presente proyecto las biopelículas tenían una edad de 4 meses aproximadamente, la demanda de carbono se incrementó puesto que aumentó la biomasa de la misma hacia mediados de Febrero del 2012, siendo necesario suministrar dos costales de pasto Kikuyo cada 8 días.

5.2 Aproximación Operacional

Para que el modelo se aproxime a la realidad, se adoptó un tiempo de recirculación de 8 horas diarias. A fin de evaluar el impacto de la velocidad de las tuberías en la formación de las biopelículas, se estableció una apertura de la primera válvula de 5 vueltas para obtener una velocidad de 1 m/s, en la segunda válvula una apertura máxima para abordar una velocidad de 3 m/s, y en la última válvula una apertura de 5 vueltas para una velocidad de 1.5 m/s. El 28 de Febrero de 2012 se aumentó la velocidad de la última válvula en 1 vuelta para sostener una velocidad de 2 m/s dentro de la tubería número 3. El procedimiento de recirculación diario se muestra en el Anexo 10.1.

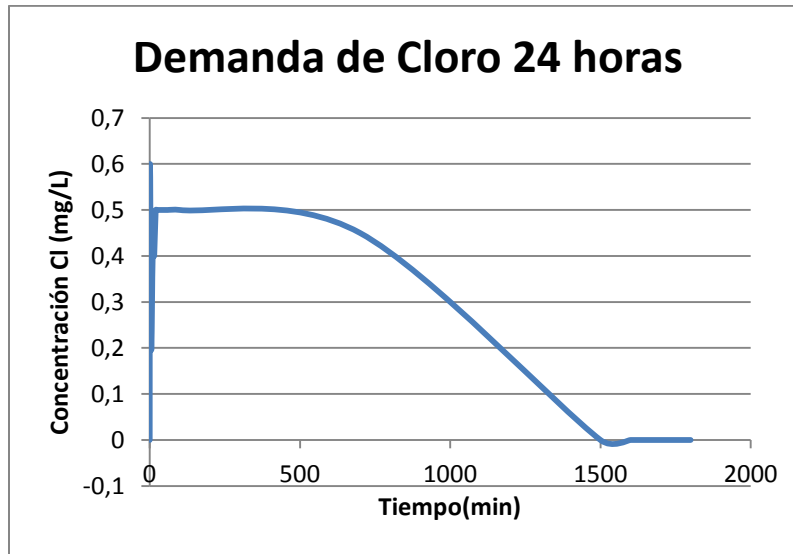
En el Anexo 10.1 se puede ver que las pérdidas de agua por fugas se evitan al revisar el sistema antes de encenderlo todos los días, a fin de no alterar los resultados del proyecto y evadir posibles irregularidades en las velocidades y la altura del nivel de agua. También se esboza de manera muy general el procedimiento de medición de testigos y piezómetros en lo relacionado con la operación del sistema, es decir en la variación del caudal y el régimen de flujo que se influencia por la realización de medidas.

5.2.1 Cloro Residual

Para preservar las condiciones que se presentan en un sistema de distribución de agua potable fue necesario conservar la concentración de cloro mínima en el modelo; según la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de la Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (la concentración de cloro residual libre dentro de cualquier punto de la red se debe mantener entre 0.3 y 2 mg/L), para que este modelo sea comparable con resultados anteriores se estableció la concentración de cloro residual en 0.5 mg/L, para tal fin se hizo uso de hipoclorito de calcio HTH granular, desde el 15 de Diciembre de 2011.

Para determinar la cantidad de cloro que debe ser introducida al sistema, se debe considerar que el agua en el modelo es recirculada 8 horas diarias y que el cloro residual se ve disminuido a través del tiempo, tomando como referencia las curvas de cloro residual del modelo, se determinó que la concentración de $(\text{ClO})_2\text{Ca}(s)$ inicial es de 20.5 g (Trujillo Gómez, 2011).

Sin embargo la demanda de cloro aumenta a través del tiempo y es necesario monitorear la concentración de cloro; se determinó el 13 de Enero de 2012 que la concentración de cloro residual estaba por debajo de 0.5 mg/L, con un suministro de 20.5 g de $(\text{ClO})_2\text{Ca}(s)$. Por tanto fue necesario recalcular la cantidad de $(\text{ClO})_2\text{Ca}(s)$ a suministrar mediante curvas de cloro residual como la esbozada en la Gráfica 3, en donde se determinó que la concentración a suministrar debía ser de 47.6 g $(\text{ClO})_2\text{Ca}(s)$ para mantener una concentración de cloro residual en el modelo igual a 0.5 mg/L. Sin embargo la concentración de cloro residual siguió fluctuando y fue necesario realizar una segunda curva de calibración de cloro el 27 de Abril de 2012 en la que se estableció una cantidad de $(\text{ClO})_2\text{Ca}(s)$ igual a 37.2 gramos.



Gráfica 3. Demanda de Cloro 24 horas. Concentración de 57.6 mg/l de $(ClO)_2Ca$ (s).

Como se ilustra en la gráfica anterior la concentración de cloro residual se mantiene por 12 horas en 0.5 mg/L, y por tanto es necesario suministrar hipoclorito de calcio cada 12 horas, para que no llegue a cero.

5.3 Control Cuantitativo a la formación y el desarrollo de biopelículas.

Los testigos trazados en la tubería son un instrumento para medir la biomasa de la biopelícula, el espesor y la velocidad de crecimiento de la misma; esto se diseñó mediante dos mecanismos diferentes; el primero corresponde a los testigos de centro y los testigos de borde, que operan de la misma manera pero cada uno determina características de crecimiento en locaciones diferentes dentro de la tubería. El segundo instrumento utilizado para cuantificar el comportamiento de las biopelículas es la medición de pérdidas por fricción en los piezómetros y las características hidráulicas que se ven influenciada por la formación de películas biológicas en sistemas de distribución de agua potable.

5.3.1 Medición de Testigos

El procedimiento utilizado para extraer los testigos de borde y de centro es el mismo; este se realizó una vez a la semana desde el 18 de Enero de 2012 hasta el 8 de junio de 2012. El diagrama de flujo del procedimiento se muestra en el Diagrama 1.

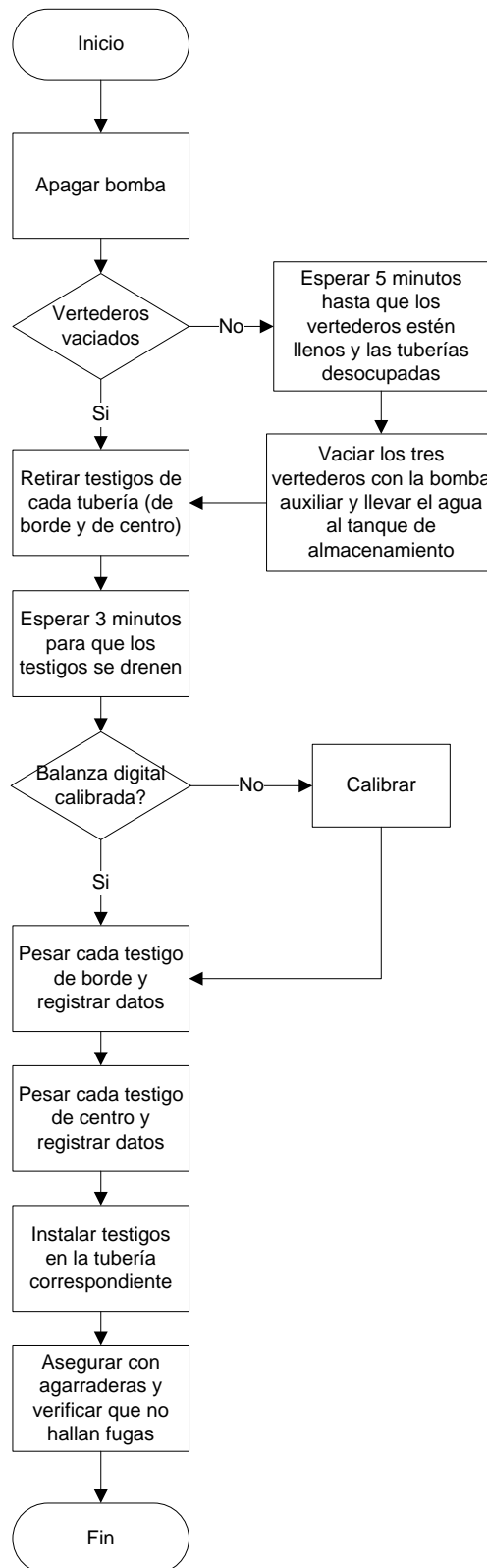


Diagrama 1. Procedimiento de extracción de testigos.

El Diagrama 1 muestra que una vez que se extraen los testigos, es necesario dejarlos secar para que el exceso de agua no altere el pesaje de los mismos; este tiempo se mantuvo constante en todas las mediciones y para todos los testigos, aproximadamente 5 minutos.

El pesaje de los testigos se realizó en una balanza digital previamente calibrada, luego de registrar los datos se colocan los testigos en su lugar dentro de la tubería y son atornillados mediante abrazaderas. El peso obtenido en los testigos de borde es acumulado, por tanto debe restársele el peso de la fecha inicial para determinar el espesor de la biopelícula.

A diferencia de los testigos de borde, el peso de los testigos de centro es el registrado en la fecha de medición, y por ende el espesor de las biopelículas se calcula de manera diferente para cada tipo de testigos, como se muestra en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Fórmulas espesor de biopelículas según tipo de testigo.

CALCULO DE TESTIGOS SEGÚN TIPO		
TIPO	Peso de Biomasa	Espesor Biomasa
BORDE	$peso_{biomasa} = Peso_{testigo_i} - Peso_{inicial}$	$espesor = \frac{peso_{biomasa}}{\rho * Area_{testigo}}$
CENTRO	$peso_{biomas} = Peso_{conBiopel} - Peso_{sinBiopel}$	$espesor = \frac{peso_{biomasa}}{\rho * Area_{testigo}}$ $e_{prom} = \frac{e_{testigo_i} + e_{testigo_{i+1}}}{2}$

El peso sin biopelícula de los testigos de centro se refiere al peso del testigo inicial, registrado en la construcción del montaje, por María Ximena Trujillo.

5.3.1.1 Cuantificación por Método de Escobillón

Mediante la selección de algunos testigos de centro, se pretendía calcular más exactamente la magnitud de la biopelícula, y de sus colonias; El procedimiento escogido fue un recuento en placa por método escobillón, para la determinación de las Unidades Formadoras de Colonias en área (UFC/cm²) desarrollado por el Laboratorio de Ecología y Microbiología Ambiental (LEMA) de la Universidad de los Andes. Este procedimiento se desarrolló en estudios anteriores y se decidió conservar con el fin de obtener resultados más precisos (Trujillo Gómez, 2011).

5.3.1.2 Velocidad crecimiento de biopelículas

La velocidad inicial se refiere a la tasa en la cual se desarrolló la biopelícula en el primer testigo, después de los 206 días de recirculación del sistema, hasta el primer día de pesaje del testigo en cada tubería; esta se expresa en micrómetros por día y se determina según la Ecuación 6.

$$velocidad_{crecimiento} = \frac{espesor_j * testigo_1 + espesor_i * testigo_1}{tiempo_{i+1} - tiempo_i}$$

Ecuación 6. Velocidad de crecimiento de la biopelícula en los testigos.

Otro tipo de evaluación del crecimiento de las biopelículas en las tuberías es la velocidad de regeneración de la misma; la cual solamente se toma en los testigos de centro después de haber sido limpiados por completo y colocados nuevamente en recirculación por un periodo de tiempo determinado; la expresión utilizada es la de la Ecuación 7.

$$vel_{regeneración} = \frac{espesor\ final - espesor\ inicial}{No\ días\ intervalo}$$

Ecuación 7. Velocidad de regeneración de las biopelículas en testigos de centro.

5.3.2 Aproximaciones Hidráulicas de las tuberías en presencia de biopelículas

Una de las principales implicaciones de las biopelículas en el comportamiento hidráulico de las tuberías se presenta en las pérdidas por fricción; por tal motivo es necesario realizar mediciones para cuantificar sus implicaciones mediante el registro con piezómetros. En el presente proyecto se utilizó un procedimiento experimental comparable con montajes anteriores; este se muestra en el Diagrama 2 en donde se describe la rutina de trabajo semanal.

También es posible calcular la subcapa laminar viscosa como indicativo del comportamiento hidráulico de los microorganismos dentro de las tuberías; estas mediciones se hicieron con el fin de registrar los resultados en un diagrama de Moody, y complementar los resultados obtenidos por María Ximena Trujillo en el 2011.

Para el cálculo de las pérdidas por fricción y la subcapa laminar viscosa es necesario aplicar las ecuaciones del número de Reynolds con la velocidad determinada de la siguiente manera:

$$v = Q/A$$

En donde el caudal se determina de la calibración de los vertederos y el área corresponde a $\pi * \frac{\varphi^2}{4}$. Otra de las ecuaciones que se implementan es la de Darcy-Weisbach para el factor de fricción y la ecuación de Colebrook-White para determinar la rugosidad absoluta.

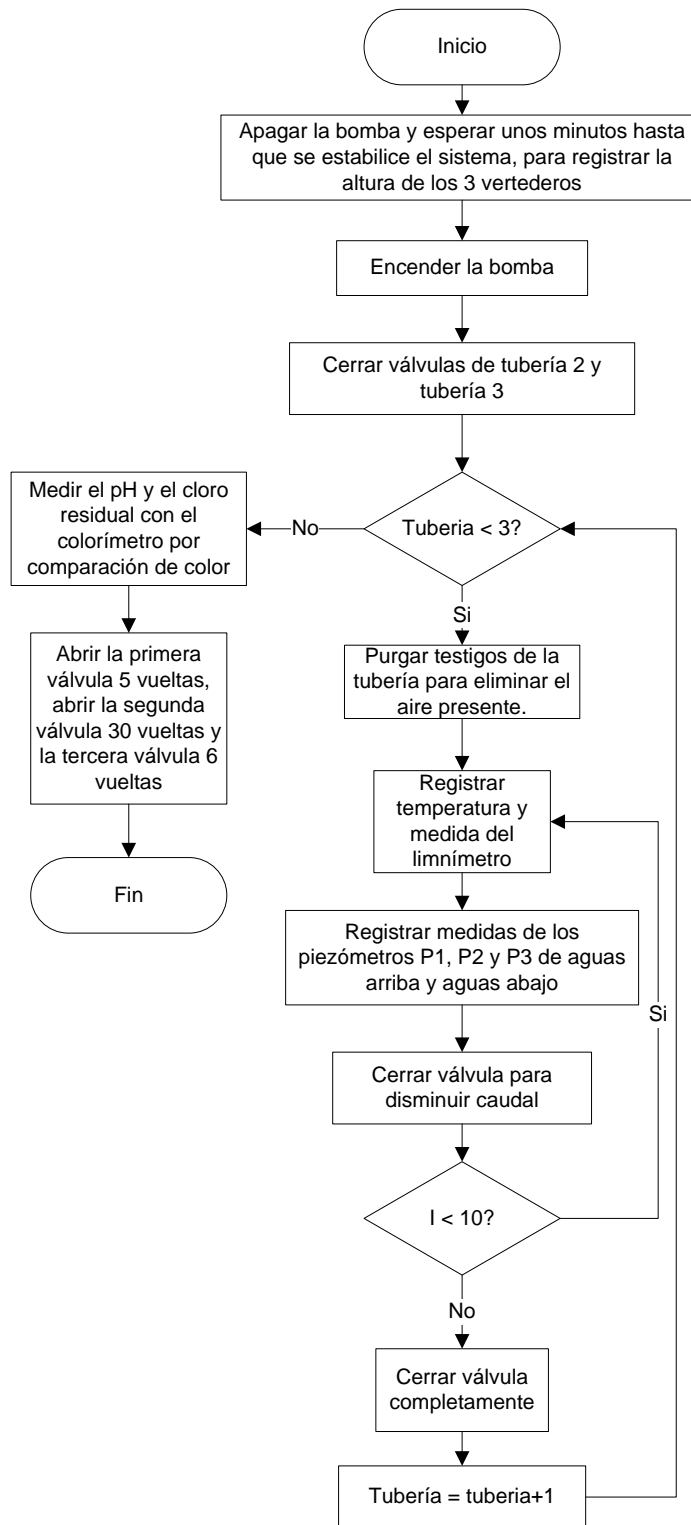


Diagrama 2. Procedimiento para el registro de las pérdidas por fricción en el montaje.

El orden en el que se calcularon los parámetros hidráulicos para cada medición y las ecuaciones que se utilizaron se muestra en el Cuadro 3, este es el procedimiento que se debe seguir para todas las tuberías, las características de cada una se muestran en el Anexo 10.3.

Cuadro 3. Procedimiento iterativo para la determinación hidráulica.

Orden	Ecuación	Determinar	Unidades
1	$\mu_0 = \mu_{\text{tabla de } T_{\text{max}}} - \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{medida}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} * (\mu_{\text{tabla de } T_{\text{max}}} - \mu_{\text{tabla de } T_{\text{min}}})$	μ_0	Kg/(m*s)
2	$\rho_0 = \rho_{\text{tabla de } T_{\text{max}}} - \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{medida}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} * (\rho_{\text{tabla de } T_{\text{max}}} - \rho_{\text{tabla de } T_{\text{min}}})$	ρ_0	kg/m ³
3	$v = \frac{Q}{\rho}$	v	m ² /s
4	$Q = 0.0085(H_L - H_D)^{2.45}$	Q	m ³ /s
5	$v = Q * \frac{4}{\pi * \phi^2}$	v	m/s
6	$Re = \frac{d * v}{\nu}$	Re	-
7	$H_f = (H_{\text{prom1}}) - (H_{\text{prom2}})$	H_f	m
8	$f = H_f * \frac{d}{l} * \frac{2g}{v^2}$	f	-
9	$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$	k_s	m
10	$\tau_0 = \frac{d}{4} * \rho g * \frac{H_f}{l}$	τ_0	$\frac{Kg}{m^2}$
11	$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$	u_*	$\frac{m}{s}$
12	$S^* = 11,6 * \frac{\mu}{u_* \rho}$	S^*	μm

El procedimiento para el cálculo de los componentes hidráulicos dentro de las tuberías se ilustra con un ejemplo en el Anexo 10.2 y en el Anexo 10.4 se puede encontrar los registros de los cálculos realizados para el presente proyecto.

5.3.3 Medidas fisicoquímicas

Se realizó un registro diario del nivel de cloro y del pH, del montaje, con un colorímetro para cloro libre por comparación de color, como se muestra en la Figura 17.



Figura 17. Colorímetro por comparación de color para cloro libre.

5.4 Control Cualitativo a la formación y el desarrollo de biopelículas.

Para tener un registro completo del crecimiento, desarrollo y desprendimiento de las biopelículas, se mantuvo un seguimiento visual, y de la composición de la comunidad de los microorganismos.

5.4.1 Registro Visual

Con la instalación de dos tubos de vidrio en los extremos de las tuberías, se realizó un seguimiento fotográfico de la formación y el crecimiento de la biopelícula en las tuberías de vidrio, y una aproximación a la formación en las tuberías de PVC, pero se debe aclarar que las condiciones de rugosidad, reducción de diámetro y el cambio de sentido del flujo pueden diferir altamente los resultados.

5.4.2 Identificación de Microorganismos

Mediante una identificación por Método Tradicional/ Kit de Diagnóstico realizado por el Laboratorio de Ecología y Microbiología Ambiental (LEMA) de la Universidad de los Andes, para caracterizar la composición de las biopelículas y su estructura funcional.

5.5 Comparación con trabajos anteriores

La comparación consta de dos partes; en la primera serán contrastados los resultados del presente proyecto con el de María Ximena Trujillo, y la segunda parte compara los resultados recopilados de los dos proyectos de grado mencionados anteriormente con los resultados obtenidos por dos tesis de grado que utilizaron una fuente de CODB diferente a pasto. Por disponibilidad de información solo pudieron ser recopilados dos bases de datos: el informe final de Luis Fernando Muñoz en el 2005 “Velocidad de desprendimiento de las biopelículas en tuberías de distribución de agua potable” que utilizó Fosfato Diámonico (DAP) como fuente de fósforo y nitrógeno y una mínima cantidad de glucosa (panela) como compuesto orgánico, y la tesis de grado de Ángela Donoso “Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de biopelículas en redes de distribución de agua potable” del 2009 que utilizó panela como fuente de CODB.

Los resultados que se van a comparar son la velocidad de crecimiento y el espesor de las biopelículas, los diagramas de Moody y la influencia de las biopelículas en la tubería de acuerdo a la fuente de CODB.

6. RESULTADOS

Para una comprensión global acerca del comportamiento de las biopelículas en sistemas de distribución de agua potable es necesario reconocer externa e internamente las afecciones generadas, por lo cual se abordan dos parámetros principales, uno cuantitativo y otro cualitativo del crecimiento y desprendimiento de las películas biológicas. Para un análisis aplicable a casos generales es necesario tener en cuenta resultados reportados con anterioridad y compararlos con la presente investigación; en primer orden se delimitarán los resultados encontrados en la experimentación para posteriormente compararse con los enunciados por Trujillo en el 2011, Donoso en el 2009 y Muñoz en 2005.

6.1 ANÁLISIS CUANTITATIVO

Los resultados expuestos a continuación se registraron desde los 126 días de recirculación hasta los 309 días, esto comprenden los días del 15 de Diciembre de 2011 hasta el 15 de Junio de 2012, es decir que el estudio abarca 6 meses de mediciones. Se iniciará con una descripción de los parámetros microbiológicos cuantificables para finalizar en las características hidráulicas de estudio y en la correspondiente relación.

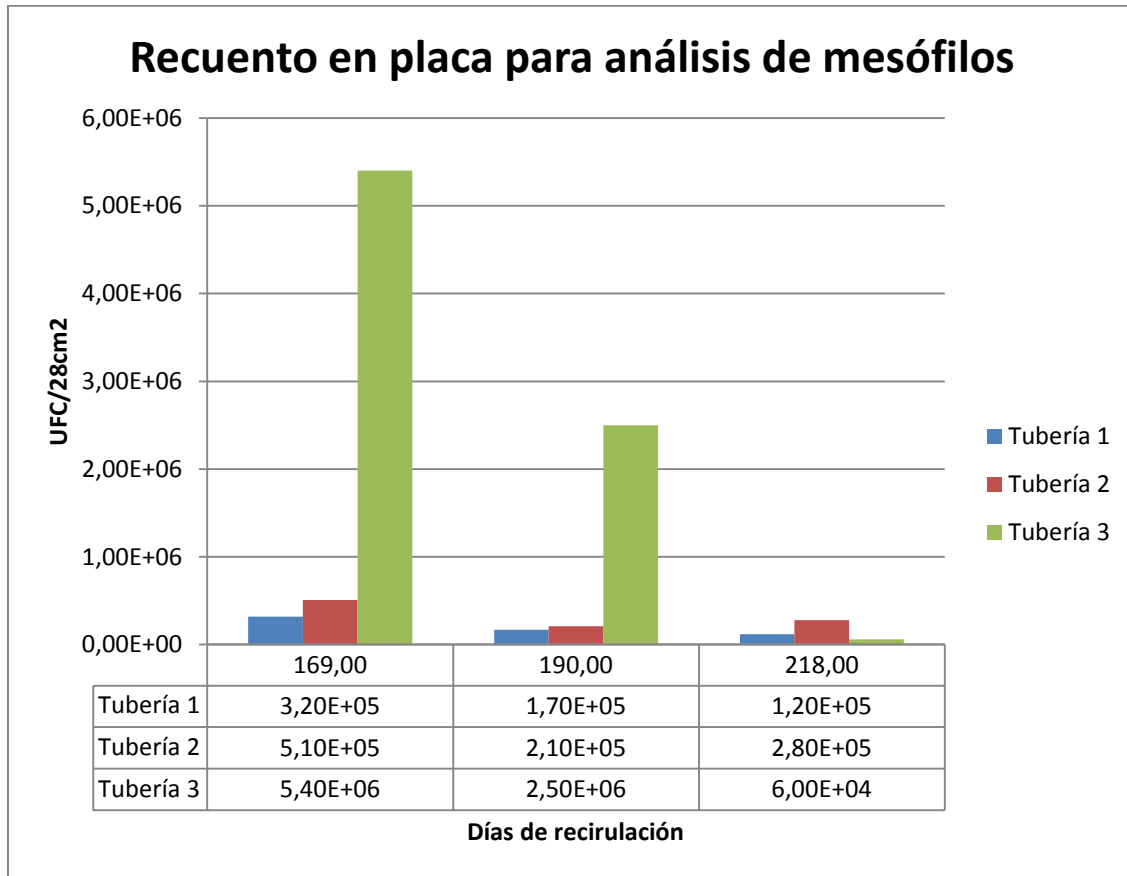
7.1.1 UNIDADES FORMADORAS DE COLONIAS

A lo largo de los seis meses de recirculación se tomaron tres recuentos mediante método escobillón, el primero el 27 de Enero de 2012, el segundo el 17 de Febrero del mismo año y el último el 14 de Marzo de 2012. Estas pruebas fueron tomadas en uno de los testigos de centro para cada tubería, los testigos fueron elegidos de acuerdo con la agenda que se elaboró al inicio del proyecto para la extracción de los testigos.

El 27 de Enero se muestrearon los testigos de centro número 22, El 17 de febrero se muestrearon los testigos de centro número 15, y el 14 de Marzo se muestrearon los testigos de centro número 10. Estos testigos de centro fueron los que presentaron visualmente un mayor número de microorganismos entre los extraídos para dicho día.

Los resultados del recuento se reportan en unidades formadoras de colonias por área de testigo, los recuentos son comparables puesto que todas las áreas son iguales. En la Gráfica 4 se muestran los resultados obtenidos en las mediciones.

Gráfica 4. Recuento en placa para análisis de mesófilos.



En la Gráfica 4 se evidencia un decrecimiento en la población bacteriana a lo largo del tiempo en las tres tuberías; precisamente en dichas fechas se suministró pasto cada 15 días y no cada 8 días. Paradójicamente la tubería número 3 es la que presenta un mayor número de bacterias y se recirculó con una velocidad media, la tubería 1 en cambio presenta la menor carga bacteriana y es la que se recirculo a menor velocidad. La tubería 2 (de mayor velocidad) presentó una carga microbiana baja casi similar a la tubería uno.

7.1.2 CARACTERÍSTICAS EN TESTIGOS DE BORDE

La extracción de los testigos de borde se realizó semanalmente y por ende la magnitud de los errores debidos al procedimiento de manipulación es mayor en estos elementos en contraste con los testigos de centro, los cuales representan un parámetro más confiable para la realización de análisis y la evaluación del comportamiento.

El procedimiento inicial para la determinación del espesor de la biopelícula fue realizado mediante pesajes con un nivel de precisión de cuatro cifras decimales, el error asociado al cálculo se disminuyó con la calibración de los instrumentos y el establecimiento de un tiempo para la remoción del exceso de agua con el fin de evitar la alteración de los resultados debido a

la rata de evaporación presentada. Los espesores de la biopelícula variaron considerablemente en función a la velocidad de la tubería como se ilustra en las Tabla 1, 2 y 3.

Tabla 1. Espesor y velocidad de crecimiento de la biopelícula formada en la tubería con velocidad de 1 m/s

TUBERIA 1	Peso inicial (g)	69,4591				
Fecha (dd/mes)	Días (-)	ρ (kg/m³)	Peso (g)	Biomasa (g)	Espesor (μm)	Velocidad crecimiento (μm/día)
18-ene	160	997,5233	71,2756	1,8165	455,2525	2,845328275
27-ene	169	997,4248	71,2541	1,795	449,9086	-0,59376881
03-feb	176	997,6555	71,2153	1,7562	440,0818	-1,403833275
10-feb	183	997,4222	71,3114	1,8523	464,2718	3,455718305
24-feb	197	997,836	71,28	1,8209	456,2122	-0,041641925
02-mar	204	997,5985	71,2986	1,8395	460,982	0,681400728
16-mar	218	997,6685	71,3005	1,8414	461,4258	0,031697564
23-mar	225	998,052	71,2665	1,8074	452,7319	-1,241984643
30-mar	232	997,2304	71,3019	1,8428	461,9795	1,321082376
13-abr	246	997,29	71,2933	1,8342	459,796	-0,155962376
20-abr	253	997,308	71,2805	1,8214	456,5791	-0,45955917
27-abr	260	997,316	71,239	1,7799	446,1725	-1,486652798
04-may	267	997,908	71,2784	1,8193	455,7785	1,372278174
11-may	274	997,4040	71,28	1,8209	456,4098	0,090193049
18-may	281	997,8600	71,2802	1,8211	456,2514	-0,022637428

Según la Tabla 1 a los 169, 176, 197, 225, 246, 260 y 281 días se presentaron decrecimientos en la velocidad de formación de las biopelículas para la tubería 1, lo cual induce una disminución del espesor de la misma. La frecuencia y calidad de los nutrientes puede influir en la dinámica del crecimiento y desprendimiento de la película biológica, lo que podría explicar el decrecimiento paulatino que se puede apreciar en la Tabla 1.

A este punto es necesario aclarar que el suministro de nutrientes en el periodo de desarrollo central no se realizó de manera constante, motivo por el cual el espesor de la biopelícula se mantuvo relativamente constante y hasta cierto punto decreciente en las tres tuberías de estudio. La Tabla 2 muestra un decrecimiento en la formación de la biomasa exactamente en los días mencionados para la tubería 1 lo que fundamenta la estrecha relación que existe entre la velocidad de crecimiento de la película biológica y la cantidad y calidad del nutriente presente en el agua.

Tabla 2. Espesor y velocidad de crecimiento de biopelícula formada en tubería con velocidad de 3 m/s

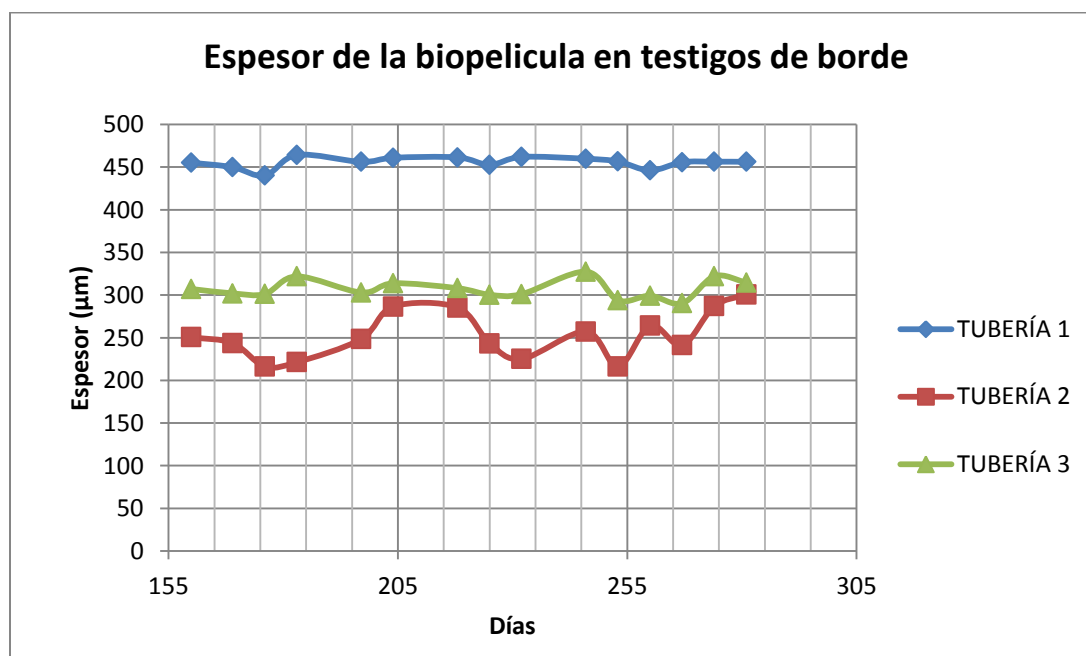
TUBERIA 2	Peso inicial (g)	67,8272				
Fecha (dd/mes)	Días (-)	ρ (kg/m ³)	Peso (g)	Biomasa (g)	Espesor (μ m)	Velocidad crecimiento (μ m/día)
18-ene	160	997,5233	68,8272	1	250,6207	1,566379452
27-ene	169	997,4248	68,7991	0,9719	243,6023	-0,779820846
03-feb	176	997,6555	68,6902	0,863	216,257	-3,906472877
10-feb	183	997,4222	68,7104	0,8832	221,3706	0,730519241
24-feb	197	997,836	68,819	0,9918	248,4877	0,13816248
02-mar	204	997,5985	68,9707	1,1435	286,5632	5,439350577
16-mar	218	997,6685	68,9664	1,1392	285,4656	-0,078401323
23-mar	225	998,052	68,7991	0,9719	243,4492	-6,002331977
30-mar	232	997,2304	68,7252	0,898	225,1235	-2,617962438
13-abr	246	997,29	68,8532	1,026	257,197	2,290963532
20-abr	253	997,308	68,6898	0,8626	216,2321	-5,852127814
27-abr	260	997,316	68,8819	1,0547	264,3846	6,878931424
04-may	267	997,908	68,7901	0,9629	241,2297	-3,307852048
11-may	274	997,4040	68,9723	1,1451	287,0201	6,541493108
18-may	281	997,8600	69,027	1,1998	300,5933	1,939023629

Se espera que el comportamiento de la tercera tubería sea similar a las dos anteriores, y que en los días señalados se presente una alteración en el desarrollo tradicional de la biopelícula establecida en la tubería con velocidad de 2 metros por segundo. Si el ciclo de crecimiento en las tres tuberías presenta un patrón similar bajo diferentes velocidades de flujo, se entendería que los nutrientes representan un factor más influyente que los regímenes de flujo para la formación y el desprendimiento de estas, pues su nivel de sensibilidad es mayor bajo cortos lapsos de tiempo. Los datos de la tercera tubería indican una velocidad de crecimiento negativa para los mismos días que la primera tubería lo cual se puede apreciar en la Tabla 3; el comportamiento global del sistema se evidencia con más claridad en la Gráfica 5 para la cual se tiene un mayor espesor a menores velocidades de flujo y por tanto el desarrollo es más favorable.

A pesar de que hay una gran diferencia entre las velocidades de la tubería 2 y 3 (de 3 m/s a 2 m/s) los espesores de las biopelículas en esas tuberías presentan una mayor cercanía que el presentado por las tuberías 1 y 2.

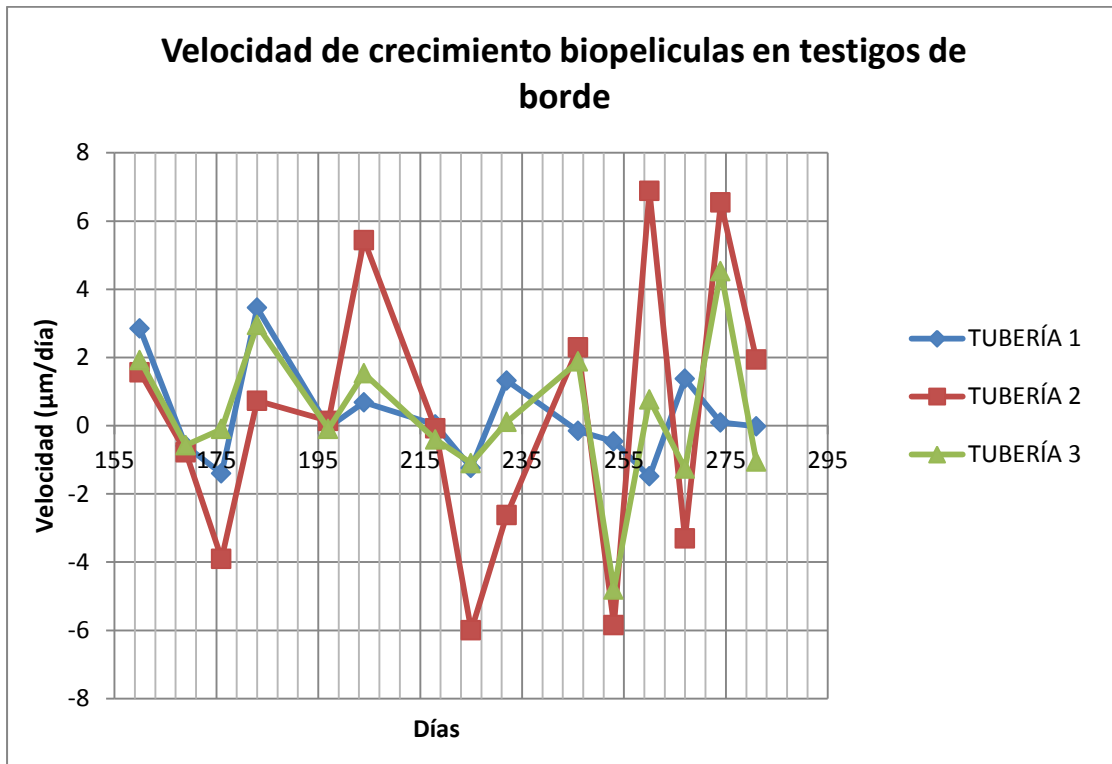
Tabla 3. Espesor y velocidad de crecimiento de biopelícula formada en la tubería con velocidad de 2 m/s

TUBERÍA 3		Peso inicial (g)				
Fecha (dd/mes)	Días (-)	ρ (kg/m ³)	Peso (g)	Biomasa (g)	Espesor (μm)	Velocidad crecimiento ($\mu\text{m}/\text{día}$)
18-ene	160	997,5233	68,6515	1,2255	307,1357	1,919598018
27-ene	169	997,4248	68,6308	1,2048	301,9777	-0,573114455
03-feb	176	997,6555	68,6283	1,2023	301,2814	-0,099471245
10-feb	183	997,4222	68,7104	1,2844	321,9299	2,949788098
24-feb	197	997,836	68,6356	1,2096	303,0558	-0,097263785
02-mar	204	997,5985	68,6781	1,2521	313,7785	1,531818055
16-mar	218	997,6685	68,6555	1,2295	308,0933	-0,406087113
23-mar	225	998,052	68,6252	1,1992	300,3852	-1,101167043
30-mar	232	997,2304	68,6272	1,2012	301,134	0,106981502
13-abr	246	997,29	68,7322	1,3062	327,4373	1,878808478
20-abr	253	997,308	68,5981	1,1721	293,816	-4,803055276
27-abr	260	997,316	68,6195	1,1935	299,178	0,766007256
04-may	267	997,908	68,585	1,159	290,3574	-1,260082228
11-may	274	997,4040	68,7109	1,2849	322,0611	4,529091829
18-may	281	997,8600	68,6821	1,2561	314,6985	-1,051802264

Gráfica 5. Espesor de biopelículas formadas en el montaje.


En la Gráfica 6 se evidencia que la dinámica de crecimiento de la biopelícula es mayor para la tubería 2 en donde se tiene una velocidad de flujo mayor, la tubería que circula a una velocidad de 1 metro por segundo sin embargo no es la que presenta una menor velocidad de crecimiento, lo que indica que la velocidad de flujo no actúa de manera directamente proporcional con la velocidad del flujo.

Gráfica 6. Velocidad de crecimiento en el montaje según tubería.



7.1.2 CARACTERÍSTICAS EN TESTIGOS DE CENTRO

Como se mencionó previamente los testigos de centro fueron retirados por pares cada semana desde el número 24 hasta llegar al número uno; el día 27 de abril fue necesario reiniciar el ciclo de mediciones de dichos testigos para evaluar el desprendimiento y el ciclo de crecimiento de la biopelícula dentro de la tubería.

Los testigos de centro adicionalmente de representar un buen indicativo para la cuantificación del crecimiento de las biopelículas, caracterizan la influencia de la película biológica en el medio y en el comportamiento hidráulico del sistema de abastecimiento. Las características de la subcapa laminar viscosa se determinan de acuerdo con el coeficiente de rugosidad que se perturba por la presencia de los microorganismos en la red.

La geometría de los testigos de centro fue determinada por Trujillo, teniéndose una longitud de 7 centímetros y ancho de 4 centímetros, el comportamiento en un punto dentro de la tubería

está determinado por el promedio de las medidas laterales. Los resultados del espesor de la biopelícula, la subcapa laminar viscosa y la rugosidad en la primera tubería se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Comportamiento de la biopelícula en testigos de centro (velocidad de flujo 1 m/s)

velocidad (m/s)			1	TUBERÍA 1									
Fecha	Días	ρ	Número de Testigo	Peso sin biopelícula	Peso con biopelícula	Biomasa	Espesor	Espesor promedio	δ'	0.305 δ'	6.1 δ'	ks	Re
(dd/mes)	(-)	(kg/m ³)	(-)	(g)	(g)	(g)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(-)
18-ene	160	997,523	24	57,699	58,7555	1,0565	378,258	315,531	219,3	66,87	1337	2,08E+08	102471,05
		997,523	23	57,783	58,4891	0,7061	252,805						
27-ene	169	997,425	22	57,1725	57,5876	0,4151	148,633	150,119	186,1	56,75	1135	4,10E+08	111832,83
		997,425	21	56,4381	56,8615	0,4234	151,605						
03-feb	176	997,656	20	55,1489	55,6834	0,5345	191,341	208,346	170,8	52,1	1042	8,50E+08	109857,39
		997,656	19	55,4029	56,0324	0,6295	225,35						
10-feb	183	997,422	18	55,2987	55,889	0,5903	211,366	267,941	248,5	75,78	1516	5,64E+08	79842,973
		997,422	17	56,5137	57,42	0,9063	324,515						
24-feb	197	997,836	14	57,9492	58,2572	0,308	110,239	131,857	192,5	58,73	1175	6,95E+08	100370,55
		997,836	13	57,7721	58,2009	0,4288	153,475						
02-mar	204	997,599	12	57,1081	57,4494	0,3413	122,186	169,622	185,6	56,6	1132	5,45E+08	107894,23
		997,599	11	55,29	55,8963	0,6063	217,057						
16-mar	218	997,669	10	56,9798	57,5069	0,5271	188,69	151,335	185,6	56,61	1132	7,49E+08	103012,44
		997,669	9	56,7023	57,0207	0,3184	113,98						
23-mar	225	998,052	8	57,4472	57,7333	0,2861	102,378	154,909	185,3	56,52	1130	7,40E+08	103351,92
		998,052	7	55,8428	56,4225	0,5797	207,44						
30-mar	232	997,23	6	56,6923	57,2081	0,5158	184,726	141,571	193,7	59,07	1181	5,52E+08	103148,97
		997,23	5	57,151	57,4258	0,2748	98,4154						
20-abr	253	997,308	2	55,6662	55,932	0,2658	95,1848	104,907	290,7	88,67	1773	1,27E+08	79980,966
		997,308	1	56,3831	56,7032	0,3201	114,63						
27-abr	260	997,316	4	56,0702	56,4437	0,3735	133,752	121,702	281,3	85,81	1716	5,24E+08	71058,078
		997,316	3	57,2116	57,5178	0,3062	109,651						
04-may	267	997,908	6	56,6923	57,1862	0,4939	176,763	146,306	345,7	105,4	2109	1,35E+10	30072,532
		997,908	5	57,151	57,4747	0,3237	115,85						
11-may	274	997,404	8	57,4472	57,7031	0,2559	91,6307	152,431	407,2	124,2	2484	2,77E+09	37262,382
		997,404	7	55,8428	56,4383	0,5955	213,232						
18-may	281	997,860	10	56,9798	57,4785	0,4987	178,489	150,375	205,8	62,77	1255	4,97E+08	98399,297
		997,860	9	56,7023	57,0439	0,3416	122,262						

Como se observa en la Tabla 4 el segundo ciclo de medición se inició con los testigos cuatro y tres para llegar hasta el 10 y el número nueve. En los días 160, 176 y 183 se tienen valores del espesor promedio mayores al espesor de la subcapa laminar viscosa los cuales coinciden con los eventos de disminución en el espesor global de la biopelícula, lo cual puede estar fundamentado en los eventos de desprendimiento que se producen en las tuberías.

En la Tabla 4 también se observa que los testigos que se encuentran aguas arriba del montaje presentan un mayor espesor de la biopelícula y por ende la formación primaria de las biopelículas se formó en los testigos número 24 y 23, incluso cuando los testigos de aguas

abajo se encuentren a mayor tiempo de recirculación, lo que indica que estos últimos presentan formaciones jóvenes.

El comportamiento establecido por las biopelículas en los testigos de centro para la tubería de PVC a 3 metros por segundo se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Comportamiento de la biopelícula en testigos de centro (velocidad de flujo 3 m/s)

velocidad (m/s)			3	TUBERÍA 2									
Fecha	Días	ρ	No. de Testigo	Peso sin biopelícula	Peso con biopelícula	Biomasa	Espesor	Espesor promedio	δ'	0.305 δ'	6.1 δ'	ks	Re
(dd/mes)	(-)	(kg/m ³)	(-)	(g)	(g)	(g)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(-)
18-ene	160	997,52	24	33,5052	33,9536	0,4484	160,54	133,796	225,05	68,641	1372,81	1,75E+02	101517,5
		997,52	23	34,4732	34,7722	0,299	107,051						
27-ene	169	997,42	22	56,3214	56,6467	0,3253	116,479	163,689	209,15	63,792	1275,84	1,68E+02	109964,9
		997,42	21	57,3456	57,9346	0,589	210,9						
03-feb	176	997,66	20	55,6143	55,8972	0,2829	101,273	127,424	201,13	61,345	1226,91	3,56E+02	105220,3
		997,66	19	55,9935	56,4225	0,429	153,574						
10-feb	183	997,42	18	56,4153	56,8721	0,4568	163,564	177,332	248,33	75,741	1514,82	6,31E+02	78646,33
		997,42	17	55,7616	56,2953	0,5337	191,1						
24-feb	197	997,84	14	53,2824	53,8436	0,5612	200,863	193,454	201,86	61,567	1231,33	4,55E+02	101553,7
		997,84	13	55,4694	55,9892	0,5198	186,045						
02-mar	204	997,6	12	56,8296	57,3709	0,5413	193,787	138,798	187,74	57,261	1145,23	3,17E+02	114520,6
		997,66	11	56,0524	56,2865	0,2341	83,8084						
16-mar	218	997,67	10	55,5659	55,9615	0,3956	141,616	131,915	188,32	57,437	1148,75	6,19E+02	102928,6
		997,67	9	54,0566	54,398	0,3414	122,214						
23-mar	225	998,05	8	53,895	54,4644	0,5694	203,754	186,059	184,4	56,241	1124,82	6,03E+02	104391,2
		998,05	7	53,0272	53,4977	0,4705	168,364						
30-mar	232	997,23	6	55,745	56,5122	0,7672	274,761	222,688	193,09	58,893	1177,86	5,78E+02	102771,4
		997,23	5	54,1467	54,6231	0,4764	170,615						
20-abr	253	997,31	2	56,595	56,9958	0,4008	143,529	115,4	250,89	76,521	1530,42	1,45E+03	68359,04
		997,31	1	56,3989	56,6426	0,2437	87,2706						
27-abr	260	997,32	4	55,8847	56,4364	0,5517	197,566	187,933	513,98	156,76	3135,26	2,95E+03	29102,88
		997,32	3	55,4906	55,9885	0,4979	178,3						
04-may	267	997,91	6	55,745	56,4682	0,7232	258,827	195,981	507,71	154,85	3097,01	4,72E+03	26723,93
		997,91	5	54,1467	54,5187	0,372	133,136						
11-may	274	997,404	8	53,895	54,4574	0,5624	201,38	180,146	394,02	120,18	2403,53	1,73E+03	42028,73
		997,404	7	53,0272	53,471	0,4438	158,913						
18-may	281	997,860	10	55,5659	55,9897	0,4238	151,682	107,194	473,81	144,51	2890,22	2,19E+03	33434,19
		997,860	9	54,0566	54,2318	0,1752	62,7056						

Las anomalías en cuanto al espesor de la biopelícula en la tubería dos se presentan en los días 225 y 232 para los cuales el espesor es mayor que la longitud de la subcapa laminar viscosa, a diferencia de la primera tubería la velocidad de 3 metros por segundo propicia un desarrollo y mejores condiciones para la formación de películas biológicas, pues como se observa en la Tabla 5 los espesores a groso modo son mayores a los determinados en la Tabla 4.

El comportamiento de la tercera tubería es diferente a las dos anteriores a medida que la subcapa laminar viscosa siempre excede el espesor de la biopelícula desarrollada; este comportamiento particular sugiere que la velocidad de estabilización evita desprendimientos de

mayor magnitud ocasionados por las fuerzas cortantes de la tubería y para el presente montaje la velocidad de estabilización fluctúa entre 1.5 y 2 metros por segundo, como se observa en la Tabla 6.

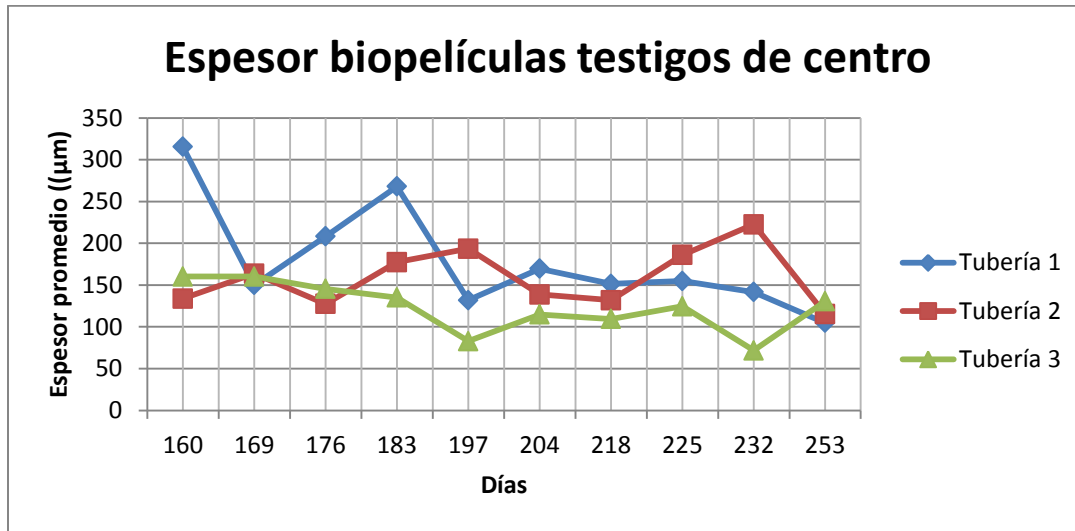
Tabla 6. Comportamiento de la biopelícula en testigos de centro (velocidad de flujo 3 m/s)

velocidad (m/s)			1.5 - 2 m/s		TUBERÍA 3									
Fecha	Días	ρ	No. de Testigo	Peso sin biopelícula	Peso con biopelícula	Biomasa	Espesor	Espesor promedio	δ'	0.305 δ'	6.15'	ks	Re	
(dd/mes)	(-)	(kg/m ³)	(-)	(g)	(g)	(g)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(μ m)	(-)	
18-ene	160	997,52	24	56,7767	57,0345	0,2578	92,3	160,129	240,1	73,24	1464,74	6,28E+01	102861	
		997,52	23	54,6893	55,326	0,6367	227,957							
27-ene	169	997,42	22	55,3457	55,9934	0,6477	231,919	160,234	238,9	72,88	1457,53	3,96E+02	87059,7	
		997,42	21	56,9582	57,2055	0,2473	88,5495							
03-feb	176	997,66	20	55,8284	56,2644	0,436	156,08	145,412	206,3	62,93	1258,54	3,16E+02	104008	
		997,66	19	55,9861	56,3625	0,3764	134,744							
10-feb	183	997,42	18	57,6691	58,1069	0,4378	156,761	135,027	251	76,54	1530,83	4,97E+02	80415,4	
		997,42	17	53,7138	54,0302	0,3164	113,292							
24-feb	197	997,84	14	56,1631	56,4809	0,3178	113,746	82,8042	206,2	62,89	1257,85	4,48E+02	99577,3	
		997,84	13	56,5726	56,7175	0,1449	51,8622							
02-mar	204	997,6	12	55,0391	55,4229	0,3838	137,401	114,794	173,9	53,03	1060,67	3,64E+02	121688	
		997,6	11	54,5905	54,848	0,2575	92,1857							
16-mar	218	997,67	10	58,6277	58,9096	0,2819	100,914	109,487	187,6	57,21	1144,17	4,20E+02	110586	
		997,67	9	53,3024	53,6322	0,3298	118,061							
23-mar	225	998,05	8	58,2322	58,5123	0,2801	100,231	124,546	193,3	58,96	1179,3	4,37E+02	106662	
		998,05	7	54,9183	55,3343	0,416	148,861							
30-mar	232	997,23	6	56,9114	57,0798	0,1684	60,3099	71,806	206,8	63,07	1261,31	3,79E+02	101470	
		997,23	5	53,5038	53,7364	0,2326	83,3021							
20-abr	253	997,31	2	57,4503	57,8477	0,3974	142,312	130,584	249	75,94	1518,85	3,24E+02	85549,4	
		997,31	1	54,9532	55,2851	0,3319	118,856							
27-abr	260	997,32	4	57,9324	58,2937	0,3613	129,383	104,942	396,9	121,1	2421,03	1,20E+04	27106,3	
		997,32	3	55,7404	55,9652	0,2248	80,5018							
04-may	267	997,91	6	56,9114	57,082	0,1706	61,0563	71,9541	521,3	159	3179,91	1,94E+03	31010,5	
		997,91	5	53,5038	53,7353	0,2315	82,8519							
11-may	274	997,404	8	58,2322	58,4982	0,266	95,2473	107,117	459,8	140,2	2804,71	9,22E+02	39757,8	
		997,404	7	54,9183	55,2506	0,3323	118,987							
18-may	281	997,860	10	58,6277	58,9221	0,2944	105,368	114,835	343,6	104,8	2095,67	1,97E+03	47167,8	
		997,860	9	53,3024	53,6497	0,3473	124,302							

En la Tabla 6 se observa un periodo de crecimiento en los testigos de aguas arriba y progresivamente se va disminuyendo el espesor de la biopelícula en sentido del flujo; se observa también que los valores de la subcapa laminar viscosa hacia los últimos días de medición es considerablemente grande en comparación con los datos registrados anteriormente, lo cual puede deberse a la frecuencia y calidad de los nutrientes suministrados así como a la manipulación en la realización de las pruebas que corresponden a errores aleatorios presentes en todos los procedimientos experimentales.

En la Gráfica 7 se observa el comportamiento global del espesor de la biopelícula en comparación con la velocidad de flujo presentada en las tuberías; se tiene un comportamiento similar para las tres velocidades, los espesores fluctúan relativamente bajo los mismos rangos.

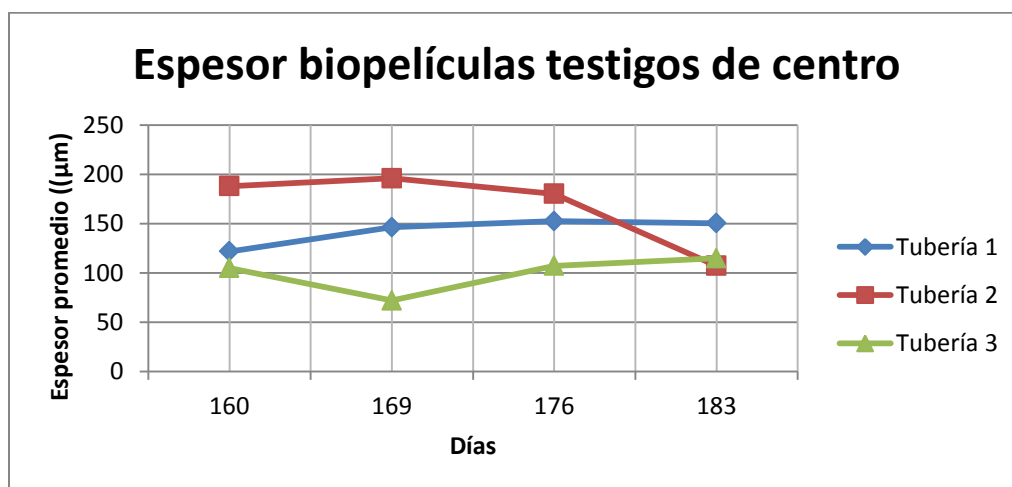
Gráfica 7. Espesor de biopelículas desarrolladas en los testigos de centro.



En la Gráfica 7 que corresponde al primer ciclo de medición de los testigos también se desarrolla una comparación entre la tubería de mayor velocidad y la de menor velocidad, para lo cual se observa que el espesor de la biopelícula no tiene ninguna relación con la velocidad de flujo, pues la película biológica presente en la tubería uno presenta un mayor espesor que la tubería de más alta velocidad hacia los inicios del proyecto.

El segundo ciclo de medición de los testigos que comprende desde el día 260 de recirculación hasta el 281, muestra un comportamiento similar al de los testigos de borde en el que se tiene un decrecimiento para la tubería 2 y un crecimiento para las otras dos tuberías como se ilustra en la Gráfica 8.

Gráfica 8. Espesor biopelícula en testigos de centro segundo ciclo.



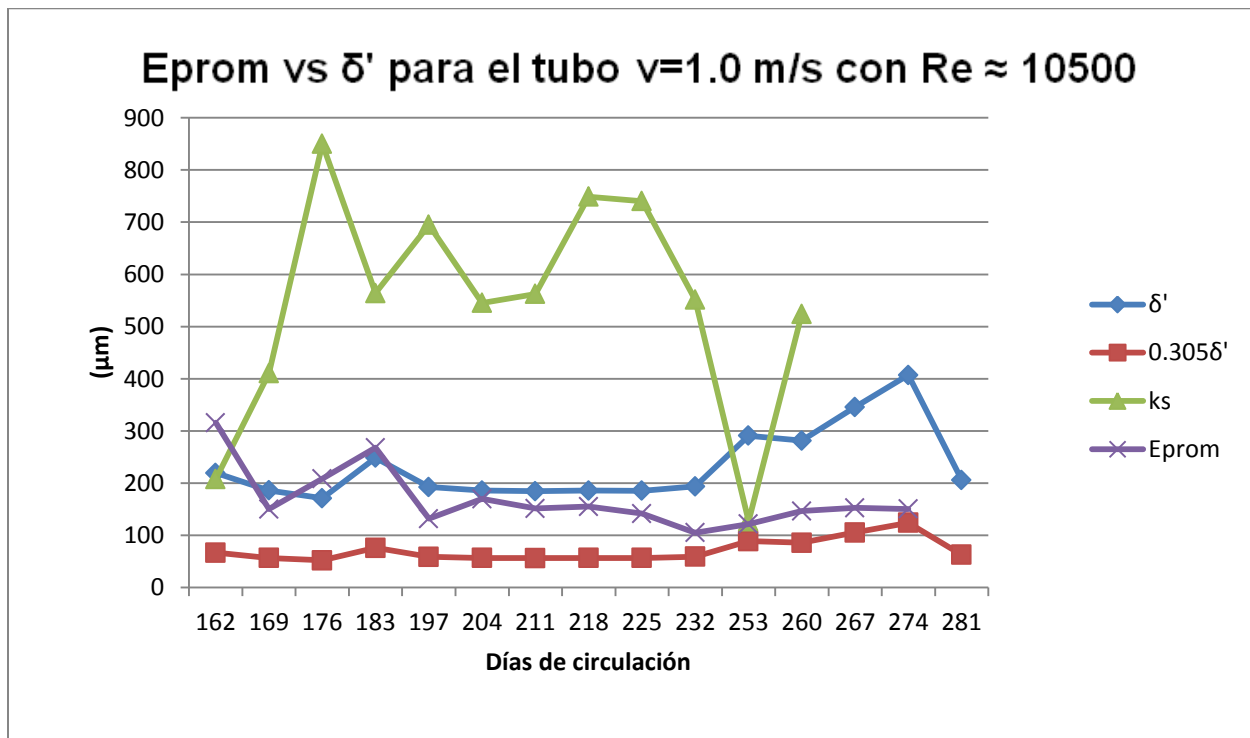
En la Gráfica 8 se observa que el comportamiento de los testigos aguas abajo presenta la misma relación que la encontrada en la Gráfica 7.

7.1.3.1 Relación entre el espesor de la subcapa laminar viscosa, el espesor de la biopelícula y la rugosidad relativa

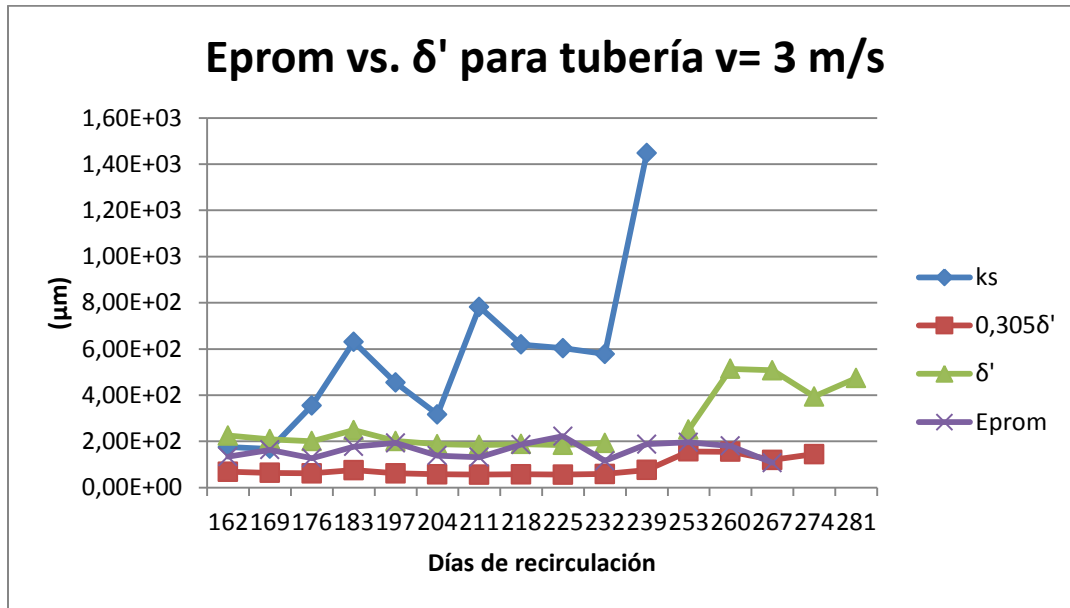
Como se mencionó en las secciones anteriores los testigos de centro fueron manipulados en menor medida y por ende el error aleatorio asociado es mínimo; lo anterior propicia la realización de un análisis más exacto acerca de la influencia del espesor de la biopelícula en la rugosidad relativa de la tubería y de la consecuente influencia en la hidráulica del sistema.

Según las Tablas 4, 5 y 6 la representación gráfica de la rugosidad relativa en las tuberías es mayor a la subcapa laminar viscosa en un orden de magnitud de $1 * 10^2$. La magnitud de la rugosidad relativa se encuentra fuertemente influenciada por la velocidad de flujo, lo cual no se produce con el espesor de la biopelícula y con el de la subcapa laminar viscosa; esto se puede observar en la Gráfica 9 para la cual en el día 267 la tubería presentó una rugosidad relativa elevada, al igual que la tubería con velocidad de 3 metros por segundo como se muestra en la Gráfica 10.

Gráfica 9. Relación entre el espesor de la biopelícula, la subcapa laminar viscosa y la rugosidad relativa de la tubería 1.

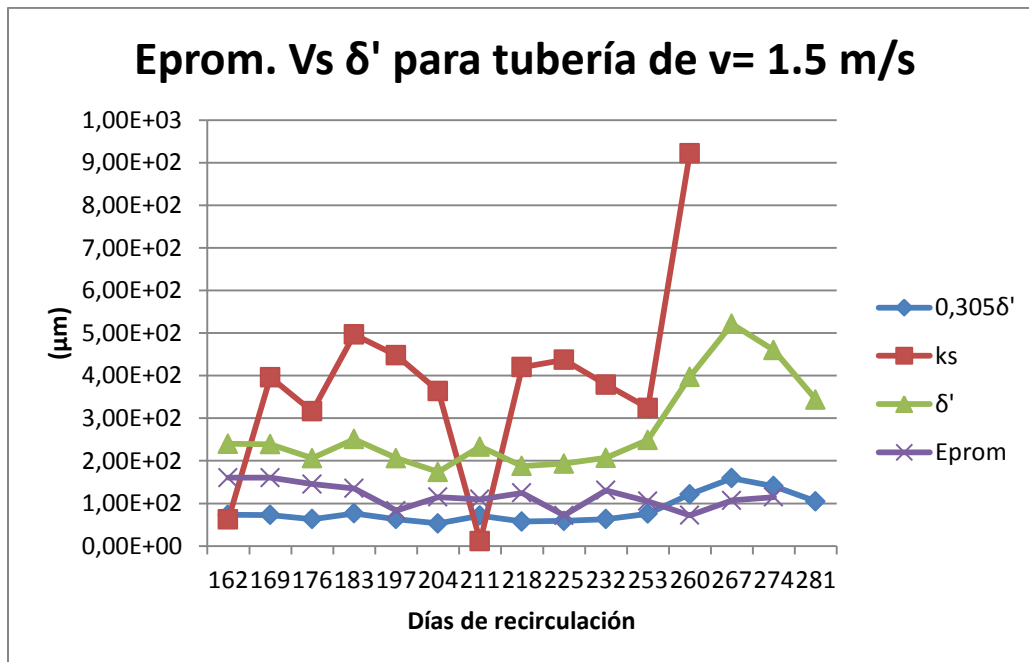


Gráfica 10. Relación entre el espesor de la biopelícula, la subcapa laminar viscosa y la rugosidad relativa de la tubería 2.



En el día 267 se presentó un aumento en la subcapa laminar viscosa que pudo ser ocasionado por cambios en los regímenes de flujo, lo cual también altera el desarrollo de la biopelícula dentro de la tubería. Este comportamiento se evidencia para la tubería número 3 en el día 260 como se observa en la Gráfica 11.

Gráfica 11. Relación entre el espesor de la biopelícula, la subcapa laminar viscosa y la rugosidad relativa de la tubería 2.

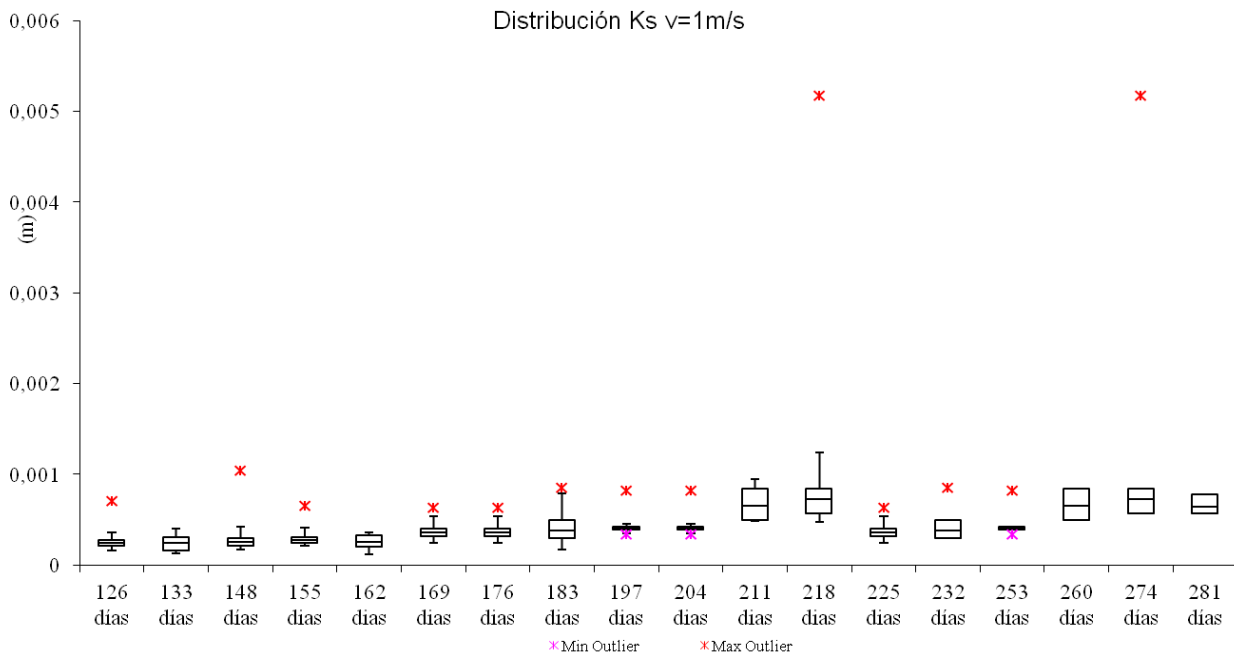


Para las tres tuberías se observa que la rugosidad excede a la subcapa laminar viscosa que a la vez supera al espesor promedio de la tubería para todos los casos, por lo cual se infiere que los desprendimientos masivos producidos en las tuberías se presentaron en fechas específicas. Es importante aclarar que los desprendimientos se presentan infaliblemente en las tuberías sin embargo a menor intensidad que cuando superan el espesor de la subcapa laminar viscosa.

Para tener una comprensión global acerca del comportamiento de la rugosidad relativa en la tubería se realizó un análisis de caja de bigotes para analizar la distribución probabilística que se presenta en el montaje para cada tubería; los datos representan los percentiles 0.25 y 0.75 muestreados. El esquema de bigotes para la primera tubería con una velocidad de un metro por segundo se muestra en la Gráfica 15; la gráfica correspondiente a la tubería 2 con una velocidad máxima de tres metros por segundo se muestra en la Gráfica 13.

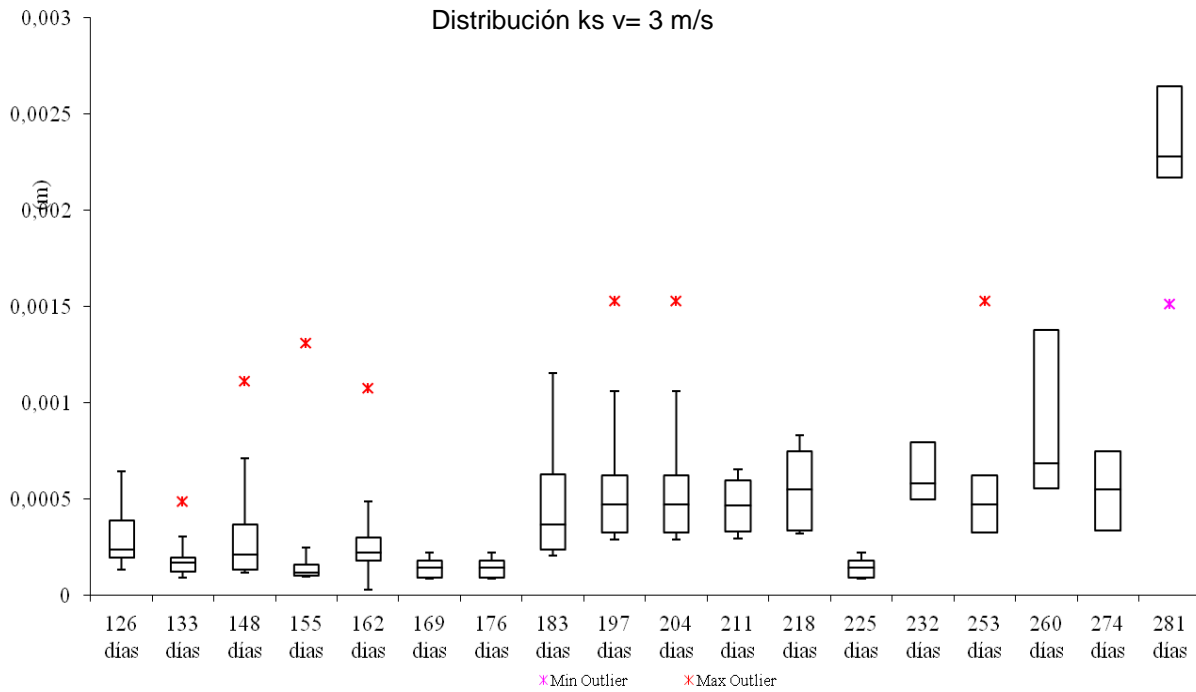
Los días considerados en las gráficas corresponden a los días de mediciones hidráulicas en el sistema de recirculación.

Gráfica 12. Esquema de caja de bigotes para la tubería con velocidad de 1 m/s



Los asteriscos rojos representan máximos atípicos y los asteriscos morados representan mínimos atípicos; como se observa en la Gráfica 12 se presentan en los días de recirculación 218 y 274 unos máximos que dejan un sesgo bastante grande con respecto a los demás datos, a diferencia de los mínimos que representan valores dentro de la media de los datos.

Gráfica 13. Esquema de bigotes para la tubería con velocidad de 3 m/s

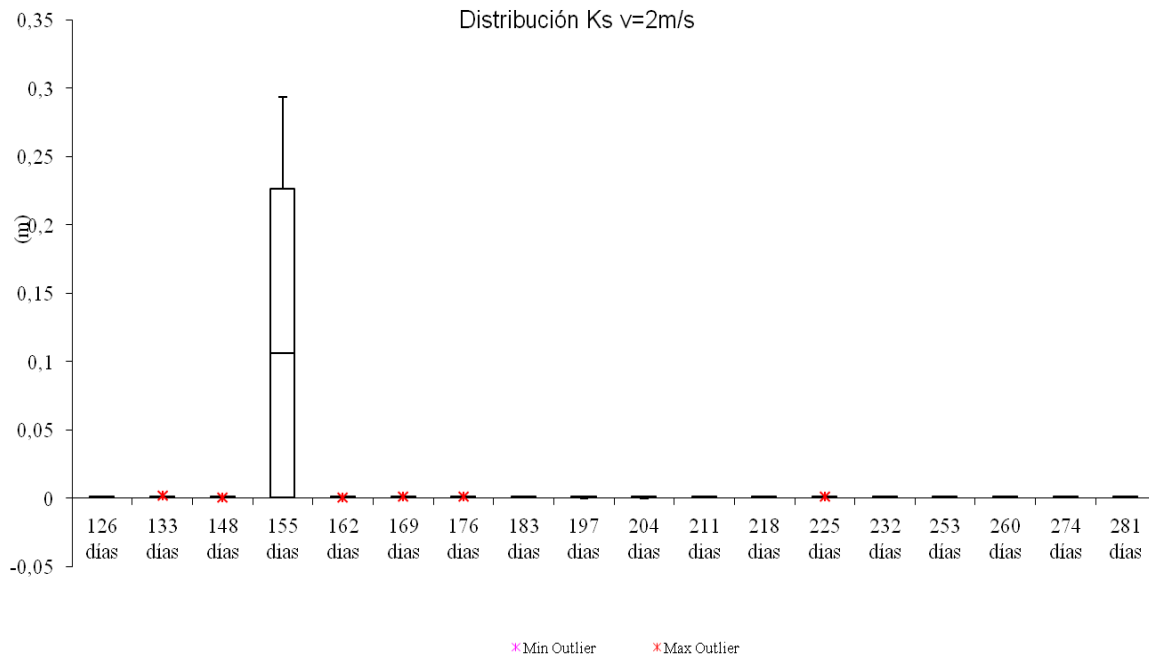


Como se aprecia en la Gráfica 12 y en la Gráfica 13 los valores máximos oscilan entre 0.001 metros y 0.0015 metros, en la primera gráfica se considera una fluctuación de k_s constante, mientras que para la segunda gráfica se tienen altas variaciones a partir de los días 148, 183, 218 y 260, debido a los problemas mencionados en las secciones anteriores con la frecuencia, calidad y cantidad de los nutrientes presentes en forma de materia orgánica.

Los valores del día 281 de recirculación se encuentran por fuera de la media y el mínimo atípico representa cualquiera de los máximos de los datos adicionales en la muestra de las pruebas. En la Gráfica 13 se encuentran valores de la rugosidad más altos que los encontrados para los percentiles de menor velocidad, así mismo se encuentran más amplios rangos de los datos y mayor diversidad.

El comportamiento de la tubería tres respecto a la rugosidad relativa presenta un resalto sobresaliente como se muestra en la Gráfica 14, con motivo de la modificación en la velocidad de flujo de la tubería hacia el día 155, cuando se modifico el régimen de flujo.

Gráfica 14. Esquema de bigotes para la tubería con velocidad de 2 m/s



7.1.3 EFECTOS DE LA BIOPELÍCULA EN LAS PÉRDIDAS POR FRICCIÓN DE LAS TUBERÍAS

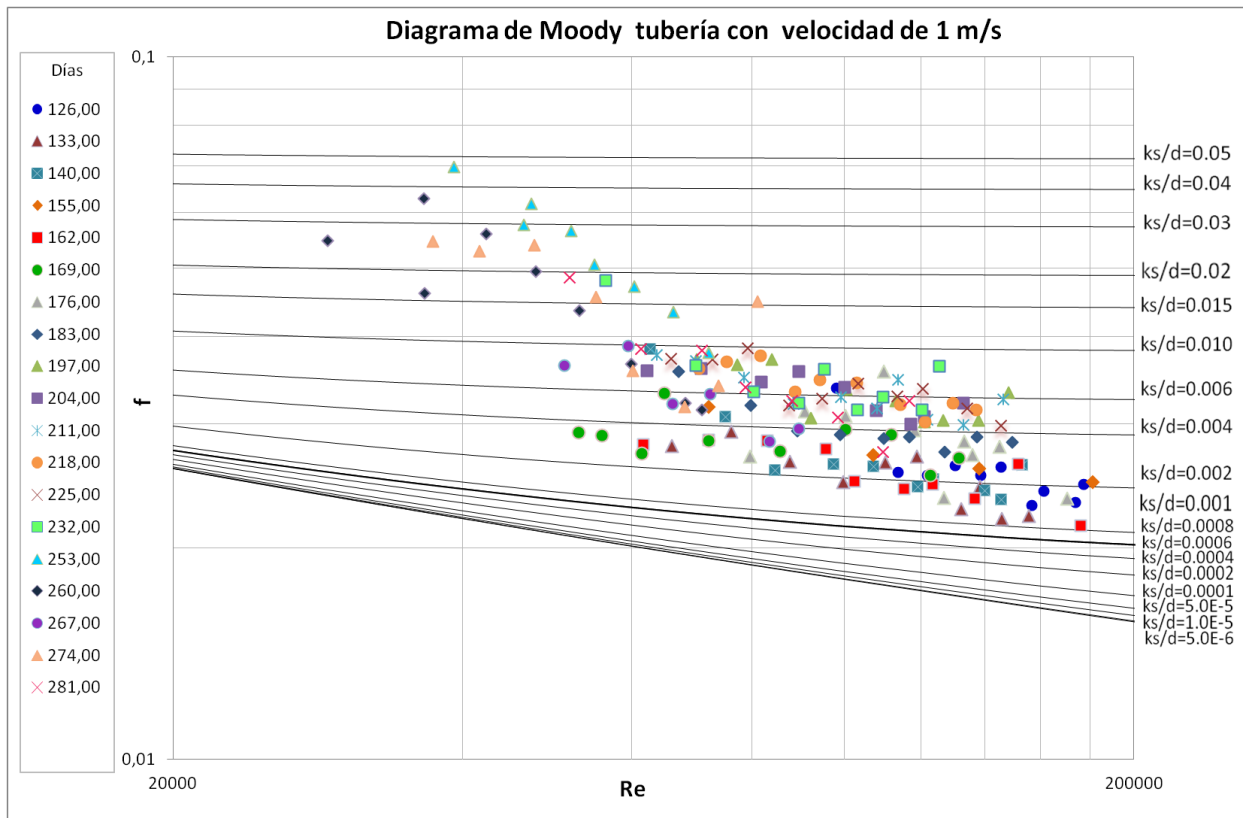
La determinación hidráulica se realizó desde el 15 de Diciembre de 2011 hasta el 8 de Junio de 2012; los registros por fecha se ilustran en Anexo 10.3, y como se ilustró en la Sección 5.3.2 del presente documento las pérdidas por fricción permiten determinar todas las características hidráulicas necesarias para establecer el régimen de flujo que se presenta en el sistema de distribución. Al determinarse el caudal, las lecturas en los piezómetros, la altura del vertedero, y la temperatura de los puntos se puede establecer las pérdidas por fricción mediante el procedimiento que se ilustra en el Anexo 10.2 al final del documento. Una vez se tienen las pérdidas por fricción se procede a calcular el factor de fricción en la tubería y el número de Reynolds al dividir el producto del área por la velocidad entre la viscosidad del agua. El factor de fricción y el número de Reynolds se grafican en el diagrama de Moody con el objetivo de identificar la influencia de las biopelículas en el comportamiento regular de la rugosidad relativa en las tuberías representadas por las líneas de Moody.

Además de los parámetros ya mencionados se pueden determinar los esfuerzos de cortante en las tuberías, la velocidad de corte, la subcapa laminar viscosa y el tipo de flujo presente, lo cual es de mucha utilidad para evaluar los parámetros influenciados por acción del espesor de biomasa, determinados en las medidas semanales.

7.1.3.1 Diagrama de Moody

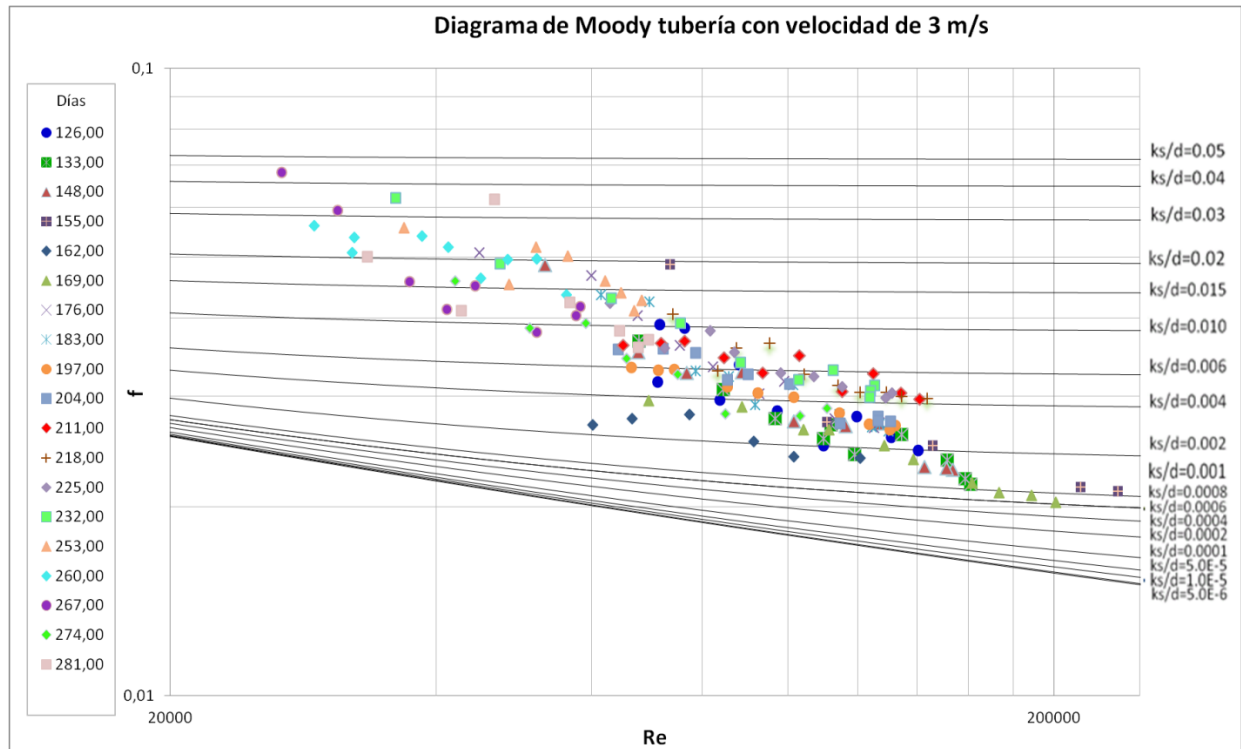
Los resultados para el diagrama de Moody de la primera tubería con una velocidad de un metro por segundo se ilustran en la Gráfica 15, que contiene todos los datos de medición tomados en el presente proyecto y que comprenden desde los 126 días de recirculación hasta los 281 días de recirculación; esta gráfica de igual forma se planteó para las tuberías 2 y 3 que recircularon con velocidades de tres metros por segundo (3 m/s) y dos metros por segundo (2 m/s) respectivamente. Los diagramas de Moody correspondientes a la segunda y tercera tubería se muestran en la Gráfica 15 y en la Gráfica 16 correspondientemente.

Gráfica 15. Diagrama de Moody para la tubería con velocidad de 1 m/s



En la Gráfica 15 se observa un comportamiento flexible en los factores de fricción y en la rugosidad relativa de la tubería por efecto de la biopelícula; se advierte que se producen saltos significativos en las curvas de Moody y que a menor número de Reynolds se tiene una mayor flexibilidad alcanzándose factores de fricción muy altos y límites superiores. También se observa que el cociente de la rugosidad relativa sobre el diámetro mínimo presentado en el proyecto fue de 0.001 hasta alcanzarse valores de 0.05.

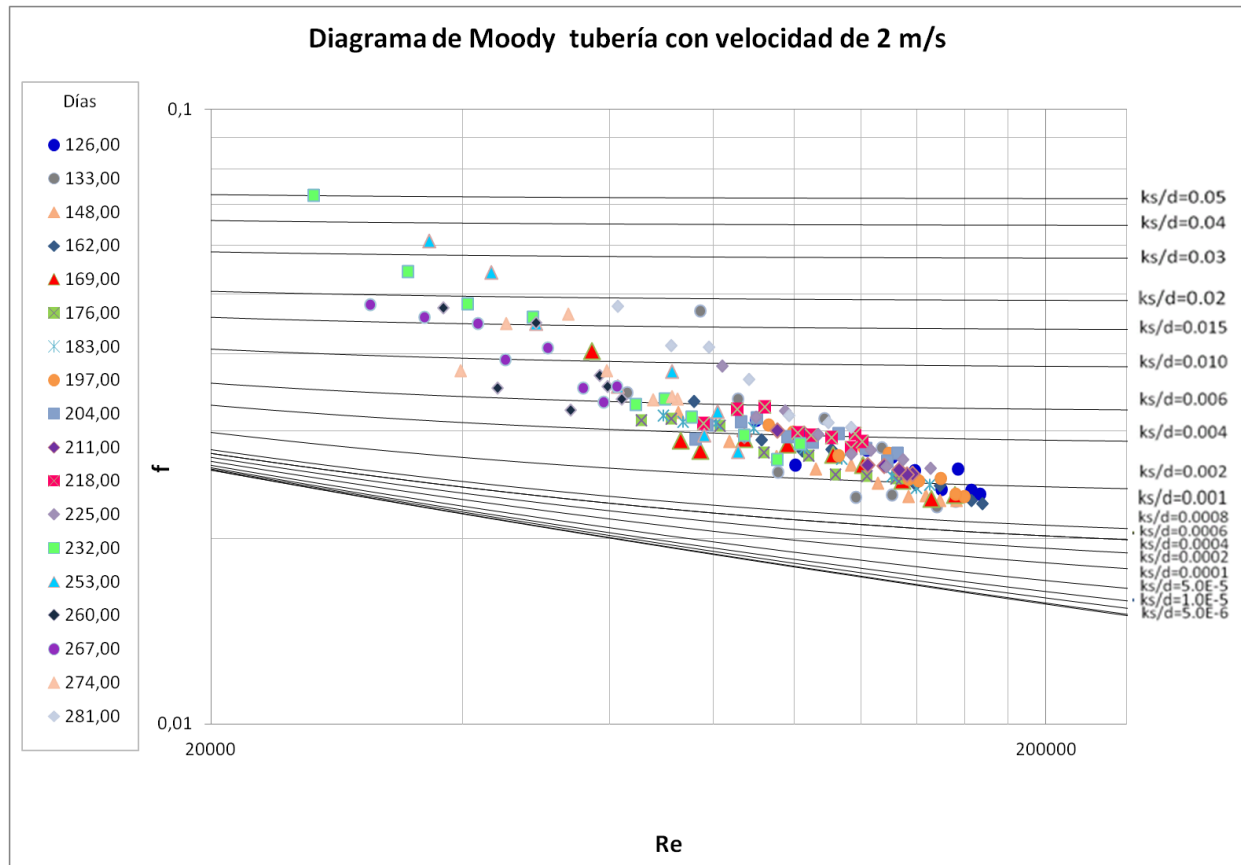
Gráfica 16. Diagrama de Moody para la tubería con velocidad de 3 m/s



En la Gráfica 16 se observa una mayor flexibilidad del factor de fricción como producto de la presencia de biopelículas, sugiriendo que a mayores velocidades se pueden cubrir rangos hidráulicos mayores, de la misma forma se observa que al presentarse número de Reynolds altos se disminuye casi proporcionalmente el factor de fricción. Por último se infiere que la relación entre el tiempo y el factor de fricción es proporcional a medida que con el transcurso de los días de recirculación se obtienen factores de fricción más altos, como también se asciende en las curvas representadas por el cociente de rugosidad y diámetro de la tubería.

Una relación similar a las encontradas en las gráficas anteriores se puede observar para la última tubería que presenta una velocidad intermedia de 2 metros por segundo y que inicialmente contaba con una velocidad media de 1.5 metros por segundo; sin embargo la modificación en la velocidad de flujo no interfirió con la tendencia de la gráfica inmediatamente como se observa en la Gráfica 17.

Gráfica 17. Diagrama de Moody para la tubería con velocidad de 2 m/s



7.1.5 PRUEBAS FISICO-QUÍMICAS

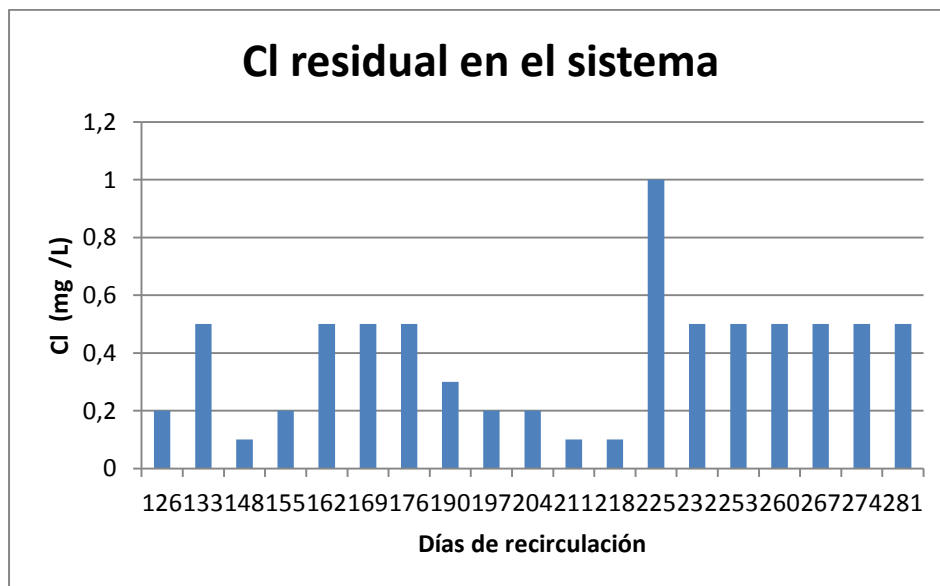
Los parámetros de pH y cloro residual fueron registrados semanalmente en el montaje para verificar las condiciones que se presentan en un sistema de distribución de agua potable convencional y para asegurar y controlar que los resultados puedan ser extrapolados a casos reales; los resultados de los análisis para pH se mantuvieron constante en 8.2. Sin embargo el valor del pH para el día 260 disminuyó hasta 7.5, los resultados para la medición del cloro residual sin embargo tuvieron más fluctuaciones, lo cual se debió en primera instancia a que en el mes de enero hacia los 225 días de recirculación el suministro de cloro se detuvo y se reanudo a las dos semanas, debido a problemas con la distribución del hipoclorito de calcio.

Estos resultados se pueden apreciar mejor en la Tabla 7 y en la Gráfica 18, la cual muestra un salto abrupto y un incremento en la concentración de cloro para el día de recirculación 225; es de suma importancia determinar los parámetros fisicoquímicos del montaje para controlar el crecimiento y la calidad del agua, evitando la proliferación y persistencia de organismos que se desarrollan a pH ácido ó básico.

Tabla 7. Cloro residual en el sistema de recirculación.

Cl	Día	Días Recirculación
0,2	22-dic	126
0,5	06-ene	133
0,1	13-ene	148
0,2	20-ene	155
0,5	27-ene	162
0,5	02-feb	169
0,5	08-feb	176
0,3	24-feb	190
0,2	02-mar	197
0,2	09-mar	204
0,1	16-mar	211
0,1	23-mar	218
1	30-mar	225
0,5	20-abr	232
0,5	27-abr	253
0,5	04-may	260
0,5	11-may	267
0,5	18-may	274
0,5	25-may	281

Gráfica 18. Cloro residual en el sistema de recirculación



6.2 ANÁLISIS CUALITATIVO

Las propiedades organolépticas son un buen indicativo para determinar la calidad del agua y han sido utilizadas a lo largo de la historia en las normativas para controlar el estado del recurso. Las características externas que presente una fuente de suministro de agua son fundamentales para determinar la eficiencia del servicio y es necesario que presente un color,

olor, turbiedad y apariencias deseables para evitar reclamos por parte de los usuarios. Por todo lo anterior se consideró necesario evaluar las características aparentes del agua y de las biopelículas mediante tubos de vidrio, y mediante la identificación de los organismos presentes en las tuberías para respaldar las observaciones físicas.

7.2.1 REGISTRO FOTOGRÁFICO



18 Enero de 2012

- 160 días de recirculación
- Velocidad 1 m/s



27 Enero de 2012

- 169 días
- V= 1.5 m/s



3 Febrero de 2012

- 176 días
- v= 1.5 m/s



10 Febrero de 2012

- 183 días
- v = 1 m/s



24 Febrero de 2012

- 197 días
- v= 1 m/s



2 Marzo de 2012

- 204 días
- v= 2 m/s



16 Marzo de 2012

- 218 días
- v= 1 m/s



23 Marzo de 2012

- 225 días
- v= 2 m/s



30 Marzo de 2012

- 232 días
- v= 1 m/s



13 Abril de 2012

- 246 días
- v= 1 m/s



11 Mayo de 2012

- 274 días
- v= 1 m/s

En el registro fotográfico se mostraron las imágenes de los tubos que mostraron mayores anomalías para el día registrado; se observa que el tubo que más aparece en el registro es el de la tubería que cuenta con una velocidad de flujo igual a 1 metro por segundo. Sin embargo las características físicas de la tubería de vidrio no se vieron significativamente alteradas por la presencia de las biopelículas; los días en que se observaron mayores coloraciones y presencia de biopelícula fueron en los 160, 225 y 274 días de recirculación.

7.2.2 IDENTIFICACIÓN DE MICROORGANISMOS

La prueba realizada por el LEMA mediante aislamiento e identificación de una bacteria a partir de cultivo no puro por técnica Crystal Gram Positivos arrojó los resultados que se ilustran en la Tabla 8.

Tabla 8. Identificación de microorganismos

Tubo	Testigo	Detección	Confiabilidad
1	15	<i>Corynebacterium aquaticum</i>	95%
2	15	<i>Bacillus licheniformis</i>	92%
3	15	<i>Corynebacterium aquaticum</i>	99%

Los organismos *Bacillus licheniformis* fueron reportados con anterioridad en el montaje y es frecuente que se encuentren en sistemas de distribución de agua potable; son organismos que se infiltran al organismo humano por medio de la ingestión de alimentos ó agua contaminada. Son organismos aeróbios que forman esporas y representan un riesgo para la salud humana.

Los *Corynebacterium aquaticum* son bacterias inmóviles anaerobias facultativas que por lo general no causan enfermedades y se encuentran comúnmente en la piel humana; algunas

bacterias de dicho género son patógenos, que causan afecciones tales como faringitis, infecciones en la piel, neumonitis entre otras.

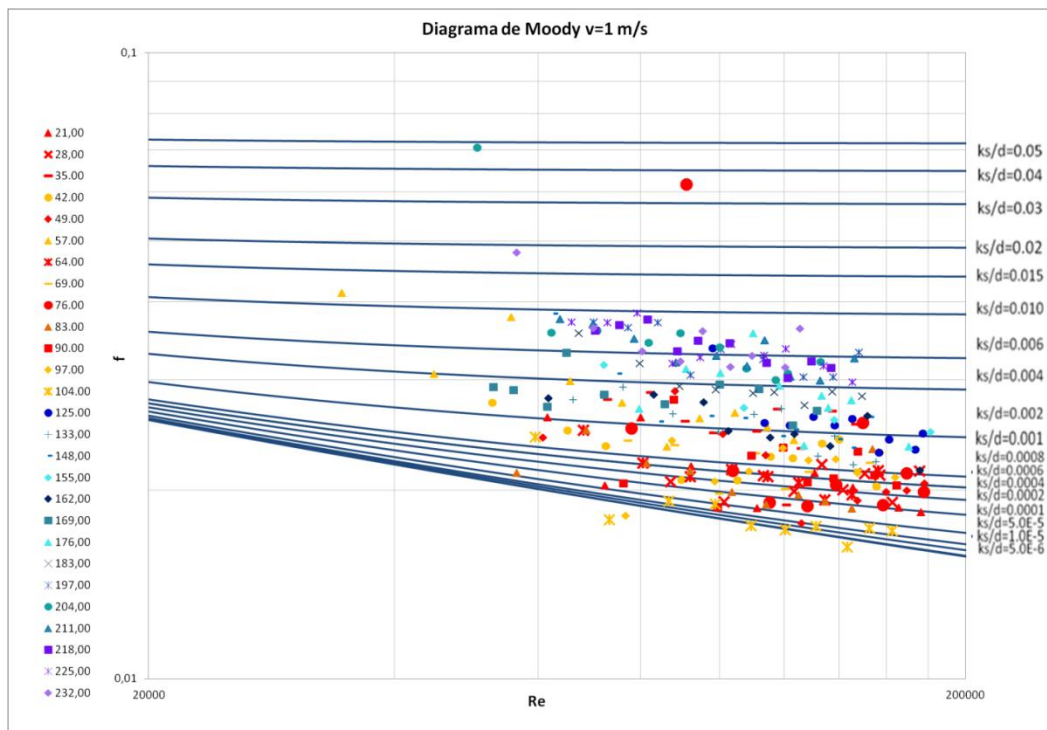
6.3 ANÁLISIS COMPARATIVO CON ESTUDIOS ANTERIORES

Los resultados del presente proyecto se realizaron a fin de elaborar una comparación y contribución al proyecto desarrollado por Trujillo en el 2011; paralelamente en la dinámica de crecimiento de las biopelículas se anticipó la influencia de los nutrientes en el desarrollo de los microorganismos. Para fundamentar el estudio del crecimiento y desprendimiento articulado en secciones anteriores es indispensable profundizar el tema para casos de estudio a base de diversas fuentes de CODB; es por esto que se eligieron proyectos de grado y tesis de semestres anteriores y las dos únicas bases de datos con información disponible fueron las realizadas por Muñoz en el 2005 y por Ángela Donoso en el 2009.

7.3.1 COMPARACIÓN CON EL TRABAJO DE TRUJILLO DEL 2011

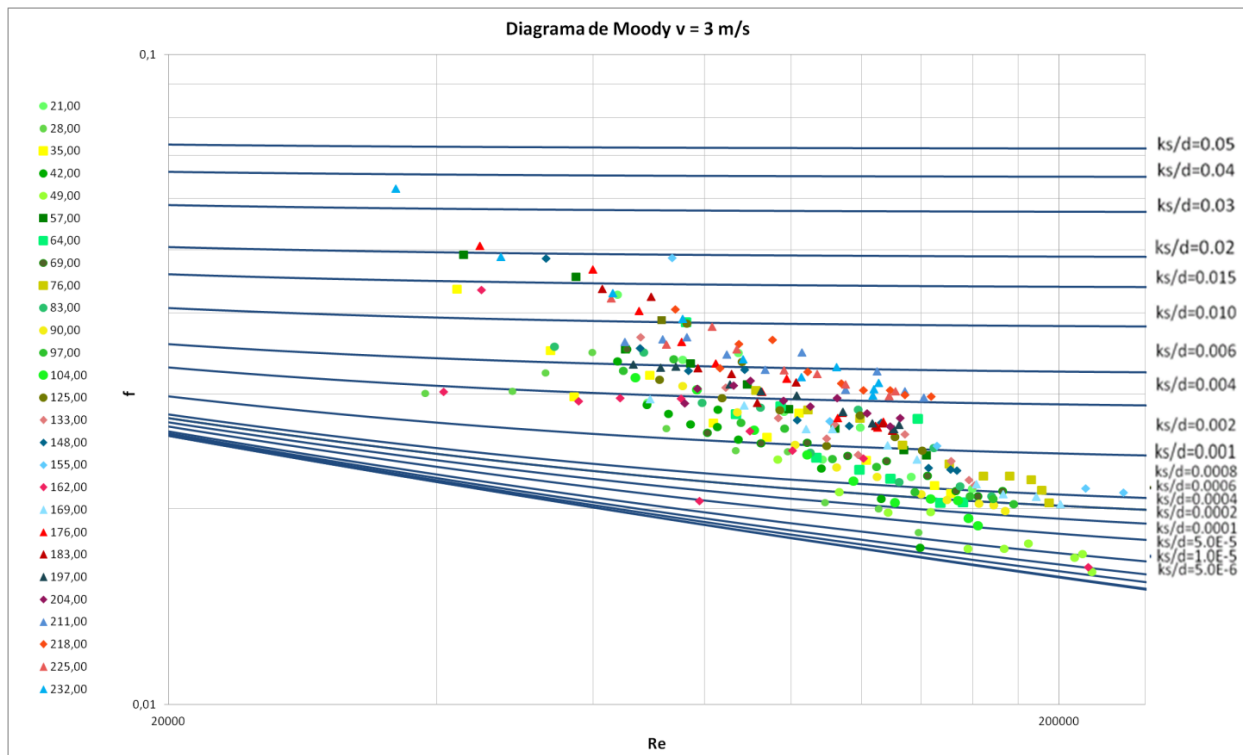
El diagrama de Moody y el crecimiento tanto en los testigos de centro como en los de borde siguen la misma tendencia para el proyecto iniciado por Trujillo y el continuado por la autora, como se muestra en la Gráfica 19 que corresponde al diagrama de Moody para la primera tubería y la Gráfica 20 que corresponde a la segunda tubería; solamente se pueden comparar las tuberías mencionadas puesto que la velocidad de la tercera tubería sufrió una variación de 0.5 m/s en su velocidad y esto podría alterar los resultados severamente.

Gráfica 19. Diagrama de Moody continuación datos Trujillo ($v = 1$ m/s)



La Gráfica 19 muestra el diagrama de Moody completo con todos los datos, en el cual las mediciones realizadas por Trujillo se muestran en colores rojo y naranja, mientras que las mediciones que se realizaron en el 2012 se muestran en tonos azules y púrpuras. Se infiere de la gráfica que el factor de fricción aumenta con el tiempo de recirculación; por otro lado la flexibilidad que le confiere la biopelícula tiene un rango de acción similar en ambas mediciones, que es significativamente menor al encontrado en los diagramas correspondientes a velocidades superiores, como el esbozado en la Gráfica 20 para la tubería con velocidad de tres metros por segundo.

Gráfica 20. Diagrama de Moody continuación datos Trujillo ($v = 3 \text{ m/s}$)



En la Gráfica 20 se muestran los datos registrados por Trujillo en tonos verdosos y amarillos, mientras que los registrados en el 2012 se muestran en tonos azules y rojos, se observa una alta flexibilidad en el factor de fricción ante cambios en el número de Reynolds minúsculos.

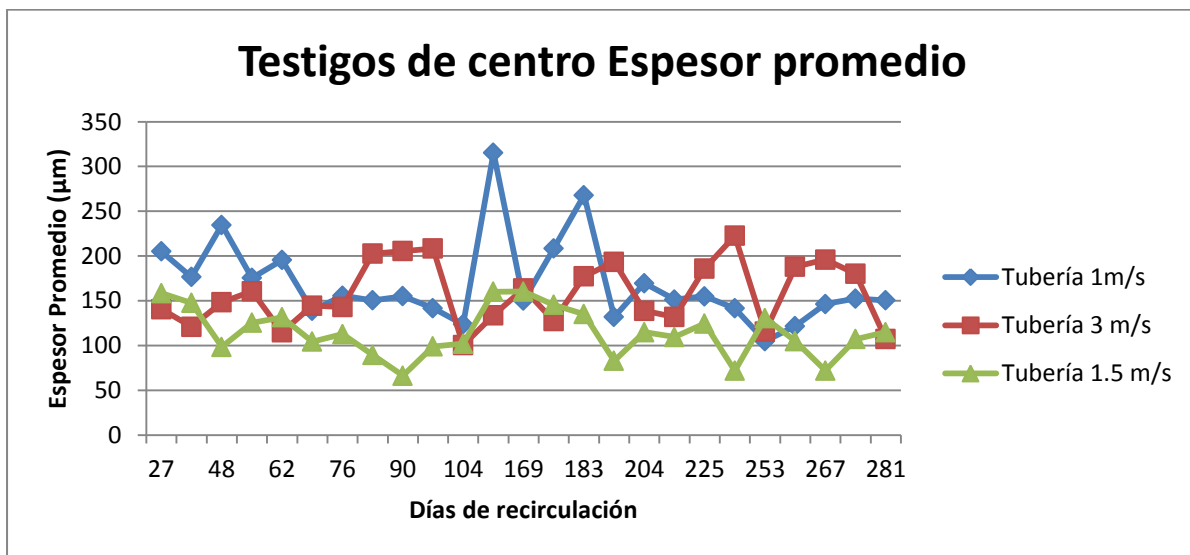
La tendencia de crecimiento de las biopelículas se mantiene constante para las dos mediciones tanto para los testigos de centro como para los de borde como se muestra en la Gráfica 21 y en la Gráfica 22 respectivamente. La tasa de crecimiento de las biopelículas se mantuvo relativamente constante como se puede observar en las Gráficas 20 y 21 que corresponde a la velocidad de crecimiento de las biopelículas.

En la Gráfica 22 se observa un salto en el espesor de las biopelículas que corresponde al cambio del orden de los testigos de borde, que como se abordó en las secciones anteriores, los

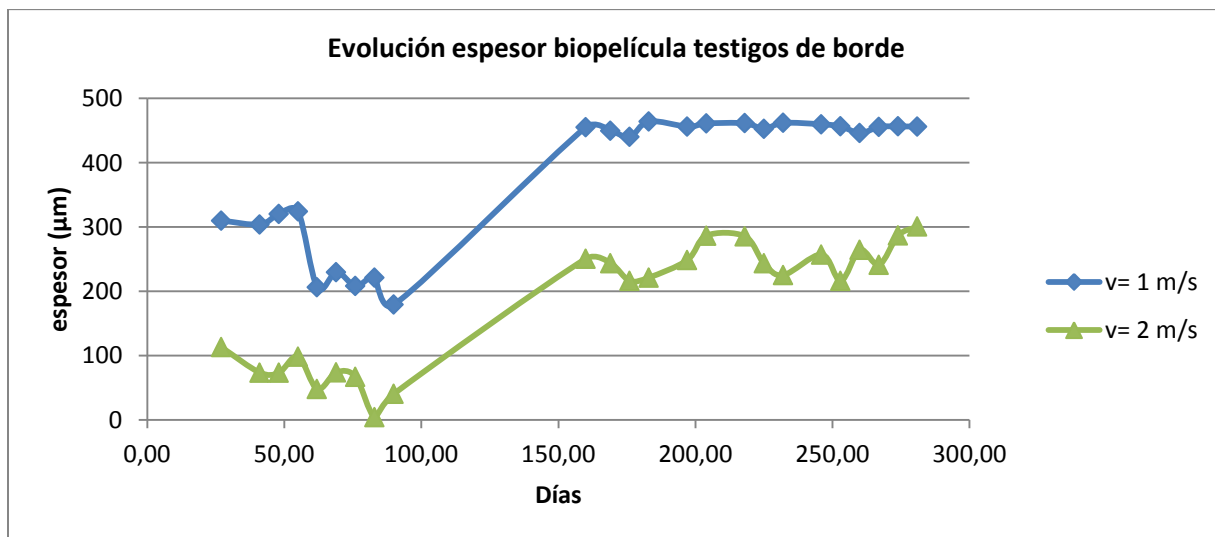
testigos de borde de aguas abajo tienen un espesor menor a los testigos de borde aguas arriba, y las mediciones iniciadas el día 160 correspondieron a los testigos 24 y 23 (aguas arriba en las tuberías). Sin embargo se observa que la tasa de cambio del espesor de la biopelícula en las demás secciones de la gráfica se mantiene constante lo que indica que la tendencia en ambos casos es similar.

Estas analogías se pueden atribuir al hecho de que las mediciones se realizaron en el mismo montaje y bajo las mismas condiciones de operación y mantenimiento.

Gráfica 21. Continuación datos de Trujillo espesor promedio testigos de centro.



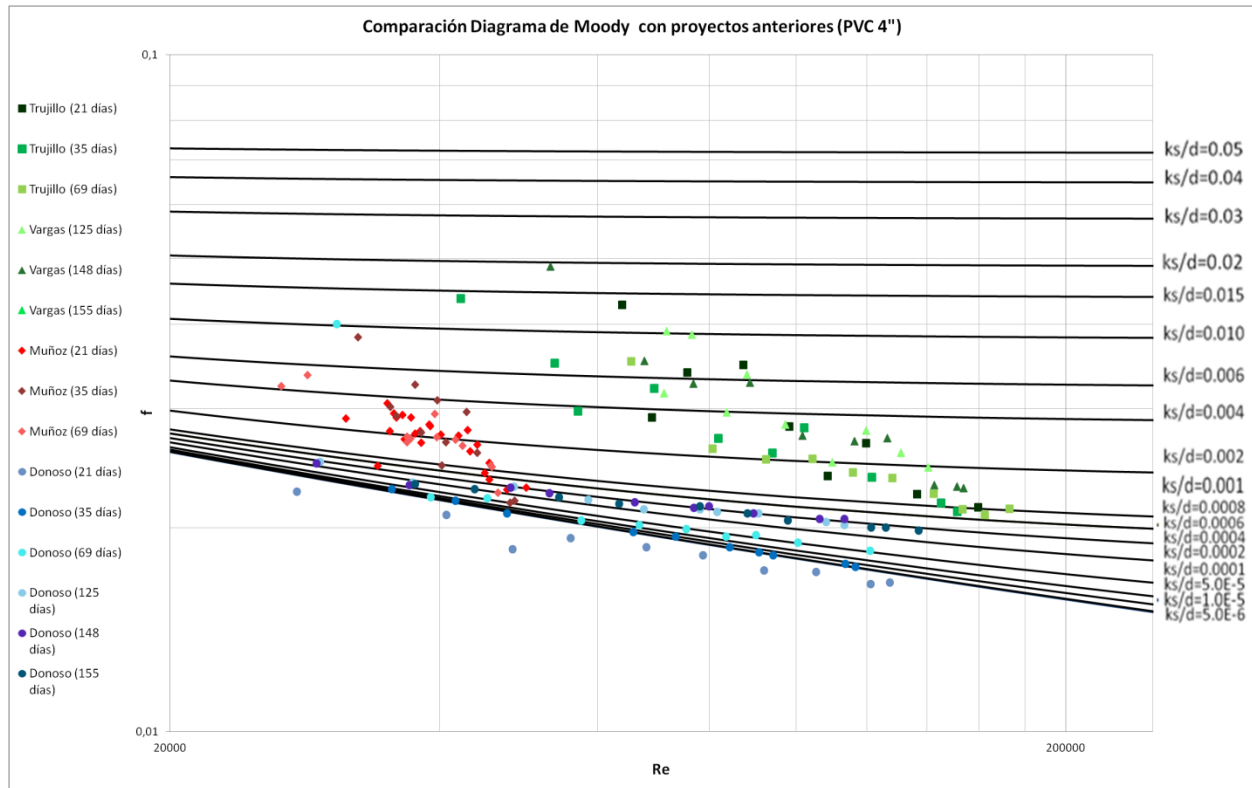
Gráfica 22. Espesor biopelículas testigos de borde (Continuación datos Trujillo).



7.3.2 COMPARACIÓN DE PROYECTOS CON FUENTES DE CODB DIFERENTES A PASTOS

El comportamiento presentado de las biopelículas alimentadas con pasto en comparación a las alimentadas con fosfato diamónico (DAP) y panela (glucosa), presenta una amplia diferencia tanto en las pérdidas por fricción como en el correspondiente factor de fricción, lo cual se evidencia en la Gráfica 23 que representa los diagramas de Moody encontrados por cuatro autores en seis días de recirculación (21 días, 35 días, 69 días, 125 días, 148 días y 155 días).

Gráfica 23. Diagrama de Moody comparativo por fuente de CODB.



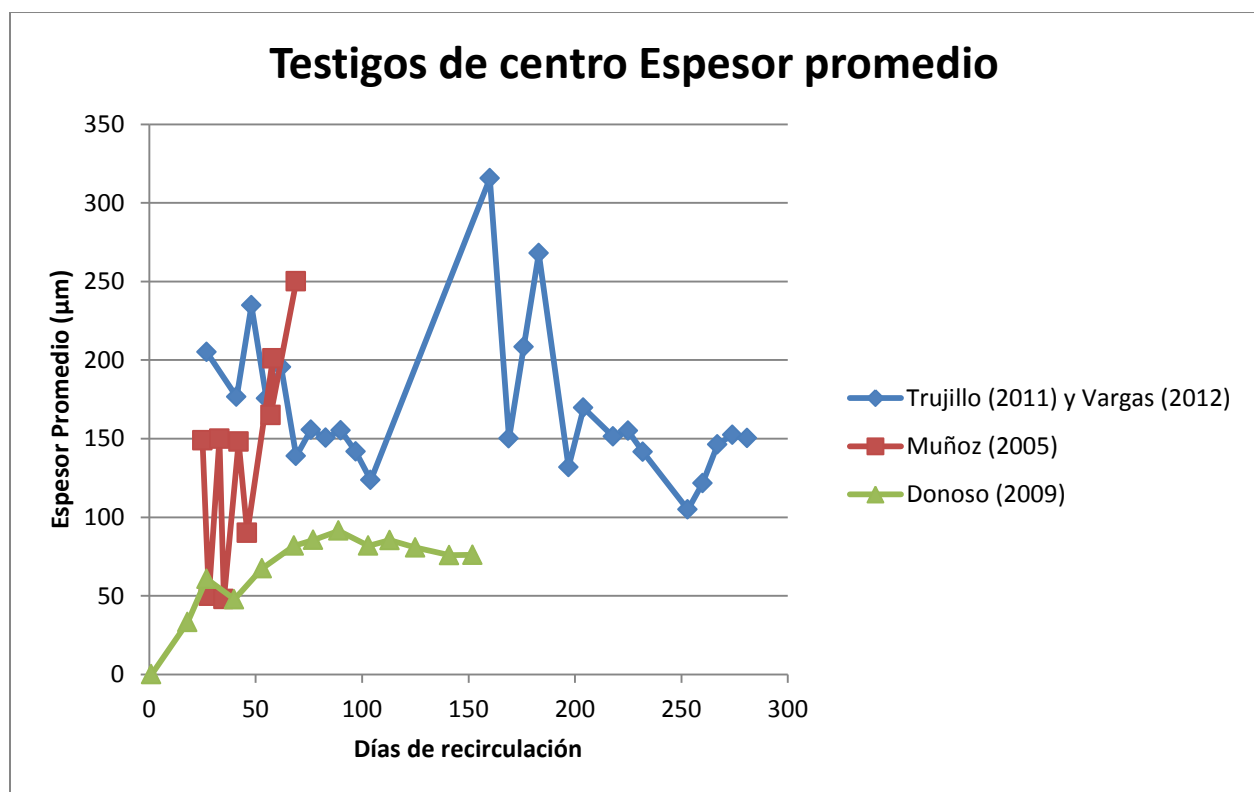
Las mediciones realizadas a tuberías con biopelículas expuestas a DAP se ilustran en la Gráfica 23 en color rojo, las mediciones realizadas a biopelículas expuestas a glucosa se muestran en color azul y finalmente las biopelículas expuestas a pastos se muestran en color verde. El diagrama de Moody se trazó para tuberías en PVC de 4 pulgadas de diámetro y con una velocidad de flujo cercana a 1 metro por segundo.

En la Gráfica 23 se obtienen los factores de fricción más altos utilizando como fuente de nutrientes pasto, la glucosa presenta menores factores de fricción y se mantiene en cocientes de rugosidad sobre diámetro de la tubería menores. El DAP puede producir valores del coeficiente de fricción cercanos a los encontrados con pasto, pero bajos números de Reynolds

menores, y por tanto es posible que al disminuir el número de Reynolds en las tuberías que utilizan nutrientes mediante pastos se obtengan factores de fricción mayores.

Otra de las relaciones que se pudieron determinar se refiere únicamente a los testigos de centro, pues Muñoz en su proyecto no utilizó testigos de borde; esto se observa en la Gráfica 24, en la cual se observa que los mayores espesores se encuentran en las biopelículas alimentadas con pastos desde los orígenes de la recirculación. Sin embargo los pronósticos para las biopelículas alimentadas con DAP sugieren un aumento abrupto del espesor de las biopelículas ante más días de circulación, estos datos no han sido reportados por el autor ni otros tesisistas.

Gráfica 24. Espesor en testigos de Centro, Comparación con proyectos anteriores.



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Entre los factores que más influyen la dinámica de crecimiento y desprendimiento de las biopelículas en sistemas de distribución de agua se encuentran el tipo de nutrientes y la frecuencia de suministro de materia orgánica.
- El tiempo necesario para que se presentara un desprendimiento de las biopelículas bajo las condiciones del modelo, fue de una semana sin nutrientes y de casi un mes ante deficientes cantidades de cloro.
- La carencia de nutrientes produce un decrecimiento en el factor de fricción de la tubería y una disminución considerable del espesor de la biopelícula.
- En los eventos en los cuales el espesor de la subcapa laminar viscosa es menor al espesor de la biopelícula se presenta un decrecimiento en la velocidad de formación de la biopelícula y se presenta una reducción paulatina en el espesor de la biopelícula, que podría ser inducido por el desprendimiento de la misma.
- Los testigos que se encuentran aguas arriba en la tubería y por tanto esas secciones de la tubería está más propensa a sufrir colonizaciones de biopelículas y a ser pioneras de las bacterias que se acomodarán aguas abajo, cuyo espesor será menor.
- El pasto es el tipo de nutriente que produce un mayor crecimiento de la biopelícula pues su espesor es considerablemente más amplio que los encontrados con otras fuentes de materia orgánica, también se encuentra que los factores de fricción y las características hidráulicas se alteran ampliamente en presencia de pastos.
- La panela es el tipo de nutriente más estable pues no se producen mayores fluctuaciones ni se presenta una flexibilidad considerable en el factor de fricción, ante números de Reynolds menores.
- La magnitud y el espesor desprendido de la biopelícula es directamente proporcional a la velocidad de flujo y a los esfuerzos de cortante producidos interiormente en la tubería.
- Se recomienda implementar un sistema para el control cualitativo de las biopelículas diferente al registro fotográfico puesto que no se observan cambios destacables en las características de los tubos de vidrio; se podrían obtener mejores resultados si se utilizan otros materiales para las tuberías laterales que tenga una mejor predisposición para la adhesión de películas biológicas como el hierro y se observe la biomasa por medio de cámaras de inspección.

8. BIBLIOGRAFÍA

Benito Chen, Yaging Li. (2002). *Simulation of thick biofilm growth at the microscale*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Publishers.

Beyenal. (2002). *Passive Film Chemistry on 316L Stainless Steel Ennobled by Biomineralized Manganese*. Denver, Colorado: NACE International.

Boe-Hansen, R. (2001). *Microbial growth in drinking water distribution systems*. Denmark, Lyngby: Environment & Resources DTU, Technical University of Denmark.

Carvajal L., Gómez Alejandra & Ochoa Santiago. (2006). Simulación de un lavado hidráulico en tuberías para el control del crecimiento de biopelícula. *Dyna, julio, año/vol.74 número 152*, pp.63-72.

Characklis, W., Picologlou, B. & Zeller, N. (1980). Biofilm growth and hydraulics performance. *Journal of the Hydraulics Division*, 733-746.

Chmielewski RAN & Frank JF. (2003). *Biofilm formation and control in food processing facilities*. Comp. Rev. Food Sci. and Food Saf.

CIACUA. (2009). *Investigación sobre los factores que generan la formación, crecimiento y posterior desprendimiento de biopelículas en las redes matrices de acueducto. Fase I*. Bogotá, D.C.: Centro de Investigaciones en Acueducto y Alcantarillado.

Cloete T. E., Westaard D., van Vuuren S.J. (2003). *Dynamic response of biofilm to pipe surface and fluid velocity*. Recuperado el 5 de Abril de 2012, de Cloete_Dynamic:
[http://www.up.ac.za/dspace/bitstream/2263/3694/1/Cloete_Dynamics\(2003\).pdf](http://www.up.ac.za/dspace/bitstream/2263/3694/1/Cloete_Dynamics(2003).pdf)

Echavarría, M. A. (2003). *Influencia del crecimiento de biopelículas sobre la rugosidad absoluta en tuberías presurizadas*. Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes.

EPA. (1988). *Environmental Protection Agency*. Recuperado el 4 de Enero de 2012, de Patógenos que están en la lista de candidatos contaminantes: www.epa.gov

Geesey. (1994). *Edstrom*. Recuperado el 4 de Abril de 2012, de Edstrom:
www.edstrom.com/Resources.cfm.doc_id=143

Gelves, M. F. (2005). *Deterioro de la calidad del agua por el posible desprendimiento de las biopelículas en las redes de distribución de agua potable. Estado del arte*. Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes.

Gelves, M. F. (2005). *Deterioro de la calidad del agua por el posible desprendimiento de las biopelículas en redes de distribución de agua potable estado del arte*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.

Gómez, M. P. (2008). *Mecanismos de control en la formación de biopelículas en sistemas de distribución de agua potable*. Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes.

Hallam, N. B., et al. (2001). THE POTENTIAL FOR BIOFILM GROWTH IN WATER DISTRIBUTION SYSTEMS. Pergamon. ELSEVIER Science. , 4063-4071.

Hernández, M. X. (2010). *Influencia de la fuente de carbono en el desarrollo de biopelículas y su efecto hidráulico en sistemas de distribución de agua potable*. Bogotá D.C.: Universidad de los Andes.

Jan Dirk van Elsas, Sarah Turner and Mark J. Bailey. (2002). *Microbial biofilm*. Oxford, U.K: New Phytosphere.

Klapper, I., Rupp, C.J., Cargo, R., Purvedorj, B. and Stoodley, P. (2002). Viscoelastic fluid description of bacterial biofilm material properties. *Biotechnology and Bioengineering*, 80, (3) , 289-296.

Knobelsdorf, J. e. (1997). Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: una revisión bibliográfica. *Ingeniería del Agua Vol.4 Num.2* , 17-28.

Kwok W.K, Picioreanu C, Ong S.L, Van Loosdrecht M & Heijnen J.J. (1998). "Influence of Biomass Production and Detachment Forces on Biofilm Structures in a Biofilm Airlift Suspension Reactor". *Biotechnology and Bioengineering* , 401-407.

L.C.Simoes, N.Azevedo, A.Pacheco, C.W.Keevil & M.J. Vieira. (2006). "Drinking water biofilm assessment of total and culturable bacteria under different operating conditions" . Braga, Portugal.: Taylor & Francis Group. .

Latorre, R. M. (2005). *Efecto hidráulico de las biopelículas en tuberías de agua potable*. Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes.

Levinson, W. (2006). *Microbiología e Inmunología Médica*. Madrid, España: Mc Graw Hill Interamericana, Octava edición.

Mayette. (1992). *Edsom*. Recuperado el 4 de Abril de 2012, de Edsom: www.edsom.com/Resources.cfm?doc_id=143

Mittelman, M. (Octubre 1985). Biological fouling of purified-water systems: Part I, Bacterial Growth and Replication . *Microcontamination 3* , pp. 51-55, 70.

MNB Momba, N Makala. (Abril 2004). Comparing the effect of various pipe materials of biofilm formation in chlorinated and combined chlorine-chloraminated water systems. *Water SA Vol 30 No 2* .

Murcia, M. A. (2009). *Biopelículas: Mecanismos y procesos para removerlas de los sistemas de distribución de agua potable*. Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes.

Paul Stoodley, Zbigniew Lewandowski, John D. Boyle, Hilary M. Lappin-Scott. (1998). *Oscillation Characteristics of Biofilm Streamers in Turbulent Flowing Water as related to drag and pressure drop* . Devon, United Kingdom: Biotechnology and bioengineering Vol. 57. .

Paula Watnick and Roberto Kolter. (2011). *Biofilms: The Hypertextbook*. Recuperado el 8 de Abril de 2012, de <http://www.hypertextbookshop.com/biofilmbook/v004/r003/index.html>

Picioreanu C, V. L. (2001). Two-Dimensional Model of Biofilm Detachment Caused by Internal Stress from Liquid Flow. *Biotechnology and Bioengineering* , 205-218.

Piera, G. (2003). *ESTUDIO DEL BIOFILM: Formación y Consecuencias*. Barcelona: Escola de prevenció i Seguretat Integral.

Reyes, P. (2005). *Comportamiento de biopelículas luego de lavados sucesivos en tuberías de agua a presión*. Bogotá, D.C.: Universidad de los Andes.

Rochex, A., Godon, J.J., Bernet, N., Escudié, R. (2008). Role of shear stress on composition, diversity and dynamics of biofilm bacterial communities. *Water Research*, 42(20) , 4915-4922.

Saldarriaga, J. G. (2007). *Hidráulica de tuberías. Abastecimiento de aguas, redes, riegos*. Bogotá, D.C.: Alfaomega.

Singh, P. (2002). *A component of innate immunity prevents bacterial biofilm development*. Nature.

Stoodley P, Wilson S, Cargo R, Piscitelli C, Rupp CJ. (2001). "Detachment and other dynamic processes in bacterial biofilms". *Surfaces in Biomaterials Foundation* , 189-192.

Trujillo Gómez, M. X. (2011). *Modelación física de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono orgánico disuelto*. Bogotá: Universidad de los Andes.

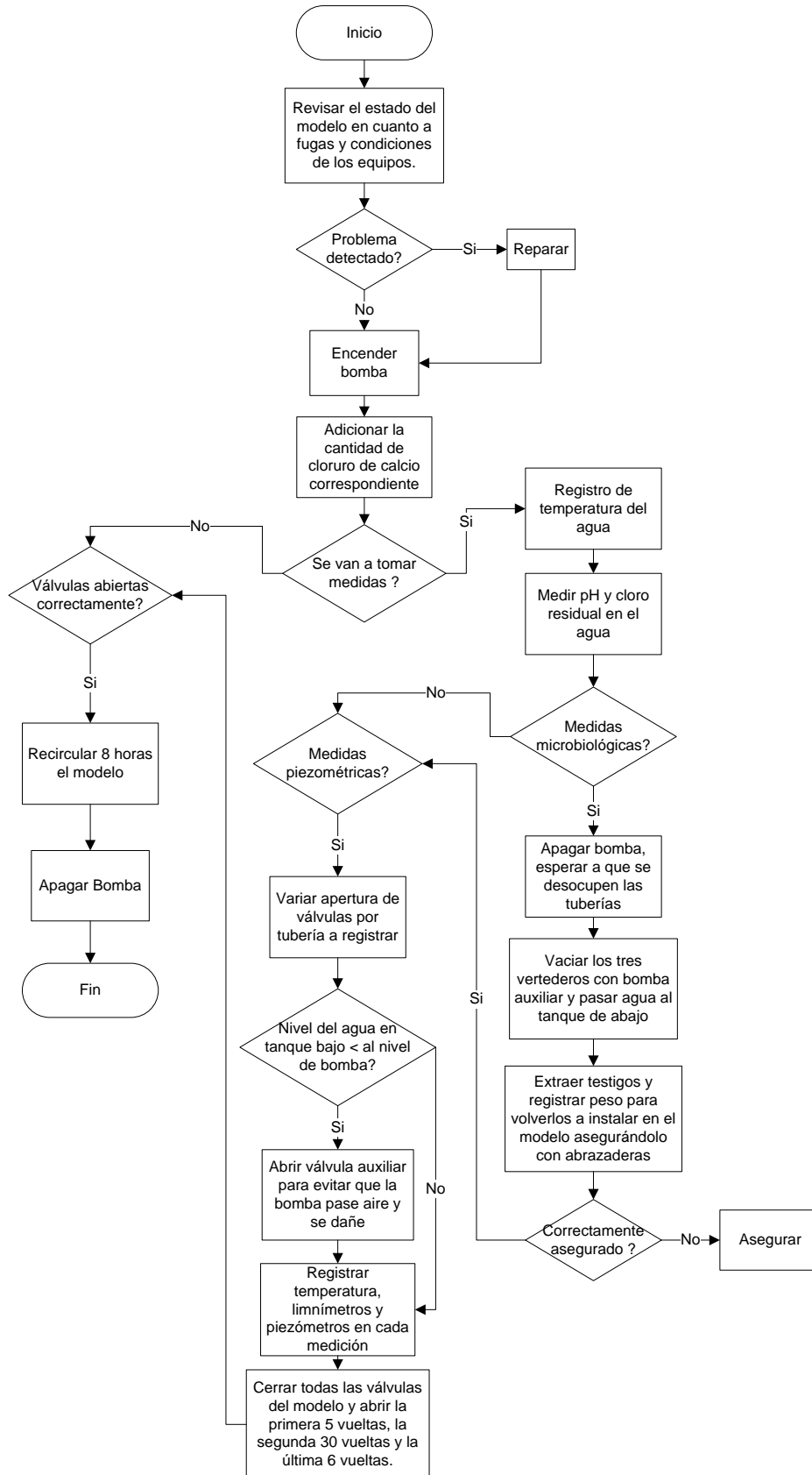
Vargas Gamarra, A. (2005). *Influencia de los materiales de las tuberías en el crecimiento de biopelículas en las redes de distribución de agua a presión*. Bogotá, Colombia.: Universidad de los Andes.

Vergara, F and Cox, G. (2002). Controlled Biomass formation and kinetics of toluene degradation in a bioscrubber and in a reactor Airlift. En F. C., *Biotechnology and bioengineering*. (págs. pp 686-693). Vol.55 (4).

Wimpenny, J. (2000). Heterogeneity in biofilms. *FEMS Microbiol* , 661-671.

9. ANEXOS

9.1 ANEXO PROCEDIMIENTO DE RECIRCULACIÓN DIARIO



10.2 ANEXO CÁLCULOS HIDRÁULICOS DE LAS TUBERÍAS CON PRESENCIA DE BIOPELÍCULAS

Antes de encender el sistema se registra la altura inicial (H_o) de cada uno de los vertederos con el limnómetro, en este ejemplo se aborda el cálculo para el primer vertedero, es decir para la tubería 1.

La temperatura del agua es registrada para cada medida piezométrica que se vaya a realizar; con dichos datos se puede calcular la viscosidad cinemática del agua y la densidad de la misma al interpolar con los datos encontrados en la literatura que se ilustran en el cuadro a continuación:

Cuadro 4. Cambio de la viscosidad y densidad del agua con la temperatura

T (°C)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)
20	0,001003	998,29
21	0,000979	998,09
22	0,000911	997,38
23	0,000933	997,62
24	0,000911	997,38
25	0,000891	997,13
26	0,000871	996,86
27	0,000852	996,59
28	0,000833	996,31
29	0,000815	996,02
30	0,000798	995,71

Fuente: [Base de datos]. [Consultado el 29 de Mayo de 2012]. <Disponible en>: http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf

Tomando los datos del 22 de Diciembre de 2011, se tienen las temperaturas para la tubería número 1 mostradas en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Datos registrados de temperatura por medición.

Medición (-)	T (°C)
1	25,1
2	25,1
3	25,2
4	25,2
5	25,3
6	25,3
7	25,3
8	25,3
9	25,4
10	25,4

Se encuentra entonces que la temperatura fluctúa entre 25 y 26°C, la ecuación que se utiliza para realizar la interpolación se muestra en la Ecuación 8:

$$\mu_0 = \mu_{\text{tablaDe}T_{\text{max}}} - \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{medida}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{min}}} * (\mu_{\text{tablaDe}T_{\text{max}}} - \mu_{\text{tablaDe}T_{\text{min}}})$$

Ecuación 8. Interpolación de la viscosidad según la temperatura medida.

en donde μ_0 es la viscosidad en la temperatura medida, $\mu_{\text{tablaDe}T_{\text{max}}}$ es la viscosidad que se encuentra en el Cuadro 4 para el límite máximo en el que fluctúa la temperatura medida en la tubería dentro de las 10 mediciones. T_{max} y T_{min} son los límites máximo y mínimo respectivamente para la temperatura en la que fluctúa la medición en las mediciones y finalmente $\mu_{\text{tablaDe}T_{\text{min}}}$ es la viscosidad que se encuentra en el Cuadro 4 para el límite mínimo en el que fluctúa la temperatura medida en la tubería dentro de las 10 mediciones. Para el presente ejemplo entonces se tiene:

$$\mu_0 = 0.00087 - \frac{26 - T_{\text{medida}}}{26 - 25} * (0.00087 - 0.00089)$$

La Ecuación 8 también puede ser utilizada para determinar la densidad en la temperatura medida y reemplazando en los datos del Cuadro 5, se obtiene la densidad para cada temperatura. La viscosidad cinemática se determina dividiendo la viscosidad entre la densidad, los resultados se muestran en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Resultados de viscosidad, densidad y viscosidad cinemática para ejemplo.

Medición	T	μ	ρ	ν
(-)	(°C)	(kg/ms)	(kg/m³)	(m²/s)
1	25,07	8,88E-04	997,1242	8,90E-07
2	25,13	8,86E-04	997,1086	8,89E-07
3	25,17	8,85E-04	997,0982	8,88E-07
4	25,23	8,84E-04	997,0853	8,87E-07
5	25,26	8,83E-04	997,0775	8,86E-07
6	25,29	8,83E-04	997,0697	8,85E-07
7	25,33	8,82E-04	997,0620	8,84E-07
8	25,35	8,81E-04	997,0568	8,84E-07
9	25,37	8,81E-04	997,0516	8,84E-07
10	25,39	8,80E-04	997,0464	8,83E-07

En cada una de las 10 mediciones del ejemplo se tomaron las temperaturas y la altura del vertedero simultáneamente, con dichos datos se puede calcular la velocidad de flujo haciendo uso de la ecuación de calibración para el primer vertedero esbozado en el Cuadro 1. La fórmula se retoma en la Ecuación 9. Tomando la altura para la medición 1, se tiene que $H_L = 30,01 \text{ cm}$ y si la altura inicial del vertedero uno fue 11.15 cm entonces:

$$Q = 0.0085(H_L - H_0)^{2.46} = 0.0085(30.01 - 11.15)^{2.46} = 11.75 \frac{L}{s} * \frac{1m^3}{1000L} = 0.01175 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ecuación 9. Cálculo del caudal para cada tubería.

La velocidad entonces se calcula como: $v = Q * \frac{4}{\pi * \varphi^2} = \frac{0.01175 \text{ m}^3}{s} * \frac{4}{\pi * 0.108^2} = 1.282 \text{ m/s}$ esto es posible gracias a que el diámetro interno de las tuberías es conocido por las mediciones realizadas por Trujillo.

Luego puede ser posible calcular el número de Reynolds haciendo uso de la **¡Error! No se encuentra el rígen de la referencia.** como sigue:

$$Re = \frac{0.108 * 1.282}{8.9 * 10^{-7}} = 155577$$

Las pérdidas por fricción se calculan con los registros de la altura piezométrica aguas arriba y aguas abajo para cada tubería, esta altura debe promediarse para el punto de aguas arriba (H_{prom1}) y aguas abajo (H_{prom2}) así la pérdida de la altura piezométrica (H_f) es la diferencia de (H_{prom1}) y (H_{prom2}). Ahora si se puede aplicar la ecuación de Darcy-Weisbach que se muestra a continuación:

$$f = H_f * \frac{d}{l} * \frac{2g}{v^2}$$

Los datos de las alturas piezométricas se pueden observar en el anexo 10.4, H_f es igual a 0.048 m, entonces reemplazando los valores se tiene:

$$f = 0.048 * \frac{0.108 \text{ m}}{1.20 \text{ m}} * 2 * \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\left(1.01 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = 0.022$$

La rugosidad absoluta ahora se calcula con la Ecuación 5, resolviendo para k_s , entonces se tiene:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \rightarrow k_s = \left(10^{-0.5 \cdot \sqrt{f}} - \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) = \left(10^{-0.5 \cdot \sqrt{0.022}} - \frac{2.51}{155577 \cdot \sqrt{0.022}} \right) = 1.33 \text{E} - 4 \text{ m}$$

El esfuerzo cortante se debe calcular para determinar el espesor de la subcapa laminar viscosa, como se muestra a continuación:

$$\tau_0 = \frac{d}{4} \cdot \rho g \cdot \frac{H_f}{l} = \frac{0.108 \text{ m}}{4} \cdot 9975125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{0.048 \text{ m}}{1.2 \text{ m}} = 4.55 \frac{\text{Kg}}{\text{ms}^2}$$

Ahora se debe determinar: $v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{4.55 \frac{\text{Kg}}{\text{ms}^2}}{9975125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 0.067 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ para finalmente calcular el espesor de la subcapa

laminar viscosa:

$$\delta' = 11.6 \cdot \frac{\mu}{u_* \rho} = 11.6 \cdot \frac{9.23 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}{0.0582 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 9975125 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 1000000 = 184,5219 \mu\text{m}$$

10.3 ANEXO CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DE LAS TUBERÍAS

La determinación de los parámetros más relevantes fueron definitivos en la fase de construcción del proyecto, esto fue realizado por María Ximena Trujillo en el año 2011 y los resultados para la tubería 1, para la tubería 2 y para la tubería 3 se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Parámetros relevantes para el cálculo hidráulico.

C	(-)	0,008551
n	(-)	2,460025
ϕ	(m)	0,108
A	(m ²)	0,009
L	(m)	2,765
Q	(L/s)	7,7658
Q	(m ³ /s)	0,0078
v	(m/s)	0,8477

Se puede observar que los parámetros encontrados son los mismos debido a que todas las tuberías son del mismo material y tienen el mismo tamaño. En el Cuadro 7 ϕ es el diámetro de la tubería, A es el área, L es la longitud entre piezómetros de aguas arriba y aguas abajo, Q es el caudal y v es la velocidad de flujo.

A continuación se muestran las características de flujo que son influenciadas por las biopelículas para las tuberías 1 y 2. Estos factores comprenden el número de Reynolds, la subcapa laminar viscosa y el factor de fricción.

TUBERÍA 1					
Días	Re	δ'	ks	ks	0,305 δ'
(-)	(-)	(μm)	(m)	(μm)	(μm)
162	102471	219,2612	2,08E-04	2,08E+02	6,69E+01
169	111832,8	186,053	4,10E-04	4,10E+02	5,67E+01
176	109857,4	170,8355	8,50E-04	8,50E+02	5,21E+01
183	79842,97	248,4732	5,64E-04	5,64E+02	7,58E+01
197	100370,5	192,5419	6,95E-04	6,95E+02	5,87E+01
204	107894,2	185,5649	5,45E-04	5,45E+02	5,66E+01
211	107999,6	184,5894	5,62E-04	5,62E+02	5,63E+01
218	103012,4	185,5977	7,49E-04	7,49E+02	5,66E+01
225	103351,9	185,3069	7,40E-04	7,40E+02	5,65E+01
232	103149	193,6734	5,52E-04	5,52E+02	5,91E+01
246	79980,97	290,7295	1,27E-04	1,27E+02	8,87E+01
253	71058,08	281,3454	5,24E-04	5,24E+02	8,58E+01
260	30072,53	345,7195	1,35E-02	1,35E+04	1,05E+02
267	37262,38	407,1883	2,77E-03	2,77E+03	1,24E+02

TUBERÍA 2					
Días	Re	δ'	ks	ks	0,305 δ'
(-)	(-)	(μm)	(m)	(μm)	(μm)
162	101517,5	225,0516	1,75E-04	1,75E+02	6,86E+01
169	109964,9	209,1546	1,68E-04	1,68E+02	6,38E+01
176	105220,3	201,1325	3,56E-04	3,56E+02	6,13E+01
183	78646,33	248,3316	6,31E-04	6,31E+02	7,57E+01
197	101553,7	201,858	4,55E-04	4,55E+02	6,16E+01
204	114520,6	187,7426	3,17E-04	3,17E+02	5,73E+01
211	102928,6	184,5489	7,82E-04	7,82E+02	5,63E+01
218	104391,2	188,3196	6,19E-04	6,19E+02	5,74E+01
225	107046,7	184,3967	6,03E-04	6,03E+02	5,62E+01
232	102771,4	193,0914	5,78E-04	5,78E+02	5,89E+01
246	68359,04	250,8878	1,45E-03	1,45E+03	7,65E+01
253	29102,88	513,9777	2,95E-03	2,95E+03	1,57E+02
260	26723,93	507,706	4,72E-03	4,72E+03	1,55E+02
267	42028,73	394,0217	1,73E-03	1,73E+03	1,20E+02

10.4 ANEXO BASE DE DATOS SEMANAL, MEDICIONES:

FECH A	Día	Tubo PVC	H ₀ (m)	To ma (-)	H _L (m)	μ (kg/ms)	ρ (kg/m ³)	v (m ² /s)	Q (m ³ /s)	v (m/s)	Re (-)	AGUAS ARRIBA				AGUAS ABAJO				h _{f_p2} (m)	h _{f_p3} (m)	h _{f_p4} (m)	h _{f_prome} dio (m)	f _{prom} (-)	ks (m)	τ ₀ (kg/m s ²)	v* (m/s)	δ' (μm)	Tipo de Flujo (-)	
												P2 (m)	P3 (m)	P4 (m)	Pprom (m)	P2 (m)	P3 (m)	P4 (m)	Pprom (m)											
15/12/2011	126	1	11,47	1	31,59	9,13E-04	997,40	9,15E-07	0,014	1,50	1,77E+05	0,84	0,84	0,84	0,84	0,76	0,77	0,77	0,77	0,08	0,07	0,07	0,07	0,025	2,25E-04	6,94	0,083	127,26	FTHL	
			11,47	2	31,42	9,12E-04	997,40	9,15E-07	0,013	1,47	173801	0,83	0,83	0,83	0,83	0,76	0,77	0,76	0,76	0,07	0,06	0,06	0,07	0,023	1,71E-04	6,27	0,079	133,8073265	FTHL	
			11,47	3	30,82	9,12E-04	997,39	9,14E-07	0,013	1,37	161348	0,81	0,81	0,81	0,81	0,74	0,76	0,75	0,75	0,07	0,05	0,06	0,06	0,024	2,00E-04	5,61	0,075	141,4557726	FTHL	
			11,47	4	30,59	9,11E-04	997,38	9,14E-07	0,012	1,33	156751,9	0,80	0,80	0,80	0,80	0,74	0,75	0,75	0,74	0,06	0,05	0,05	0,05	0,023	1,58E-04	5,03	0,071	149,2190668	FTHL	
			11,47	5	30,01	9,10E-04	997,37	9,13E-07	0,011	1,23	145462,4	0,79	0,79	0,79	0,79	0,73	0,74	0,74	0,74	0,06	0,05	0,05	0,05	0,026	2,75E-04	4,90	0,070	150,9884952	FTHL	
			11,47	6	29,64	9,10E-04	997,37	9,13E-07	0,011	1,17	138460,5	0,77	0,78	0,78	0,77	0,72	0,73	0,73	0,73	0,05	0,04	0,04	0,05	0,025	2,45E-04	4,33	0,066	160,6284718	FTHL	
			11,47	7	29,19	9,09E-04	997,36	9,11E-07	0,010	1,10	130345,2	0,76	0,77	0,77	0,76	0,72	0,73	0,72	0,72	0,04	0,04	0,04	0,04	0,026	2,77E-04	3,95	0,063	168,00	FTHL	
			11,47	8	28,71	9,08E-04	997,35	9,11E-07	0,009	1,03	121893,5	0,75	0,75	0,75	0,75	0,71	0,72	0,71	0,71	0,04	0,03	0,04	0,04	0,025	2,39E-04	3,34	0,058	182,4781439	FTHL	
			11,47	9	28,22	9,08E-04	997,34	9,10E-07	0,009	0,96	113635,1	0,74	0,74	0,74	0,74	0,70	0,71	0,71	0,71	0,03	0,03	0,03	0,03	0,026	2,46E-04	2,93	0,054	194,7933308	FTHL	
			11,47	10	27,24	9,07E-04	997,34	9,09E-07	0,008	0,83	98048,07	0,73	0,73	0,73	0,73	0,69	0,70	0,70	0,70	0,03	0,03	0,03	0,03	0,034	7,01E-04	2,87	0,054	196,7926925	FTHL	
		126	2	11,23	1	29,71	9,05E-04	997,32	9,08E-07	0,011	1,22	145094,4	0,77	0,76	0,75	0,76	0,71	0,71	0,71	0,71	0,06	0,05	0,03	0,04	0,023	1,57E-04	4,27	0,065	160,9861961	FTHL
	11,23			2	29,22	9,05E-04	997,31	9,07E-07	0,010	1,14	135883,3	0,75	0,74	0,74	0,74	0,71	0,71	0,70	0,70	0,05	0,04	0,04	0,04	0,024	1,86E-04	3,89	0,062	168,6302066	FTHL	
	11,23			3	28,62	9,04E-04	997,31	9,07E-07	0,010	1,05	125069,6	0,74	0,73	0,73	0,73	0,70	0,70	0,69	0,70	0,04	0,04	0,04	0,04	0,025	2,44E-04	3,50	0,059	177,497841	FTHL	
	11,23			4	28,06	9,04E-04	997,31	9,07E-07	0,009	0,97	115423,6	0,72	0,72	0,71	0,72	0,69	0,69	0,69	0,69	0,03	0,03	0,02	0,03	0,023	1,30E-04	2,64	0,051	204,2854291	FTHL	
	11,23			5	27,31	9,04E-04	997,30	9,06E-07	0,008	0,87	103205,7	0,71	0,70	0,70	0,70	0,68	0,68	0,68	0,68	0,03	0,02	0,02	0,02	0,025	2,22E-04	2,36	0,049	216,2955416	FTHL	
	11,23			6	26,72	9,03E-04	997,30	9,06E-07	0,007	0,79	94187,29	0,70	0,70	0,69	0,70	0,68	0,68	0,67	0,67	0,03	0,02	0,02	0,02	0,029	4,26E-04	2,29	0,048	219,1649341	FTHL	
	11,23			7	26,42	9,03E-04	997,30	9,06E-07	0,007	0,75	89786,45	0,69	0,69	0,69	0,69	0,67	0,67	0,67	0,67	0,02	0,02	0,02	0,02	0,026	2,33E-04	1,82	0,043	246,2559823	FTHL	
	11,23			8	25,91	9,03E-04	997,29	9,05E-07	0,006	0,69	82572,9	0,69	0,69	0,68	0,69	0,67	0,67	0,66	0,66	0,02	0,02	0,02	0,02	0,033	6,43E-04	1,97	0,044	236,0561082	FTHL	
	11,23			9	25,55	9,03E-04	997,29	9,05E-07	0,006	0,65	77734,17	0,69	0,68	0,67	0,68	0,66	0,66	0,66	0,66	0,02	0,02	0,02	0,02	0,033	6,44E-04	1,75	0,042	250,4974979	FTHL	
	11,23			10	25,52	9,02E-04	997,28	9,05E-07	0,006	0,65	77341,04	0,68	0,68	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,02	0,02	0,01	0,01	0,027	2,72E-04	1,40	0,037	279,9917136	FTHL	
		126	3	10,51	1	30,76	9,01E-04	997,27	9,04E-07	0,014	1,53	182512,8	0,83	0,83	0,81	0,82	0,77	0,77	0,77	0,77	0,06	0,07	0,04	0,05	0,018	3,12E-05	5,19	0,072	145,3197132	FTHL
	10,51			2	30,56	8,99E-04	997,25	9,02E-07	0,014	1,49	178482,9	0,83	0,83	0,80	0,82	0,77	0,77	0,77	0,77	0,06	0,06	0,03	0,05	0,018	3,41E-05	5,00	0,071	147,7612966	FTHL	
	10,51			3	30,27	8,99E-04	997,25	9,01E-07	0,013	1,44	172289,3	0,82	0,82	0,79	0,81	0,76	0,76	0,76	0,76	0,06	0,06	0,04	0,05	0,019	6,23E-05	5,02	0,071	147,4493914	FTHL	
	10,51			4	29,92	8,98E-04	997,24	9,00E-07	0,013	1,38	165094,9	0,80	0,80	0,78	0,79	0,75	0,75	0,75	0,75	0,05	0,05	0,03	0,04	0,018	2,85E-05	4,24	0,065	160,2465804	FTHL	
	10,51			5	29,37	8,97E-04	997,23	9,00E-07	0,012	1,28	153944,7	0,79	0,79	0,77	0,78	0,74	0,74	0,74	0,74	0,05	0,05	0,03	0,04	0,019	4,94E-05	3,92	0,063	166,5023883	FTHL	
	10,51			6	28,91	8,97E-04	997,22	8,99E-07	0,011	1,21	144947,8	0,77	0,77	0,76	0,77	0,73	0,73	0,73	0,73	0,04	0,05	0,03	0,04	0,020	6,75E-05	3,63	0,060	172,8592933	FTHL	
	10,51			7	28,41	8,96E-04	997,21	8,98E-07	0,010	1,13	135556,4	0,76	0,76	0,75	0,75	0,72	0,72	0,72	0,72	0,04	0,04	0,03	0,03	0,020	7,42E-05	3,23	0,057	183,0501598	FTHL	
	10,51			8	27,81	8,95E-04	997,20	8,97E-07	0,009	1,04	124781,7	0,74	0,74	0,73	0,73	0,71	0,71	0,71	0,71	0,03	0,03	0,02	0,03	0,020	5,56E-05	2,66	0,052	201,6059912	FTHL	
	10,51			9	27,19	8,95E-04	997,36	9,11E-07	0,009	0,95	112324,8	0,72	0,72	0,71	0,72	0,70	0,70	0,70	0,70	0,02	0,03	0,02	0,02	0,019	2,74E-05	2,12	0,046	229,4137996	FTHL	
	10,51			10	26,41	8,95E-04	997,20	8,97E-07	0,008	0,84	101416,3	0,71	0,71	0,70	0,70	0,69	0,68	0,68	0,68	0,02	0,03	0,02	0,02	0,022	1,08E-04	1,96	0,044	234,8523564	FTHL	

22/12/2011	133	1	11,15	1	30,01	8,88E-04	997,12	8,90E-07	0,012	1,28	155577	0,78	0,78	0,78	0,78	0,73	0,74	0,74	0,73	0,05	0,04	0,05	0,05	0,022	1,33E-04	4,55	0,068	152,8	FTHL
			11,15	2	29,51	8,86E-04	997,11	8,89E-07	0,011	1,20	145858,1	0,77	0,78	0,78	0,77	0,73	0,74	0,73	0,73	0,04	0,04	0,04	0,04	0,022	1,23E-04	3,95	0,063	163,83	FTHL
			11,15	3	29,11	8,85E-04	997,10	8,88E-07	0,010	1,14	138311,6	0,76	0,76	0,76	0,76	0,72	0,72	0,72	0,72	0,05	0,04	0,04	0,04	0,024	2,05E-04	3,93	0,063	163,99	FTHL
			11,15	4	28,77	8,84E-04	997,09	8,87E-07	0,010	1,08	132134,8	0,75	0,75	0,75	0,75	0,71	0,71	0,71	0,71	0,04	0,03	0,03	0,03	0,023	1,41E-04	3,33	0,058	178,03	FTHL
			11,15	5	28,03	8,83E-04	997,08	8,86E-07	0,009	0,98	118994,1	0,74	0,74	0,74	0,74	0,70	0,71	0,71	0,71	0,04	0,03	0,03	0,03	0,027	3,11E-04	3,21	0,057	181,22	FTHL
			11,15	6	27,51	8,83E-04	997,07	8,85E-07	0,008	0,90	110266,3	0,72	0,72	0,72	0,72	0,69	0,69	0,69	0,69	0,03	0,03	0,03	0,03	0,026	2,80E-04	2,69	0,052	197,67	FTHL
			11,15	7	26,85	8,82E-04	997,06	8,84E-07	0,007	0,82	99723,2	0,70	0,70	0,70	0,70	0,68	0,68	0,68	0,68	0,02	0,02	0,02	0,02	0,025	2,02E-04	2,06	0,045	225,72	FTHL
			11,15	8	26,05	8,81E-04	997,06	8,84E-07	0,007	0,72	87730,89	0,69	0,69	0,69	0,69	0,67	0,67	0,67	0,67	0,02	0,02	0,02	0,02	0,027	2,69E-04	1,70	0,041	248,09	FTHL
			11,15	9	25,22	8,81E-04	997,05	8,84E-07	0,006	0,62	76234,08	0,68	0,68	0,68	0,68	0,66	0,66	0,66	0,66	0,02	0,01	0,01	0,01	0,029	3,98E-04	1,42	0,038	271,88	FTHL
			11,15	10	24,43	8,80E-04	997,05	8,83E-07	0,005	0,54	66167,45	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,64	0,64	0,01	0,01	0,01	0,01	0,028	3,16E-04	1,02	0,032	320,44	FTHL
	10,79	1	30,01	8,77E-04	997,01	8,79E-07	0,012	1,34	164952,6	0,77	0,76	0,75	0,76	0,71	0,71	0,70	0,71	0,06	0,04	0,05	0,05	0,021	9,07E-05	4,65	0,068	149,42	FTHL		
	10,79	2	29,89	8,75E-04	996,99	8,78E-07	0,012	1,32	162736,3	0,77	0,76	0,75	0,76	0,71	0,71	0,70	0,71	0,06	0,04	0,05	0,05	0,021	9,98E-05	4,58	0,068	150,17	FTHL		
	10,79	3	29,55	8,74E-04	996,98	8,77E-07	0,012	1,27	155869,9	0,76	0,75	0,74	0,75	0,71	0,71	0,69	0,70	0,05	0,04	0,05	0,05	0,022	1,37E-04	4,46	0,067	152,14	FTHL		
	10,79	4	28,72	8,73E-04	996,97	8,76E-07	0,010	1,13	139599,7	0,74	0,74	0,73	0,74	0,70	0,70	0,69	0,70	0,04	0,04	0,04	0,04	0,024	1,94E-04	3,85	0,062	163,47	FTHL		
	10,79	5	27,91	8,72E-04	996,96	8,75E-07	0,009	1,01	124761,7	0,72	0,71	0,71	0,72	0,69	0,69	0,68	0,69	0,03	0,03	0,03	0,03	0,022	1,16E-04	2,80	0,053	191,43	FTHL		
	10,79	6	27,51	8,71E-04	996,94	8,74E-07	0,009	0,95	117871,6	0,72	0,71	0,71	0,71	0,69	0,68	0,68	0,68	0,03	0,03	0,03	0,03	0,024	1,94E-04	2,75	0,053	192,82	FTHL		
	10,79	7	27,38	8,70E-04	996,94	8,73E-07	0,009	0,94	115692,4	0,71	0,71	0,70	0,71	0,68	0,68	0,68	0,68	0,03	0,02	0,02	0,03	0,023	1,47E-04	2,51	0,050	201,65	FTHL		
	10,79	8	26,61	8,70E-04	996,93	8,72E-07	0,008	0,83	103010,8	0,70	0,70	0,69	0,69	0,67	0,67	0,67	0,67	0,02	0,02	0,02	0,02	0,024	1,87E-04	2,10	0,046	220,44	FTHL		
	10,79	9	25,82	8,69E-04	996,92	8,72E-07	0,007	0,73	90863,25	0,69	0,68	0,68	0,68	0,67	0,67	0,66	0,67	0,02	0,02	0,02	0,02	0,027	2,75E-04	1,78	0,042	239,19	FTHL		
	10,79	10	24,62	8,69E-04	996,92	8,71E-07	0,005	0,60	74084,29	0,67	0,67	0,66	0,67	0,65	0,65	0,65	0,65	0,02	0,02	0,01	0,01	0,031	4,85E-04	1,37	0,037	272,81	FTHL		
	11,31	1	30,01	8,67E-04	996,90	8,70E-07	0,012	1,26	155947,8	0,81	0,81	0,78	0,80	0,76	0,75	0,75	0,75	0,06	0,06	0,03	0,05	0,023	1,60E-04	4,52	0,067	149,8	FTHL		
	11,31	2	29,61	8,66E-04	996,89	8,69E-07	0,011	1,19	147949,8	0,79	0,79	0,77	0,78	0,74	0,74	0,74	0,74	0,05	0,05	0,03	0,04	0,023	1,41E-04	3,98	0,063	159,58	FTHL		
	11,31	3	28,71	8,66E-04	996,89	8,69E-07	0,010	1,05	130758,9	0,77	0,77	0,76	0,77	0,73	0,74	0,74	0,73	0,04	0,04	0,02	0,03	0,024	1,71E-04	3,25	0,057	176,56	FTHL		
	11,31	4	28,51	8,65E-04	996,88	8,68E-07	0,009	1,02	127230,8	0,77	0,77	0,75	0,76	0,72	0,72	0,72	0,72	0,05	0,05	0,02	0,04	0,028	3,70E-04	3,66	0,061	166,1	FTHL		
	11,31	5	28,01	8,65E-04	996,87	8,67E-07	0,009	0,95	118388,9	0,74	0,74	0,73	0,74	0,71	0,71	0,71	0,71	0,03	0,03	0,02	0,03	0,023	1,57E-04	2,63	0,051	196	FTHL		
	11,31	6	27,42	8,64E-04	996,87	8,67E-07	0,008	0,87	108422,5	0,73	0,73	0,73	0,73	0,70	0,69	0,70	0,70	0,03	0,04	0,03	0,03	0,031	5,49E-04	2,96	0,054	184,5	FTHL		
	11,31	7	26,61	8,64E-04	996,86	8,66E-07	0,007	0,77	95552,4	0,71	0,71	0,71	0,71	0,69	0,69	0,69	0,69	0,02	0,02	0,02	0,02	0,026	2,37E-04	1,88	0,043	231,51	FTHL		
	11,31	8	25,93	8,63E-04	996,86	8,66E-07	0,006	0,69	85465,16	0,70	0,70	0,69	0,70	0,68	0,68	0,68	0,68	0,02	0,02	0,01	0,02	0,034	6,93E-04	1,97	0,044	225,78	FTHL		
	11,31	9	25,32	8,63E-04	996,86	8,66E-07	0,006	0,62	76979,37	0,69	0,69	0,69	0,69	0,67	0,67	0,67	0,67	0,02	0,02	0,02	0,02	0,047	1,91E-03	2,23	0,047	212,43	FTHL		
	11,31	10	24,22	8,63E-04	996,86	8,66E-07	0,005	0,50	62952,68	0,67	0,67	0,66	0,67	0,66	0,65	0,65	0,65	0,01	0,01	0,01	0,01	0,035	7,34E-04	1,10	0,033	302,59	FTHL		