



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
PROYECTO DE GRADO INGENIERÍA CIVIL

Presentado por:

JUAN CAMILO BARRERA TRIVIÑO

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL CRECIMIENTO DE BIOPELÍCULAS,
BAJO CONDICIONES DE ALTA VELOCIDAD EN TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN
DE AGUA POTABLE

Asesor:

JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA

9 de Junio de 2014



Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle a Dios por las oportunidades que me ha brindado. A mi Papá y mi Mamá por todo el esfuerzo que realizaron para que yo pudiera llegar a este punto y por apoyarme siempre en cada decisión que tomé. A mis tíos por todo el apoyo que desde distintos ámbitos me brindaron para poder estudiar en la Universidad de los Andes. A Juan Guillermo Saldarriaga por compartir su conocimiento conmigo y asesorarme en este trabajo. A Jhon Calvo por su paciencia y colaboración. A Carolina Piamonte por su inmensa colaboración en el desarrollo de este proyecto y a mis amigos que siempre me acompañaron en este proceso y nunca me dejaron bajar los brazos.

Contenido

Índice De Figuras	v
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Gráficas.....	vii
Índice Diagramas De Flujo.....	viii
1. Introducción	1
1.1 Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
2. Antecedentes	4
3. Marco Teórico	8
3.1 Aspectos Microbiológicos	8
3.1.1 Definición Biopelículas.....	8
3.1.2 Formación en redes de distribución de agua potable.....	8
3.1.3 Ciclo de vida Biopelículas	9
3.1.4 Disponibilidad de nutrientes	11
3.1.5 Comportamiento de las biopelículas con respecto a sustancias desinfectantes .	13
3.1.6 Características de los materiales en una red de distribución de agua potable y su relación con la formación de biopelículas.....	13
3.2 Aspectos Hidráulicos	16
3.2.1 Propiedades del agua.....	16
3.2.2 Régimen de Flujo y Número de Reynolds	20
3.2.3 Teoría de la subcapa laminar viscosa.....	21
3.2.4 Pérdidas por fricción	22
3.2.5 Factor de fricción y ecuación de Colebrook-White	23
3.2.6 Diagrama de Moody.....	25
4. Modelo Físico.....	27
4.1 Modelos Existentes.....	27
4.2 Selección del modelo físico a partir de los modelos existentes.....	29

4.3	Construcción del modelo	30
4.4	Componentes del modelo.....	39
5.	Procedimiento Experimental	42
5.1	Calibración de vertederos.....	42
5.2	Proceso de recirculación	43
5.3	Determinación del volumen de agua presente en el modelo.....	43
5.4	Determinación de Cloro Residual.....	46
5.4.1	Dosis de Cloro requerida.....	46
5.4.2	Decaimiento de Cloro Residual en el sistema	47
5.5	Comportamiento de la temperatura del sistema.....	50
5.6	Fuente de carbono suministrada al sistema.....	51
5.7	Proceso de recolección de datos	52
5.7.1	Recolección de datos hidráulicos	53
5.7.2	Recolección de datos biológicos	54
5.8	Cálculos y manipulación de datos.....	56
5.8.1	Cálculos Hidráulicos	56
5.8.2	Análisis Microbiológicos.....	57
6.	Resultados y discusión	60
6.1	Resultados Hidráulicos	60
6.1.1	Tubería de PVC.....	61
6.1.2	Tubería de Polietileno	64
6.1.3	Tubería de Hierro Galvanizado	67
6.2	Resultados Biológicos.....	72
6.2.1	Resultados de análisis de testigos	73
6.2.2	Resultados Análisis Microbiológico	89
7.	Conclusiones	91
8.	Recomendaciones.....	93
9.	Bibliografía	94
10.	Anexos.....	96

a. Cálculo hidráulico tipo	96
b. Tabla propiedades del Agua	98
c. Tabla de Cálculos Hidráulicos definitivos	99
d. Tabla de cálculos realizados con los testigos	106
e. Mediciones realizadas de temperatura.....	112

Índice De Figuras

figura 1 "Porcentajes De Daños En Las Tuberías Según Su Material" (Ávila & Clavijo)....	9
Figura 2" Esquema De La Formación De Eps En Un Una Tubería" (Echavarría, 2003) ...	10
Figura 3 "Ciclo De Vida De Una Biopelícula En Una Tubería" (Hernández, 2010)	11
Figura 4"Biomas Presente En Los Materiales Más Comunes En El Diseño De Tuberías De Redes De Distribución De Agua Potable" (Niquette Patrick, 2000)	15
Figura 5 "Diagrama De Moody" (Duque, 2014)	15
Figura 6 "Montaje De Biopelículas De Medición De Velocidades Con Tuberías De Pvc De 6" "	28
Figura 7 " "Montaje Biopelículas Tuberías De Materiales Diferentes Y Diámetro De 4" " "	29
Figura 9 " Testigos Retirados Tubería De Polietileno"	30
Figura 8"Testigos Retirados De Todas Las Tuberías"	30
Figura 10" Testigos De Polietileno Lavados"	30
Figura 11 "Desmote Tubería De Pvc"	31
Figura 12 "Desmote Tubería De Polietileno"	31
Figura 13"Procedimiento De Limpieza De La Tubería De Hg"	32
Figura 14"Procedimeinto De Limpieza De La Tubería De Polietileno"	32
Figura 15 "Proceso De Desmote Y Corte De Las Tuberías De Pvc De 6 Pulgadas"	33
Figura 16"Proceso De Transporte De La Tubería De Hierro Galvanizado"	33
Figura 17 "Reducciones De 6 A 4 Pulgadas"	34
Figura 18 "Tuberías Complementarias De Pvc".....	34
Figura 19 "Tuberías Recién Instaladas"	35
Figura 20 "Ubicación De Testigos En La Nueva Tubería"	35
Figura 21"Proceso De Elaboración De Testigos".....	36
Figura 22 "Cierre Hermético De Testigos"	37
Figura 23" Nuevo Modelo Terminado".....	38
Figura 24 "Válvulas Reguladoras De Caudal"	39
Figura26 "Tanque De Almacenamiento Ubicado Después De Los Vertederos"	40

Figura 25 " Tanque De Almacenamiento Cilíndrico"	40
Figura 27 "Vertederos En El Modelo"	40
Figura 28 "Testigos Y Correas"	41
Figura 29"Tablero Piezométrica"	41
Figura 30 "Sección Transversal Con Piezómetros"	41
Figura 31 "Curva De Calibración Del Vertedero Número 3" (Trujillo, 2011).....	42
Figura 32"Medición Del Diámetro Interno De Las Tuberías"	43
Figura 33"Colorímetro De Detección De Cloro Libre".....	48
Figura 34"Dosis Separadas De Cloro"	49
Figura 35" Dosis Separada De Cloro"	49
Figura 36"Cloro Preparado Para Ser Vertido En El Modelo"	49
Figura 37" Bolsa Para Almacenar El Pasto"	51
Figura 38 "Recolección Del Pasto En El Centro Deportivo"	51
Figura 39 "Costales De Almacenamiento De Pasto".....	52
Figura 40"Ubicación De La Fuente De Carbono En El Modelo"	52
Figura 41"Formato Toma De Datos".....	54
Figura 42 "Válvula Tubería De Hierro Galvanizado"	71
Figura 43"Resultados Cultivo De Las Muestras De La Tubería De Pvc" (Ciia, 2014)	90
Figura 44 "Resultados Cultivo De Las Muestras De La Tubería De Polietileno (Ciia, 2014)	90
Figura 45"Resultados Cultivo De Las Muestras De La Tubería De Hierro Galvanizado" (Ciia, 2014).....	90

Índice de Tablas

tabla 1 Variables Importantes En La Adhesión Celular Para Formar Biopelículas" (Dolan, 2002).....	9
Tabla 2 "Fuentes De Nutrientes Encontrados En Redes De Distribución De Agua Potable" (Donoso, 2009).....	12
Tabla 3"Concentración Total De Microorganismos Encontrados En Tuberías De Diferentes Materiales" (Hernández, 2010).....	14
Tabla 4 "Régimen De Flujo Según El Número De Reynolds"(Saldarriaga,2007).....	21
Tabla 5"Clasificación Del Flujo Turbulento De Acuerdo Al Espesor De La Subcapa Laminar Viscosa"(Saldarriaga , 2007)	22
Tabla 6 "Propiedades Geométricas De Los Testigos Del Modelo"	36
Tabla 7"Diametros Internos Reales Medidos De Las Tuberías Del Montaje"	39
Tabla 8"Ecuaciones De Calibración De Vertederos"	42

Tabla 9" "Diámetros Reales De Tuberías".....	44
Tabla 10"Volumen Tanque De Llegada"	45
Tabla 11"Volumen Tuberías"	45
Tabla 12 "Volumen Elementes Complementarios"	45
Tabla 13"Volumen Tanque Cilíndrico"	45
Tabla 14 "Volumen Total Del Sistema"	46
Tabla 15 " Ecuaciones Para Estimar El Espesor Y Las Velocidades De Desarrollo De Las Biopelículas" (Hernández, 2010).....	58
Tabla 16 "Rugosidades Promedio Tubería Pvc"	61
Tabla 17"Rugosidades Promedio Polietilen	64
Tabla 18"Rugosidad Promedio Hierro Galvanizado"	72
Tabla 19 "Resultados Testigos De Cabeza Pvc"	73
Tabla 20"Resultados Cálculos Testigos De Centro Pvc"	74
Tabla 21 "Resultados Cálculos Velocidad De Desarrollo Biopelícula Testigos De Pvc"	76
Tabla 22 "Resultados Cálculos Testigos De Cabeza Polietileno"	77
Tabla 23 " Resultados Cálculos Testigos De Centro Polietileno"	78
Tabla 24"Resultados Cálculos Velocidad De Desarrollo De La Tubería De Polietileno" ...	79
Tabla 25 "Resultados Cálculos Testigos De Cabeza Hierro Galvanizado"	80
Tabla 26"Resrutado Cálculos Testigos De Centro Hierro Galvanizado"	81
Tabla 27"Resutados Pruebas Microbiológicas De Laboratorio" (Ciia, 2014).....	90

Índice de Gráficas

Gráfica 1 "Variación De La Densidad Del Agua En Función De La Temperatura"	17
Gráfica 2 "Variación De La Viscosidad Dinámica Del Agua En Función De La Temperatura"	18
Gráfica 3 "Variación De La Viscosidad Cinemática Del Agua En Función De La Temperatura"	19
Gráfica 4 "Curva De Decaimiento De Cloro"	49
Gráfica 5 "Variación De La Temperatura En El Modelo"	50
Gráfica 6"Diagrama De Moody Datos Obtenidos Pvc"	62
Gráfica 7" Efecto De La Biopelícula Sobre La Rugosidad Absoluta Del Pvc"	63
Gráfica 8 "Diagrama De Moody Datos Obtenidos Polietileno"	65
Gráfica 9 "Efecto De La Biopelícula Sobre La Rugosidad Absoluta Del Polietileno"	66
Gráfica 10" Diagrama De Moody Datos Obtenidos Hierro Galvanizado"	68
Gráfica 11" Efecto De La Biopelícula Sobre La Rugosidad Absoluta Del Hierro Galvanizado"	69
Gráfica 12" Diagrama De Moody Todos Los Datos Obtenidos Hierro Galvanizado"	70



Gráfica 13 "Espesor De Biopelícula Testigos De Cabeza Pvc"	74
Gráfica 14 "Espesor Testigos De Centro Pvc"	75
Gráfica 15 "Velocidad De Desarrollo Biopelícula Tubería De Pvc"	76
Gráfica 16 "Espesor De Biopelícula Testigos De Cabeza Polietileno"	77
Gráfica 17 "Espesor De Biopelícula Testigos De Centro Polietileno"	78
Gráfica 18 "Velocidad De Desarrollo Tubería De Polietileno"	79
Gráfica 19 "Espesor Biopelícula Tubería De Hierro Galvanizado"	80
Gráfica 20 "Espesor De Biopelícula Testigos De Centro Hierro Galvanizado"	81
Gráfica 21 "Resultado Cálculos Velocidad De Desarrollo Hierro Galvanizado"	82
Gráfica 22 "Velocidad De Desarrollo Biopelícula Hierro Galvanizado"	82
Gráfica 23 "Comparación De Espesores Testigos De Cabeza"	83
Gráfica 24 " Comparación Espesores Testigos De Cabeza" (Duque, 2014)	84
Gráfica 25 " Comparación De Espesores De Biopelícula Testigos De Centro"	85
Gráfica 26 "Comaparación De Espesores De Las Biopelículas En Todos Los Testigos Medidos	86
Gráfica 27 " Comparación Velocidad De Desarrollo De Biopelículas"	86
Gráfica 28 "Comaparación Del Espesor De La Subcapa Laminar Viscosa Con El Espesor De La Biopelícula Tubería Pvc"	87
Gráfica 29 " Comparación Espesor Dela Subcapa Laminar Viscosa Con El Espesor De La Biopelícula Tubería De Polietileno"	88

Índice Diagramas De Flujo

DIAGRAMA DE FLUJO 1 "RECOLECCIÓN DE DATOS HIDRÁULICOS"	53
DIAGRAMA DE FLUJO 2 "TOMA DE MUESTRAS MICROBIOLÓGICOS"	54
DIAGRAMA DE FLUJO 3 "PROCEDIMIENTO DE PESO DE TESTIGOS"	55
DIAGRAMA DE FLUJO 4 "CÁLCULOS HIDRÁULICOS"	56



Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
 Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
 Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
 condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



1. Introducción

Durante los últimos años el Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA) se ha encargado de estudiar el fenómeno de la formación de películas biológicas en redes de distribución de agua potable. Esta línea de investigación es fundamental para determinar la afectación en la calidad del agua potable en redes de distribución por la formación de biopelículas y las implicaciones hidráulicas que la formación de estas produce en estos sistemas.

La formación de biopelículas en las redes de distribución es un hecho inevitable dado que los procesos de tratamiento de agua potable realizados en las PTAP solo se limitan a realizar un tratamiento de desinfección con cloro, asegurando una dosis de cloro residual que mantenga el agua desinfectada durante su trayecto hasta su lugar de consumo, en lugar de realizar un proceso de esterilización que realmente elimine todos los organismos presentes en el agua (Bernal, 2009). Adicionalmente la literatura científica ha documentado que el 99 % de las bacterias presentes en el agua tienden a asociarse en películas biológicas (Zsuzsa Ludmany, 2006) dado que esta es la forma en la cual pueden adaptarse más rápidamente al medio y proliferar durante un periodo mayor.

La presencia de estas matrices biológicas en las tuberías tiene serias implicaciones en la salud pública dado que su desprendimiento es inevitable y su consumo por parte de los usuarios puede repercutir negativamente en la salud de las personas, especialmente en los individuos más vulnerables “niños, ancianos y población inmunodeprimida”. Por otro lado la existencia de biopelículas en las tuberías también tiene implicaciones en la hidráulica de los sistemas de distribución dado que puede aumentar la rugosidad absoluta (k_s) de las tuberías (Morales, 2013) o puede hacer poco coherente la relación en el diagrama de Moody entre el número de Reynolds y el factor de fricción, complicando el entendimiento de la hidráulica del sistema.

Aunque la línea de investigación con respecto a este tema se encuentra bastante desarrollada y grupos de investigación como el CIACUA han encontrado resultados consistentes que permiten entender los efectos de las biopelículas en las redes de distribución de agua potable, todavía quedan ciertos temas que vale la pena aclarar como el comportamiento de las biopelículas con altas velocidades de flujo que es el tema que se desarrollara en este proyecto de grado.

Es relevante enfatizar en este tema porque a pesar que el pensamiento lógico indica que altas velocidades de flujo generaran esfuerzos cortantes de mayor magnitud en las paredes



Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



de las tuberías, impidiendo la formación de películas biológicas y acelerando su proceso de desprendimiento, estudios realizados por la Universidad de los Andes han demostrado que las mayores velocidades de flujo empleadas en montajes experimentales benefician la velocidad de desarrollo de las biopelículas dado que el flujo turbulento característico de las altas velocidades puede promover la transferencia de nutrientes entre el flujo y la matriz biológica (Trujillo, 2011).

Por lo tanto en el presente documento se analizará el comportamiento de las biopelículas generadas artificialmente en un modelo físico desarrollado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes, operado a velocidades máximas de flujo y alimentado con pasto común como fuente de carbono, con el fin de poder explicar su comportamiento bajo estas condiciones.

1.1 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Encontrar patrones de manera experimental que permitan entender el comportamiento y el crecimiento de las biopelículas bajo condiciones de flujo a altas velocidades en un modelo físico que simule el comportamiento de las tuberías de una red de distribución de agua potable.

1.2.2 Objetivos específicos

- Entender el comportamiento de los modelos experimentales existentes en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes, para determinar cuál de estos tiene la capacidad de generar mayores velocidades de flujo para modificarlo de acuerdo a las necesidades requeridas en el proyecto.
- Diseñar y construir un montaje a partir de los montajes preexistentes en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes, en el cual se puedan realizar pruebas experimentales que permitan comprender la influencia de las velocidades altas de flujo en el comportamiento de la biopelículas.



Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



- Determinar los efectos hidráulicos relacionados con el comportamiento del factor de fricción y la rugosidad de las tuberías, producidos por presencia de biopelículas en el sistema.
- Identificar el comportamiento y el crecimiento de las biopelículas en las tuberías de acuerdo con un análisis de los espesores desarrollados en los testigos.
- Comparar los resultados obtenidos con respecto a los aspectos hidráulicos y microbiológicos obtenidos en trabajos realizados previamente por el CIACUA con respecto al tema

2. Antecedentes

Antes de comenzar a desarrollar el tema de este proyecto es de vital importancia explicar los trabajos de investigación realizados previamente en la Universidad de los Andes los cuales inspiraron este proyecto y marcaron la línea base de conocimiento que se tiene actualmente con respecto a la presencia de biopelículas en redes de distribución de agua potable.

A continuación se presenta un breve resumen de los trabajos más relevantes que fueron revisados para desarrollar este proyecto

- *“La Influencia de los materiales de las tuberías en el crecimiento de biopelícula en las redes de distribución de agua a presión (2005)”* presentado por Andrea Vargas Gamarra:

Es un proyecto enfatizado en la formación de películas biológicas en tuberías de distintos materiales con el fin de establecer en qué tipo de material se produce una mayor proliferación de microorganismos. Como conclusión principal de este proyecto se estableció que la colonización de microorganismos es mayor en biopelículas de Polietileno que de PVC

- *“Reglas de operación para el desprendimiento de biopelículas en el sistema de distribución de agua potable (2009)”* Presentado por María Alejandra Escovar:

Fue un proyecto de grado de estado del arte que buscaba proponer alternativas para con respecto al lavado hidráulico como método para desprender biopelículas en redes de distribución de agua potable. Aunque el tema de este proyecto no está directamente relacionado con tema principal del presente documento entre las conclusiones se encontró que, los tratamientos de agua potable realizan desinfección no esterilización, por lo tanto siempre se espera la presencia de microorganismos en las redes de distribución de agua potable. Adicionalmente se concluyó que las propiedades viscosas de la biopelícula contribuyen a incrementar la resistencia por fricción de las tuberías, por lo tanto con mayores velocidades constantes la biopelícula no se desprende por el contrario se vuelve más estable y compacta.



Universidad de los Andes

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
 Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
 Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
 condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



- “*Influencia de la fuente de carbono en el desarrollo de biopelículas y si efecto hidráulico en sistemas de distribución de agua potable (2010)*” presentado por María Ximena Hernández:

Es una tesis muy completa de maestría que buscaba determinar si la fuente de carbono con la cual se alimentan los montajes de biopelículas presentaba alguna influencia en la formación y crecimiento de biopelículas y que posible efecto hidráulico podía producir este hecho en las redes de distribución de agua potable. De este proyecto se resaltan varias conclusiones relevantes como el hecho de que el pasto Kikuyo permitió obtener biopelículas de mayor espesor que otras fuentes de nutrientes. Adicionalmente se encontró que en las tuberías de Polietileno hay una mayor formación de películas biológicas que en las de PVC, mientras que en tuberías de materiales como el CCP se forman películas minerales y no biológicas. Finalmente se concluyó que las biopelículas generan un aumento en las pérdidas por fricción.

- “*Modelación Física de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono orgánico disuelto (2011)*” presentado por María Ximena Trujillo:

Pretendía evaluar la influencia de la velocidad de flujo en el desarrollo de la biopelícula y el efecto de esta sobre el factor de fricción de Darcy-Weisbach, mediante un modelo físico alimentado con pasto. Las conclusiones más relevantes de este proyecto fueron que en primer lugar el principal efecto hidráulico de la biopelícula, en las tuberías de distribución de agua potable, es el aumento del valor del coeficiente de rugosidad absoluta (k_s), el cual depende de la velocidad de flujo de la tubería y la cantidad de sustrato disponible. En segundo lugar a medida que aumenta la velocidad de flujo, la velocidad inicial de desarrollo disminuye y aumenta la velocidad de crecimiento de la biopelícula. Por último la velocidad de desarrollo aumenta porque el flujo turbulento aumenta la transferencia de masa. Por otro lado el flujo turbulento dificulta la adherencia de los organismos pioneros. Y la variación del factor de fricción con respecto al número de Reynolds es incongruente con el diagrama de Moody, debido a las propiedades físicas de la biopelícula.

- “*Biopelículas alimentadas con CODB mediante pastos: Dinámica de crecimiento y desprendimiento en los sistemas de distribución de agua potable (2012)*” presentado por Tatiana Melisa Vargas Castillo:

Buscaba 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. De este proyecto se concluyó que en primer lugar la magnitud y el espesor desprendido de las biopelículas es directamente proporcional a la velocidad de flujo y a los esfuerzos cortantes producidos al interior de la tubería. Adicionalmente se encontró que el pasto es el tipo de alimento que produce un mayor crecimiento en la biopelícula y la panela es el tipo de nutriente más estable porque no produce fluctuaciones considerables en el factor de fricción. Por último se afirmó que en los casos en los cuales la subcapa laminar viscosa es menor al espesor de la biopelícula se presenta un decaimiento en la formación de las biopelículas, lo cual puede contribuir a su desprendimiento.

- . “*Modelación física de Biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono orgánico disuelto (2012)*” presentado por Sandra Carolina Navarrete Rodríguez:

Fue un proyecto buscaba establecer la existencia de una relación entre el material de una tubería y la formación de las biopelículas, simulando un sistema de distribución de agua potable. La conclusión más relevante que se encontró en este proyecto fue que el crecimiento de la biopelícula será más acelerado en una tubería con acero galvanizado que en una tubería de PVC.

- “*Efecto de la velocidad de flujo sobre el crecimiento u desprendimiento de biopelículas alimentadas con CODB mediante pastos en redes de distribución de agua potable (2013)*” presentado por Laura Tamayo Morales:

Este documento se basó en una tesis de laboratorio que pretendía 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 y con el mismo material (PVC). De este proyecto se concluyó que en primer lugar el principal efecto hidráulico que producen las biopelículas en tuberías de las redes de distribución de agua potable es el aumento de la rugosidad absoluta (k_s). Y este aumento depende de la cantidad y la calidad del sustrato disponible en el flujo. Por otro lado se concluyó que la velocidad de flujo no tiene una influencia directa sobre la velocidad de desarrollo de las biopelículas, pues aunque se observaron patrones de desarrollo más rápidos en velocidades bajas, la regeneración de la biopelícula, posterior a los desprendimientos, fue mayor en la tubería de mayor velocidad debido a que se incrementa la transferencia de masa entre el flujo y la biopelícula, por lo que los microorganismos embebidos tienen un mayor contacto con nutrientes

- “*Efecto de la velocidad de flujo sobre el crecimiento de biopelículas en tuberías de PVC en redes de agua potable (2013)*” presentado por Gonzalo Cifuentes :

Este proyecto buscaba relacionar el crecimiento de biopelículas en tuberías con las pérdidas por fricción y los cambios en variables hidráulicas de las ecuaciones de diseño físicamente basadas utilizadas en el diseño de acueductos. En este documento se encontró resultados negativos para la asociación entre el número de Reynolds y el crecimiento de las biopelículas. Adicionalmente se pudo determinar por medio del procedimiento experimental que las mediciones finales se estabilizaron en todas las tuberías, en un espesor de aproximadamente 0,11 mm. Lo que hace evidente el cambio de la rugosidad a causa de la presencia de las biopelículas.

- “*La Influencia de material de las tuberías en el crecimiento de películas bacterianas (2014)*” presentado por Oscar Díaz :

Buscaba hallar la influencia del material sobre el crecimiento de biopelículas en tuberías con agua potable con alto contenido de carbono orgánico disuelto biodegradable (pastos). En este proyecto se encontró que en primer lugar, en los materiales más lisos hay mayor concentración de microorganismos pues a causa de las propiedades de la superficie deben acomodarse más microorganismos en el mismo volumen, para asegurar su supervivencia. En segundo lugar el crecimiento de la biopelícula se da en mayor cantidad en las zonas laterales de las tuberías. Y por último se afirmó que la velocidad de crecimiento es independiente del material en su etapa estable.



Universidad de
los Andes

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



3. Marco Teórico

Con el objetivo de poder desarrollar el estudio planteado en este documento fue fundamental la realización de una revisión bibliográfica amplia relacionada con el tema que permitiera acceder al conocimiento necesario para poder entender adecuadamente los resultados obtenidos mediante métodos experimentales. A continuación se enuncian los aspectos microbiológicos e hidráulicos más importantes relacionados con el desarrollo de biopelículas en redes de distribución de agua potable.

3.1 Aspectos Microbiológicos

3.1.1 Definición Biopelículas.

Una biopelícula es un conjunto diverso de microorganismos entre los cuales se pueden encontrar bacterias, hongos, virus, bacilos entre otros, que interactúan y viven asociados para formar una meta-comunidad y que se encuentran protegidos gracias a una matriz polimérica producida por ellas mismas, la cual se adhiere a superficies vivas o inertes, (CIACUA, 2009).

3.1.2 Formación en redes de distribución de agua potable.

A pesar de que una tubería a presión no parece ser el ambiente más adecuado para el desarrollo de películas microbianas, la presencia de materia orgánica y sustratos que no son removidos por los procesos de potabilización o que ingresan a través de fisuras en la red o en sus uniones (Navarrete, 2012), sirve como sustento fundamental para promover la formación de matrices poliméricas a las cuales se pueden adherir cualquier tipo de virus y componentes biológicos.

Aunque pareciera poco probable que la cantidad de fisuras y fugas sea lo suficientemente significativa para asegurar el ingreso de una cantidad considerable de materia que fomente el crecimiento de biopelículas, los porcentajes de fallas en las redes de distribución de agua potable son bastante comunes y se muestran en la siguiente figura.

	Acero galvan.	Otros aceros	Hierro fundido	Hierro dúctil	Polietileno	PVC
Rotura	2%	3%	20%	18%	7%	11%
Defecto del material	—	—	1%	—	—	30%
Corrosión	89%	94%	16%	60%	7%	
Fallas de instalación	—	—	1%	18%	43%	4%
Otros	—	—	1%	4%	14%	4%
Inexplicable	9%	3%	61%	—	29%	51%

Figura 1 "porcentajes de daños en las tuberías según su material" (Ávila & Clavijo).

Este claro que el ingreso de sustratos que promueven la formación de estos elementos en las redes de distribución es un hecho que no se puede impedir a pesar de la eficiencia de la red y los tratamientos de desinfección; sin embargo la formación de biopelículas solo se concreta si las matrices poliméricas se adhieren efectivamente a las paredes de las tuberías, y este hecho es función de ciertas variables como la velocidad, el pH, la temperatura y muchas otras que se presentaran en la siguiente tabla:

Propiedades del sustrato	Propiedades del fluido	Propiedades de las células
Textura o rugosidad	Velocidad	Hidrofobicidad de la superficie celular
	pH	Fimbrias y flagelos
Hidrofobicidad	Temperatura	
	Cationes	Sustancias poliméricas extracelulares (EPS)
	Presencia de agentes antimicrobianos	

Tabla 1 Variables importantes en la adhesión celular para formar biopelículas" (Dolan, 2002).

3.1.3 Ciclo de vida Biopelículas

El ciclo de vida o etapas de formación de las biopelículas es un proceso que se puede dar en distintos momentos y en diferentes lugares en una red de tuberías y de acuerdo con los estudios realizados con respecto al tema se puede explicar de acuerdo a las siguientes etapas

Primera Etapa: Acondicionamiento de la superficie

En esta etapa inicial la materia orgánica presente en el flujo se adhiere a la superficie de la tubería generando una capa que neutraliza las cargas que puede tener la superficie de la tubería facilitando la adherencia de las primeras células pioneras (Hernández, 2010).

Segunda Etapa: Adhesión de bacterias pioneras

En el agua que transita por las tuberías existe la presencia de ciertas bacterias planctónicas que al acercarse a la zona límite de la distribución de velocidades de las tuberías donde la velocidad tiende a 0, se fijan a las paredes de las tuberías gracias a la presencia de fuerzas electrostáticas y físicas (Hernández, 2010).

Tercera Etapa: Formación de las sustancias poliméricas extracelulares (EPS)

Las bacterias que se encuentran adheridas a la pared de la tubería comienzan a generar un sustrato extracelular polimérico conocido como EPS que facilita la adhesión de nuevos organismos al medio. Esta formación de sustancias poliméricas permite que la biopelícula permanezca adherida a la pared de la tubería

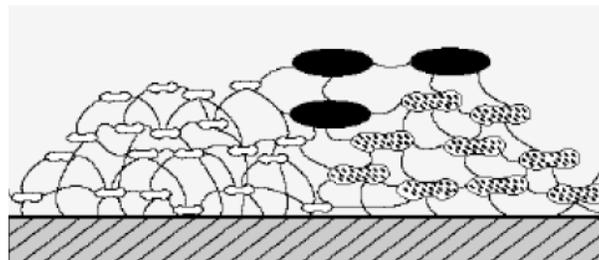


Figura 2" Esquema de la Formación de EPS en un una tubería" (Echavarría, 2003).

Cuarta Etapa: Desarrollo, reproducción y colonización de microorganismos secundarios

A medida que se van acumulando nutrientes los microorganismos empiezan a reproducirse más rápidamente aumentando el tamaño de la matriz de EPS y atrayendo nuevos organismos colonizadores que se alimentan de los residuos de los organismos pioneros. Se ha estimado que durante esta etapa la producción de sustancias poliméricas extracelulares es bastante elevada y puede llegar a representar en entre el 50 y el 90% de carbono orgánico presente en las biopelículas (Dolan, 2002). Por lo tanto se puede afirmar que la mayor cantidad de área y volumen ocupados por las biopelículas en las tuberías corresponde a EPS y no a microorganismos.

Quinta Etapa: Desprendimiento y nueva colonización

En esta quinta y última etapa del ciclo de vida de las biopelículas el espesor de la capa biológica alcanza un tamaño lo suficientemente considerable para que la capa sea afectada por los esfuerzos cortantes generados por el flujo, por lo tanto se desprenden células de la película biológica las cuales pueden transportarse por el flujo y colonizar nuevas superficies. En la siguiente imagen se presenta un esquema general del ciclo de vida de las biopelículas

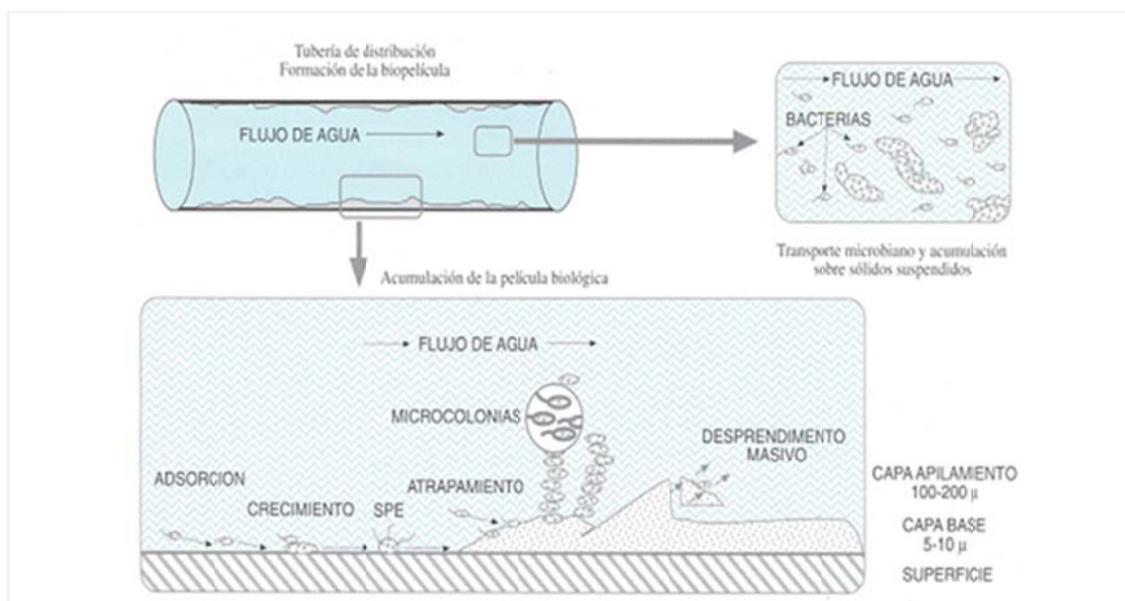


Figura 3 "Ciclo de vida de una biopelícula en una tubería" (Hernández, 2010).

3.1.4 Disponibilidad de nutrientes

El crecimiento de las biopelículas es producto de la presencia de nutrientes en el agua. Algunos de los nutrientes que son utilizados más comúnmente por las biopelículas como fuente de energía son el nitrógeno, el fósforo, el azufre, el carbono orgánico, metales y trazas (Díaz, 2014). Como se discutió anteriormente la probabilidad de que exista una

presencia considerable de este tipo de nutrientes en las redes de distribución de agua potable es bastante alta y los tratamientos de potabilización no se encargan de eliminar por completo este tipo de elementos. También es importante recalcar que en ausencia de nutrientes los microorganismos presentes en las biopelículas pueden entrar en una especie de estado de latencia como quistes hasta el momento en el cual estén en un ambiente favorable

A continuación se presentara una tabla que muestra los nutrientes requeridos por las biopelículas y las posibles fuentes en las cuales pueden ingresar a una red de distribución.

Nutrientes	Fuentes
Carbón Orgánico	Ácidos húmico y fúlvico propios del agua
	Plastificantes y solventes
	Plásticos reforzados con fibra de vidrio
	Lubricantes de bombas y equipos
	Subproductos microbianos
	Polvo
Nitrógeno	Ácidos húmico y fúlvico propios del agua
	Nitratos y nitritos del agua
	Subproductos microbianos
	Polvo
Fósforo	Fosfatos del agua
	Subproductos microbianos
	Polvo
Azufre	Sulfatos del agua
	Ácido sulfúrico (proveniente del pre tratamiento)
	Surfactantes
	Polvo
Metales y trazas	Elementos metálicos y sales del agua
	Plásticos reforzados con fibra de vidrio
	Componentes de acero inoxidable
	Químicos adicionados en el tratamiento
	Polvo

Tabla 2 "Fuentes de nutrientes encontrados en redes de distribución de agua potable" (Donoso, 2009).



3.1.5 Comportamiento de las biopelículas con respecto a sustancias desinfectantes

La diversidad de especies biológicas que conforman las biopelículas es difícil de determinar por lo tanto es casi imposible encontrar una sustancia desinfectante efectiva que pueda eliminar por completo las colonias de este tipo de microorganismos. Adicionalmente se sabe que las sustancias poliméricas extracelulares secretadas por las células microbianas tienen la capacidad de generar una matriz que sirve como barrera protectora contra agentes desinfectantes (Navarrete, 2012).

De acuerdo con el Decreto 1575 y la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Protección Social y el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se establece que un sistema de distribución de agua potable debe mantener una concentración de cloro residual que se encuentre entre 0.3 a 2 mg/L en cualquier punto de la red, con el fin de garantizar la desinfección de microorganismos presentes en el agua sin afectar la salud humana. Sin embargo cuando los microorganismos se encuentran organizados en una estructura polimérica como es el caso de las biopelículas este tipo de medidas de desinfección pueden llegar a ser poco eficientes

Adicionalmente se puede resaltar la existencia de estudios en la literatura que después de buscar la dosis óptima de desinfectante remanente en redes de distribución de agua potable encontraron que la aplicación únicamente de desinfectantes no es suficiente para evitar el crecimiento de biopelículas (J Chandy, 2001).

3.1.6 Características de los materiales en una red de distribución de agua potable y su relación con la formación de biopelículas

Los materiales de los cuales se encuentran hechas las tuberías de las redes de distribución de agua potable son una variable determinante para explicar el comportamiento de las biopelículas en la red de distribución dado que el desarrollo de los microorganismos varía totalmente de un material a otro.

En la Universidad de los Andes se han desarrollado varios proyectos que buscan identificar cómo se comportan las películas biológicas en tuberías de diferentes materiales comerciales con el fin de establecer que materiales tienen un potencial mayor de generación de biopelículas. Los resultados de estos estudios permiten observar resultados como los que se presentan en la siguiente tabla.

Material	COT (mg/L)
Vidrio	2.78±0.4
Cobre	4.15±0.17
Polibutileno	4.46±0.15
PVC	5.42±0.11
Polipropileno	5.98±1.56
Polietileno	179±0.82
Etileno-propileno	157±0.84
Látex	320±19.4

Tabla 3"Concentración total de microorganismos encontrados en tuberías de diferentes materiales" (Hernández, 2010).

De la tabla presentada anteriormente se puede apreciar que el material que presenta una mayor tendencia a captar microorganismos es el látex, mientras que el que presenta la menor capacidad de adherencia es el virio. Por otro lado se puede ver que materiales que se usan comúnmente en redes de distribución como el polietileno presentan una clara tendencia a concentrar cantidades importantes de microorganismos.

Del mismo modo uno de los análisis más completos referentes a este tema fue realizado por Niquette Patrick en el año 2000 en el cual se encontró la densidad de biomasa almacenada en los materiales que se encuentran en el mercado para fabricar tuberías de distribución de agua potable. Los resultados de este estudio se muestran a continuación.

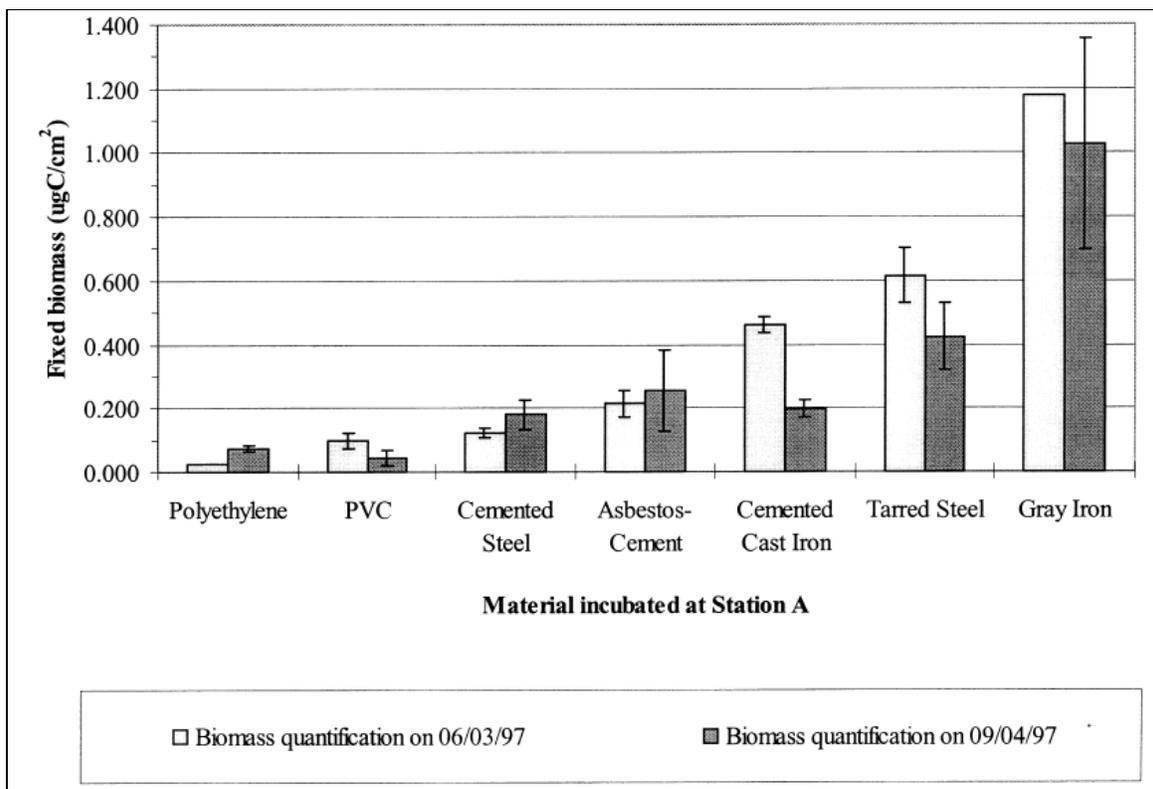


Figura 4 "Biomasa presente en los materiales más comunes en el diseño de tuberías de redes de distribución de agua potable" (Niquette Patrick, 2000).

De este estudio se puede inferir claramente que los materiales en los cuales se encontró una densidad menor de biomasa fueron el Polietileno y el PVC mientras que el hierro y el acero fueron los que presentaron una densidad mayor. En términos generales se puede afirmar que los materiales plásticos tienden a tener un potencial menor para almacenar microorganismos que el cemento y los metales.

Para el desarrollo de este proyecto de grado se utilizará un montaje con tuberías de PVC, Polietileno y Hierro Galvanizado; por lo tanto a continuación se presentaran algunos resultados obtenidos en estudios previos realizados por la Universidad de los Andes con respecto al comportamiento de biopelículas en estos materiales.

- **Hierro:** El hierro es un material que fomenta el desarrollo de microorganismos a causa de sus problemas de corrosión y formación de hendiduras, los cuales facilitan la formación de biopelículas. Adicionalmente la interacción del cloro con el hierro



Universidad de
los Andes

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



produce hidróxidos que disminuyen la presencia del cloro libre en el agua como desinfectante (Gamarra, 2005). Por último se puede afirmar que la superficie rugosa de este material facilita la colonización de las superficies por parte de los microorganismos (Keinanen, 2006).

- **Polietileno:** Es un material termoplástico muy resistente a la corrosión y bastante económico en el mercado. Tiene cierta capacidad de albergar microorganismos debido a que tiende a aportar suficientes nutrientes para que se dé una formación rápida de las biopelículas
- **PVC:** Es un material muy resistente a cualquier esfuerzo mecánico y la corrosión producida por sustancias ácidas. Está comprobado que su capacidad de albergar microorganismos es mucho menor que la de otros materiales utilizados comercialmente como el hierro. Sin embargo en su superficie desarrolla mayor densidad de biopelículas que materiales como el acero inoxidable, soportando la idea de que los microorganismos colonizan más rápidamente superficies hidrofóbicas (Donoso, 2009).

3.2 Aspectos Hidráulicos

Anteriormente se discutió sobre las características microbiológicas de la biopelículas, las cuales determinan su desarrollo en un sistema que aparentemente es hostil como las redes de distribución de agua potable. Ahora se discutirá sobre el conocimiento hidráulico que por medio de ecuaciones físicamente basadas permite describir el comportamiento del flujo en una tubería.

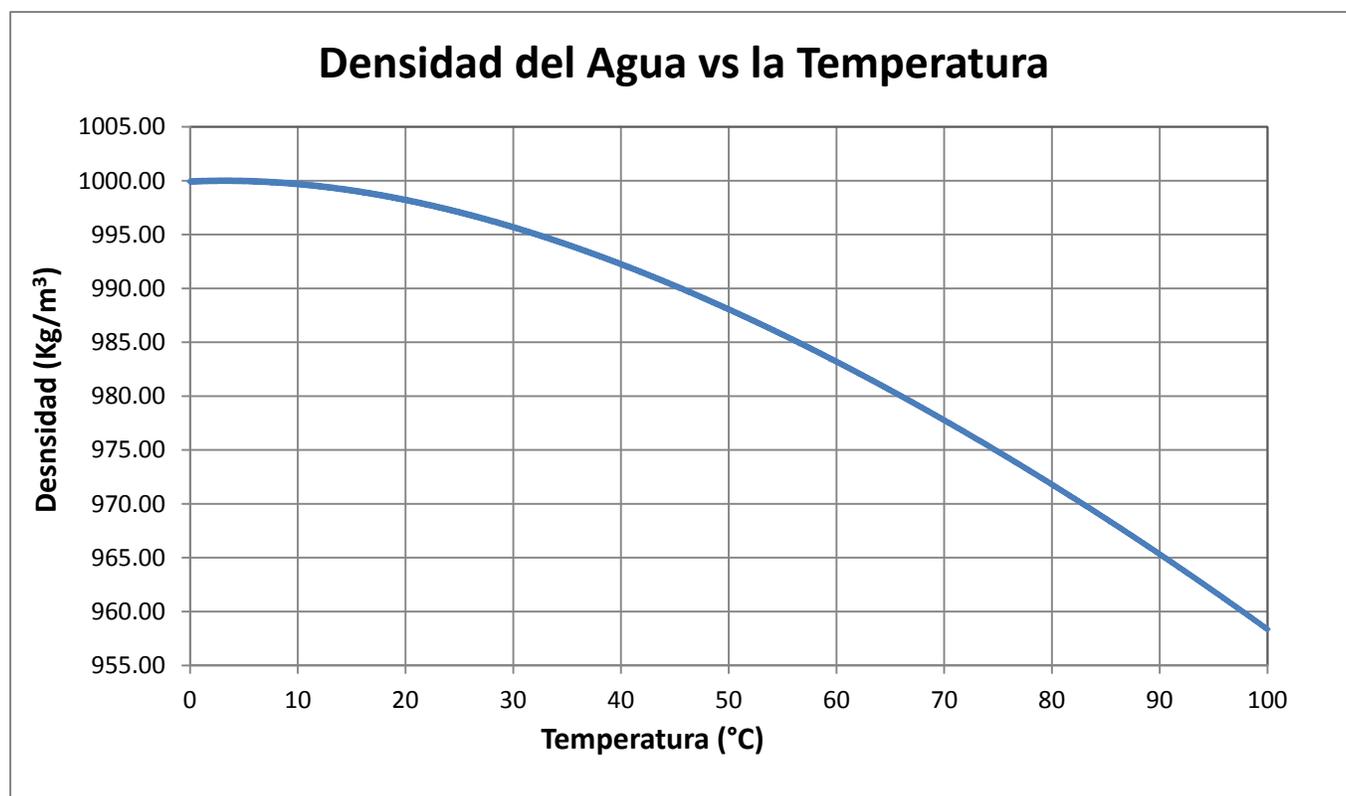
3.2.1 Propiedades del agua

El agua es un compuesto químico que se caracteriza por tener un punto de congelamiento a una temperatura de 0°C y un punto de ebullición a 100 °C, por lo tanto entre estos rangos de temperatura se encuentra en estado líquido y algunas de sus propiedades como la viscosidad y la densidad varían en función de los cambios de temperatura.

Como la investigación desarrollada en este documento consiste en un modelo que simula el comportamiento del flujo en una red de distribución de agua potable se debe tener en cuenta los cambios producidos en las propiedades del agua a causa de las fluctuaciones de temperatura en el sistema. Estos cambios adquieren más importancia cuando se utilizan bombas para recircular el flujo las cuales aumentan paulatinamente la temperatura fluido como ocurre en los modelos experimentales desarrollados en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes.

De acuerdo con la tabla del **Anexo 10.2** basada en la tabla de propiedades del agua que se encuentra en el libro *Hidráulica de tuberías: Abastecimiento de agua, redes, riego* del profesor Saldarriaga se construyó una tabla general con las propiedades del agua para cualquier valor de temperatura, la cual se utilizara posteriormente para determinar las propiedades de este fluido correspondientes a cada medición realizada a la hora de analizar los datos obtenidos experimentalmente.

Con esta tabla también se construyeron las siguientes gráficas que para cada una de las propiedades que se ven modificadas por los cambios de temperatura.



Gráfica 1 "Variación de la densidad del agua en función de la temperatura".

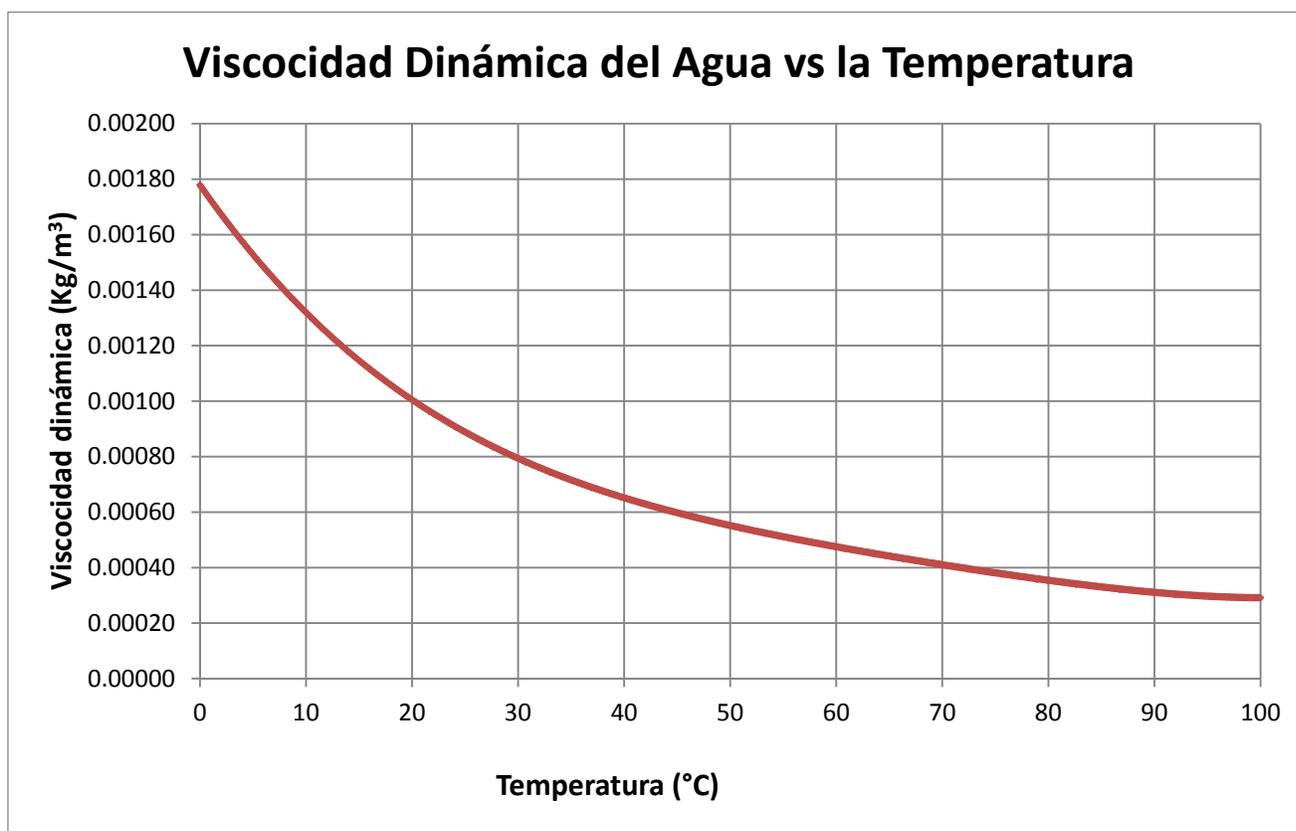
Si se realiza una regresión polinomial de la curva obtenida en la gráfica anterior se obtiene que la densidad se puede expresar en función de la temperatura de acuerdo a al siguiente ecuación.

$$\rho \left(\frac{Kg}{m^3} \right) = -1 * 10^{-7} * T^4 + 4 * 10^{-5} * T^3 - 0.0073 * T^2 + 0.0458 * T + 999.92$$

Ecuación 1 "Variación de la densidad del agua en función de la temperatura".

Donde la temperatura se encuentra en grados Celsius y la densidad en unidades del sistema internacional con un coeficiente de regresión R^2 de 1.

Al igual que para describir el comportamiento de la densidad con respecto a la temperatura del flujo, también se realizó el mismo procedimiento para la viscosidad dinámica y la viscosidad cinemática del agua.



Gráfica 2 "Variación de la viscosidad dinámica del agua en función de la temperatura".

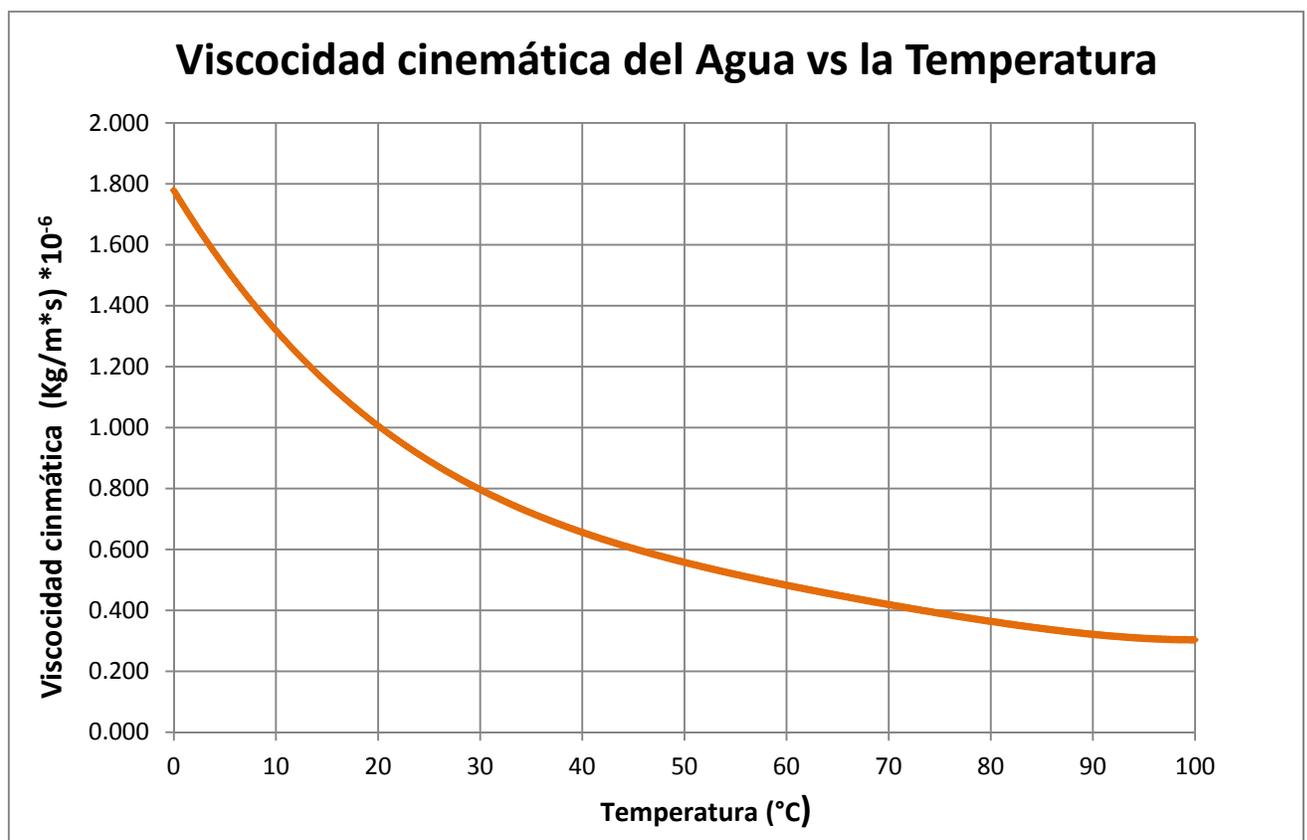
La regresión exponencial que representa el comportamiento de esta curva con un coeficiente R^2 de 1 es

$$\nu \left(\frac{m^2}{s} \right) = 3 * 10^{-11} * T^4 - 9 * 10^{-9} * T^3 - 1 * 10^{-6} * T^2 + 5 * 10^{-5} * T + 0.0018$$

Ecuación 2 "Variación de la viscosidad dinámica del agua en función de la temperatura".

donde la temperatura se encuentra en grados Celsius.

Finalmente la gráfica que representa el comportamiento de la viscosidad cinemática se muestra a continuación



Gráfica 3 "Variación de la viscosidad cinemática del agua en función de la temperatura".



La regresión exponencial correspondiente a esta gráfica con un coeficiente R^2 igual a 1 y la temperatura en grados Celsius es la siguiente

$$\mu \left(\frac{Kg}{m * s} \right) = 3 * 10^{-8} * T^4 - 9 * 10^{-9} * T^3 - 0.001 * T^2 + 0.0549 * T + 1.7789$$

Ecuación 3 "Variación de la viscosidad cinemática del agua en función de la temperatura".

3.2.2 Régimen de Flujo y Número de Reynolds

Como ya fue enunciado anteriormente, se sabe que el comportamiento del flujo en las tuberías es un factor que determina por completo el desarrollo de las películas biológicas en su interior.

El entendimiento del comportamiento del agua a través de un canal o una tubería ha sido el producto de muchos años de investigación realizada en las áreas de mecánica de fluidos e hidráulica que llevaron a explicar este fenómeno por medio de una serie de ecuaciones físicamente basadas que se discutirán a continuación.

El estudio del régimen de flujo a distintas velocidades permitió el desarrollo del número de Reynolds, que permite asociar las fuerzas viscosas con las fuerzas inerciales en un fluido en movimiento (Saldarriaga, 2007)

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

Ecuación 4 "Número de Reynolds".

De acuerdo con la ecuación 4, el número de Reynolds es un número adimensional que es función de la viscosidad cinemática (ν), la velocidad (v) y el diámetro de la tubería (d).

Por lo tanto a partir del número de Reynolds se puede clasificar el régimen de flujo de la siguiente manera

Flujo laminar: las fuerzas viscosas son superiores las inerciales por lo tanto no existe intercambio molecular. En este tipo de flujo se supone que el fluido se mueve en capas dispuestas una sobre otras, por lo tanto no se presenta ningún tipo de mezcla en el flujo.

Flujo en transición: Es un tipo de flujo intermedio entre el flujo laminar y el flujo turbulento en el cual el comportamiento del flujo es inestable; sin embargo no existe una condición de mezcla completa.

Flujo turbulento: En el flujo turbulento las fuerzas inerciales predominan sobre las fuerzas viscosas y se produce una mezcla completa entre capas promoviendo el intercambio molecular. En este tipo de flujo se vuelve imposible determinar la velocidad de las partículas por lo tanto se habla en términos de una velocidad promedio.

Tipo de Flujo	Rango
Laminar	Re<2200
Transición	2200< Re<4500
Turbulento	Re>4500

Tabla 4 "Régimen de flujo según el número de Reynolds"(Saldarriaga, 2007).

En la Tabla 4 se puede apreciar claramente como están establecidos los rangos para determinar el régimen de flujo de acuerdo con el número de Reynolds.

3.2.3 Teoría de la subcapa laminar viscosa

Después de los adelantos presentados por Reynolds, Ludwig Prandtl pudo establecer el comportamiento de las pérdidas de energía por fricción en ductos a partir de la interacción del flujo – pared sólida y la teoría de la longitud de mezcla. Estas permiten clasificar el flujo de carácter turbulento en tres categorías: Flujo turbulento hidráulicamente liso, flujo turbulento hidráulicamente rugoso y flujo turbulento transaccional. Según Prandtl la diferencia entre estos tipos de flujo turbulento es causada por la subcapa laminar viscosa que se define como la zona aledaña a la superficie de la tubería, donde su presencia impide el intercambio común de moléculas en flujos gobernados por regímenes turbulentos, generando una capa de flujo laminar cercana a la pared (Saldarriaga, 2007).

La subcapa laminar viscosa (δ') se define por medio de la siguiente ecuación

$$\delta' = 11.6 * \frac{\nu}{v_*}$$

Ecuación 5 "Subcapa Laminar viscosa".

donde ν es la viscosidad cinemática del agua y v_* es la velocidad de corte

Según Prandtl la velocidad de corte (v^*) se define como:

$$v^* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$$

Ecuación 6 "Velocidad de corte".

donde (τ_0) es el esfuerzo cortante en la pared de la tubería y (ρ) es la densidad del agua.

De acuerdo al espesor de la subcapa a laminar viscosa y su relación con la rugosidad absoluta del material (k_s) se puede establecer si el régimen de flujo es hidráulicamente liso (FTHL) cuando el espesor de la rugosidad absoluta es menos al espesor de la subcapa laminar viscosa de tal manera que se pudiera suponer que la rugosidad de la tubería no existiera. Turbulento hidráulicamente transicional cuando el espesor de la capa límite es muy similar a la rugosidad de la tubería y no es clara la clasificación del flujo o flujo turbulento hidráulicamente rugoso cuando la rugosidad es superior a al espesor de la subcapa laminar viscosa.

La clasificación de los diferentes tipos de flujo de acuerdo con la teoría de la subcapa laminar viscosa se presentan en la siguiente tabla:

Tipo de Flujo	Rango
Liso	$k_s \leq 0,305\delta'$
Transición	$0,305\delta' < k_s \leq 6,1\delta'$
Rugoso	$k_s \geq 6,1\delta'$

Tabla 5"Clasificación del flujo turbulento de acuerdo al espesor de la subcapa laminar viscosa"(Saldarriaga , 2007).

3.2.4 Pérdidas por fricción

La relación entre el esfuerzo cortante en la pared de un conducto y la caída piezométrica de altura o pérdidas por fricción (h_f) se define por medio de la siguiente ecuación para el caso de una tubería a presión (Saldarriaga, 2007)

$$\tau_0 = \frac{d}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot \frac{h_f}{L}$$

Ecuación 7 "Relación entre el esfuerzo cortante y h_f ".

donde (τ_0) es el esfuerzo cortante generado en la pared de la tubería, (h_f) son las pérdidas de caída piezométrica, (L) es la longitud de la tubería y (d) y (ρ) son el diámetro de la tubería y la densidad del fluido.

La caída piezométrica también puede ser descrita en términos de la ecuación de Darcy-Weisbach realizando un análisis dimensional que obtiene como resultado la siguiente ecuación (Saldarriaga, 2007):

$$h_f = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 8 "Pérdidas por fricción expresadas en función del factor de fricción".

donde (f) es el factor de fricción, (v) es la velocidad de flujo

Si se despeja el factor de fricción de la Ecuación 8 se puede obtener una expresión aparentemente sencilla para calcular el factor de fricción en términos de la caída de altura piezométrica h_f

$$f = \frac{2 \cdot g \cdot d \cdot h_f}{L \cdot v^2}$$

Ecuación 9 "Factor de fricción despejado de la Ecuación 8".

De la ecuación presentada anteriormente se puede inferir el factor de fricción es directamente proporcional a las pérdidas de caída piezométrica e inversamente proporcional a la velocidad de flujo.

3.2.5 Factor de fricción y ecuación de Colebrook-White

Los estudios realizados por Colebrook, White, Prandtl, Von Karman y Moody con respecto al comportamiento del flujo en tuberías contribuyeron al entendimiento del efecto de la rugosidad como una característica propia de cada material, la cual es una constante y únicamente varía cuando está siendo afectada por factores que inhiben su capacidad como la presencia de películas biológicas. Por otro lado los estudios de estos investigadores también permitieron aclarar la definición del factor de fricción que había sido propuesto

por Darcy como una función compleja del número de Reynolds y la rugosidad relativa del material (Saldarriaga, 2007).

Con respecto al factor de fricción se determinó que este varía de acuerdo con el régimen de flujo; por lo tanto para el flujo laminar únicamente dependerá del número de Reynolds y podrá ser calculado por medio de la siguiente expresión

$$f = \frac{64}{Re}$$

Ecuación 10 "Factor de fricción para régimen de flujo laminar".

Mientras que para el caso del flujo turbulento y el flujo de transición el factor de fricción será función tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa de la tubería (k_s/d) y deberá ser calculado por medio de la ecuación implícita físicamente basada de Colebrook-White.

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

Ecuación 11 "Ecuación de Colebrook White".

Para efectos del estudio planteado en este documento se buscará entender los cambios que la presencia de las biopelículas producen en la rugosidad de las tuberías ;por lo tanto será muy útil despejar la rugosidad absoluta de la tubería de la ecuación de Colebrook-White como se muestra en la Ecuación 12

$$K_s = 3.7d \left(10^{\frac{1}{2\sqrt{f}}} - \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 11 "Ecuación de la rugosidad absoluta".

3.2.6 Diagrama de Moody

El diagrama de Moody fue el resultado de los estudios realizados por Lewis Moody en 1944, el cual consiste en una gráfica que permite observar el comportamiento del factor de fricción en todos los tipos de flujo. Este diagrama se obtuvo a partir de los estudios que habían sido realizados previamente por Johan Nikuradse y Colebrook –White. La aplicación de este diagrama fue muy importante para el desarrollo de la ingeniería hidráulica antes de que existieran computadores con la capacidad de resolver fácilmente la ecuación de Colebrook-White (Saldarriaga, 2007) .A continuación se presenta una imagen del diagrama de Moody

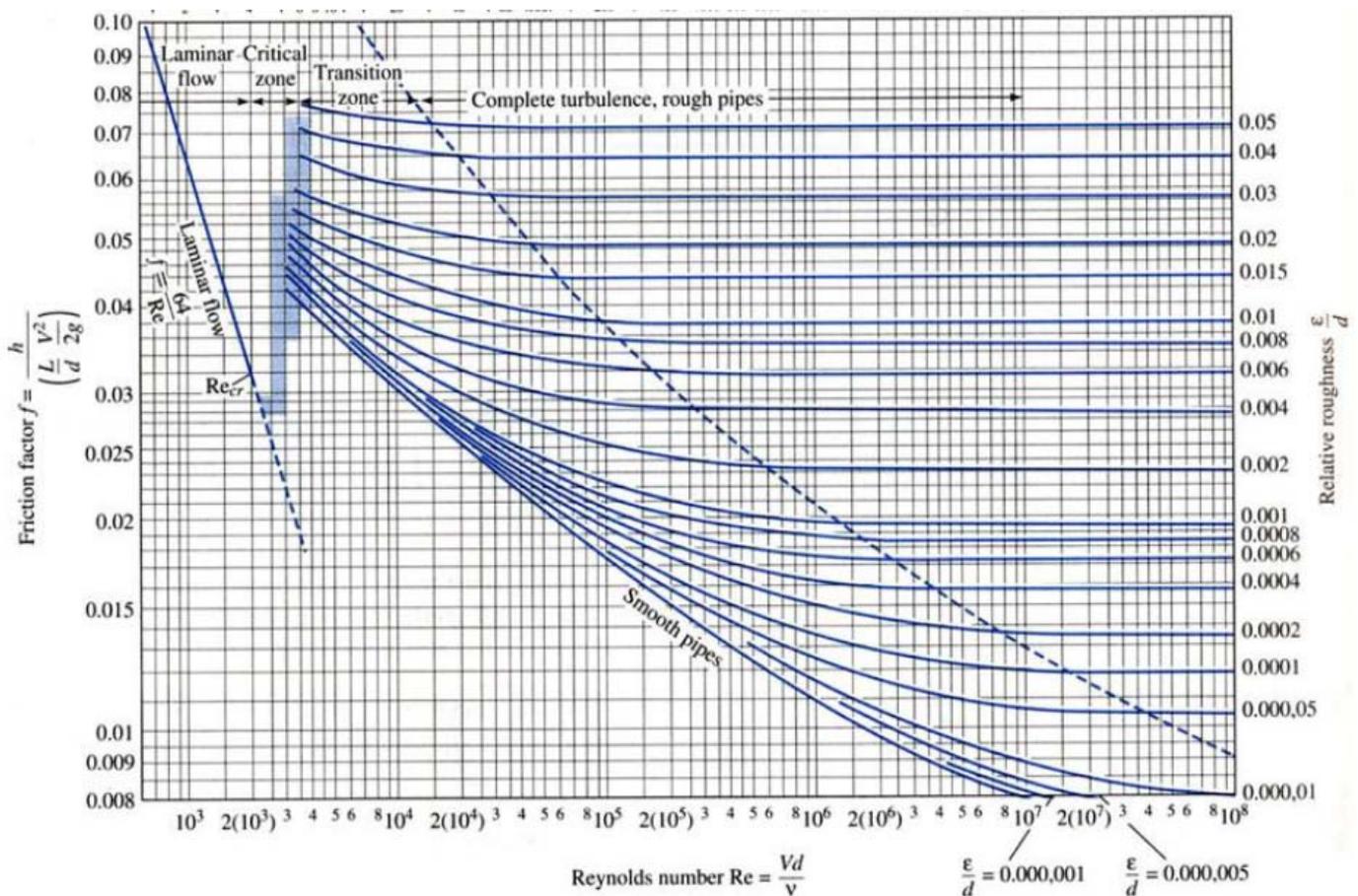


Figura 5 "Diagrama de Moody" (Díaz, 2014).



Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



En el diagrama de Moody presentado anteriormente se puede ver como el factor de fricción está representado como una recta para los menores valores del número de Reynolds. También se puede apreciar como el factor de fricción es prácticamente constante en la zona de régimen turbulento y que la transición entre flujo laminar y turbulento se da de manera gradual.



Universidad de los Andes

Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
 Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
 Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



4. Modelo Físico

En el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes especialmente en la zona conocida como el laboratorio de alcantarillados, se han venido construyendo diferentes modelos físicos utilizados para realizar investigaciones referentes al tema de las biopelículas. Estos modelos han sido desarrollados basados en la misma metodología, la cual consiste en desarrollar un circuito cerrado, en el cual se recircule el flujo utilizando tuberías de materiales comunes en el mercado. A estas tuberías se les fabrican testigos los cuales se pueden remover cuando se requiera analizar el comportamiento de las películas que se formen en su superficie.

Para poder realizar las pruebas necesarias para determinar el comportamiento de las biopelículas desarrolladas en tuberías a presión a altas velocidades, fue necesario desarrollar un modelo físico que cumpliera con las especificaciones necesarias para la ejecución del proyecto.

El desarrollo del modelo físico se basó en los modelos preexistentes en laboratorio de la Universidad de los Andes dado que estos modelos presentaban características que podían ser útiles para el tipo de mediciones que debían realizarse.

El modelo que se finalmente fue construido fue una modificación de los 2 modelos que habían sido utilizados el semestre anterior por (Díaz, 2014) y (Cifuentes, 2013), en el cual se utilizaron componentes de ambos modelos.

4.1 Modelos Existentes.

En el momento en el que se inició este proyecto existían 2 modelos desarrollados para estudiar el fenómeno de la formación de biopelículas en tuberías de redes de distribución en el Laboratorio de Alcantarillados.

El primer modelo había sido desarrollado por Carolina Navarrete en el 2012 y posteriormente fue utilizado por (Díaz, 2014) en el 2013. Este primer modelo estaba conformado por tres tuberías de 4 pulgadas de materiales diferentes (PVC, Polietileno, Hierro Galvanizado) y su objetivo era realizar estudios enfocados en la influencia que tienen los materiales de las tuberías en el proceso de formación de biopelículas.

El segundo modelo estaba enfocado en analizar los efectos de la velocidad en el crecimiento y desprendimiento de las películas biológicas y había sido utilizado por Gonzalo Cifuentes (Cifuentes, 2013). Este modelo también estaba compuesto por tres tuberías, pero en esta caso las 3 tuberías eran de PVC y el diámetro de cada tubería era de 6 pulgadas.

Ambos modelos utilizaban una bomba para recircular el agua en el circuito y un tanque de almacenamiento. El flujo se manipulaba por medio de una válvula colocada aguas arriba en cada una de las tuberías y la caída de presión era medida por medio de piezómetros y sensores de presión. Para medir el caudal transportado por las tuberías se utilizaba un vertedero triangular calibrado y se medía la altura utilizando un limnómetro móvil. Los modelos preexistentes en el laboratorio se pueden apreciar en las siguientes imágenes.



Figura 6 “Montaje de biopelículas de medición de velocidades con tuberías de PVC de 6” ”.



Figura 7 “ "Montaje biopelículas tuberías de materiales diferentes y diámetro de 4" ”.

4.2 Selección del modelo físico a partir de los modelos existentes

El modelo utilizado por Gonzalo Cifuentes (Cifuentes, 2013) desarrollado para determinar el comportamiento de las biopelículas de acuerdo con los cambios en la velocidad de flujo, permitía obtener caudales más altos que el otro modelo; sin embargo todas las tuberías de este modelo eran del mismo material y no tenía mucho sentido analizar el comportamiento de las biopelículas a altas velocidades en un solo material.

Por otro lado las tuberías del montaje utilizado por Óscar (Díaz, 2014) poseían una sección transversal menor por lo tanto estas podrían transportar los mismos caudales trabajados por Gonzalo Cifuentes (Cifuentes, 2013) en su modelo físico con una velocidad mayor. Por esta razón se decidió utilizar los componentes del modelo de Gonzalo Cifuentes (Cifuentes, 2013) con las tuberías del modelo de Oscar Díaz (Díaz, 2014) .

Originalmente se pensó en traer tuberías nuevas de 4 pulgadas para desarrollar en nuevo modelo. Sin embargo por cuestiones de tiempo se decidió reutilizar las tuberías de Hierro Galvanizado y Polietileno del montaje de Oscar y una tubería nueva de PVC que tenía el CIACUA en el laboratorio.

4.3 Construcción del modelo

En esta sección se presentarán los pasos realizados para desarrollar el nuevo modelo físico.

En primer lugar fueron retirados y limpiados los testigos de las tuberías de Hierro Galvanizado y Polietileno del modelo de Oscar (Díaz, 2014) como se muestra a continuación:

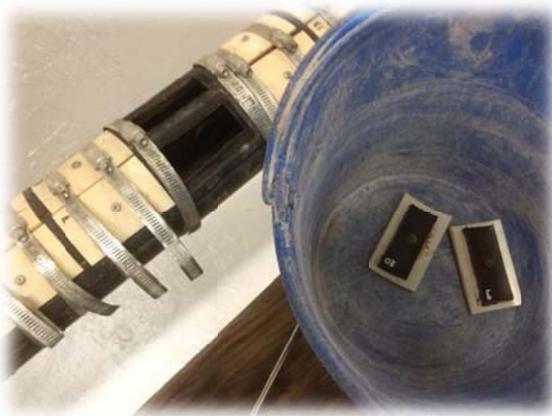


Figura 9 " Testigos retirados tubería de Polietileno".



Figura 8 "Testigos retirados de todas las tuberías".



Figura 10 " Testigos de polietileno lavados".

Posteriormente se procedió a retirar cuidadosamente las tuberías del modelo evitando cualquier tipo de daño que pudiera afectar su funcionamiento en el nuevo modelo como se puede apreciar en las Figuras 11 y 12.



Figura 12 "Desmonte tubería de polietileno".



Figura 11 "Desmonte tubería de PVC".

Fue de gran ayuda el hecho de que la unión de la tubería de Hierro Galvanizado con la estructura de los vertederos, pudo ser retirada sin sufrir ningún daño como se muestra en la Figura 11, lo cual permitió reutilizar esta unión perfectamente acelerando la adecuación del modelo.

Una vez retiradas estas tuberías fue necesario limpiarlas. Para realizar este procedimiento se utilizó un tubo largo de PVC con un diámetro menor a 4 pulgadas el cual se forró con

trapos, y fue introducido en ambas tuberías varias veces hasta lograr que la superficie de estas quedara lo suficientemente limpia para hacer parte del nuevo montaje. Las Figuras 13, 14 ilustran este procedimiento.



Figura 13"Procedimiento de limpieza de la tubería de HG".



Figura 14"Procedimiento de limpieza de la tubería de Polietileno".

Una vez fueron limpiadas ambas tuberías se procedió a retirar las tuberías que hacían parte del modelo de Gonzalo Cifuentes (Cifuentes, 2013) y la tubería de PVC del modelo de Oscar Díaz (Díaz, 2014) que no sería utilizada en el nuevo modelo.



Figura 15 "Proceso de desmonte y corte de las tuberías de PVC de 6 pulgadas".

Después de retirar las tuberías de PVC se trasladaron las tuberías de Polietileno y Hierro Galvanizado hasta la ubicación del nuevo modelo utilizando una polea.



Figura 16 "Proceso de transporte de la tubería de Hierro Galvanizado".

Como el modelo utilizado por Gonzalo estaba adecuado para tuberías de diámetros de 6 pulgadas, fue necesario utilizar reducciones para poder colocar las tuberías de 4 pulgadas.



Figura 17 "Reducciones de 6 a 4 pulgadas".

Una vez fueron instaladas las reducciones en el modelo se procedió a la instalación de las tuberías. Sin embargo, las tuberías del modelo original tenían una longitud de casi 9 metros mientras que las tuberías del montaje reutilizadas no superaban los 7 metros por lo tanto la longitud faltante se añadió al modelo con tuberías de PVC como se muestra a continuación:



Figura 18 "Tuberías complementarias de PVC".

Después de realizar la instalación de estas tuberías complementarias se pudo instalar las tuberías de Polietileno y Hierro Galvanizado. La tubería nueva de PVC fue la última tubería que se instaló.



Figura 19 "Tuberías recién instaladas".

Después de instalar todas las tuberías se procedió a la elaboración de los nuevos testigos de la tubería de PVC los cuales fueron desarrollados con dimensiones muy parecidas a las de los testigos de las tuberías de Polietileno y Hierro Galvanizado. El proceso de construcción y adecuación de estos testigos se presenta en las en las Figuras 20 y 21.

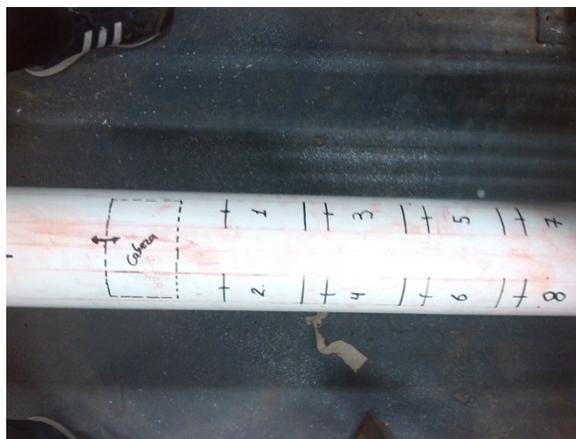


Figura 20 "Ubicación de testigos en la nueva tubería".



Figura 21 "Proceso de elaboración de testigos".

En la siguiente tabla se presentan las dimensiones de todos los testigos del modelo incluyendo los nuevos testigos de PVC

Material	Testigo	Ancho(mm)	Largo(mm)	Radio(mm)	Circunferencia (mm)	Área (mm ²)	Área (cm ²)
Poliétileno	Cabeza	60	70	101.6	60.91	4263.56	42.64
	Centro	25	60	101.6	25.06	1503.81	15.04
Hierro Galvanizado	Cabeza	60	80	101.6	60.91	4872.64	48.73
	Centro	30	60	101.6	30.11	1806.60	18.07
PVC	Cabeza	60	85	101.6	60.91	5177.18	51.77
	Centro	35	75	101.6	35.18	2638.16	26.38

Tabla 6 "Propiedades geométricas de los testigos del modelo".

La Tabla 6 muestra como los testigos de cada tubería se dividen en testigos de centro y de cabeza. Los testigos de cabeza son más grandes de que los de centro borde y hay uno en cada tubería; estos testigos nunca son limpiados durante el desarrollo del estudio con el fin

de determinar el crecimiento total de la biopelícula. Por otro lado los testigos de centro o borde son 24 testigos ubicados a lo largo de la tubería y a diferencia de los testigos de cabeza estos deben limpiarse cada vez que son retirados para realizar alguna medición pues su objetivo es determinar la velocidad de desarrollo de la capa biológica entre los periodos de medición.

Después de elaborar los testigos del modelo se debió elaborar un cierre hermético con neopreno tanto para las tuberías viejas como las nuevas con el fin de impedir fugas en el sistema.



Figura 22 "Cierre hermético de testigos".

Por último se conectaron los piezómetros y se enderezó la tubería de polietileno que se había flectado después de haber sido retirada del modelo de Oscar Díaz (Díaz, 2014), finalmente el nuevo modelo se puede observar en la Figura 23.



Figura 23" Nuevo modelo terminado".

4.4 Componentes del modelo

El modelo construido para realizar las pruebas de laboratorio está compuesto por tres tuberías de 4 pulgadas, con una longitud de 6.14 metros. Los materiales de las tuberías son PVC polietileno y Hierro Galvanizado y sus diámetros medidos utilizando un calibrador se presentan en la siguiente tabla

Material	d (m)	A (m ²)
PVC	0.1058	0.0088
Polietileno	0.0948	0.0071
Hierro Galvanizado	0.1042	0.0085

Tabla 7 "Diametros internos reales medidos de las tuberías del montaje".

El montaje cuenta con 3 válvulas que permiten regular el caudal que pasa por las tuberías y se muestran en la siguiente figura:



Figura 24 "Válvulas reguladoras de caudal".

Dos tanques de almacenamiento. El primer tanque es de forma cubica y recibe el agua que viene de los vertederos mientras que el segundo tanque es de forma cilíndrica y se encuentra ubicado aguas arriba del modelo, pues su principal objetivo es almacenar el agua bombeada que va a alimentar el sistema. Que se muestran en las Figuras 25 y 26



Figura 26 "Tanque de almacenamiento ubicado después de los vertederos".



Figura 25 " Tanque de almacenamiento cilíndrico".

Los caudales son medidos por medio de 3 vertederos triangulares ubicados después de una estructura de disipación de energía. A la salida de los vertederos se encuentra un limnómetro móvil.



Figura 27 "Vertederos en el modelo".

El modelo cuenta con 24 testigos de centro y 1 de cabeza o borde para cada una de las tuberías, los cuales se fijan al modelo por medio de correas removibles como se ve en la Figura 28.

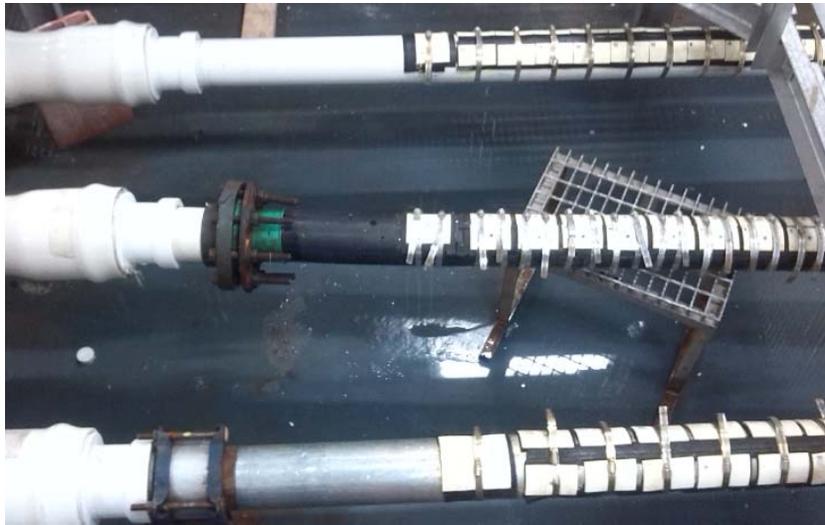


Figura 28 "Testigos y correas".

Por último el modelo cuenta con 8 piezómetros para cada tubería, 4 aguas arriba y 4 aguas abajo, que se pueden medir en el tablero piezométrica que se muestra en la Figura 28

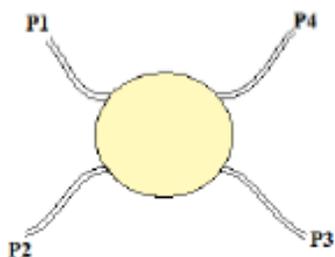


Figura 30 "Sección transversal con piezómetros".



Figura 29 "Tablero Piezométrica".

5. Procedimiento Experimental

5.1 Calibración de vertederos

Con el fin de poder determinar los caudales y las velocidades medidas en el montaje se debieron utilizar las ecuaciones de calibración De los vertederos triangulares del modelo de velocidades utilizado por Gonzalo Cifuentes (Cifuentes, 2013). Estas ecuaciones fueron planteadas por María Ximena Trujillo (Trujillo, 2011) y se presentan a continuación.

Vertedero	Ecuación	H ₀ (cm)
Vertedero 1	$Q = 0.0085(H-H_0)^{2.46}$	10.78
Vertedero 2	$Q = 0.0047(H-H_0)^{2.47}$	10.61
Vertedero 3	$Q = \mathbf{0.0053}(H-H_0)^{2.48}$	10.07

Tabla 8 "Ecuaciones de calibración de vertederos"

El valor del coeficiente de la ecuación del vertedero número 3 se encuentra en color rojo porque a pesar de ser el coeficiente calculado por el proceso de calibración en las hojas de cálculo de María Ximena Trujillo en el documento final aparece un coeficiente completamente diferente que modifica los caudales obtenidos. Las ecuaciones de calibración de los vertederos se obtienen a partir del ajuste realizado por medio de una regresión con mediciones de nivel y caudales medidos con un caudalímetro. A partir de estos datos se puede obtener una curva de calibración como la que se muestra a continuación:

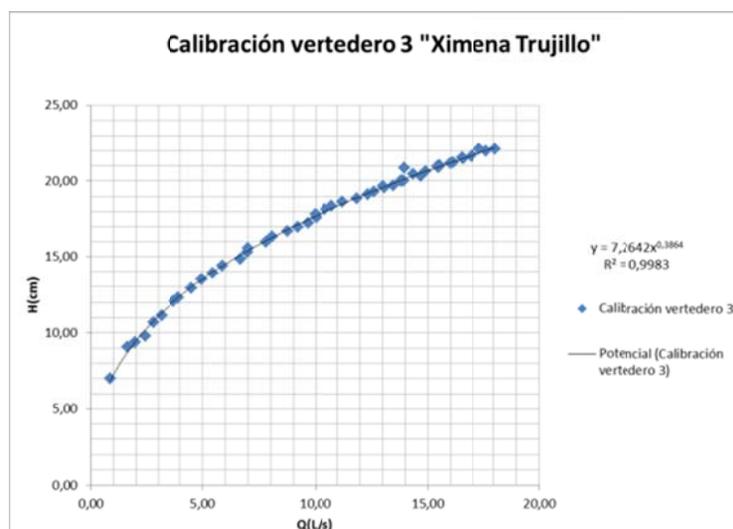


Figura 31 "Curva de calibración del vertedero número 3" (Trujillo, 2011).

Es importante aclarar que al caudal que pasa por la tubería de PVC es medido utilizando la ecuación del vertedero 1, mientras que los caudales de las tuberías de Polietileno y Hierro Galvanizado se determinan con las ecuaciones de los vertederos 3 y 4 respectivamente.

Las ecuaciones de calibración de los vertederos permiten determinar el caudal de cada medición por medio del nivel observado con el limnómetro móvil que se encuentra sobre los vertederos.

5.2 Proceso de recirculación

Con el fin de representar las condiciones de un sistema de distribución de agua potable real se, planteó un circuito cerrado en el cual el flujo que pasa por las tuberías es almacenado en un tanque y posteriormente es recirculado con lo ayuda de una bomba. De acuerdo con la experiencia del CIACUA desarrollando este tipo de montajes se ha establecido que el agua se debe recircular constantemente en el sistema durante un período de 8 horas diarias

5.3 Determinación del volumen de agua presente en el modelo

Dado que el nuevo modelo presenta tuberías y accesorios de características diferentes a las que originalmente se encontraban en el modelo de Gonzalo Cifuentes (Cifuentes, 2013), fue necesario realizar de nuevo los cálculos del volumen de agua presente en el sistema durante su funcionamiento.

Para realizar los cálculos correspondientes al volumen del sistema se determinaron los diámetros internos reales de cada una de las tuberías midiendo una muestra de cada tipo de tubería con un calibrador como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 32 "Medición del diámetro interno de las tuberías".

Se realizaron varias mediciones en distintas partes de las muestras y luego se tomó el promedio de las mediciones como el valor del diámetro interno de cada tubería del montaje. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

Diámetros reales		
material tubería	d (m)	A (m ²)
PVC	0.105837	0.008798
Polietileno	0.094800	0.007058
Hierro Galvanizado	0.104203	0.008528

Tabla 9" "Diámetros reales de tuberías.

Los volúmenes de los tanques y los vertederos se determinaron por medio de la siguiente ecuación

$$V_t = \text{Alto} * \text{Ancho} * \text{Largo}$$

Ecuación 12 "Volumen de tanques y vertederos".

mientras que los volúmenes de las tuberías y los accesorios relacionados con ellas fueron calculados a partir de la siguiente expresión:

$$V_p = \frac{\pi * \text{Diámetro}^2}{4} * \text{Largo}$$

Ecuación 13 "Volumen de tuberías y accesorios"

A continuación se presentará el cálculo del volumen del sistema como la sumatoria de los volúmenes que representan los componentes del modelo

- Tanque que recibe el agua de los vertederos y volumen almacenado en los vertederos

Tanque de llegada			
Parámetro	A	H	V
Unidad	m ²	m	m ³
Valor	10.1492	1	10.1492

Tabla 10 "Volumen Tanque de llegada".

- Cálculo de las tuberías que conforman el modelo:

Tuberías					
Parámetro	L	d	A	V	VT TUBERÍAS
Unidad	m	m	m ²	m ³	m ³
Tubería del tanque a la Bomba	2.000	0.105	0.008	0.018	0.184
PVC	7.210	0.105	0.008	0.063	
Polietileno	6.140	0.094	0.007	0.043	
HG	7.010	0.104	0.008	0.060	

Tabla 11 "Volumen Tuberías".

- Volumen de los elementos complementarios como tuberías y uniones:

Elementos Complementarios						
Parámetro	l	d	A	#	V	
Unidad	m	m	m ²		m ³	
Uniones	0.730	0.10583667	0.008798	6	0.039	
Tuberías complementaria PE	1.070	0.10583667	0.008798	1	0.009	
Tuberías complementaria HG	0.870	0.10583667	0.008798	1	0.008	

Tabla 12 "Volumen elementos complementarios".

- Volumen del tanque de almacenamiento cilíndrico:

Tanque cilíndrico				
Parámetro	d	A	H	V
Unidad	m	m ²	m	m ³
Valor	1.320	1.368	1.450	1.984

Tabla 13 "Volumen tanque cilíndrico".

Finalmente se obtiene el volumen total del sistema que se muestra en la Tabla 14

Volumen total del sistema	12.37	m ³
	12365.59	L

Tabla 14 "Volumen total del sistema".

5.4 Determinación de Cloro Residual

Para que las condiciones presentadas en el modelo sean realmente similares a las condiciones de una red de distribución de agua potable se debe tener en cuenta el proceso de cloración realizado en las PTAP; por lo tanto es necesario recrear las condiciones de cloro residual presente en el flujo que es distribuido a los usuarios.

De acuerdo con la normativa colombiana establecida por medio de la Resolución 2115 de 2007 del Ministerio de Protección Social, una red de distribución de agua potable debe garantizar que en cualquier punto de la red el agua tenga una concentración de cloro residual que se encuentra entre 0.3 y 2 mg/L.

Según los estudios realizados previamente por la Universidad de los Andes simulando este tipo de sistemas, se determinó que la concentración óptima que se debería mantener en un modelo de esta índole debe ser de 0.5 mg/L. Adicionalmente estos estudios también encontraron que la forma más práctica de aplicar el cloro en el sistema es por medio dosis de hipoclorito de calcio granular, el cual es fácil de manipular y se disuelve fácilmente en el agua (Hernández, 2010).

5.4.1 Dosis de Cloro requerida

El hipoclorito de calcio $(ClO)_2Ca$ es una sustancia que se encuentra en estado sólido y al reaccionar con el agua se disocia de la siguiente manera.



Ecuación 14 "Dilución del Hipoclorito de Calcio en agua".

Si se plantea una relación estequiométrica entre el $(ClO)_2Ca$ y el $ClOH$ de acuerdo con los pesos moleculares de cada uno de estos compuestos en g/mol se obtiene el siguiente resultado:

$$\frac{144g (ClO)_2Ca}{1 mol(ClO)_2Ca} * \frac{1 mol(ClO)_2C}{2 mol ClOH} * \frac{1 mol ClOH}{52 g ClOH} = 1.38 \frac{g (ClO)_2Ca}{g ClOH}$$

Ecuación 15 "Relación estequemétrica entre el Hipoclorito de Calcio y el Ácido Hipocloroso".

El volumen de Ácido Hipocloroso requerido en el sistema para mantener una concentración de por lo menos 0.5mg/L de cloro se determina e acuerdo al volumen total de agua el montaje como se muestra en la siguiente ecuación.

$$12365.59 * 0,5 \frac{mg ClOH}{L} * \frac{1g ClOH}{1000mgClOH} = 6.18de ClOH$$

A partir de la masa requerida de Acido hipocloroso para mantener las concentraciones de cloro deseadas en todo el volumen del sistema se puede calcular la masa requerida en gramos de Hipoclorito de Calcio:

$$6.18g ClOH * 1.38 \frac{g (ClO)_2Ca}{g ClOH} = 8.53g (ClO)_2Ca$$

Por lo tanto para asegurar una concentración de 0.5 mg/L de cloro en el agua se deben aplicar 8.53 g de Hipoclorito de Calcio.

5.4.2 Decaimiento de Cloro Residual en el sistema

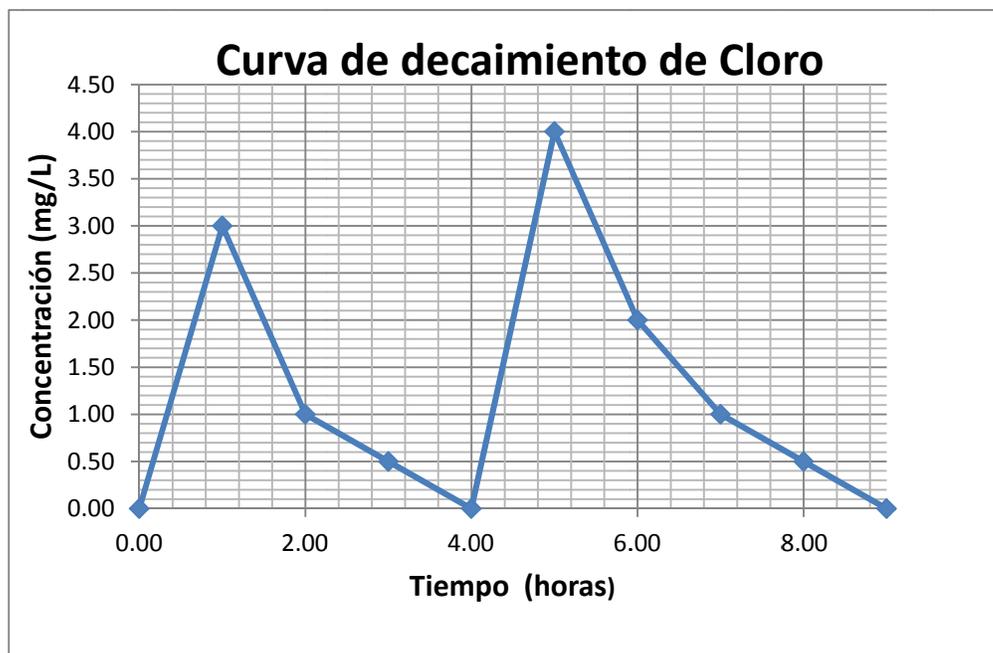
Aunque se apliquen las concentraciones de cloro necesarias para mantener al menos 0.5 mg/L de Ácido Hipocloroso en el sistema, la naturaleza de este reactivo y el proceso de recirculación en el circuito contribuyen a que las concentraciones de cloro decaigan con el tiempo; por lo tanto es importante realizar un análisis por medio de una curva de decaimiento del cloro residual que permita conocer la concentración que debe ser aplicada realmente con el fin de garantizar la concentración mínima de cloro en el sistema.

Para mantener controlados los niveles de coloro en sistema se utilizó un colorímetro de cloro libre con un límite de detección de 0.5 mg/L.



Figura 33"Colorímetro de detección de Cloro libre".

Utilizando esta herramienta se pudo determinar que cuando se aplicaba 8.53g de $(ClO)_2Ca$ al sistema las concentraciones de Cloro en el agua después de 2 horas eran menores al límite de detección del colorímetro, por lo tanto se aumentó la dosis de cloro a un valor de 16 gramos de $(ClO)_2Ca$ con la cual se garantiza una concentración de cloro mayor a 0.5 mg/L después de 4 horas. Sin embargo se sugiere realizar una curva de cloro con límite de detección menor con el fin de establecer una dosis que realmente sea óptima pues en el momento que se aplica la concentración al modelo los niveles de cloro exceden generalmente las concentraciones permitidas en la norma.



Gráfica 4 "Curva de decaimiento de cloro".

De acuerdo con el análisis realizado para determinar el decaimiento del cloro en el sistema se estimó que para mantener las concentraciones de cloro requeridas en el agua según la norma se debe aplicar 2 dosis de 16 mg de Hipoclorito de Calcio cada 4 horas.

Para preparar el cloro requerido se separaron las dosis necesarias en bolsas herméticas de plástico. Cada dosis es vertida por lo menos con medio día de anticipación en una botella de con agua de 2 Litros para garantizar que se disuelva el material granular, antes de sea vertido en el modelo. En las siguientes imágenes se muestra el proceso de separación y preparación del cloro vertido en el modelo.



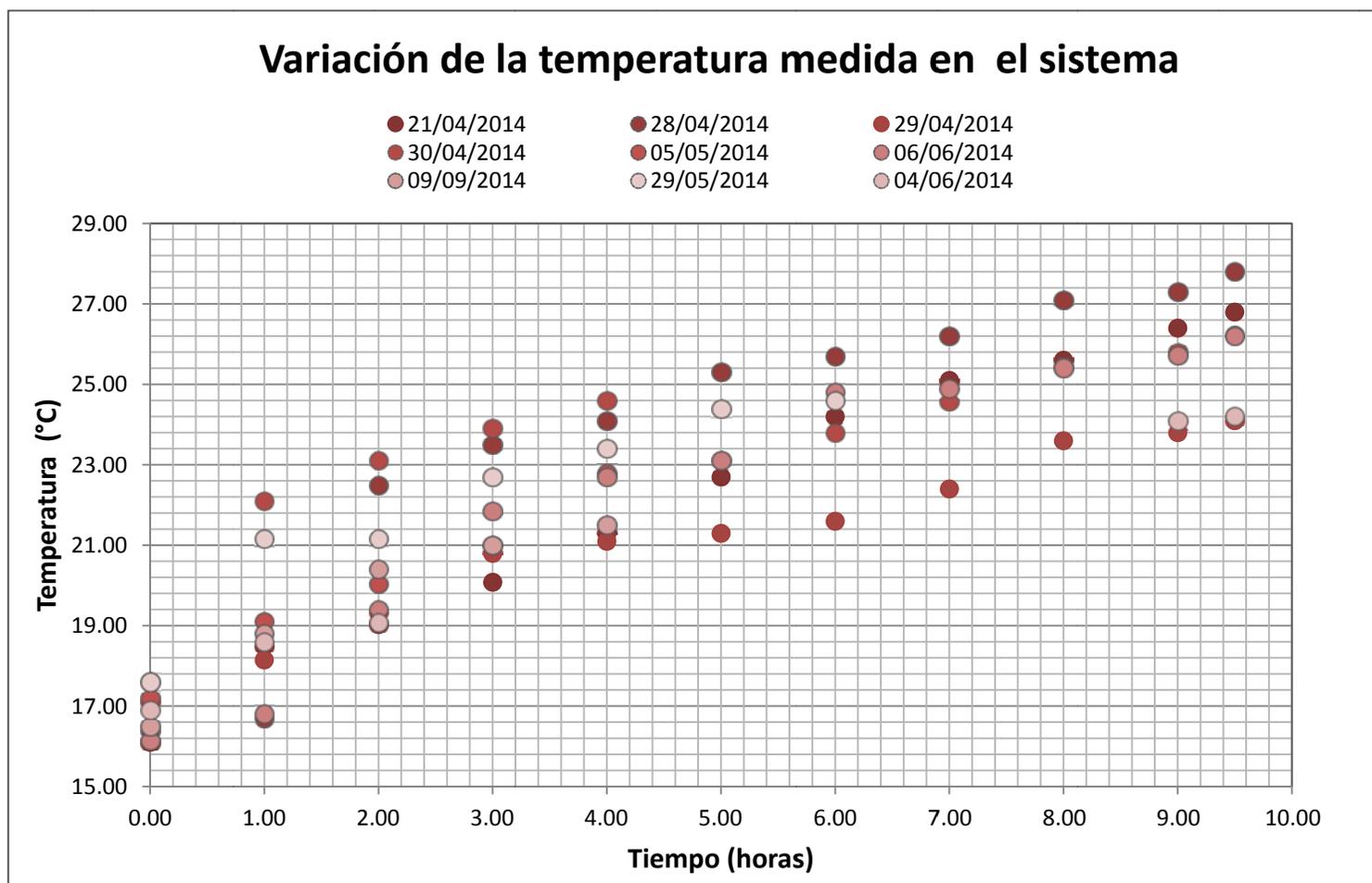
Figura 35 "Dosis separada de Cloro".



Figura 36 "Cloro preparado para ser vertido en el modelo".

5.5 Comportamiento de la temperatura del sistema.

Dado el hecho de que el modelo físico es un circuito cerrado en el cual se está recirculando el flujo constantemente a altas velocidades con la ayuda de una bomba, la temperatura del fluido va aumentando con el tiempo pues la interacción del flujo con la bomba va calentando lentamente el agua durante las horas de recirculación. El aumento de la temperatura modifica las propiedades del agua por lo tanto debe medirse cada vez que se vaya a realizar una medición de carácter hidráulico, pues de esta dependerán las propiedades del flujo. A continuación se muestra una gráfica que permite observar las variaciones de la temperatura en el modelo en todas las mediciones realizadas



Gráfica 5 “Variación de la temperatura en el modelo”.

De acuerdo con la Gráfica 5 se puede apreciar que después de la primera hora de recirculación las mediciones de temperatura varían aproximadamente entre 2 y 3 grados Celsius para los mismos períodos de medición.

5.6 Fuente de carbono suministrada al sistema

La fuente de carbono utilizada en el sistema se determinó de acuerdo con los resultados de los estudios previos sobre biopelículas desarrollados en la Universidad de los Andes. En estos estudios se estableció que el agua proveniente de las PTAP se encuentra expuesta a materia orgánica vegetal, por lo tanto en esta se encuentra materia vegetal que no es retirada por los tratamientos convencionales. Por lo tanto la fuente de materia orgánica que debe ser utilizada en este tipo de modelos es el *Pennisetum clandestinum* o pasto Kikuyo dado que es la fuente de materia orgánica que tiene más probabilidad de ingresar a un sistema de distribución de agua potable (Hernández, 2010) y que como fuente de carbono produce biopelículas de mayor espesor que otras fuentes como la panela (Vargas, 2012).

El pasto utilizado en el modelo fue recolectado en Centro deportivo de la Universidad de los Andes como se muestra en las siguientes imágenes:



Figura 38 "Recolección del pasto en el centro deportivo".



Figura 37" Bolsa para almacenar el pasto".

Para introducir el pasto dentro del modelo, se utilizaron costales de plástico con orificios para permitir el paso del agua. Las Figuras 38 y 39 presentan la ubicación de los costales en

el modelo. El costal utilizado para este proyecto se llenó con la suficiente cantidad de pasto como para mantener funcionando el modelo por más de 3 meses.



Figura 39 "Costales de almacenamiento de pasto".

El costal se amarra a las barandas y las paredes del tanque y se ubica debajo de los vertederos



Figura 40"Ubicación de la fuente de carbono en el modelo".

5.7 Proceso de recolección de datos

Para el desarrollo de este estudio se recolectaron 2 tipos de datos, datos de parámetros hidráulicos y datos de parámetros biológicos para conocer el crecimiento de las biopelículas.

5.7.1 Recolección de datos hidráulicos

Los datos que se miden para determinar el comportamiento hidráulico del modelo son diferencias de presión en los piezómetros y niveles en los vertederos. En el siguiente diagrama de flujo se explicará el procedimiento que se siguió para tomar estos datos.

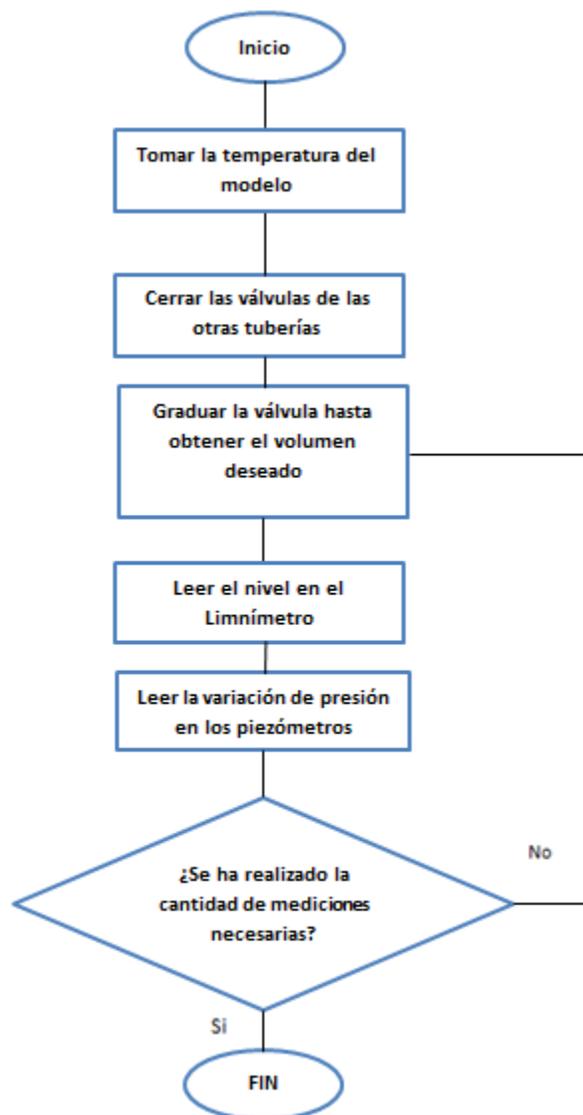


Diagrama de Flujo 1 “Recolección de datos hidráulicos”.

El formato utilizado para la recolección de estos datos se presenta a continuación:

Formato toma de datos													
	P1 (m)			P2(m)			P3(m)			P4(m)			
T (°C)	A. Arriba	A. Abajo	$\Delta h1$	A. Arriba	A. Abajo	$\Delta h2$	A. Arriba	A. Abajo	$\Delta h3$	A. Arriba	A. Abajo	$\Delta h4$ (m)	h(cm)

Figura 41 "Formato toma de datos".

5.7.2 Recolección de datos biológicos

Los parámetros biológicos que se cuantifican en este documento para investigar el comportamiento de las biopelículas formadas en las tuberías son el espesor de la biocapa cuantificando el espesor de los testigos y cantidad de microorganismos presentes en la superficie de las tuberías.

5.7.2.1 Muestras microbiológicas

El procedimiento que se debe desarrollar para raspar las tuberías y tomar las muestras microbiológicas se presente en el siguiente diagrama de flujo:

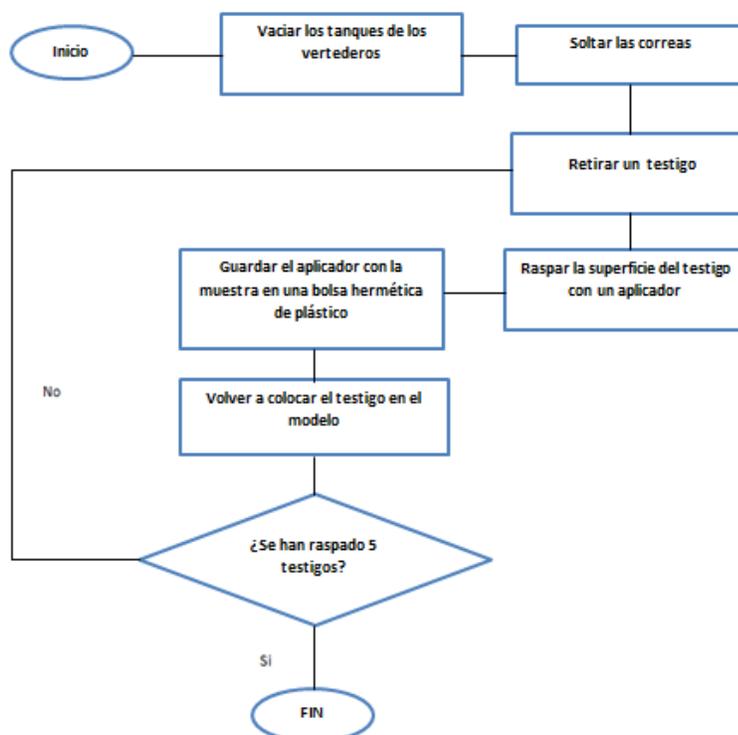


Diagrama de Flujo 2 "toma de muestras microbiológicas".

5.7.2.2 *Peso de testigos*

El procedimiento para pesar los testigos se describe en el siguiente diagrama de flujo:

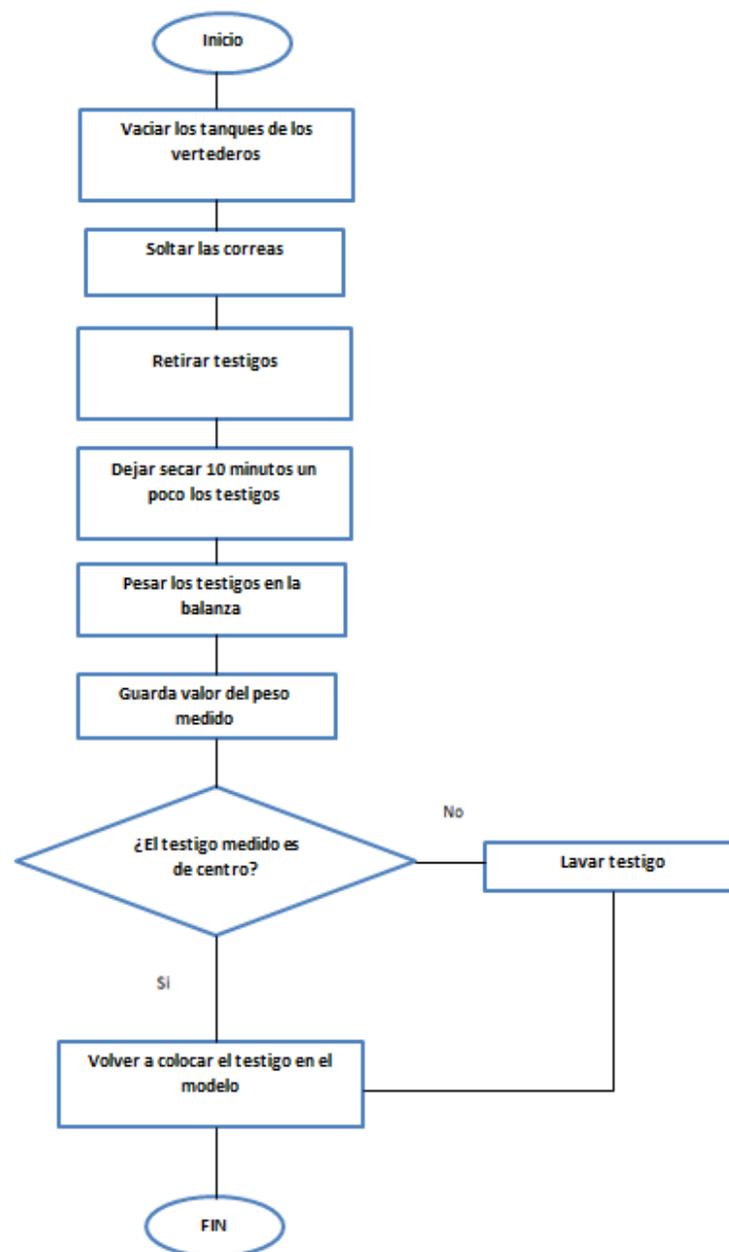


Diagrama de Flujo 3 "Procedimiento de peso de testigos".

5.8 Cálculos y manipulación de datos

En esta sección se explicarán los procedimientos desarrollados para realizar los cálculos a partir de los datos obtenidos en el modelo.

5.8.1 Cálculos Hidráulicos

El principal efecto hidráulico que se busca estudiar a partir de la presencia de biopelículas en las tuberías de distribución de agua potable son los cambios producidos en la rugosidad del material y el factor de fricción. Para analizar estos efectos se hace un análisis del diagrama de Moody siguiendo el procedimiento del Diagrama de Flujo 4

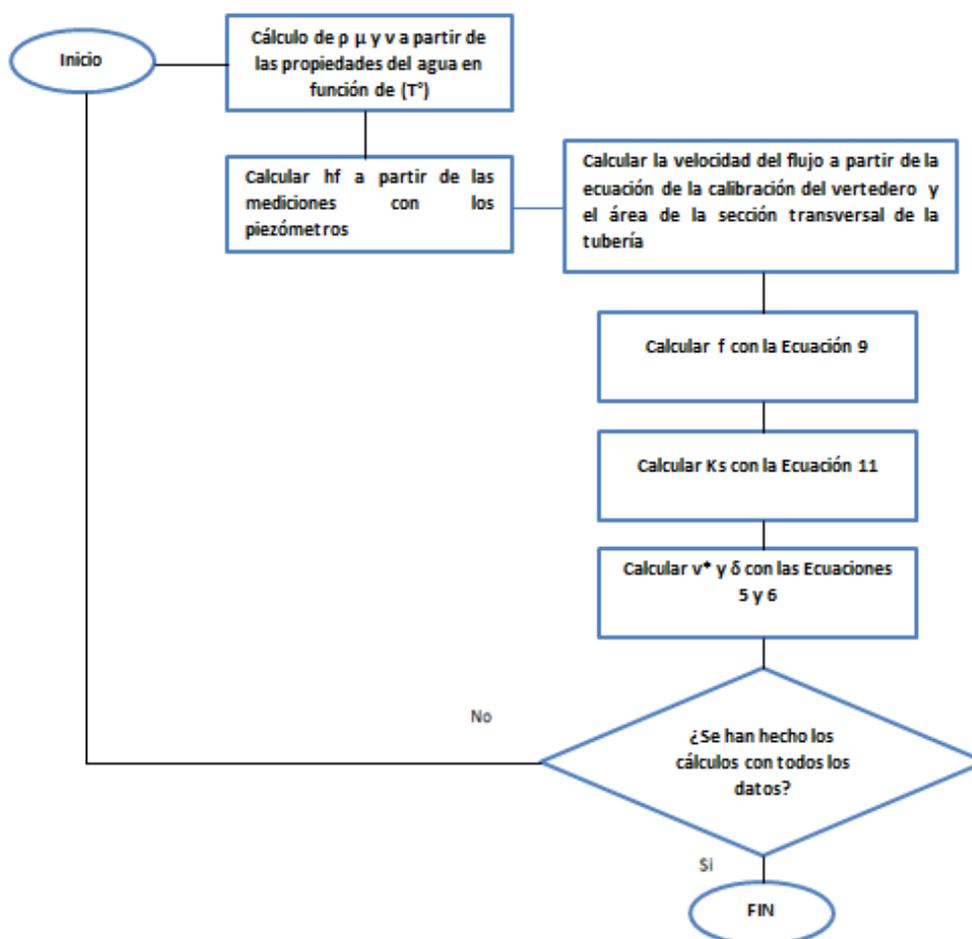


Diagrama de Flujo 4 "Cálculos hidráulicos".



5.8.2 Análisis Microbiológicos

Las muestras obtenidas al raspar los testigos para determinar la cantidad de microorganismos presentes en la superficie, fueron analizadas en los laboratorios de Ingeniería Ambiental por parte de Carolina Piamonte y Juliana Martinez y sus resultados serán presentados más adelante en este documento.

Por otro lado el procedimiento que se debe seguir para estimar el espesor de las biopelículas, es un procedimiento que prácticamente ha sido estandarizado por parte de los investigadores de la Universidad de los Andes que previamente se han dedicado a trabajar sobre este tema. El proceso básicamente consiste en determinar el espesor de la capa biológica y la velocidad de desarrollo de la biopelícula por medio de las ecuaciones que se presentarán en la Tabla 15

Testigos de Centro	
Espesor promedio (\bar{E}) $[\mu\text{m}]$	$\bar{E} = \frac{\text{Espesor}_{i+1} + \text{Espesor}_{i+2}}{2}$ $\text{Biomasa}_{i+1} = \left(\frac{\text{Peso}_{i+1} - \text{Peso}_0}{\rho \cdot A} \right) \cdot 10^9$ $\text{Biomasa}_{i+2} = \left(\frac{\text{Peso}_{i+2} - \text{Peso}_0}{\rho \cdot A} \right) \cdot 10^9$
Testigos de borde	
Velocidad inicial (Vel_0) $[\mu\text{m}/\text{día}]$	$\text{Vel}_0 = \frac{\text{Espesor}_0}{\text{N}^\circ \text{ de días}}$
Velocidad de desarrollo (Vel) $[\mu\text{m}/\text{día}]$	$\text{Vel} = \frac{(E_{j+1} - E_j)}{\Delta \text{ días}}$
Espesor Máximo ($E_{\text{máx}}$) $[\mu\text{m}]$	$E_{\text{máx}} = \frac{\text{Peso}_{\text{final}} - \text{Peso}_0}{\rho \cdot A}$

Tabla 15 " Ecuaciones para estimar el espesor y las velocidades de desarrollo de las biopelículas" (Hernández, 2010).

Dónde:

Espesor_{i+1} : corresponde al espesor del testigo impar.

Espesor_{i+2} : corresponde al testigo par o vecino.

$A [m^2]$: es el área de la testigo, obtenida al multiplicar el largo por el ancho del mismo.

$\text{Peso}_0 [g]$: es el peso del testigo inicial, es decir sin el crecimiento de biopelícula

$\text{Peso}_{\text{final}} [g]$: corresponde a la última medición del peso realizada en el proceso de toma de datos del proyecto.



Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



E_j : es el espesor de la biopelícula según los datos encontrados en la última medición

E_{j+1} : es el espesor de la biopelícula encontrado en la medición actual.

Δ días: es la diferencia de días entre $j+1$ y j que se recomienda sea 7.



6. Resultados y discusión

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos del presente proyecto de investigación después de realizar el procedimiento experimental expuesto en la sección anterior.

6.1 Resultados Hidráulicos

De acuerdo con los estudios realizados previamente por la Universidad de los Andes, de los cuales se ha hablado con anterioridad en el presente documento, el parámetro hidráulico que generalmente se ve más afectado por la presencia de películas biológicas es la rugosidad absoluta " k_s ". Por lo tanto el análisis desarrollado en el presente proyecto también se encuentra enfocado en el comportamiento de esta variable.

El método de análisis que mejor permite entender el comportamiento de la rugosidad en cada una de las tuberías es un análisis gráfico basado en el diagrama de Moody. Este análisis se desarrolló a partir de los datos tomados durante todo el primer semestre del año 2014, y utilizando las propiedades del agua con respecto a la temperatura junto con las ecuaciones físicamente basadas de Colebrook-White y Darcy.

Para entender los resultados que serán presentados a continuación es importante aclarar que el proceso constructivo finalizó la primera semana de Abril del año 2014 y que el modelo se puso en funcionamiento a partir del 7 de Abril del mismo año. El modelo recirculó agua de lunes a viernes entre las 7:00 am y las 5:00 pm hasta el 6 de Junio del 2014. Lo cual indica un total de 47 días de recirculación excluyendo la Semana Santa y los fines de semana; que fueron períodos en los cuales las tuberías se encontraron llenas pero con el flujo estático.

Los datos medidos en el montaje se fueron tomados desde el día 17 de funcionamiento del modelo hasta el día 47. Se tomaron 657 datos entre las 3 tuberías estudiadas; sin embargo errores en la medición a causa de problemas relacionados con el funcionamiento de los piezómetros en las tuberías de Polietileno y Hierro Galvanizado, además de varios datos cuyo resultados se encuentran por fuera cualquier sentido lógico hicieron que el análisis que se presenta a continuación haya sido realizado únicamente con 409 datos entre las 3 tuberías.

A continuación se presentan los resultados de este análisis hidráulico para cada una de las tuberías que conforman el modelo físico.

6.1.1 Tubería de PVC

La tubería de PVC utilizada en el modelo es la única tubería completamente nueva que se utilizó para este estudio, dado que esta tubería se encontraba guardada en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes. La máxima velocidad que se logró determinar para esta tubería durante las pruebas fue de 2.88 m/s. La mayoría de las mediciones realizadas se encontraron en rangos entre este valor y 2 m/s con el fin de ser acordes con el objetivo de este proyecto.

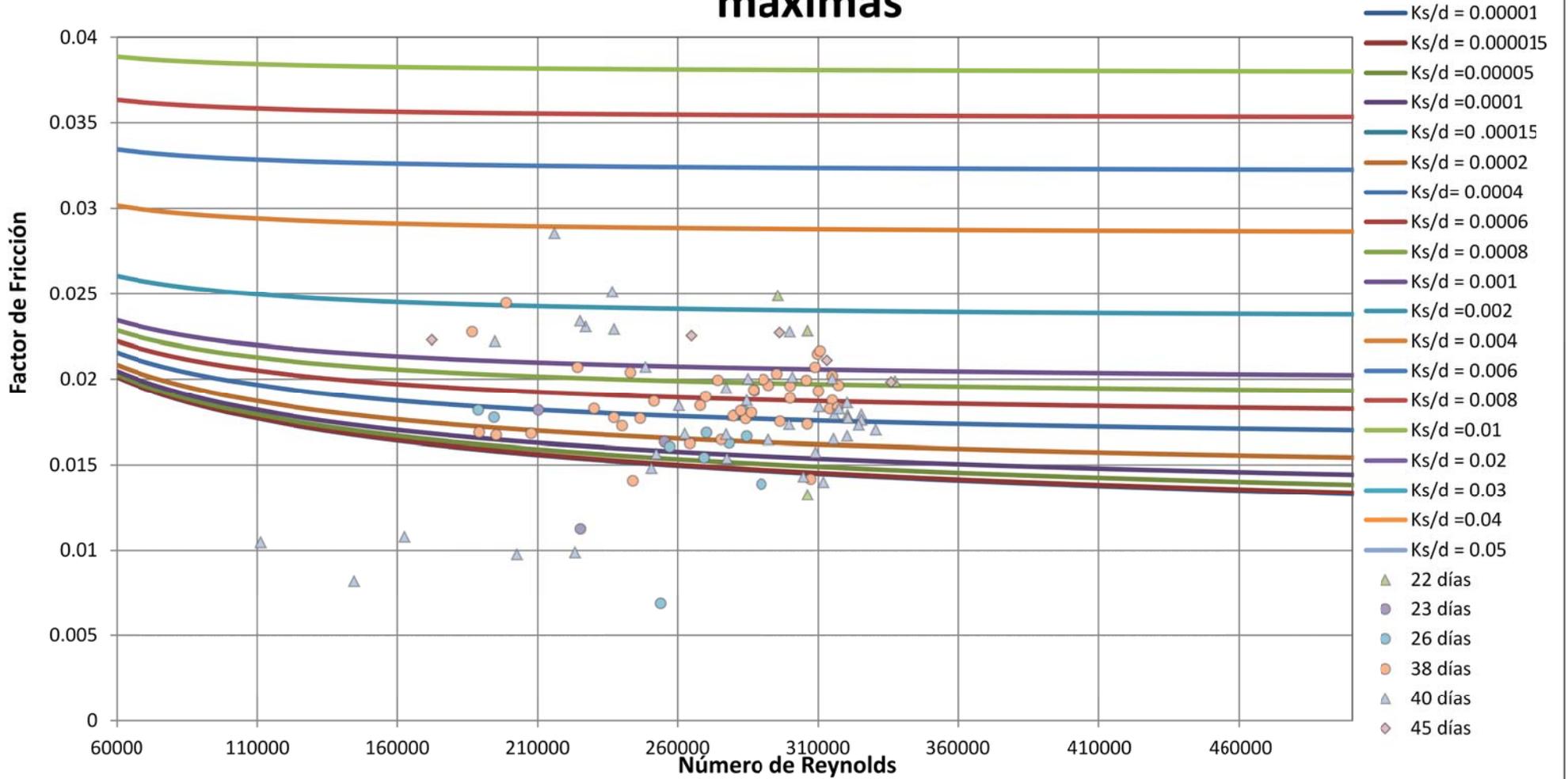
Los datos que fueron descartados, tenían rugosidades negativas o factores de fricción muy altos a causa de una relación incoherente entre la diferencia de altura encontrada en los piezómetros y la velocidad con la cual se desplazaba el flujo a través de la tubería. En la mayoría de las tuberías se presentó este problema el cual fue solucionado, purgando y acomodando los piezómetros.

En las Gráficas 6 y 7 se puede apreciar el diagrama de Moody y el diagrama de rugosidad absoluta para la tubería de PVC. Las rugosidades absolutas promedio obtenidas en cada una de las mediciones para esta tubería se presentan en la siguiente tabla

Tubería de PVC	
Días Transcurridos	Rugosidad Absoluta k_s (mm)
Valor Teórico	0.0015
19	0.017
22	0.108
23	0.009
26	0.025
38	0.065
40	0.032
45	0.134

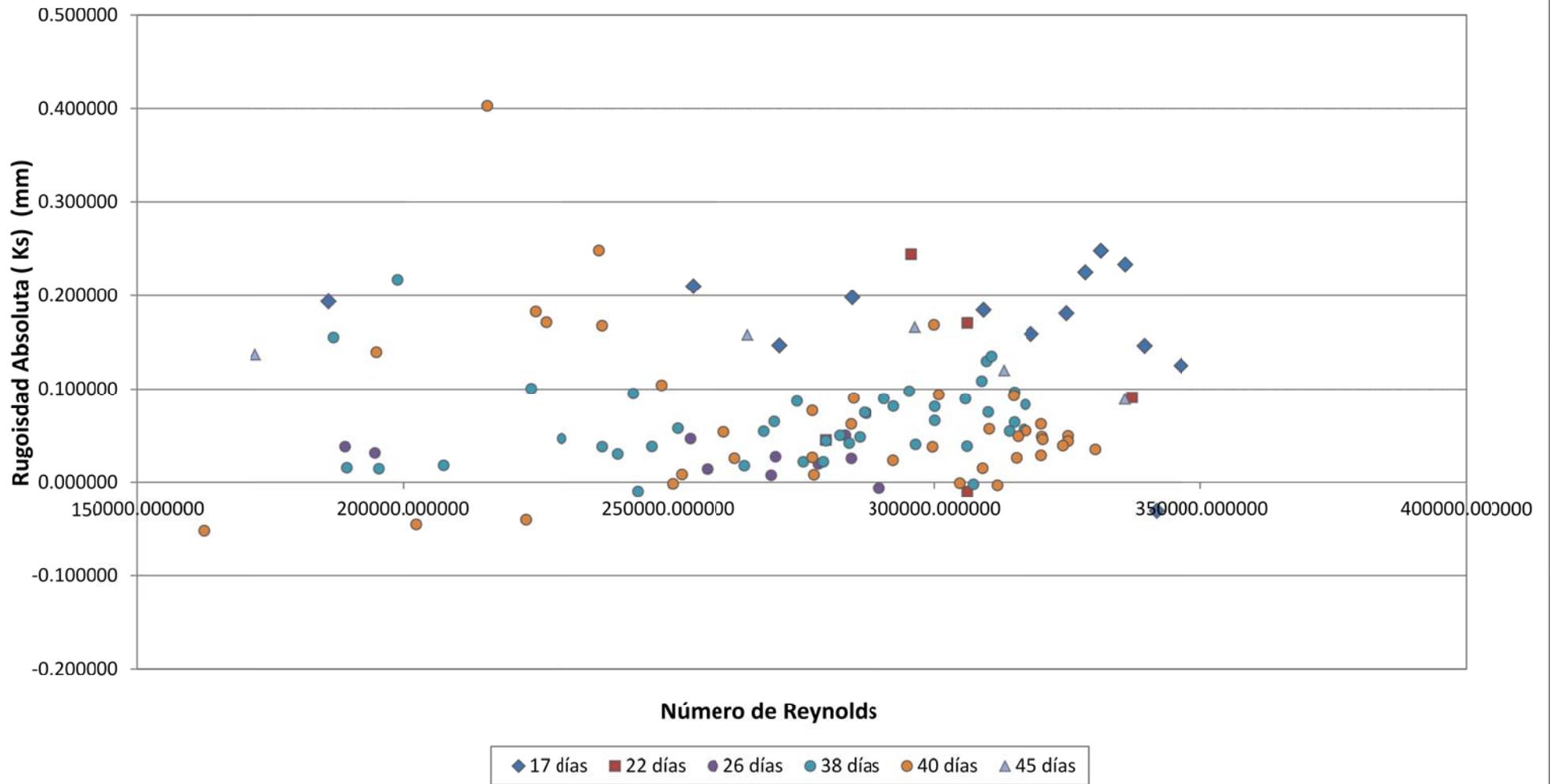
Tabla 16 "Rugosidades promedio tubería PVC".

Diagrama de Moody Tubería de PVC a velocidades máximas



Gráfica 6"Diagrama de Moody datos obtenidos PVC".

Rugosidad Absoluta Tubería PVC



Gráfica 7" Efecto de la biopelícula sobre la rugosidad absoluta del PVC".

De acuerdo a los resultados presentados en la Tabla 16 y en las Gráficas 6 y 7, se puede apreciar como la rugosidad absoluta se ve afectada seriamente por la presencia de la capa biológica que se desarrolló en la superficie de las tuberías, pues los valores promedio en todas las mediciones que fueron tomadas después del día 19 de funcionamiento del modelo, son muy diferentes al valor teórico del k_s del PVC. Del mismo modo la Gráfica 6 presenta un rango de variación de la rugosidad absoluta en la tubería bastante amplio de casi 0.2 mm para la mayoría de las mediciones. Por otro lado el diagrama de Moody muestra factores de fricción un poco altos para los valores estándar para el PVC.

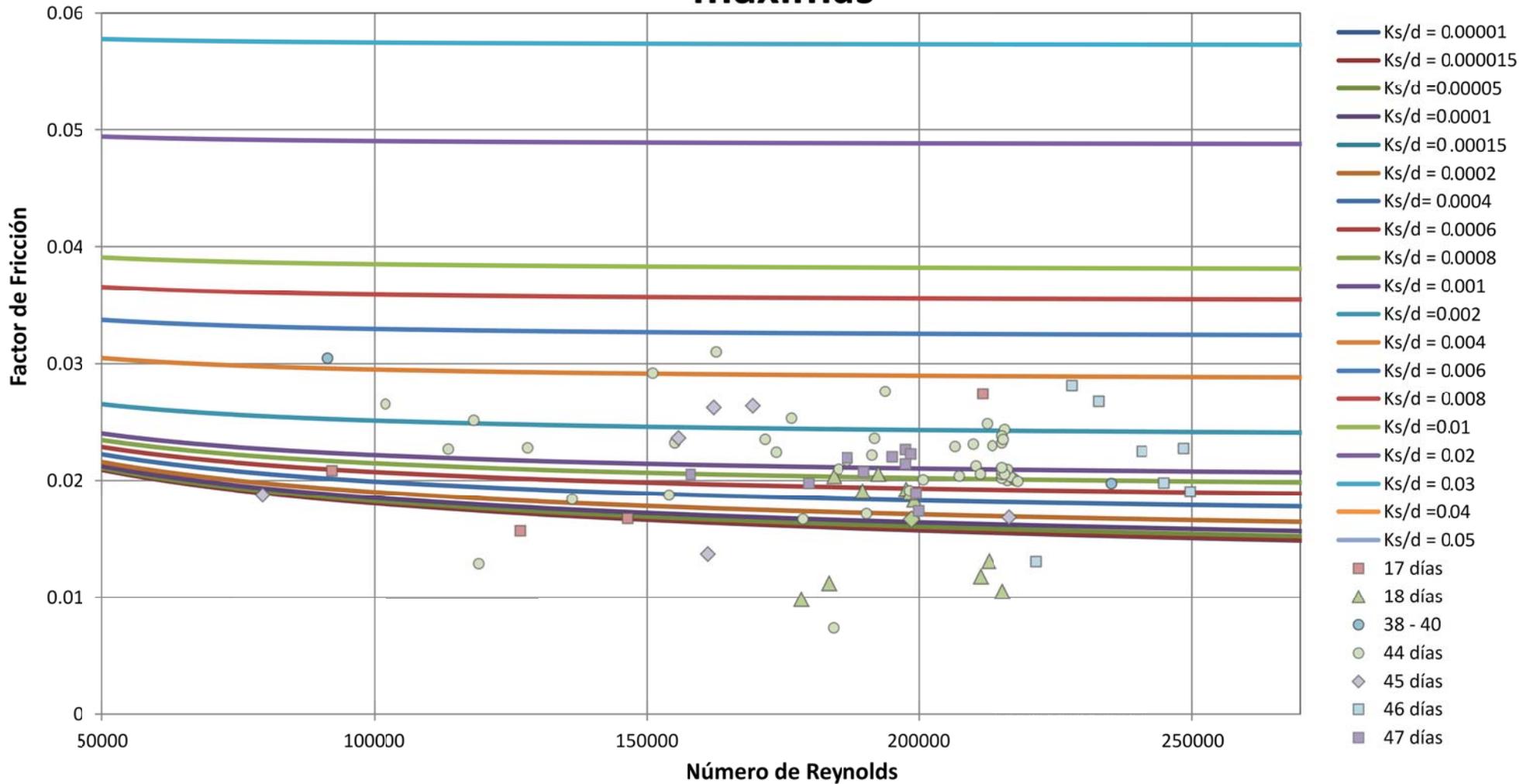
6.1.2 Tubería de Polietileno

La tubería de polietileno utilizada para este estudio había sido utilizada por (Navarrete, 2012) y (Díaz, 2014) en sus proyectos de grado. La máxima velocidad que se midió en esta tubería tuvo una magnitud de 2.44 m/s y al igual que con las mediciones realizadas con la tubería de PVC se intentó manipular la válvula de tal manera que se logaran velocidades cercanas a este valor. Esta tubería se caracterizó por su tendencia a flectarse, razón por la cual se debió colocar algunos soportes en el montaje para controlar este comportamiento. Durante el desarrollo del proyecto hubo dificultades para realizar las mediciones, pues los piezómetros no marcaban adecuadamente las pérdidas de altura. Sin embargo este problema pudo solucionarse reacomodando los piezómetros. A causa de este inconveniente muchas de las mediciones realizadas fueron descartadas pues el error al medir las presiones producía rugosidades negativas al despejar k_s con la Ecuación 11. Los resultados obtenidos por medio del análisis del diagrama de Moody y el diagrama de rugosidad absoluta se presentan a continuación:

Tubería de Polietileno	
Días Transcurridos	Rugosidad Absoluta K_s (mm)
Valor Teórico	0.007
17	0.086
18	0.016
23	0.012
38-40	0.247
44	0.125
45	0.110
46	0.146
47	0.090

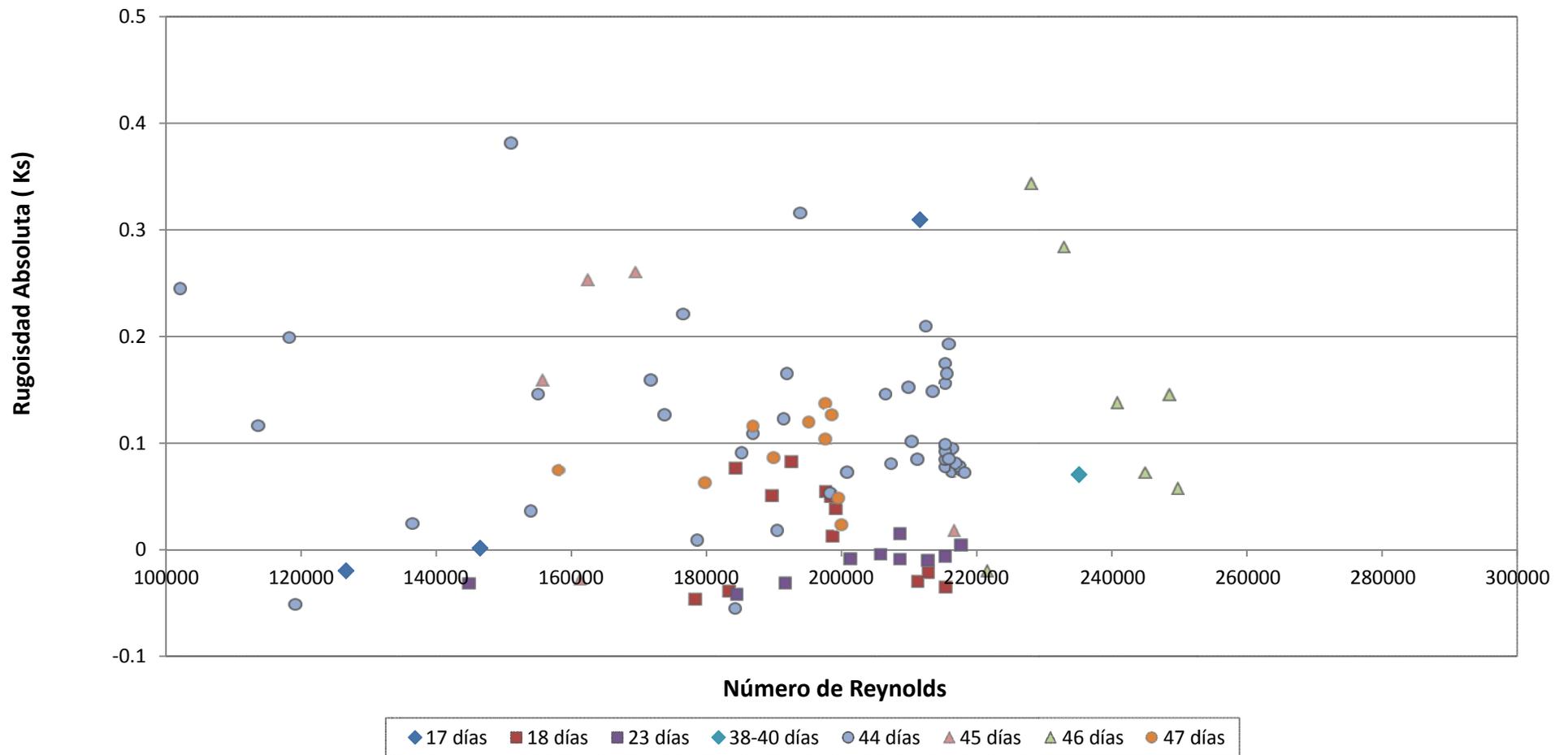
Tabla 17"Rugosidades promedio Polietileno.

Diagrama de Moody Tubería de Polietileno a velocidades máximas



Gráfica 8 "Diagrama de Moody datos obtenidos Polietileno".

Rugosidad Absoluta Tubería Polietileno



Gráfica 9 "Efecto de la biopelícula sobre la rugosidad absoluta del Polietileno".



Universidad de
los Andes

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



Al igual que en el caso del PVC, en la tubería de Polietileno se tiene que la rugosidad absoluta promedio medida experimentalmente no presenta ninguna relación clara con los valores teóricos de una tubería de este material. Esto puede deberse al efecto de las biopelículas. Del mismo modo cabe recordar que esta tubería se reutilizó de 2 montajes anteriores y aunque se limpió antes de iniciar el procedimiento experimental de este estudio, es probable que rastros de películas biológicas o quistes hayan quedado en su interior, por lo tanto el efecto de la biopelícula puede ser un poco más marcado en esta tubería lo cual se evidencia en la Tabla 17 donde ningún valor medido se encuentra cerca al valor de la rugosidad teórica del material.

Los resultados obtenidos en el diagrama de Moody de esta tubería presentan una variación menor que en el mismo diagrama de la tubería de PVC; sin embargo en el diagrama de Moody de la tubería de Polietileno se puede ver una tendencia más clara de los datos con un valor de fricción que varía entre 0.02 y 0.025, lo cual es un poco alto para este material.

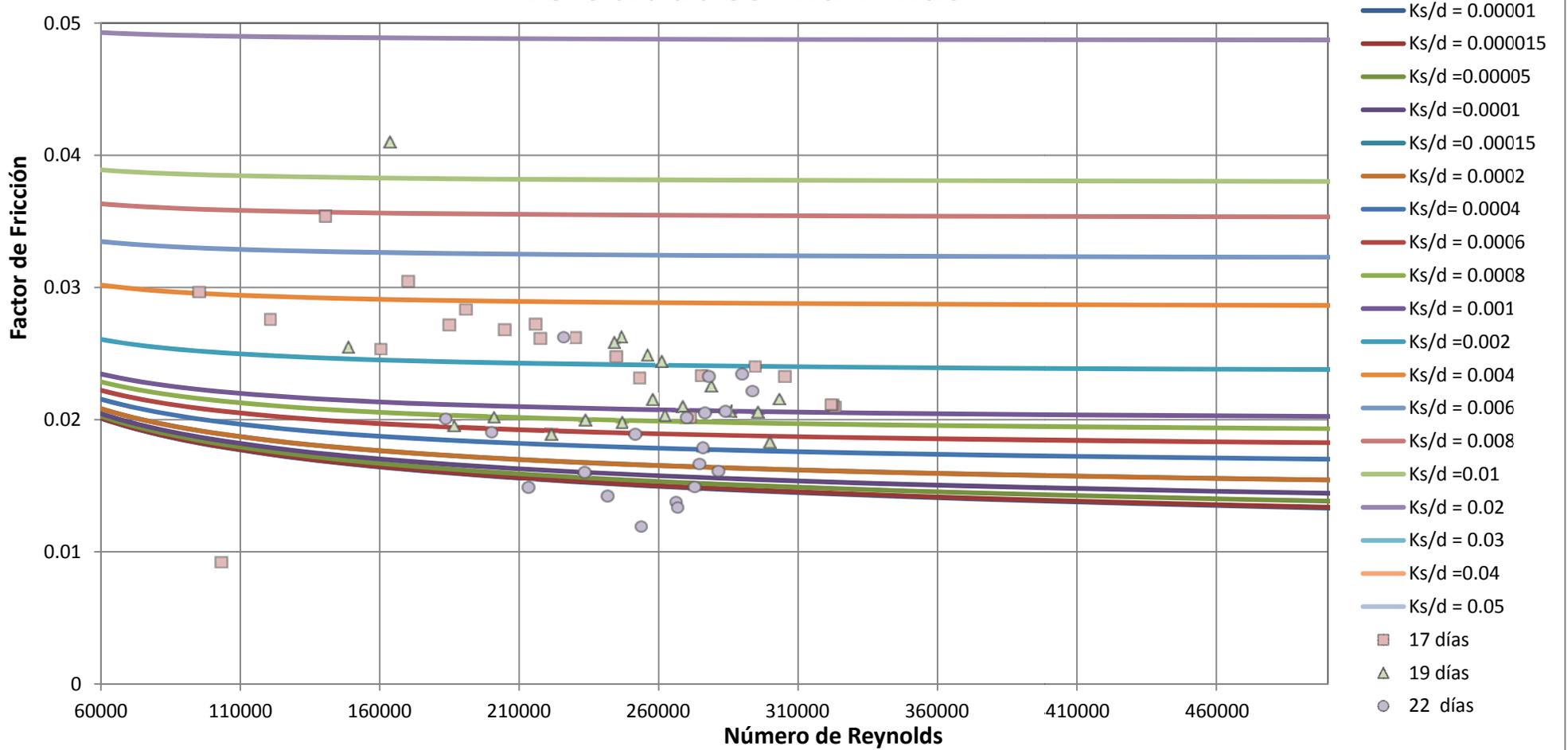
6.1.3 Tubería de Hierro Galvanizado

Al igual que la tubería de Polietileno, la tubería de Hierro Galvanizada ya había sido utilizada en proyectos desarrollados en la Universidad de los Andes. La máxima velocidad que se logró en esta tubería sin que se rebosaran los tanques de los vertederos fue de 2.94 m/s, que a su vez fue la mayor velocidad que se determinó en todo el estudio.

Los resultados obtenidos durante la fase experimental del proyecto con respecto a esta tubería fueron mucho menos acertados con respecto al comportamiento lógico según el análisis del diagrama de Moody, que los de las otras dos tuberías. En primer lugar de acuerdo con las altas velocidades que se podían manejar en esta tubería se esperaba que generara la mayor cantidad de pérdidas, pues el flujo iba a producir mayores esfuerzos cortantes en la superficie de la tubería, que a su vez era la más rugosa de los 3 tipos de superficies analizadas en el presente estudio. Sin embargo después de las primeras mediciones la rugosidad calculada empezó a disminuir hasta tal punto que en las últimas mediciones los resultados mostraron una tubería con rugosidades negativas, incluso para las máximas velocidades.

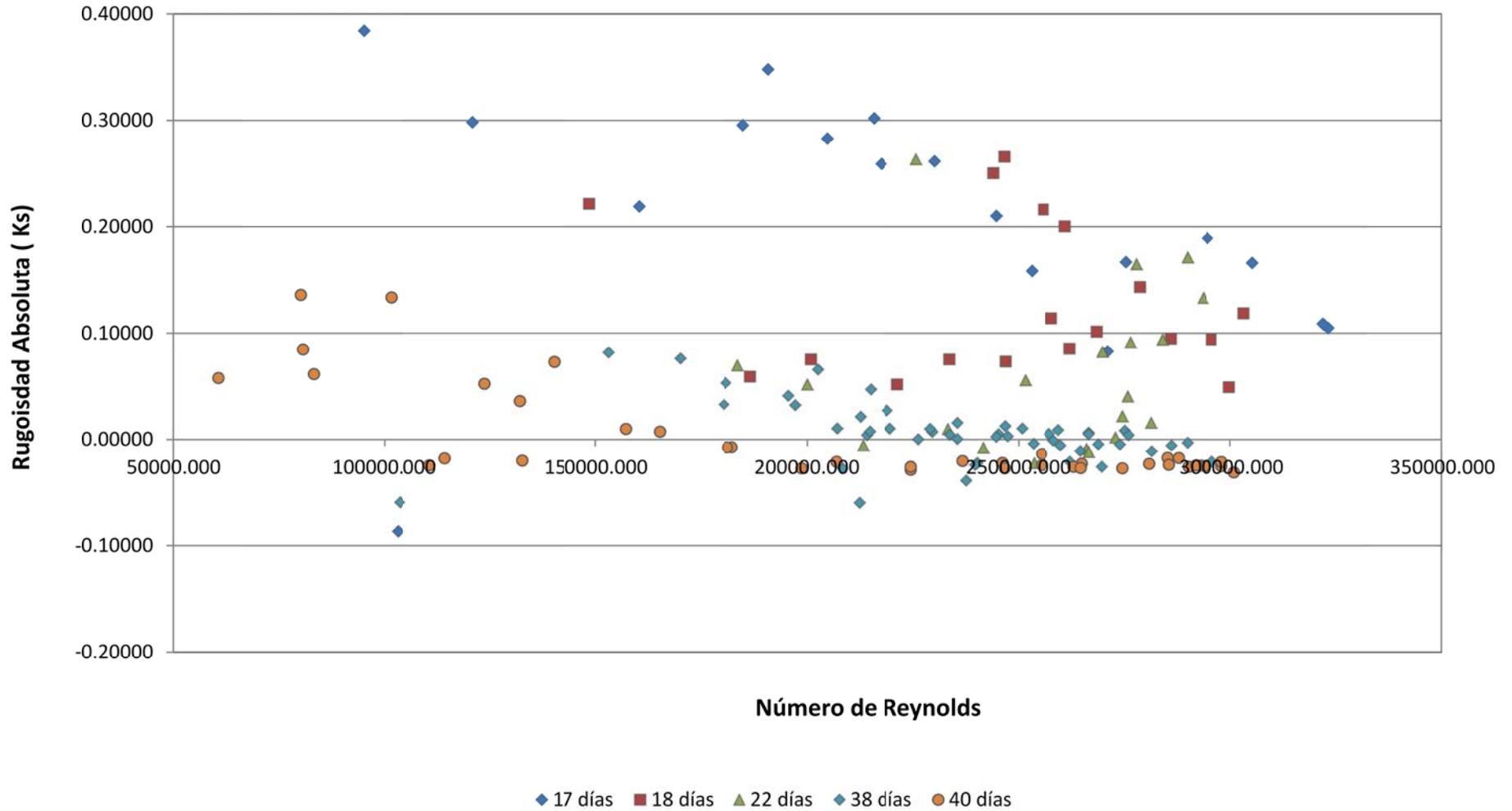
A continuación se presentan los resultados del análisis utilizando el diagrama de Moody y el diagrama de rugosidad absoluta.

Diagrama de Moody Tubería de Hierro Galvanizado a velocidades máximas



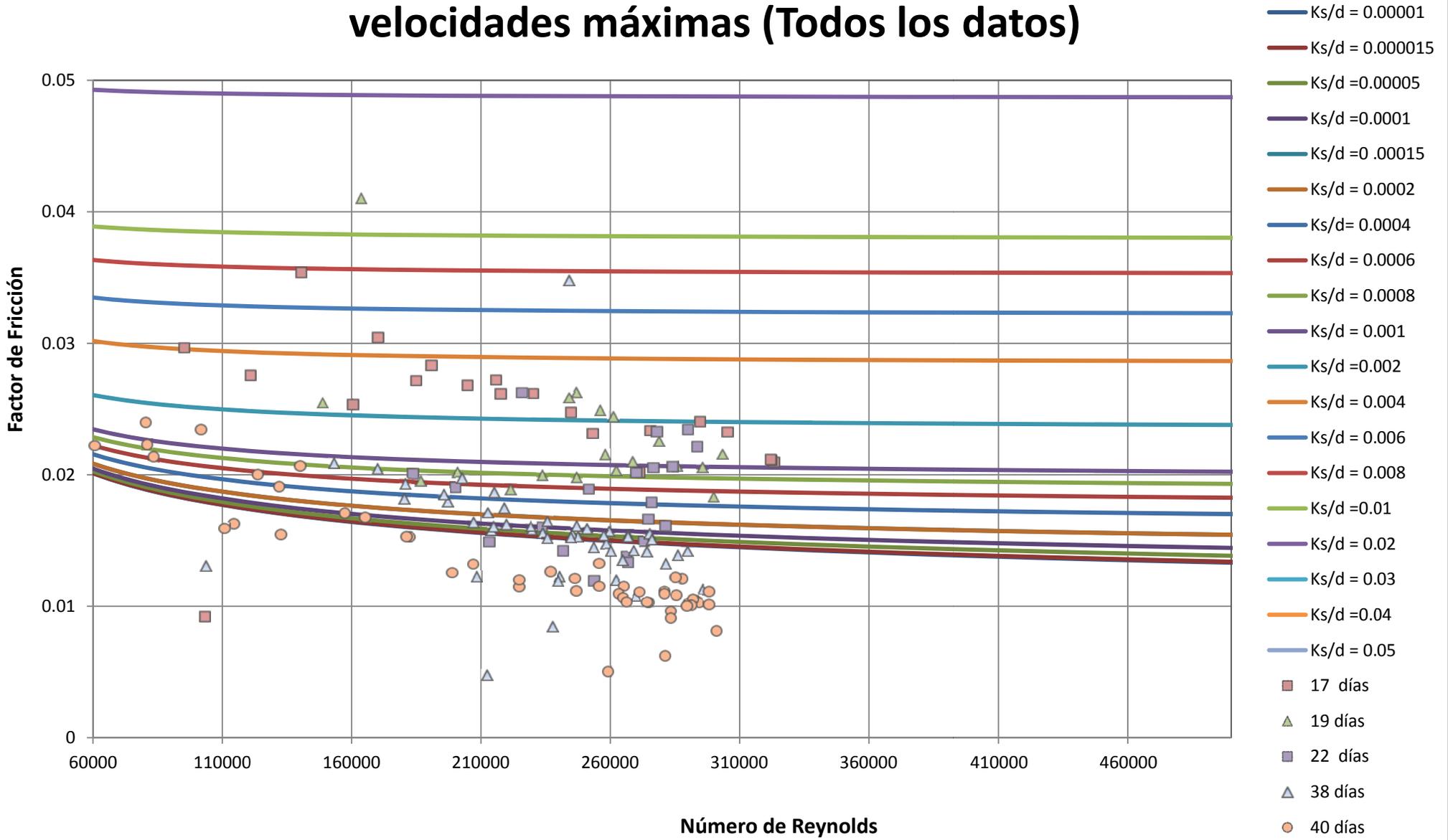
Gráfica 10" Diagrama de Moody datos obtenidos Hierro Galvanizado".

Rugosidad Absoluta Tubería Hierro Galvanizado



Gráfica 11" Efecto de la Biopelícula sobre la rugosidad absoluta del Hierro Galvanizado".

Diagrama de Moody Tubería de Hierro Galvanizado a velocidades máximas (Todos los datos)



Gráfica 12" Diagrama de Moody todos los datos obtenidos Hierro Galvanizado".

En la Gráfica 10 se puede ver el diagrama de Moody para las primeras mediciones realizadas en la tubería de Hierro. En el diagrama se puede apreciar claramente como como en las primeras mediciones el factor de fricción se encontraba entre 0.02 y 0.03, valores que son bastante acordes con lo que se espera de una tubería rugosa con pérdidas considerables. Sin embargo a medida que fue transcurriendo el tiempo se puede ver como cada vez se fueron encontrando valores del factor de fricción más pequeños.

En la Gráfica 12 se muestra el mismo diagrama de Moody que en la Figura 10, solo que en este caso se muestran los resultados obtenidos en todas las mediciones realizadas en la tubería. En este diagrama con todos los datos se puede ver como el factor de fricción fue decreciendo para el mismo rango del número de Reynolds a medida que fue pasando el tiempo. Este comportamiento también se puede identificar claramente en la rugosidad de la tubería, pues de acuerdo con los resultados del análisis de la rugosidad absoluta se puede ver como los valores de k_s se van haciendo más pequeños con cada medición ,hasta el punto en el cual la mayoría de los datos presentan rugosidades negativas.

Este fenómeno no está relacionado con la presencia de las biopelículas, pues según los estudios realizados previamente en la Universidad de los Andes, el efecto de las biopelículas en las tuberías es presión es el de aumentar la rugosidad absoluta de la tubería y no disminuirla (Trujillo, 2011).

Con el fin de solucionar este problema se realizó el mismo procedimiento de purgar y verificar la instalación de los piezómetros que se realizó para mejorar los resultados de la tubería de Polietileno. Sin embargo después de realizar este procedimiento los resultados no variaron, porque la diferencia de presiones que continuaron marcando los piezómetros era muy pequeña, para los caudales más altos que se podían medir.

La única explicación para este problema diferente a un error en las mediciones o en el modelo que no fue detectado, es que la válvula reguladora de caudales de la tubería de Hierro Galvanizado es la única que está conectada directamente al tanque de almacenamiento cilíndrico por una tubería independiente a la de las demás válvulas como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 42 "Válvula tubería de Hierro Galvanizado"

Por lo tanto como se puede ver en la Figura 42 el hecho de que la tubería de Hierro reciba caudales directamente del tanque de almacenamiento sin que el flujo sea repartido en más tuberías permite que se manejen mayores caudales por esta tubería; sin embargo esta válvula nunca pudo ser llevada al límite pues al manejar un mayor caudal se tendía a rebosar el tanque del vertedero. Por lo tanto es probable que las velocidades con la cual se realizaron las mediciones no fuera lo suficientemente altas para generar pérdidas por fricción significativas.

Sin embargo esto no explica el hecho de que las primeras mediciones hayan arrojado resultados coherentes. En términos generales se no se puede establecer que los resultados obtenidos en esta tubería sean lo suficientemente claros como para llegar a alguna conclusión válida.

A continuación se muestra los resultados de la rugosidad absoluta obtenida para las 3 primeras mediciones realizadas en la tubería de hierro, pues estos fueron los resultados en los cuales no se encontraron rugosidades negativas

Tubería de Polietileno	
Días Transcurridos	Rugosidad Absoluta k_s (mm)
Valor Teórico	0.15
17	0.25
18	0.18
22	0.41

Tabla 18"Rugosidad promedio Hierro Galvanizado".

6.2 Resultados Biológicos

Los resultados de las pruebas biológicas se, se dividen en el análisis de los testigos que permite determinar el espesor de la capa biológica y su velocidad de desarrollo, y el análisis microbiológico que permite confirmar la presencia de microorganismos en las tuberías.

6.2.1 Resultados de análisis de testigos

El análisis de los testigos comenzó a realizarse 35 días después de que empezó a funcionar el modelo, pues se estimó que la biopelícula tendría un espesor cuantificable después de haberse formado durante un mes. A continuación se presentarán los resultados obtenidos a partir del análisis de los testigos de borde y cabeza para cada una de las tuberías

6.2.1.1 Testigos de PVC

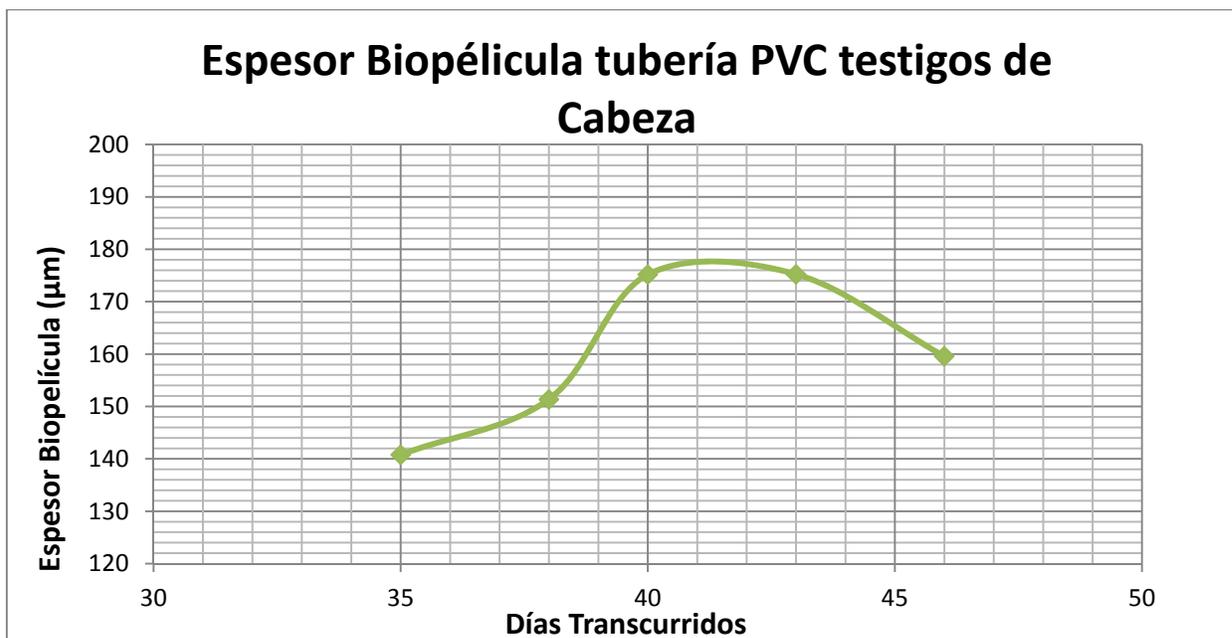
Los testigos de PVC fueron los únicos testigos nuevos que se diseñaron para este modelo. Es importante recalcar que todos los testigos de centro del montaje fueron retirados 2 veces y cada vez que fueron retirados, se limpiaron antes de ser colocados de nuevo en la tubería, mientras que los testigos de cabeza nunca fueron limpiados; por lo tanto en los testigos de cabeza se pudo determinar el crecimiento constante de la película biológica. A continuación se presentara los resultados de los espesores medidos en los testigos de Borde o de cabeza y en los testigos de centro.

Las gráficas que permiten determinar el espesor de los testigos de cabeza de PVC se realizadas a partir de la siguiente tabla.

Cálculos testigos de Cabeza					
Fecha de medición	Días transcurridos	peso biomasa(gr)	espesor (cm)	espesor (mm)	espesor (μm)
22/05/2014	35	0.7289	0.014	0.140	140.790
27/05/2014	38	0.7836	0.015	0.151	151.356
29/05/2014	40	0.9069	0.017	0.175	175.172
03/06/2014	43	0.9072	0.017	0.175	175.230
06/05/2014	46	0.8261	0.015	0.159	159.565

Tabla 19 "Resultados testigos de Cabeza PVC".

A partir de los resultados obtenidos en esta tabla se traza la curva del espesor de la biopelícula en el testigo de cabeza de la tubería de PVC



Gráfica 13 "Espesor de biopelícula testigos de cabeza PVC".

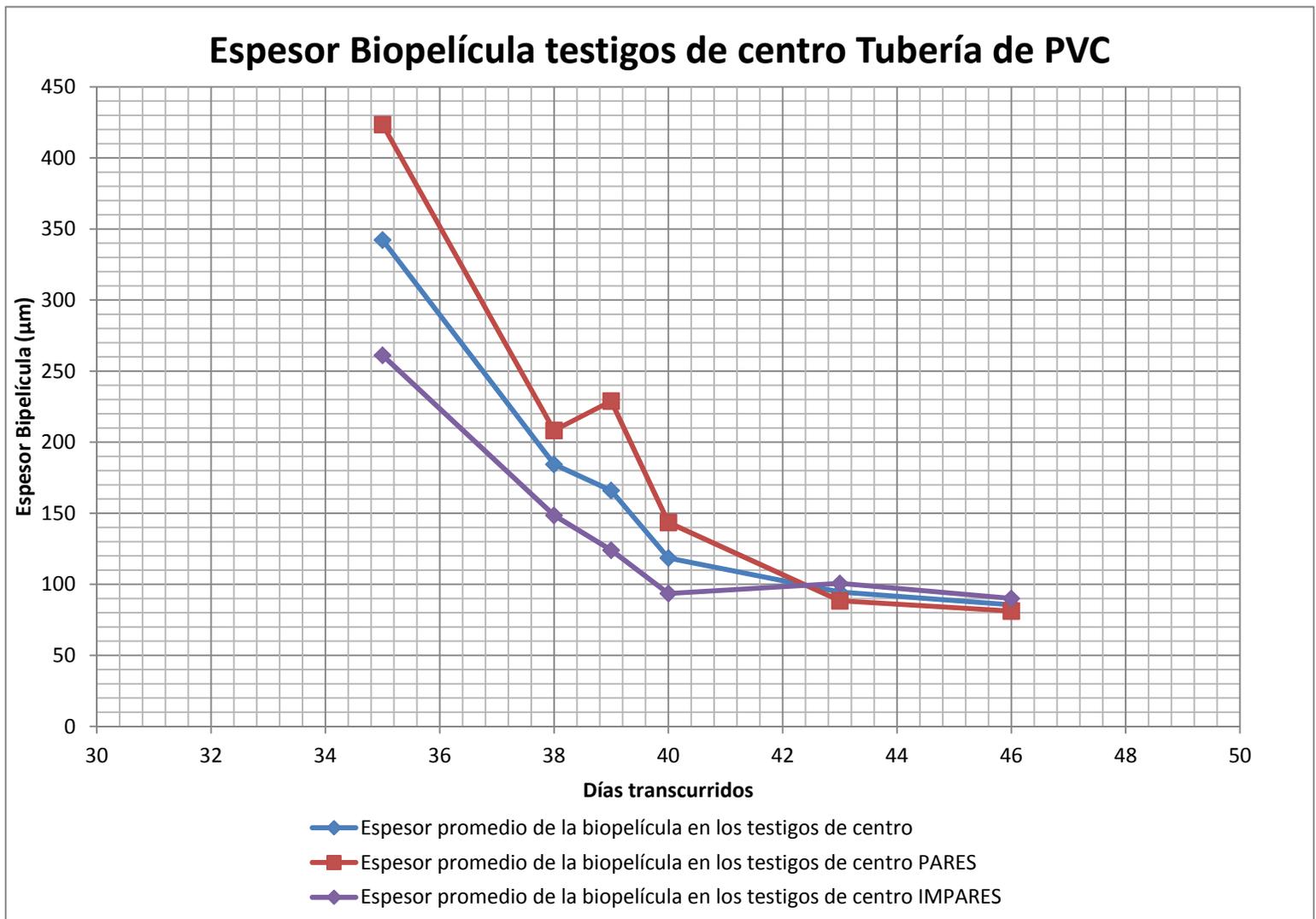
Por cuestiones de tiempo limitado para realizar la recolección de información a partir de los testigos, solo se pudo determinar el comportamiento de las biopelículas en los testigos durante un período de un poco más de 10 días. Como las mediciones se iniciaron después de 35 días de funcionamiento del modelo se supone que la biopelícula ya existía en los testigos cuando se realizaron las mediciones. En la Gráfica 13 se puede ver como el máximo espesor de la biopelícula es de casi 180 μm y que a partir del día 42 ocurrido un evento de desprendimiento que redujo el espesor de la biopelícula.

A partir de los valores de la siguiente tabla se desarrollaron las gráficas del espesor de las biopelículas en los testigos de centro.

Cálculos testigos de Centro				
Fecha de Medición	Días Transcurridos	Promedio Testigos	Promedio testigos pares	Promedio Testigos impares
22/05/2014	35	342.303	423.515	261.091
27/05/2014	38	184.386	208.289	148.5317
28/05/2014	39	165.994	228.928	124.038
29/05/2014	40	118.529	143.499	93.559
03/06/2014	43	94.557	88.432	100.682
06/05/2014	46	85.605	81.174	90.037

Tabla 20 "Resultados cálculos testigos de centro PVC".

La Gráfica 13 muestra como a partir del momento en el cual los testigos fueron retirados por primera vez y lavados su espesor disminuyó considerablemente hasta estabilizarse en un valor cercano a los 100 μm .



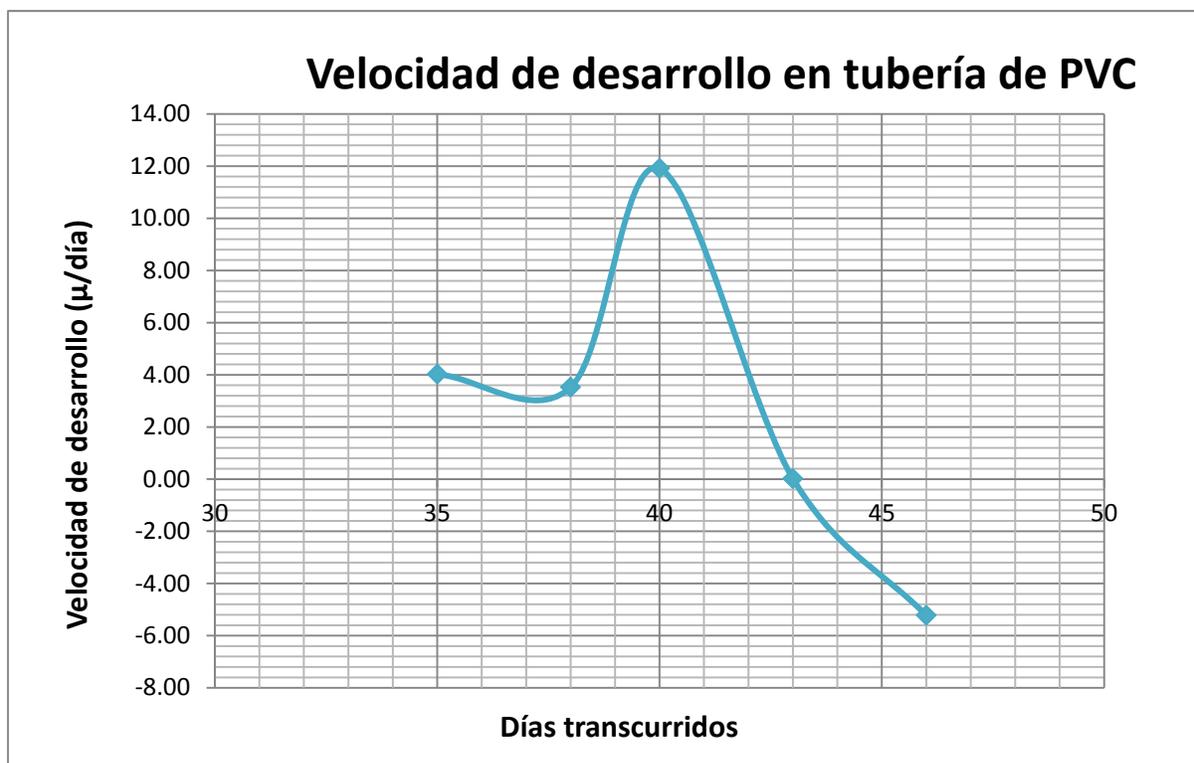
Gráfica 14 "Espesor testigos de centro PVC".

En la Gráfica 14 se puede ver como el espesor de los testigos de centro pares es un poco mayor al del espesor promedio y el de los testigos pares. En los primeros testigos analizados se encontró una biopelícula de un espesor tan considerable porque ya había transcurrido más de un mes desde el momento en el que se prendió el modelo.

A partir de los resultados obtenidos en los testigos de cabeza se puede obtener la velocidad de desarrollo de los testigos de PVC con los datos presentados en la siguiente tabla.

Espesor (μm)	Fecha de medición	Días Transcurridos	Δ espesor	Diferencia de días	Velocidad de desarrollo
0.00	30/03/2014	0	-	-	-
140.79	22/05/2014	35	140.79	35	4.02
151.36	27/05/2014	38	10.57	3	3.52
175.17	29/05/2014	40	23.82	2	11.91
175.23	03/06/2014	43	0.06	3	0.02
159.57	06/05/2014	46	-15.66	3	-5.22

Tabla 21 "Resultados cálculos velocidad de desarrollo biopelícula testigos de PVC" .



Gráfica 15 "velocidad de desarrollo biopelícula tubería de PVC".

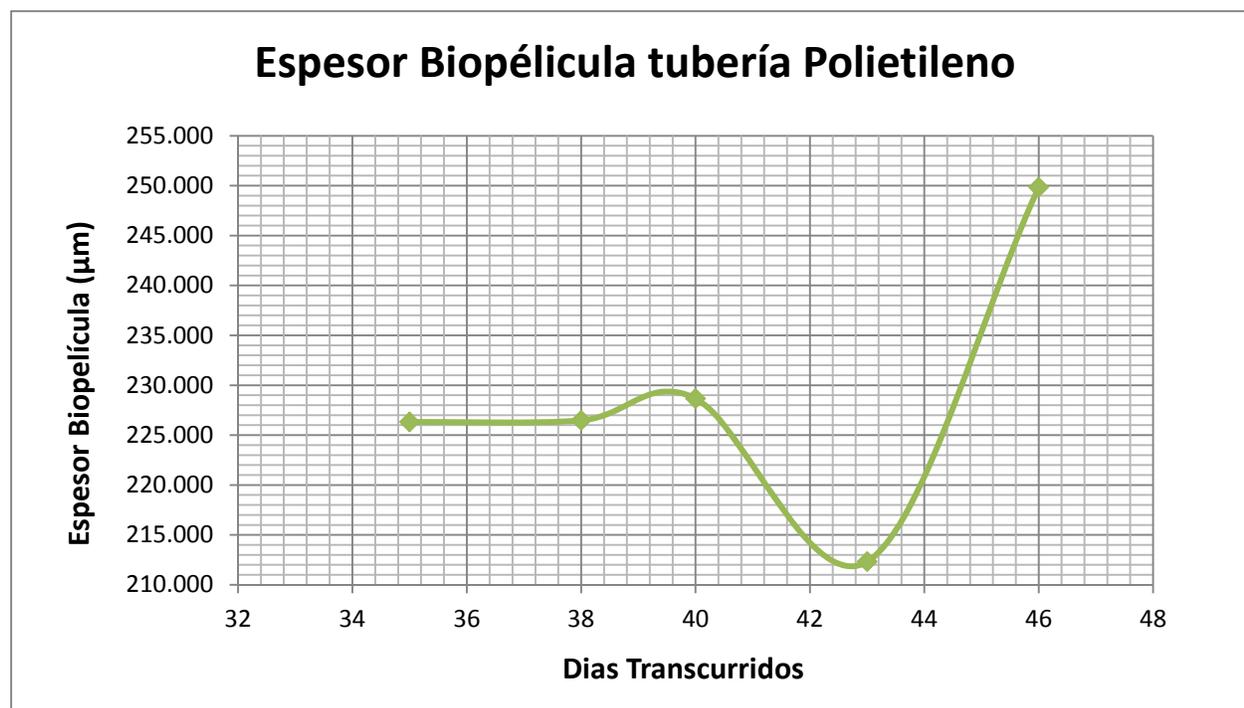
Habría sido conveniente analizar los testigos de PVC durante un mayor período de tiempo para tener más claro el comportamiento de la velocidad de desarrollo de la biopelícula. Lo que se puede concluir de los días analizados es que a partir del día 40 ocurrido un evento en el que el espesor de la biopelícula comenzó a disminuir en un periodo corto de tiempo.

6.2.1.2 Testigos de Polietileno

Los testigos de polietileno habían sido utilizados por (Navarrete, 2012) y (Díaz, 2014) por lo cual fueron limpiados antes de poner a funcionar el modelo nuevo. Los resultados de los testigos de esta tubería se muestran a continuación.

Cálculos testigos de Cabeza					
Fecha de medición	Días transcurridos	peso biomasa (gr)	espesor (cm)	espesor (mm)	espesor (μm)
22/05/2014	35	0.965	0.023	0.226	226.313
27/05/2014	38	0.966	0.023	0.226	226.478
29/05/2014	40	0.975	0.023	0.229	228.659
03/06/2014	43	0.905	0.021	0.212	212.311
06/05/2014	46	1.065	0.025	0.250	249.838

Tabla 22 "Resultados cálculos testigos de cabeza Polietileno".



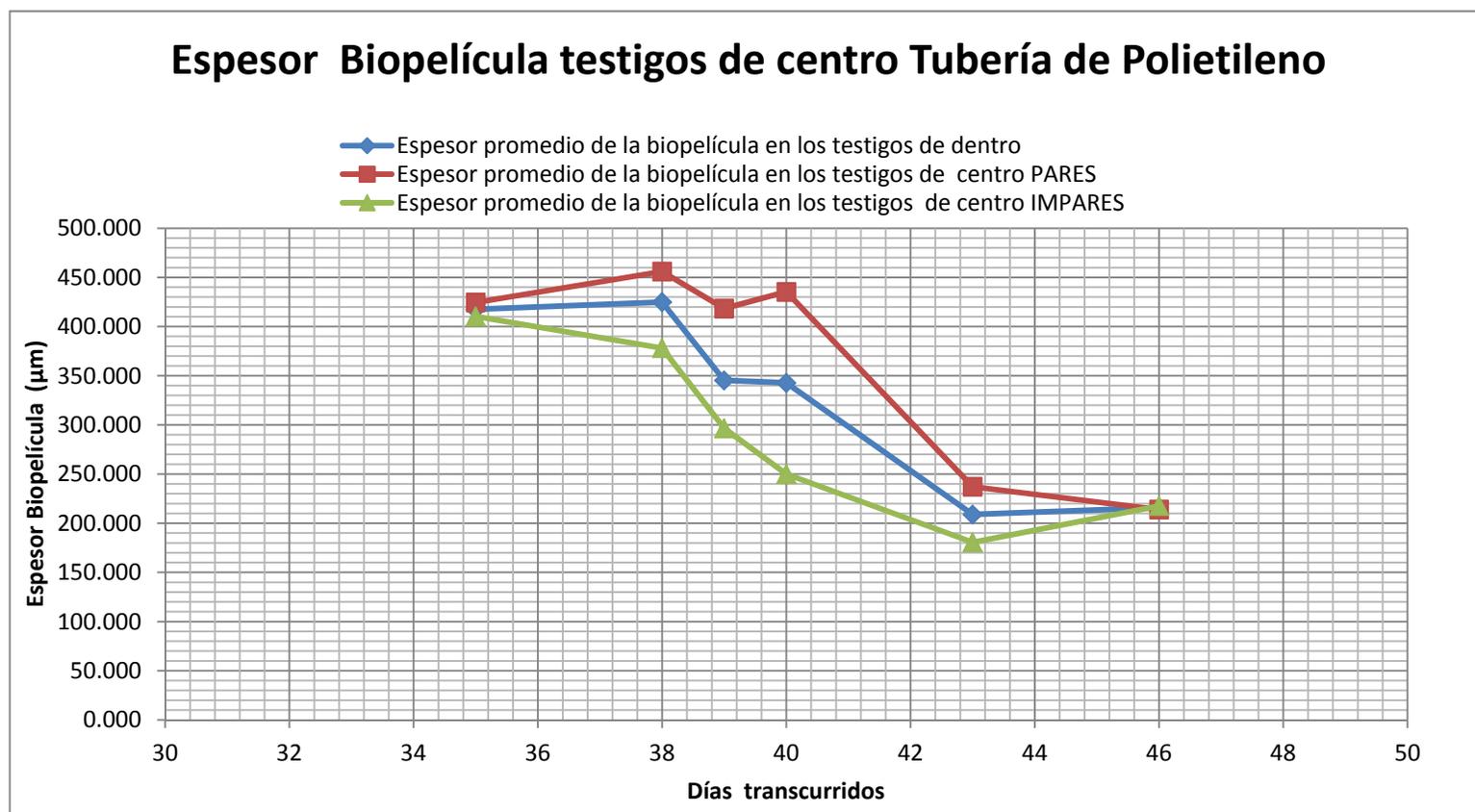
Gráfica 16 "Espesor de biopelícula testigos de cabeza polietileno".

Si se compara el espesor de la biopelícula que estaba formada inicialmente en los testigos de cabeza de Polietileno, se puede ver que su espesor era 225 μm , mucho mayor que el espesor de la biopelícula que se había formado en los testigos de cabeza de la tuberías de PVC.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos del análisis de los testigos de centro de la tubería de Polietileno:

Cálculos testigos de Centro				
Fecha de Medición	Días Transcurridos	Promedio Testigos	Promedio testigos pares	Promedio Testigos impares
22/05/2014	35	417.406	424.522	410.291
27/05/2014	38	424.828	455.953	378.139
28/05/2014	39	345.230	418.371	296.469
29/05/2014	40	342.680	435.328	250.032
03/06/2014	43	208.864	237.109	180.619
06/05/2014	46	215.785	213.923	217.647

Tabla 23 " Resultados cálculos testigos de centro Polietileno".



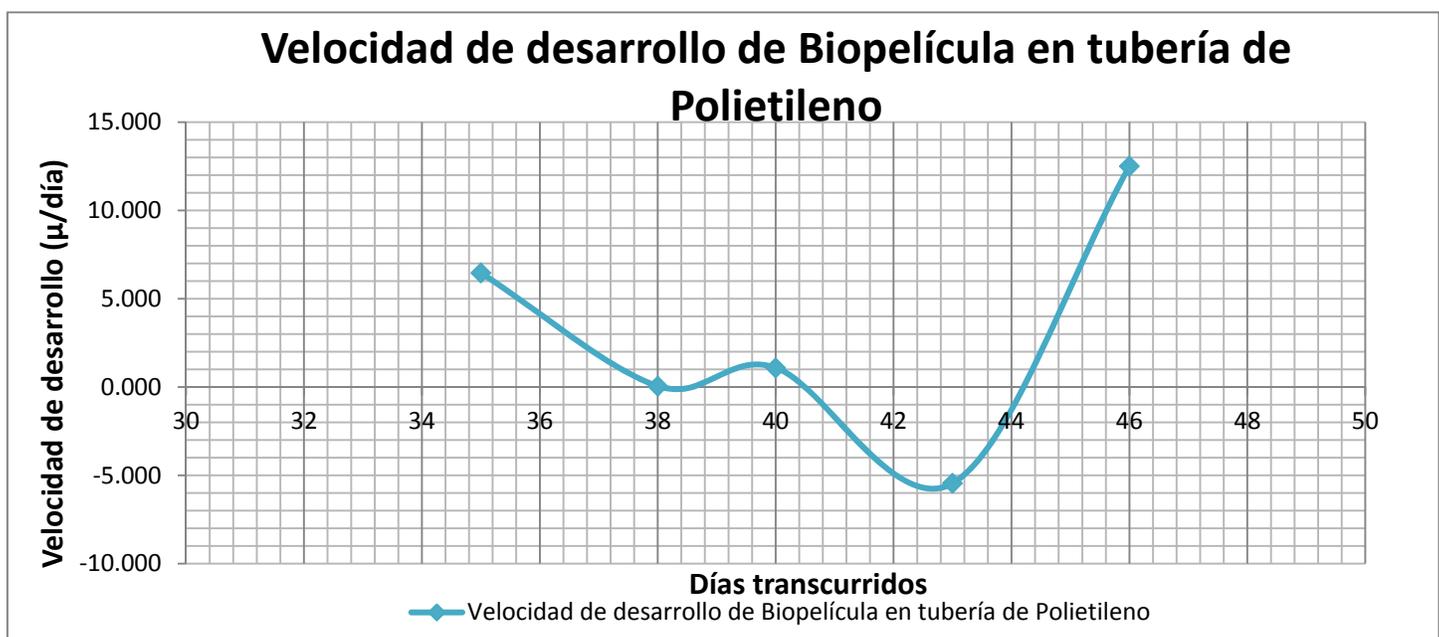
Gráfica 17 "Espesor de biopelícula testigos de centro Polietileno".

El espesor de la capa biológica que se encontraba inicialmente en los testigos de centro de la tubería de Polietileno tenía un orden de magnitud similar al de la capa encontrada en la tubería de PVC según la Gráfica 14. Al igual que con la tubería de PVC se puede apreciar como el espesor promedio de los testigos pares es un poco mayor que el de los otros testigos. Tanto en los testigos de PVC como en lo de Polietileno hay una tendencia decreciente que se debe al hecho de que transcurrió muy poco tiempo entre la primera y la segunda revisión de los testigos, esto impidió que la biopelícula se regenerara. Por último en la Gráfica 17 se puede ver como el espesor de las 3 mediciones de testigos tiende a estabilizarse en un valor cercano a 200 μm .

Los análisis de la velocidad de desarrollo obtenida en para la biopelícula de la tubería de Polietileno se presentan a continuación:

Espesor (μm)	Fecha de medición	Días Transcurridos	Δ espesor	Diferencia de días	Velocidad de desarrollo
0.00	30/03/2014	0	-	-	-
226.31	22/05/2014	35	226.313	35	6.466
226.48	27/05/2014	38	0.164	3	0.055
228.66	29/05/2014	40	2.181	2	1.091
212.31	03/06/2014	43	-16.348	3	-5.449
249.84	06/05/2014	46	37.527	3	12.509

Tabla 24 "Resultados cálculos velocidad de desarrollo de la tubería de Polietileno".



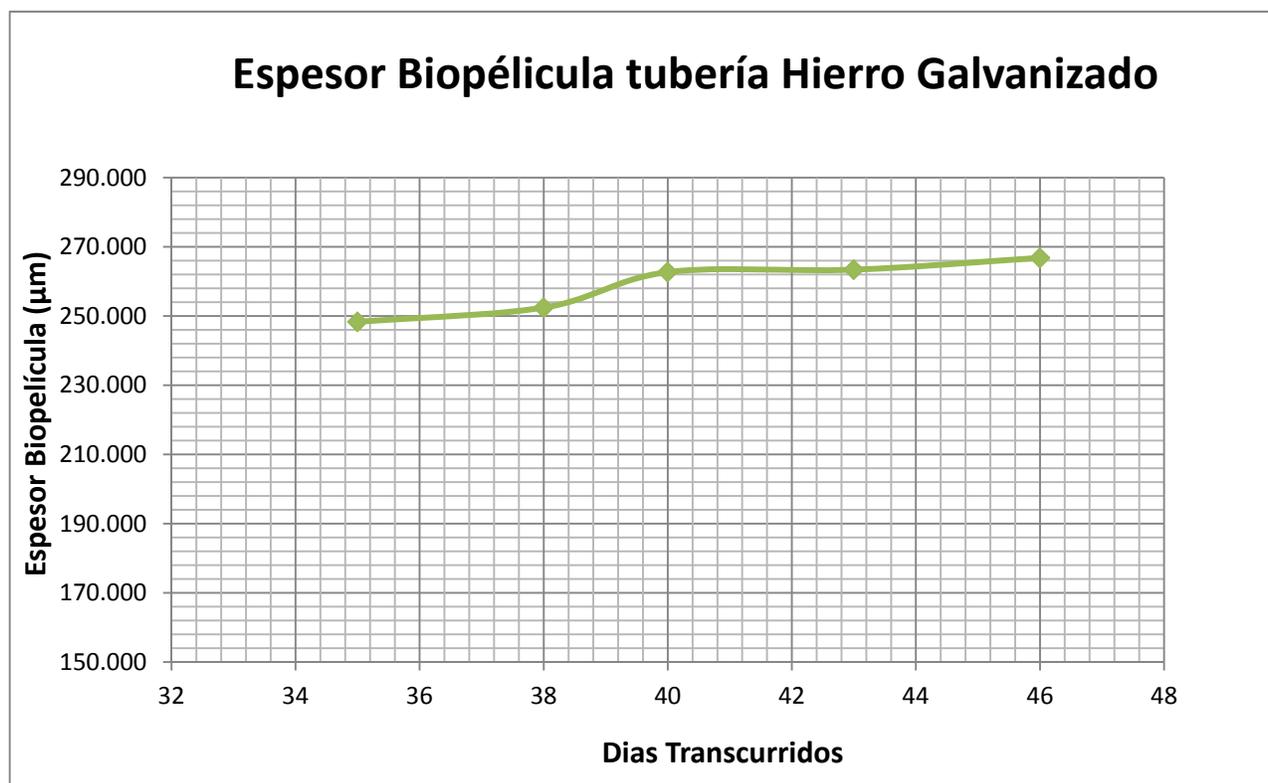
Gráfica 18 "Velocidad de desarrollo tubería de Polietileno".

6.2.1.3 Testigos de Hierro Galvanizado

Los resultados biológicos obtenidos en la tubería de Hierro son mucho más coherentes que los resultados hidráulicos obtenidos previamente para esta tubería. De acuerdo con el análisis de espesores se puede apreciar que para los testigos de cabeza el espesor determinado de la capa biológica es superior al de las biopelículas formadas en las otras 2 tuberías, y tiende a estabilizarse en un espesor de 270 μm .

Cálculos testigos de Cabeza					
Fecha de medición	Días transcurridos	peso biomasa gr	espesor cm	espesor mm	espesor (μm)
22/05/2014	35	1.2100	0.025	0.248	248.325
27/05/2014	38	1.2300	0.025	0.252	252.430
29/05/2014	40	1.2800	0.026	0.263	262.691
03/06/2014	43	1.2834	0.026	0.263	263.389
06/05/2014	46	1.3000	0.027	0.267	266.796

Tabla 25 "Resultados Cálculos testigos de Cabeza hierro Galvanizado".

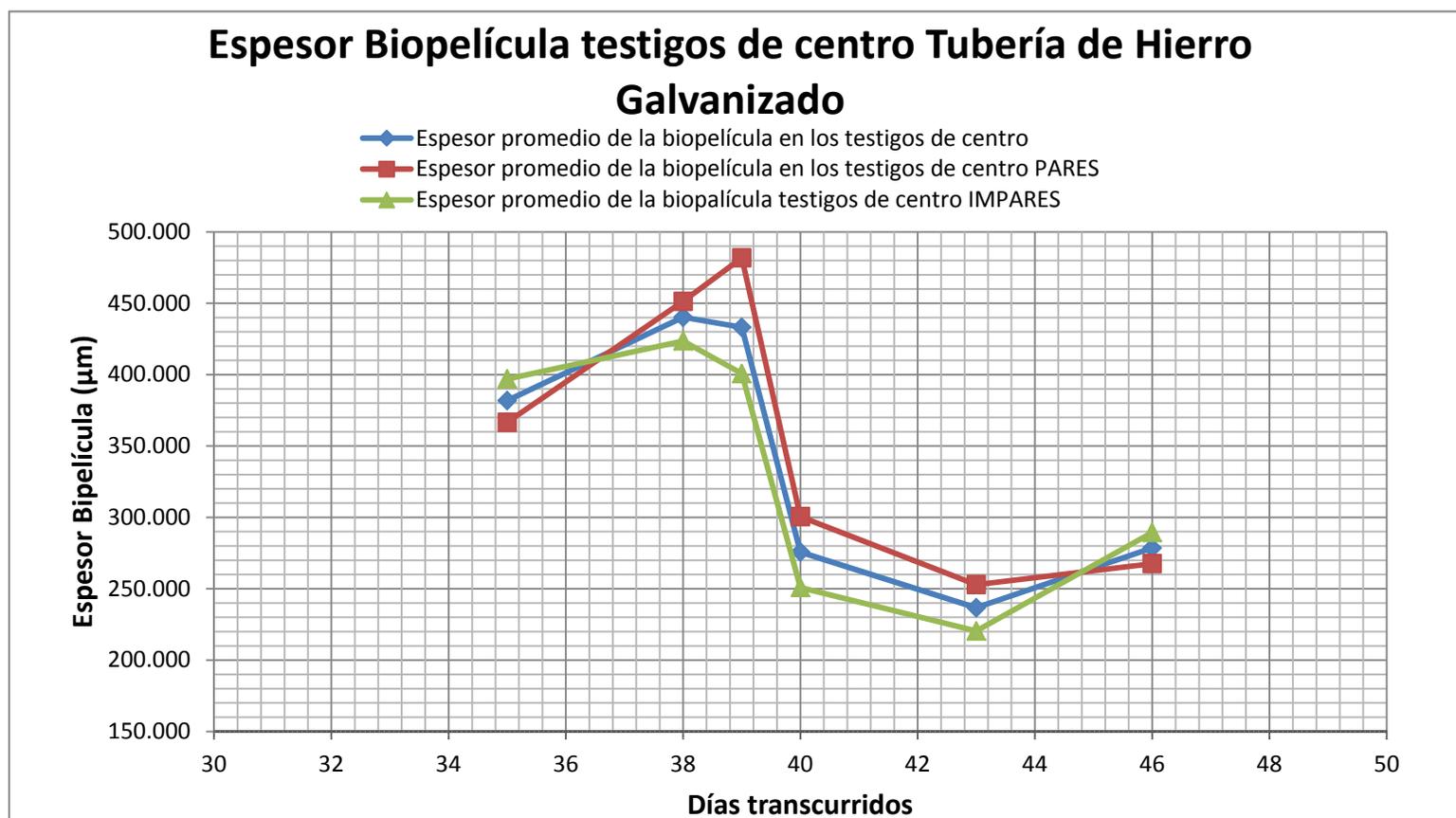


Gráfica 19 "Espesor biopelícula tubería de Hierro Galvanizado".

Por otro lado el análisis del espesor calculado en los testigos impares muestra un espesor inicial un poco menor al de las otras 2 tuberías. Sin embargo en los resultados obtenidos en la Gráfica 20 se puede apreciar que hay más de un evento claro de crecimiento de la capa biológica y finalmente el espesor se estabiliza en entre 250 y 300 μm que es más alto que los valores de las otras tuberías.

Cálculos testigos de Centro				
Fecha de Medición	Días Transcurridos	Promedio Testigos	Promedio testigos pares	Promedio Testigos impares
22/05/2014	35	381.794	366.599	396.988
27/05/2014	38	440.251	451.344	423.612
28/05/2014	39	433.177	481.816	400.752
29/05/2014	40	275.704	300.509	250.899
03/06/2014	43	236.646	252.896	220.395
06/05/2014	46	278.478	267.546	289.410

Tabla 26 "Resultado cálculos testigos de centro Hierro Galvanizado".

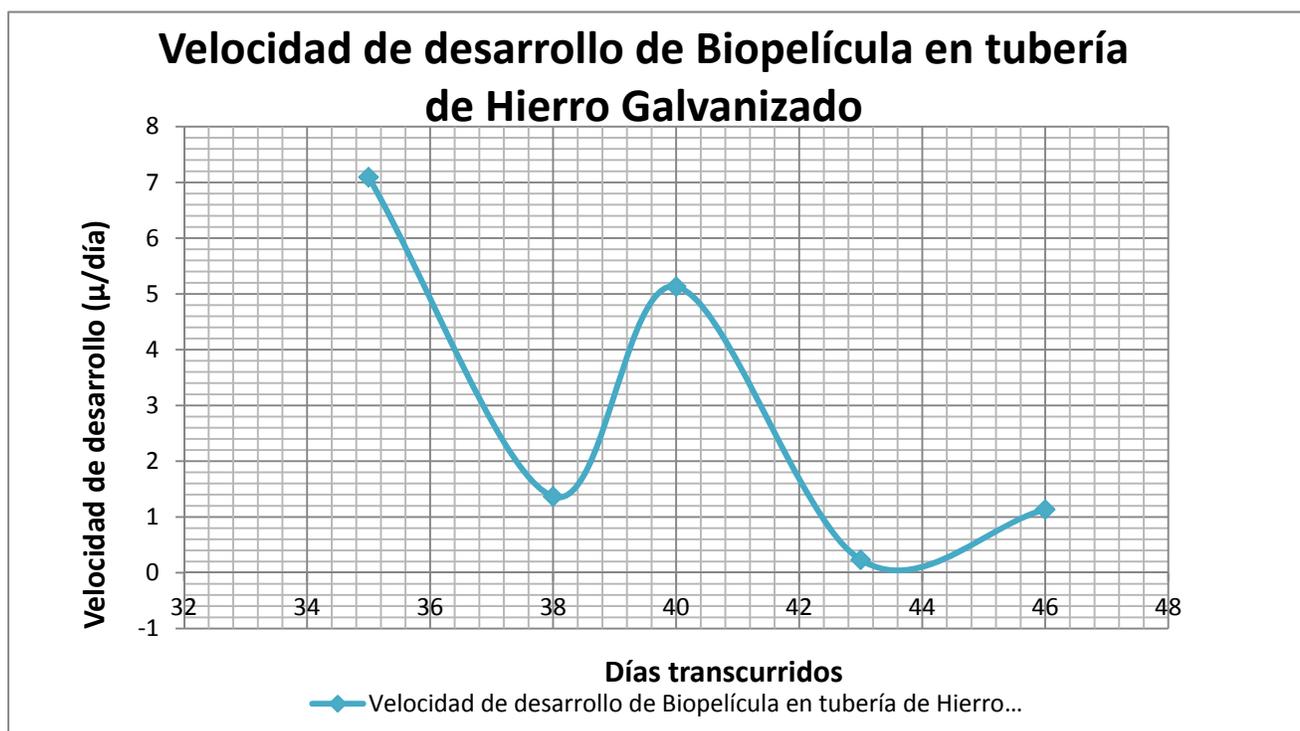


Gráfica 20 "Espesor de biopelícula testigos de centro Hierro Galvanizado".

Con respecto a la velocidad de desarrollo de biopelícula calculada para los datos obtenidos en esta tubería se encontró una variabilidad mayor que en el análisis desarrollado en las otras tuberías. Lo cual indica una actividad mayor de la biopelícula formada en esta tubería pues según las Gráficas 20 y 21 se ve que esta se desprende y crece en períodos de tiempo más cortos que las otras tuberías, aunque estos procesos de desprendimiento y crecimiento no sean de una magnitud considerable. Sin embargo el período total de análisis fue bastante corto por lo tanto es recomendable hacer un seguimiento durante más tiempo. Los resultados del análisis de la velocidad de desarrollo se muestran a continuación.

Esesor (μm)	Fecha de medición	Días Transcurridos	Δ esesor	Diferencia de días	Velocidad de desarrollo
0.00	30/03/2014	0	-	-	-
140.79	22/05/2014	35	140.79	35	4.02
151.36	27/05/2014	38	10.57	3	3.52
175.17	29/05/2014	40	23.82	2	11.91
175.23	03/06/2014	43	0.06	3	0.02
159.57	06/05/2014	46	-15.66	3	-5.22

Gráfica 21 "Resultado cálculos velocidad de desarrollo Hierro Galvanizado"



Gráfica 22 "Velocidad de desarrollo biopelícula Hierro Galvanizado".

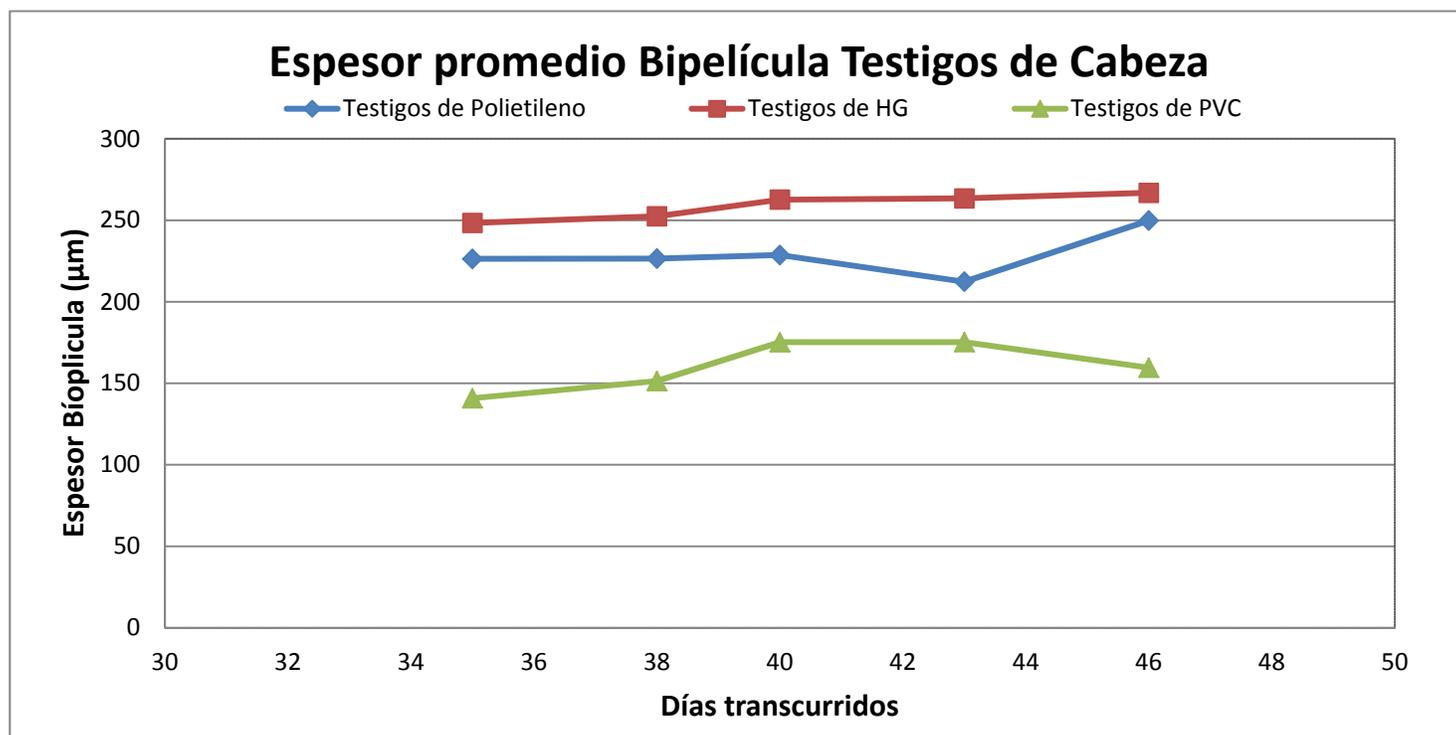
6.2.1.4 Resultados generales

En términos generales del análisis desarrollado con los testigos se puede ver que a pesar de las altas velocidades que transcurrieron durante toda la fase experimental del estudio, en todas las tuberías hubo formación de películas biológicas independientemente del material.

En las tres tuberías analizadas el espesor inicial de los testigos de centro fue mayor al de los testigos de cabeza; sin embargo después de retirar los testigos de centro y limpiarlos se vio que su espesor tendía a estabilizarse en un valor cercano al de los testigos de cabeza.

Se podría pensar que el espesor de las tuberías de Hierro y Polietileno que habían sido utilizadas con anterioridad podría estar relacionado con la presencia de quistes o residuos de biopelículas viejas que hayan contribuido a formar estas capas más rápidamente y con mayores espesores. Sin embargo la tubería de PVC era una tubería completamente nueva y se formó una biopelícula con espesores similares a los de las otras dos tuberías en los testigos de centro.

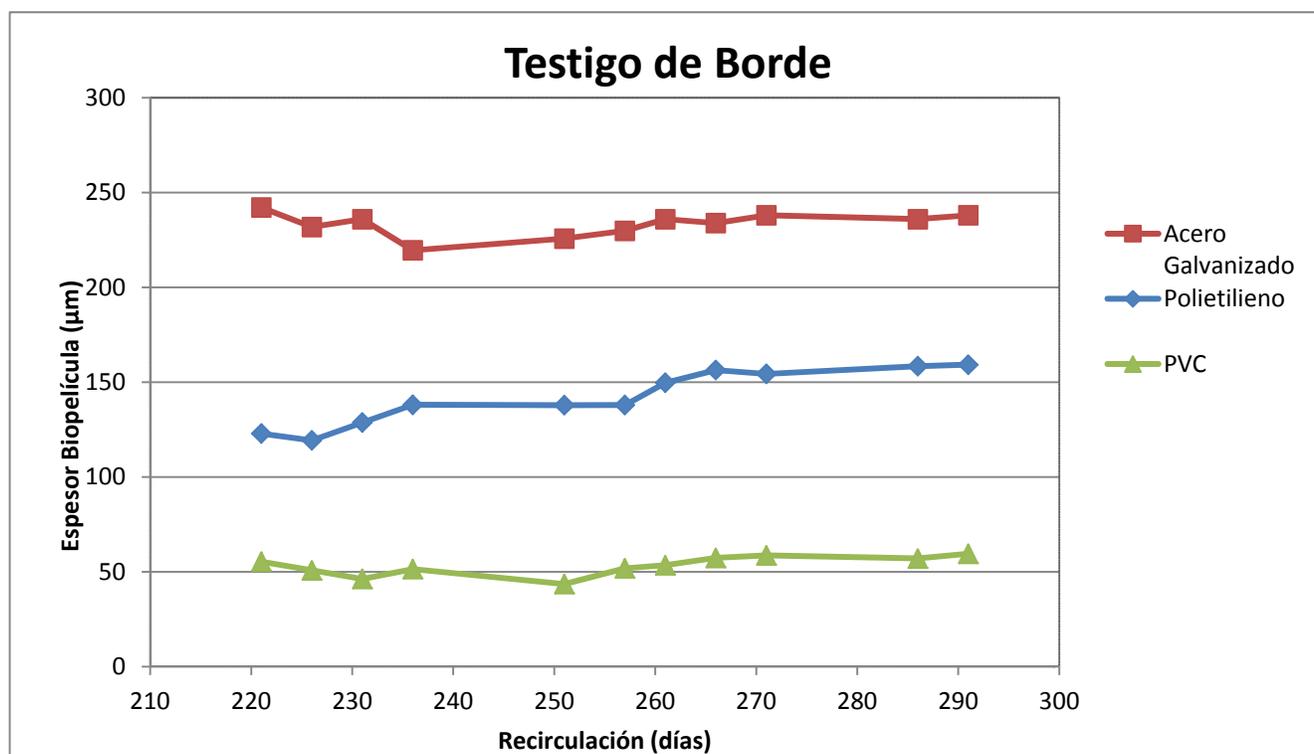
Las Gráficas 23 y 25 permiten comparar los espesores de las biopelícula formadas en cada una de las tuberías.



Gráfica 23 "Comparación de espesores testigos de cabeza".

En la Gráfica 23 se puede apreciar como la tubería que produce una biopelícula de mayor espesor es la tubería de Hierro Galvanizado, mientras que la tubería de PVC permite que se formen las películas biológicas de menor espesor. Por otro lado los espesores de la tubería de polietileno son de un tamaño bastante similar a los de la tubería de Hierro. En general se puede ver que durante el período de toma de datos el espesor de las biopelículas formadas en las tuberías de los tres materiales no varió mucho.

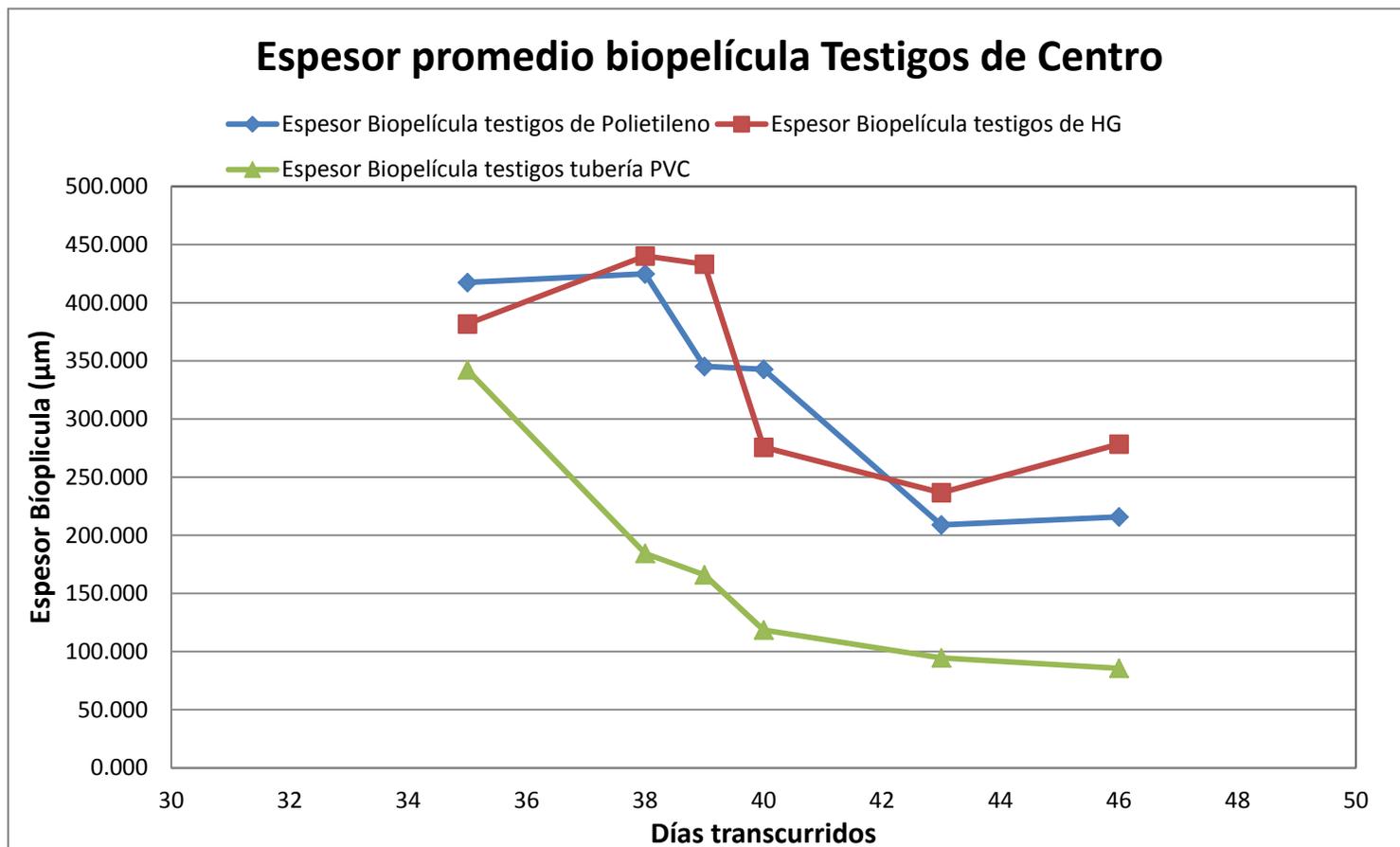
Si se comparan los espesores representados en la gráfica 23 con los espesores encontrados por Oscar Díaz (Díaz, 2014), “Gráfica 24” que utilizó 2 tuberías que hacen parte del mismo modelo se encontró que los espesores de todas las biopelículas son un poco mayores.



Gráfica “ 24 Comparación espesores testigos de Cabeza” (Díaz, 2014)

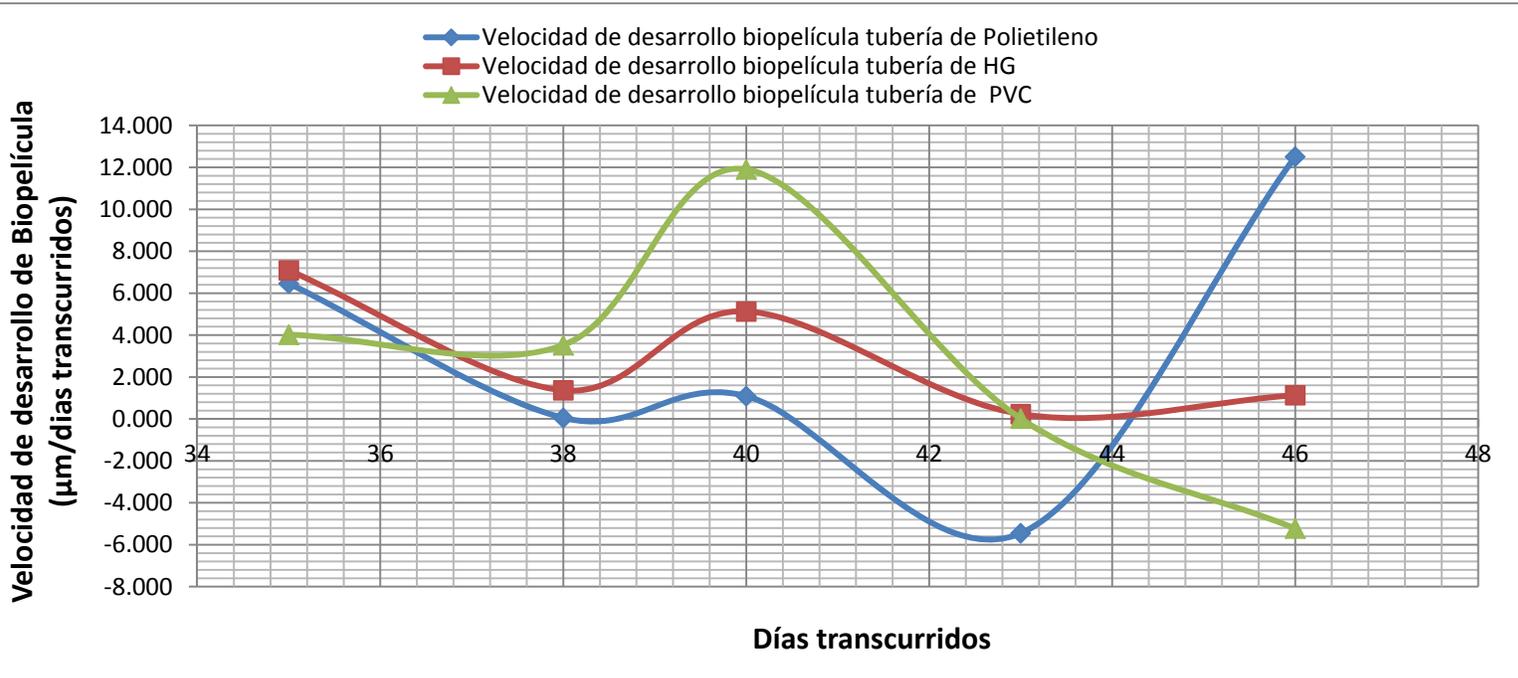
Con respecto a la comparación de los espesores hallados en las biopelículas formadas en los testigos de centro, se pudo determinar que al igual que en los testigos de borde el espesor de la biopelícula de la tubería de Polietileno es bastante similar al de la tubería de

Hierro. Mientras que el espesor de la biopelícula formada en la tubería de Polietileno continúa siendo el menor



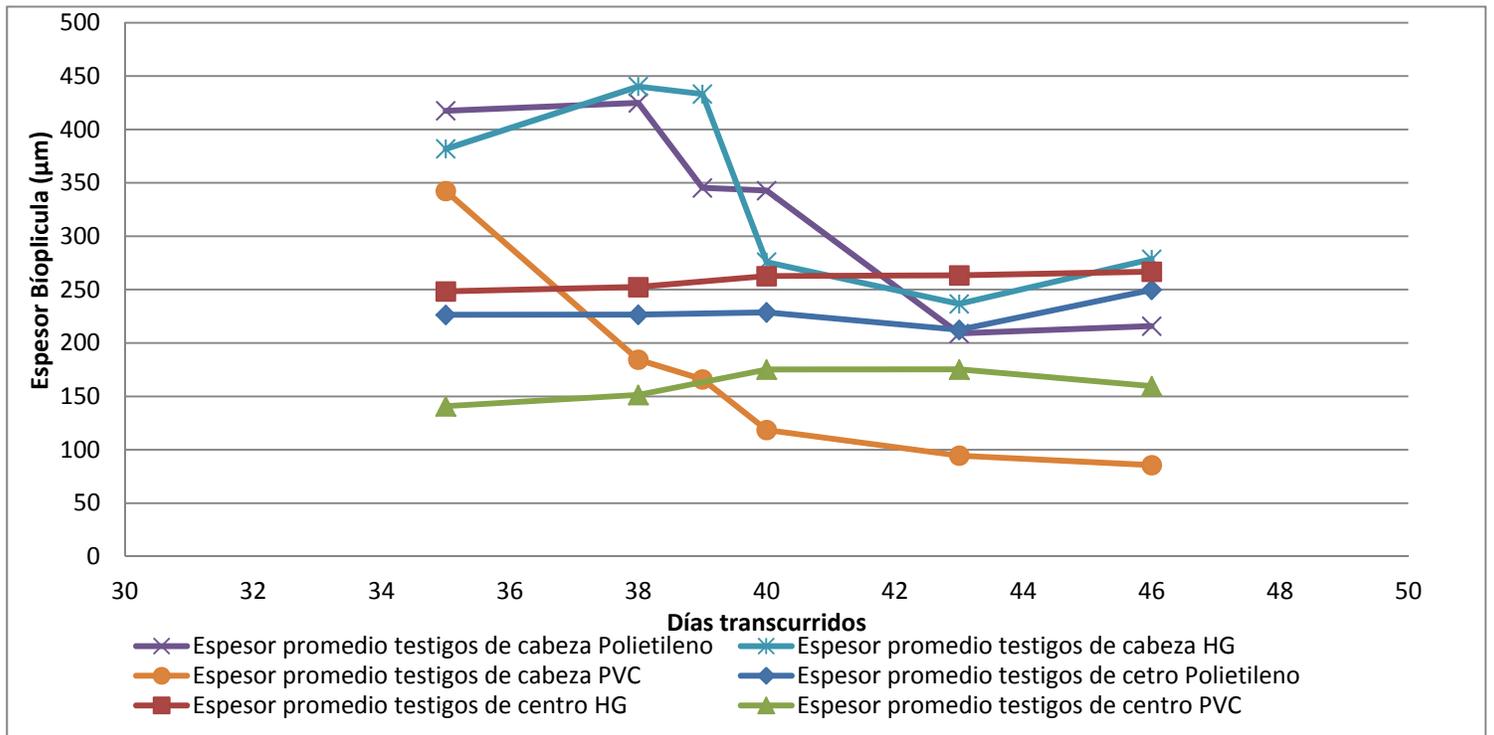
Gráfica 25" Comparación de espesores de biopelícula testigos de centro".

El análisis de la velocidad de desarrollo de las biopelículas formadas en las tres tuberías se puede ver en la Gráfica 27. De esta gráfica se rescata que alrededor del día 40 cuando se realizó una limpieza de testigos la biopelícula la velocidad de desarrollo se vio afectada seriamente pues el espesor de la capa biológica disminuyó considerablemente. Sin embargo la biopelícula formada en la tubería de Polietileno empezó a desarrollarse mucho más rápido que la de los otros materiales. Por otro lado la biopelícula de la tubería de Hierro no se vio tan afectada y mantuvo una velocidad de desarrollo similar a la tenía originalmente mientras que la tubería de polietileno disminuyó considerablemente su velocidad de desarrollo a partir del día 40.



Gráfica 27" Comparación velocidad de desarrollo de biopelículas".

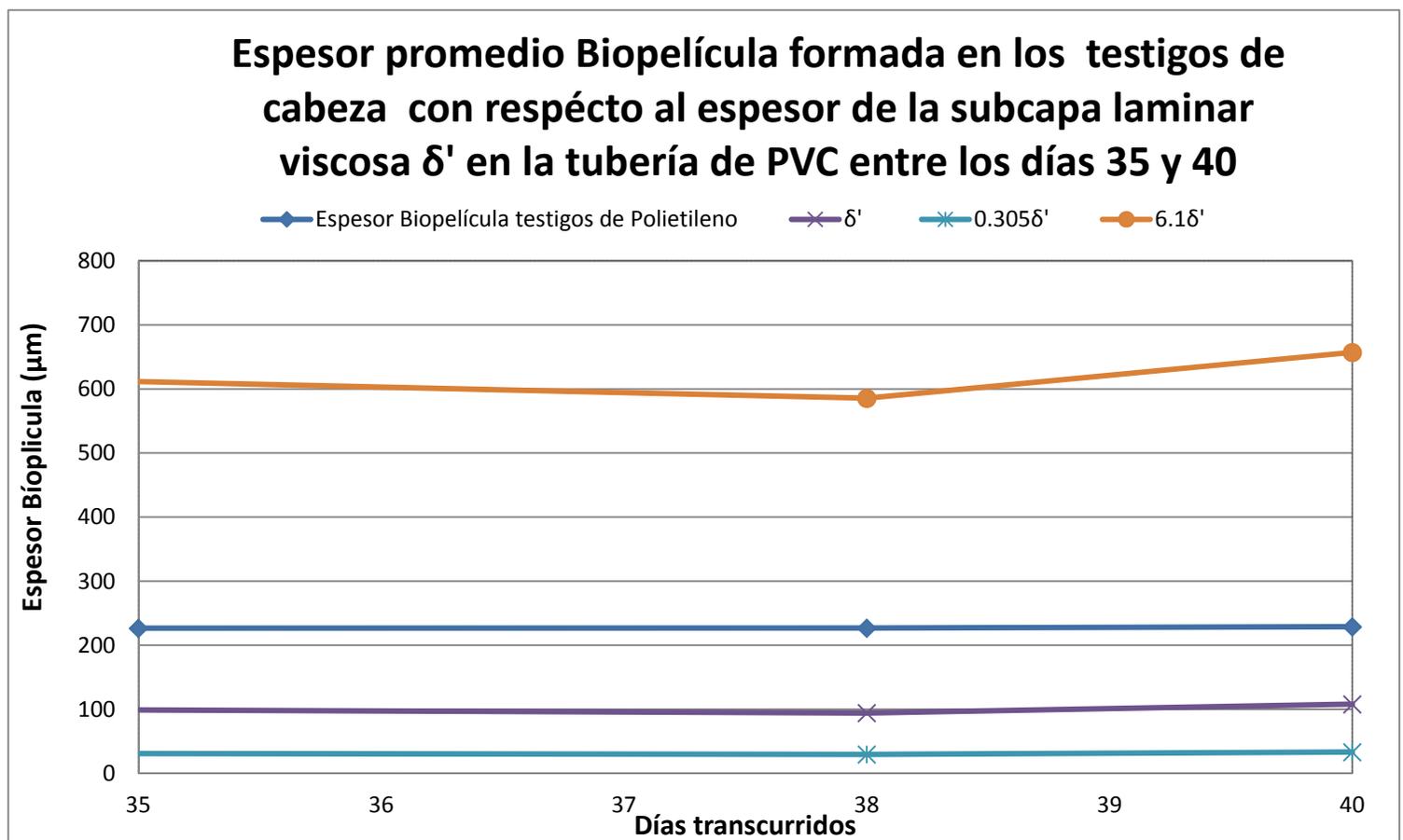
La comparación entre los espesores medidos en todos los testigos se presenta en la Gráfica 26



Gráfica 26" Comparación de espesores de las biopelículas en todos los testigos medidos.

En la gráfica 26 se superponen los espesores promedios de los testigos de centro y borde de todas las tuberías que hacían parte del modelo experimental.

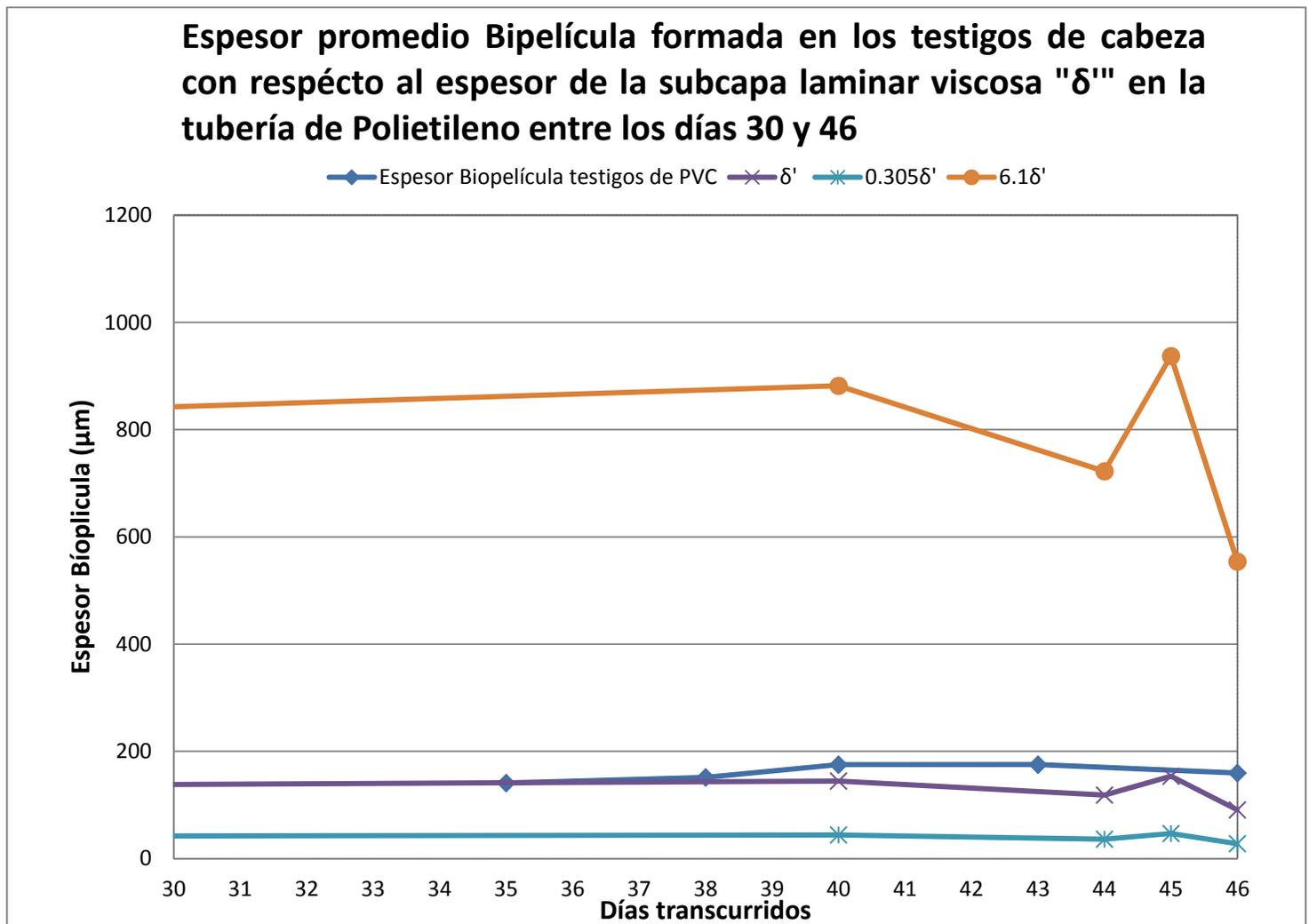
Finalmente con el objetivo de comparar el espesor de la biopelícula determinada por medio del análisis de los testigos con el espesor de la subcapa laminar viscosa calculado con el análisis hidráulico a partir de las Ecuaciones 5, 6 y 7. Este análisis se desarrolló únicamente para las tuberías de Polietileno y PVC pues los testigos fueron medidos al final del desarrollo del proyecto y los resultados hidráulicos obtenidos para la tubería de Hierro durante este período no son lo suficientemente claros.



Gráfica 28" Comparación del espesor de la subcapa laminar viscosa con el espesor de la biopelícula tubería PVC".

En esta gráfica que muestra el comportamiento de la subcapa laminar viscosa y el espesor de la biopelícula en la tubería de PVC entre los días 35 y 40 se puede ver que la subcapa laminar viscosa se encuentra entre $0.305\delta'$ y $6.1\delta'$ por lo tanto las condiciones de flujo son de un flujo hidráulicamente transicional. Adicionalmente se puede apreciar que el espesor

de la biopelícula se encontraba por encima de la subcapa laminar viscosa, lo que significaría que la biopelícula se ve beneficiada por las condiciones del flujo turbulento a altas velocidades y no solamente ocupó la subcapa laminar viscosa sino que encuentra por fuera de esta.



Gráfica 29" Comparación espesor de la subcapa laminar viscosa con el espesor de la biopelícula tubería de Polietileno".

Al igual que con la tubería de PVC la subcapa laminar viscosa que se forma en la tubería de Polietileno entre los días 30 y 45 tiene un espesor que permite definir el comportamiento del flujo, como hidráulicamente transicional. Por otro lado se puede ver que el espesor de la biopelícula se encuentra muy cerca al límite de la subcapa laminar viscosa. Es importante recordar que los resultados obtenidos en las Gráficas 28 y 29 corresponden a un periodo de



Universidad de
los Andes

Universidad de los Andes
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



tiempo muy corto y están basados en los promedios de varias mediciones por lo tanto estas graficas están sujetas a cierta incertidumbre.

6.2.2 Resultados Análisis Microbiológico

El análisis microbiológico realizado a las tuberías del montaje consistió en tomar 6 muestras de cada una de las tuberías y enviarlas a los laboratorios de Ingeniería Ambiental para que fueran analizadas y se pudiera cuantificar la cantidad de microorganismos presentes en estas.

Las muestras se tomaron con aplicadores, se tomó una muestra de cada uno de los testigos de cabeza y la pared de la tubería cercana al testigo. Este mismo procedimiento también se realizó para el testigo 12 y el testigo 24 completando un total de 6 muestras para cada tubería. Los aplicadores con las muestras se guardaron en bolsas plásticas herméticas que fueron enviadas al laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de los Andes para su análisis. El análisis de las muestras fue desarrollado por Carolina Piamonte bajo la asesoría de Juliana Martínez.

El análisis microbiológico se realizó utilizando un medio de cultivo R2A (Scharlau) que permite la detección de una gran variedad de microorganismos. Este medio también es propicio para garantizar el crecimiento de microorganismos que habitan biopelículas o sistemas de distribución de agua potable, estresados bajo los efectos de la temperatura y el cloro.

Los pasos desarrollados para desarrollar el cultivo de los microorganismos en el medio son los siguientes (CIIA, 2014)

1. Introducir los hisopos con biopelículas en preparación de peptona para nutrirlos
2. Colocar en el Shaker para que suelte la biopelícula
3. Preparar el medio R2A
4. Generar diluciones hasta 10^{-4} de cada muestra
5. Cultivar por siembra en superficie
6. Incubar por 24 horas
7. Lectura de resultados

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Muestra	Tipo de Dilución	Análisis	Coloración	Resultado
HG	-4	Heterótrofos	Blanca	Incontable UFC/ml
Polietileno	-4	Heterótrofos	Blanca	Incontable UFC/ml
PVC	-4	Heterótrofos	Blanca	Incontable UFC/ml

Tabla 27 "Resultados pruebas microbiológicas de laboratorio" (CIIA, 2014)

Los resultados muestran como las concentraciones de microorganismos encontradas en las muestras provenientes de cada una de las tuberías presentan, una cantidad incontable de microorganismos. Esto comprueba la presencia de las películas biológicas en todas las tuberías del modelo.

Las imágenes de los cultivos desarrollados en el laboratorio se muestran a continuación



Figura 44 "Resultados cultivo de las muestras de la tubería de polietileno" (CIIA, 2014).

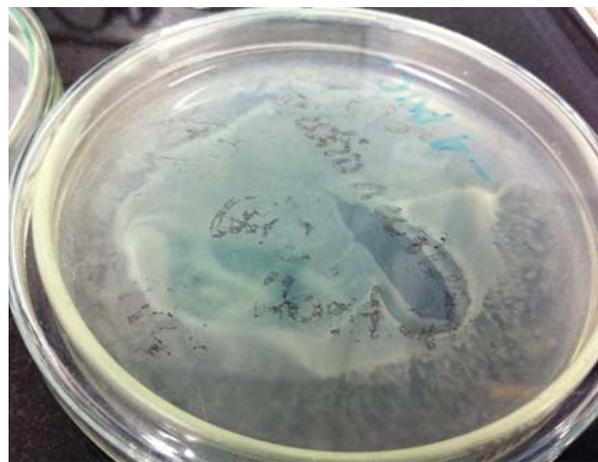


Figura 43 "Resultados cultivo de las muestras de la tubería de PVC" (CIIA, 2014).

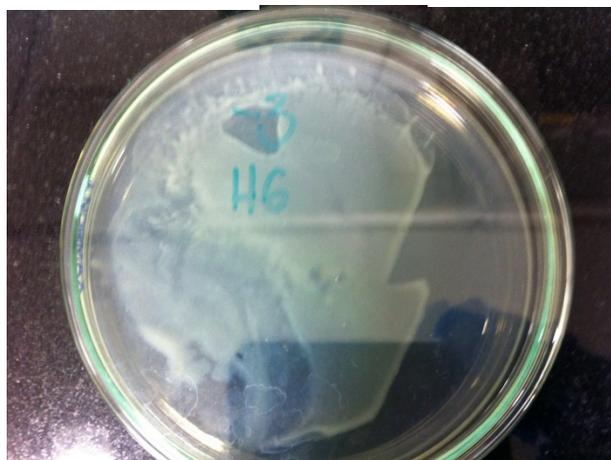


Figura 45 "Resultados cultivo de las muestras de la tubería de Hierro Galvanizado" (CIIA, 2014).

7. Conclusiones

- A pesar de que se desarrolló un método cuidadoso y adecuado para realizar la toma de mediciones en el modelo, no se pudo obtener resultados hidráulicos coherentes en la tubería de Hierro Galvanizado. Sin embargo los resultados obtenidos en las tuberías de PVC y Polietileno son acordes con los resultados obtenidos en muchos de los proyectos realizados previamente en montajes similares en la Universidad de los Andes
- El hecho de que el primer tramo de las tuberías de Polietileno y Hierro esté compuesto por una tubería de PVC con algún tipo de unión hace que las condiciones del flujo sean diferentes a las que se esperarían si la longitud total fuera del mismo material. Esto hace que las condiciones de flujo de la tubería de PVC no sea igual a la de las otras 2 tuberías.
- El uso de piezómetros para realizar la determinación de las pérdidas de energía en el sistema es tedioso y está muy expuesto a generar errores considerables. El sistema es bastante sensible y cualquier complicación en algún piezómetro puede interferir fuertemente en los resultados de la caída de presión medida. Por lo tanto sería preferible utilizar sensores diferenciales de presión.
- La medición con testigos es complicada pues se requiere detener el movimiento del flujo en el modelo, además no permite discriminar entre películas biológicas y cualquier otro tipo de formación que se pueda dar en la superficie de las tuberías como formaciones de películas minerales.
- El estudio permitió corroborar los resultados obtenidos previamente por el CIACUA en los cuales se afirmaba que uno de los efectos que produce la presencia de películas biológicas en las tuberías de distribución de agua potable es el aumento de la rugosidad absoluta " k_s " del material. Para el PVC se obtuvo que el promedio de las rugosidades absolutas obtenidas para todas las mediciones se encontraba un 3600 % por encima del valor de la rugosidad teoría del material, mientras que para el Polietileno y el Hierro Galvanizado estuvo un 1400% y un 90% por encima de su valor teórico correspondiente. Es importante recordar que el porcentaje de la tubería de Hierro corresponde únicamente a las 3 primeras mediciones realizadas en la tubería, pues el resto de mediciones no arrojaron resultados coherentes.
- La medición de muchos valores con velocidades parecidas en el mismo material permitió reafirmar que a relación entre el factor de fricción y el número de Reynolds es incongruente en el diagrama de Moody a causa de la presencia de biopelículas (Trujillo, 2011). Dado que los resultados obtenidos en el presente

estudio demuestran que para todos los materiales hay una variación muy grande de los valores del factor de fricción para la misma velocidad y el mismo número de Reynolds, lo cual no es congruente.

- Las condiciones de flujo a altas velocidades no impiden la formación de películas biológicas en las superficies de las tuberías pues los resultados del análisis de los testigos y el análisis biológico permitieron determinar la presencia de biopelículas en la tubería de PVC que no había sido utilizada en ningún otro montaje y estaba hecha del material menos rugoso.
- Tanto en la tubería de PVC como en la de Polietileno se encontró que el espesor de la biopelícula en los testigos de cabeza puede llegar a ser superior al espesor de la subcapa laminar viscosa, a pesar de las condiciones claramente establecidas de un flujo turbulento hidráulicamente transicional con altas velocidades. Esto indica que la turbulencia generada por el flujo a velocidades elevadas tiene un efecto más relacionado con la transferencia de nutrientes entre el flujo y la subcapa laminar viscosa, que beneficia el desarrollo de las películas biológicas, que un efecto de desprendimiento de material biológico anidado en la superficie de las tuberías.
- En los testigos impares de centro se encontraron espesores de biopelículas con un mayor orden de magnitud, que en los testigos de cabeza. En general hubo una tendencia de encontrar espesores mayores en los testigos ubicados hacia el centro del montaje que en los testigos ubicados cerca los tanques del vertedero.
- A pesar de que se trabajó con concentraciones de cloro un poco más elevadas que las que están estipuladas por la norma técnica colombiana durante algunos intervalos de tiempo, y se recrearon condiciones de flujo de máxima velocidad aparentemente adversas para la proliferación de microorganismos, no se pudo evitar la formación de películas biológicas. Este hecho hace que se deba investigar más respecto al tema pues altas velocidades y desinfectantes comunes no pueden exterminar efectivamente este tipo de microorganismos bajo las condiciones recreadas en el montaje, pues la subcapa laminar viscosa parece ser un ambiente idóneo para este tipo de organismos.
- Las pruebas microbiológicas raspando tuberías son la única forma de comprobar la veracidad del análisis de espesores obtenido a partir de las mediciones de los testigos. Si este tipo de análisis no se realiza no se puede determinar con certeza si el aumento en la masa de los testigos es producto de la formación de las biopelículas.

8. Recomendaciones

- Se debe procurar que todas las tuberías estén conectadas directamente al tanque de distribución sin conexiones intermedias, divisiones o uniones que puedan modificar el comportamiento del flujo.
- Los piezómetros deben ser calibrados muy cuidadosamente, y la utilización de herramientas más modernas como caudalímetros y sensores diferenciales de presión pueden mejorar la calidad del trabajo realizado, disminuyendo el error de medición y optimizando el tiempo de toma de datos, permitiendo dedicar más tiempo al análisis de los resultados obtenidos.
- El hecho de que el flujo permanezca estático gran parte del tiempo en el modelo a pesar de la aplicación de cloro, propicia a un deterioro considerable de la calidad del agua por lo tanto fomentando la formación de biopelículas. Debe idearse una forma de garantizar que el montaje dure más tiempo en funcionamiento si se quiere cuantificar el crecimiento real de las películas biológicas bajo las condiciones de flujo estudiadas.
- Se pueden realizar pruebas microbiológicas que no se limiten únicamente a contar la cantidad de microorganismos sino que determinen cuales de los organismos encontrados en las biopelículas tienen un mayor riesgo de generar efectos en la salud.
- Se requiere de un análisis desarrollado en un período de tiempo mucho mayor para encontrar resultados más precisos con respecto al desarrollo de las biopelículas en tuberías bajo flujos de alta velocidad.



Universidad de los Andes

Universidad de los Andes

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA

Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



9. Bibliografía

- A. Camper, M. B. (1999). Development and structure of drinking water biofilms and techniques for their study. *Journal of Applied Microbiology Symposium Supplement*, 1s-12s.
- Ávila, H., & Clavijo, W. (s.f.). Renovación y rehabilitación de redes de distribución de agua potable y de alcantarillado. *XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*.
- Bernal, M. A. (2009). *Reglas de operación para el desprendimiento de biopelículas en sistemas de distribución de agua potable*. Bogotá D.C.
- CIACUA. (2009). *Investigación sobre los factores que generan la formación, crecimiento y posterior desprendimiento de biopelículas en las redes matrices de acueducto*. Bogotá.
- CIIA. (2014). *Resultados muestras biopelículas*. Bogotá D.C.
- Dolan, R. (2002). Biofilms: Microbial life on surfaces: Biofilm structure. *Emerging Infectious Diseases*.
- Donoso, A. (2009). *Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de biopelículas en redes de distribución de agua potable*. Bogotá.
- Dunling Wang, R. C. (2010). Bacteriological challenges to asbestos cement water distribution pipelines. *Journal of environmental sciences*, 1203-1208.
- Duque, O. R. (2014). *La influencia del material de las tuberías en el crecimiento de películas bacterianas*. Bogotá D.C.
- Echavarría, M. A. (2003). *Influencia del crecimiento de biopelículas sobre la rugosidad absoluta en tuberías presurizadas. Modelo físico y conceptual*. Tesis, Universidad de los Andes., Bogotá.
- Gamarra, A. V. (2005). *Influencia de los materiales de las tuberías en el crecimiento de biopelículas en las redes de distribución de agua a presión*. Bogotá.
- Hernández, M. X. (2010). *Modelación de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono orgánico biodegradable*. Bogotá.
- J Chandy, M. A. (2001). Determination of nutrients limiting biofilm formation and the subsequent impact on disinfectant decay. *Water Research*, 2677-2682.



Universidad de los Andes
 Facultad de Ingeniería
 Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
 Centro de Investigaciones de Acueducto y Alcantarillado - CIACUA
 Determinación experimental del crecimiento de biopelículas bajo
 condiciones de alta velocidad en tuberías de distribución de agua potable



- Keinanen, M. (2006). Functions of drinking water pipe materials, reason or result of water quality? *8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium*. Cincinnati .
- Martin Francis Lambert, R. W. (2009). The Impact of Biofilm Development on Pipe Roughness and Velocity Profile. *World Environmental and Water Resources Congress 2009*. Great Rivers: ASCE.
- Morales, L. T. (2013). *Efecto de la velocidad de flujo sobre el crecimiento u desprendimiento de biopelículas alimentadas con CODB mediante pastos en redes de distribución de agua potable* . Bogotá D.C.
- Navarrete, S. C. (2012). *Modelación Física de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono organico disuelto*. Bogotá D.C.
- Niquette Patrick, P. S. (2000). Impacts of pipe materials on densities of fixed bacterial biomass in a drinking water distribution system. *Water Research*, 1951-1956.
- Reynolds, K. (s.f.). La vida en el sistema de distribución: Monitoreando los potenciales de formación de biopelículas. *Agua Latinoamerica*.
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías: abastecimiento de aguas, redes, riegos*. Bogotá: AlfaOmega. ISBN 978-958-682-680-8
- Trujillo, M. X. (2011). *Modelación física de biopelículas en redes de distribución de agua potable alimentadas con carbono organico disuelto*. Bogotá D.C.
- Vargas, T. M. (2012). *Biopelículas alimentadas con COBD mediante pastos: Dinámica de crecimiento y desprendimiento en sistemas de distribución de agua potable*. Bogotá D.C.
- Zsuzsa Ludmany, M. B. (2006). Evaluation of biofilms occurring in drinking distribution systems of Balantofured. *Chemicals as intentional and accidental global environmental threats*, 501-507.

10. Anexos

a. Cálculo hidráulico tipo

A partir de los datos diligenciados en el formato de datos mostrado en la figura 41, se realizaron los siguientes cálculos para cada caudal medido

A partir de la temperatura media de 24.8 °C se tiene que:

$$\mu = 0.000895 \text{ Kg/ms}$$

$$\rho = 997.12 \text{ Kg/ m}^3$$

$$v = 8.952\text{E-}7 \text{ m}^2/\text{s}$$

de acuerdo con la tabla de las propiedades del agua

Con la ecuación del vertedero se calcula una velocidad

$$Q = 0.0085(H-H_0)^{2.46} = 0.0085*(34.37-10.78)^{2.46} = 20.484\text{L/s}$$

$$A = 0.008798\text{m}^2$$

$$V = \frac{\left(\frac{\frac{20.484\text{L}}{\text{s}}}{\frac{1000\text{L}}{\text{m}^3}}\right)}{0.008798\text{m}^2} = 2.328 \text{ m/s}$$

$$\Delta P_n = H_{n\text{Aguas arriba}} - H_{n\text{Aguas Abajo}}$$

$$\Delta P_1 = H_{1\text{Aguas arriba}} - H_{1\text{Aguas Abajo}} = 0.930\text{m} - 0.762\text{m} = 0.168 \text{ m}$$

$$\Delta P_2 = H_{2\text{Aguas arriba}} - H_{2\text{Aguas Abajo}} = 0.886 - 0.800 = 0.066 \text{ m}$$

$$\Delta P_3 = H_{3\text{Aguas arriba}} - H_{3\text{Aguas Abajo}} = 0.870 - 0.831 = 0.039 \text{ m}$$

$$\Delta P_4 = H_{4\text{Aguas arriba}} - H_{4\text{Aguas Abajo}} = 0.883 - 0.795 = 0.088 \text{ m}$$

$$H_{f1} = \frac{(\Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 + \Delta P_4)}{4} = \frac{(0.168 \text{ m} + 0.066 \text{ m} + 0.039 \text{ m} + 0.088 \text{ m})}{4} = 0.090 \text{ m}$$

Se sabe que la longitud entre piezómetros es de 2.1 m por lo tanto se puede calcular el factor de fricción

$$f = H_f \cdot \frac{d}{l} \cdot \frac{2g}{v^2} = 0.090 \cdot \frac{0.1058\text{m}}{2.10\text{m}} \cdot 2 \cdot \frac{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\left(2.328 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2} = 0.016$$

1. Cálculo de número de Reynolds.

$$Re = v \cdot \frac{d}{\mu} \cdot \rho = 2.328 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \frac{0.1058\text{m}}{0.000895 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}} \cdot 997.12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 275284.707$$

2. Cálculo de la rugosidad absoluta.

A partir de los anteriores resultados se calcula la rugosidad absoluta correspondiente a ese factor de fricción utilizando la ecuación de Colebrook-White.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\sqrt{f}} &= -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \rightarrow k_s = 3.7 * d \left(10^{-0.5 \cdot \sqrt{f}} - \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \\ &= 3.7 * 0.1058\text{m} \left(10^{-0.5 \cdot \sqrt{0.016}} - \frac{2.51}{275284.707 \cdot \sqrt{0.016}} \right) = .000022 \text{ m} \end{aligned}$$

- Ejemplo cálculo de espesor de la subcapa laminar viscosa para el mismo valor se muestra a continuación

$$\tau_0 = \frac{d}{4} \cdot \rho g \cdot \frac{H_f}{l} = \frac{0.1058\text{m}}{4} \cdot 997.12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{0.090 \text{ m}}{2.10\text{m}} = 11.123 \frac{\text{Kg}}{\text{ms}^2}$$

$$v_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{11.123 \frac{\text{Kg}}{\text{ms}^2}}{997.12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} = 0.105 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\delta' = 11.6 \cdot \frac{\mu}{v_* \rho} = 11.6 \cdot \frac{0.000895 \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}{0.105 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 997.12 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \cdot 1000000 = 98.315 \mu\text{m}$$

b. Tabla propiedades del Agua

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad dinámica (kg / m*s)	Viscosidad cinemática (m ² /s) x 10 ⁻⁶
0	999.92	0.001779	1.778940
1	999.96	0.001725	1.725059
5	999.98	0.001528	1.528041
10	999.69	0.001319	1.319587
15	999.10	0.001147	1.147544
20	998.22	0.001005	1.006363
25	997.07	0.000888	0.890982
30	995.69	0.000793	0.796827
35	994.08	0.000716	0.719810
40	992.26	0.000651	0.656328
45	990.25	0.000597	0.603266
50	988.07	0.000551	0.557997
55	985.71	0.000511	0.518378
60	983.21	0.000475	0.482754
65	980.56	0.000441	0.449956
70	977.77	0.000410	0.419304
75	974.85	0.000381	0.390600
80	971.81	0.000354	0.364137
85	968.64	0.000330	0.340693
90	965.34	0.000310	0.321532
95	961.92	0.000297	0.308405
100	958.36	0.000291	0.303550

c. Tabla de Cálculos Hidráulicos definitivos

A continuación se presentara una tabla con algunos de los resultados hidráulicos obtenidos el resto de los datos se pueden ver en la hoja de cálculo anexa en un cd

DATOS PVC FINALES PVC											
Dia de recirculación	# Medición	Re	f	Ks(m)	Ks/d	ks(mm)	S'(µm)	Flujo 1	Flujo 2	Estudio Biopelículas	
										0.3056' (µm)	6.16' (µm)
19	2	346304.881635	0.021216	0.000125109	0.001182	0.125	68.841	Turbulento	Transición	20.996	419.927
	3	339398.576171	0.021965	0.000146103	0.001380	0.146	69.034	Turbulento	Transición	21.055	421.105
	4	341691.505637	0.007914	-3.13979E-05	-0.000297	-0.031	114.239	Turbulento	Transición	34.843	696.858
	7	335813.897684	0.024548	0.000233424	0.002206	0.233	65.998	Turbulento	Transición	20.129	402.589
	9	331284.212321	0.024933	0.000248069	0.002344	0.248	66.383	Turbulento	Transición	20.247	404.935
	12	328391.532021	0.024339	0.000225104	0.002127	0.225	67.779	Turbulento	Transición	20.673	413.453
	13	324876.461531	0.023097	0.000180955	0.001710	0.181	70.330	Turbulento	Transición	21.451	429.011
	15	318228.113648	0.022423	0.000158769	0.001500	0.159	72.870	Turbulento	Transición	22.225	444.509
	16	309180.859497	0.023234	0.000184547	0.001744	0.185	73.682	Turbulento	Transición	22.473	449.460
	18	284431.968190	0.023676	0.000198009	0.001871	0.198	79.343	Turbulento	Transición	24.199	483.990
	19	270795.962710	0.022147	0.000146619	0.001385	0.147	86.167	Turbulento	Transición	26.281	525.621
25	185986.066220	0.023886	0.000193651	0.001830	0.194	120.806	Turbulento	Transición	36.846	736.918	
29	254513.664486	0.024083	0.00021005	0.001985	0.210	87.916	Turbulento	Transición	26.814	536.288	
22	41	306164.383661	0.022820	0.000170521	0.001611	0.171	75.080	Turbulento	Transición	22.899	457.988
	42	337088.693929	0.019888	9.07645E-05	0.000858	0.091	73.046	Turbulento	Transición	22.279	445.583
	43	295669.329820	0.024897	0.00024431	0.002308	0.244	74.432	Turbulento	Transición	22.702	454.038
	49	279494.462057	0.017887	4.51075E-05	0.000426	0.045	92.895	Turbulento	Transición	28.333	566.659
	50	306164.383661	0.013250	-1.02507E-05	-0.000097	-0.010	98.530	Turbulento	Transición	30.052	601.033
23	58	255341.182853	0.016351	1.79385E-05	0.000169	0.018	106.351	Turbulento	Transición	32.437	648.739
	59	225007.682180	0.011231	-3.38907E-05	-0.000320	-0.034	145.627	Turbulento	Transición	44.416	888.323
	60	210195.343224	0.018178	4.17944E-05	0.000395	0.042	122.531	Turbulento	Transición	37.372	747.440
26	61	194645.828955	0.017758	3.12498E-05	0.000295	0.031	133.876	Turbulento	Transición	40.832	816.643
	62	253990.812717	0.006863	4.65364E-05	0.000440	0.047	165.025	Turbulento	Transición	50.333	1006.653
	63	270102.441333	0.016867	2.71977E-05	0.000257	0.027	98.989	Turbulento	Transición	30.192	603.835
	64	278101.324486	0.016283	1.94472E-05	0.000184	0.019	97.853	Turbulento	Transición	29.845	596.902
	65	284262.071573	0.016652	2.5355E-05	0.000240	0.025	94.665	Turbulento	Transición	28.873	577.454
	66	283135.974225	0.018148	5.02022E-05	0.000474	0.050	91.041	Turbulento	Transición	27.767	555.348
	67	289647.308922	0.013879	-6.48073E-06	-0.000061	-0.006	101.761	Turbulento	Transición	31.037	620.744
	68	269282.869367	0.015424	7.37521E-06	0.000070	0.007	103.833	Turbulento	Transición	31.669	633.382
	69	257166.147617	0.016042	1.38764E-05	0.000131	0.014	106.610	Turbulento	Transición	32.516	650.320
	70	189066.048417	0.018178	3.79029E-05	0.000358	0.038	136.225	Turbulento	Transición	41.549	830.971

71	317153.565940	0.019618	8.32245E-05	0.000786	0.083	78.171	Turbulento	Transición	23.842	476.845
72	309768.874830	0.021466	0.00012966	0.001225	0.130	76.512	Turbulento	Transición	23.336	466.723
73	310686.317534	0.021649	0.00013496	0.001275	0.135	75.962	Turbulento	Transición	23.168	463.367
74	308853.041939	0.020686	0.000108532	0.001025	0.109	78.171	Turbulento	Transición	23.842	476.845
76	283859.671253	0.017675	4.17674E-05	0.000395	0.042	92.014	Turbulento	Transición	28.064	561.284
77	237577.650765	0.017745	3.7908E-05	0.000358	0.038	109.721	Turbulento	Transición	33.465	669.301
78	189412.932655	0.016880	1.54196E-05	0.000146	0.015	141.104	Turbulento	Transición	43.037	860.734
79	186912.749037	0.022764	0.000155067	0.001465	0.155	123.133	Turbulento	Transición	37.556	751.114
80	195401.020739	0.016733	1.43596E-05	0.000136	0.014	137.380	Turbulento	Transición	41.901	838.020
81	207710.633966	0.016814	1.7917E-05	0.000169	0.018	128.928	Turbulento	Transición	39.323	786.460
83	229823.256659	0.018270	4.65215E-05	0.000440	0.047	111.783	Turbulento	Transición	34.094	681.877
84	240459.260932	0.017265	3.00807E-05	0.000284	0.030	109.904	Turbulento	Transición	33.521	670.416
85	246818.123329	0.017698	3.82387E-05	0.000361	0.038	105.755	Turbulento	Transición	32.255	645.108
86	251652.043921	0.018706	5.78348E-05	0.000546	0.058	100.890	Turbulento	Transición	30.772	615.432
87	264259.129583	0.016249	1.75189E-05	0.000166	0.018	103.086	Turbulento	Transición	31.441	628.822
88	269854.871977	0.018963	6.50577E-05	0.000615	0.065	93.444	Turbulento	Transición	28.500	570.008
89	279527.798851	0.017844	4.43344E-05	0.000419	0.044	92.997	Turbulento	Transición	28.364	567.280
90	285894.754510	0.018035	4.8376E-05	0.000457	0.048	90.443	Turbulento	Transición	27.585	551.700
91	282122.177455	0.018144	5.00514E-05	0.000473	0.050	91.376	Turbulento	Transición	27.870	557.391
92	295308.118798	0.020300	9.77447E-05	0.000924	0.098	82.531	Turbulento	Transición	25.172	503.441
93	305811.880616	0.019925	8.95212E-05	0.000846	0.090	80.442	Turbulento	Transición	24.535	490.694
94	310074.510153	0.019278	7.51768E-05	0.000710	0.075	80.658	Turbulento	Transición	24.601	492.014
95	314989.028267	0.018748	6.44438E-05	0.000609	0.064	80.514	Turbulento	Transición	24.557	491.133
96	292346.993515	0.019623	8.14603E-05	0.000770	0.081	84.793	Turbulento	Transición	25.862	517.237
97	274097.421092	0.019931	8.70099E-05	0.000822	0.087	89.736	Turbulento	Transición	27.370	547.392
98	290578.813719	0.019981	8.96294E-05	0.000847	0.090	84.542	Turbulento	Transición	25.785	515.704
99	300082.806545	0.018883	6.60641E-05	0.000624	0.066	84.210	Turbulento	Transición	25.684	513.682
100	314064.061340	0.018251	5.4686E-05	0.000517	0.055	81.842	Turbulento	Transición	24.962	499.236
101	287061.535011	0.019302	7.38759E-05	0.000698	0.074	87.068	Turbulento	Transición	26.556	531.118
102	223981.372269	0.020695	0.000100338	0.000948	0.100	107.770	Turbulento	Transición	32.870	657.397
103	243361.512995	0.020395	9.51268E-05	0.000899	0.095	99.913	Turbulento	Transición	30.473	609.469
104	267888.444825	0.018455	5.45871E-05	0.000516	0.055	95.419	Turbulento	Transición	29.103	582.054
105	286769.575460	0.019341	7.47105E-05	0.000706	0.075	87.068	Turbulento	Transición	26.556	531.118
106	296497.530776	0.017525	4.0312E-05	0.000381	0.040	88.468	Turbulento	Transición	26.983	539.653
107	306115.193229	0.017365	3.84143E-05	0.000363	0.038	86.084	Turbulento	Transición	26.256	525.110
108	307330.228729	0.014163	-2.35492E-06	-0.000022	-0.002	94.943	Turbulento	Transición	28.958	579.151
109	316843.807562	0.018330	5.63845E-05	0.000533	0.056	80.949	Turbulento	Transición	24.689	493.790
111	300082.806545	0.019585	8.12231E-05	0.000767	0.081	82.687	Turbulento	Transición	25.220	504.390
112	314989.028267	0.020190	9.65203E-05	0.000912	0.097	77.585	Turbulento	Transición	23.663	473.267
120	275284.707824	0.016461	2.16958E-05	0.000205	0.022	98.316	Turbulento	Transición	29.986	599.725
124	244238.942222	0.014077	-1.0143E-05	-0.000096	-0.010	119.832	Turbulento	Transición	36.549	730.975
126	279031.656024	0.147530	0.019537823	0.184604	0.022	32.400	Turbulento	Transición	9.882	197.640
127	198888.157629	0.024461	0.000217092	0.002051	0.217	111.634	Turbulento	Transición	34.048	680.968

40	131	320333.175158	0.017899	4.86794E-05	0.000460	0.049	81.026	Turbulento	Transición	24.713	494.257
	132	315705.002614	0.017941	4.90954E-05	0.000464	0.049	82.117	Turbulento	Transición	25.046	500.916
	133	315397.878383	0.016513	2.59893E-05	0.000246	0.026	85.677	Turbulento	Transición	26.132	522.631
	134	299671.107246	0.017356	3.77382E-05	0.000357	0.038	87.958	Turbulento	Transición	26.827	536.542
	135	292275.556718	0.016466	2.33782E-05	0.000221	0.023	92.588	Turbulento	Transición	28.239	564.785
	136	276970.322176	0.016776	2.65111E-05	0.000250	0.027	96.796	Turbulento	Transición	29.523	590.454
	137	262422.625491	0.016810	2.54945E-05	0.000241	0.025	102.060	Turbulento	Transición	31.128	622.567
	138	250743.080993	0.014812	-1.8197E-06	-0.000017	-0.002	113.789	Turbulento	Transición	34.706	694.115
	139	223037.969623	0.009880	-4.08589E-05	-0.000386	-0.041	156.630	Turbulento	Transición	47.772	955.445
	140	202624.019547	0.009766	-4.58672E-05	-0.000433	-0.046	173.415	Turbulento	Transición	52.892	1057.832
	141	162525.253696	0.010773	-5.25366E-05	-0.000496	-0.053	205.853	Turbulento	Transición	62.785	1255.701
	142	144704.551723	0.008200	-7.41312E-05	-0.000700	-0.074	265.003	Turbulento	Transición	80.826	1616.517
	143	111185.259827	0.010463	-8.17033E-05	-0.000772	-0.082	305.329	Turbulento	Transición	93.125	1862.505
	144	78667.169111	0.103980	0.010982919	0.103772	10.983	136.890	Turbulento	Transición	41.751	835.028
	145	64911.452246	0.184951	0.026892928	0.254098	0.171	124.391	Turbulento	Transición	37.939	758.785
	149	226806.170456	0.023070	0.000171299	0.001619	0.171	100.801	Turbulento	Transición	30.744	614.886
	150	237557.147875	0.022920	0.000167616	0.001584	0.168	96.553	Turbulento	Transición	29.449	588.976
	151	248604.891706	0.020719	0.000103991	0.000983	0.104	97.040	Turbulento	Transición	29.597	591.943
	154	276970.322176	0.019478	7.68656E-05	0.000726	0.077	89.832	Turbulento	Transición	27.399	547.973
	155	284708.285854	0.020026	9.02083E-05	0.000852	0.090	86.188	Turbulento	Transición	26.287	525.746
	156	299920.614573	0.022771	0.000168474	0.001592	0.168	76.726	Turbulento	Transición	23.401	468.029
	157	310254.962798	0.018390	5.70491E-05	0.000539	0.057	82.533	Turbulento	Transición	25.172	503.450
	158	314880.417810	0.020043	9.29683E-05	0.000878	0.093	77.896	Turbulento	Transición	23.758	475.163
	159	320171.784628	0.018625	6.23585E-05	0.000589	0.062	79.471	Turbulento	Transición	24.239	484.772
	160	330274.326200	0.017037	3.49381E-05	0.000330	0.035	80.551	Turbulento	Transición	24.568	491.361
	161	325195.772647	0.017925	4.94959E-05	0.000468	0.049	79.755	Turbulento	Transición	24.325	486.503
	162	325195.772647	0.017605	4.38783E-05	0.000415	0.044	80.478	Turbulento	Transición	24.546	490.914
	163	324253.481988	0.017320	3.90565E-05	0.000369	0.039	81.372	Turbulento	Transición	24.818	496.368
	164	320484.672216	0.017730	4.57115E-05	0.000432	0.046	81.372	Turbulento	Transición	24.818	496.368
	165	320171.784628	0.016673	2.86857E-05	0.000271	0.029	83.994	Turbulento	Transición	25.618	512.361
	166	309028.364311	0.015731	1.49384E-05	0.000141	0.015	89.590	Turbulento	Transición	27.325	546.499
	167	304757.957002	0.014313	-1.15188E-06	-0.000011	-0.001	95.240	Turbulento	Transición	29.048	580.963
	168	284223.760600	0.018765	6.23111E-05	0.000589	0.062	89.188	Turbulento	Transición	27.202	544.048
	169	252414.028084	0.015649	8.17998E-06	0.000077	0.008	109.973	Turbulento	Transición	33.542	670.838
	170	224842.760493	0.023411	0.000182671	0.001726	0.183	100.937	Turbulento	Transición	30.786	615.713
	171	194922.324853	0.022224	0.000139383	0.001317	0.139	119.498	Turbulento	Transición	36.447	728.940
	174	215822.699710	0.028540	0.000402616	0.003804	0.403	95.240	Turbulento	Transición	29.048	580.963
	175	236950.336695	0.025127	0.000248224	0.002345	0.248	92.452	Turbulento	Transición	28.198	563.955
	176	260364.290697	0.018459	5.38992E-05	0.000509	0.054	98.163	Turbulento	Transición	29.940	598.795
	177	277275.946578	0.015394	7.8667E-06	0.000074	0.008	100.937	Turbulento	Transición	30.786	615.713
178	300824.118412	0.020124	9.38719E-05	0.000887	0.094	81.372	Turbulento	Transición	24.818	496.368	
179	311792.267989	0.013995	-3.50614E-06	-0.000033	-0.004	94.141	Turbulento	Transición	28.713	574.263	
180	317301.857667	0.018259	5.50719E-05	0.000520	0.055	80.989	Turbulento	Transición	24.702	494.035	
45	181	335717.212367	0.019829	8.92951E-05	0.000844	0.089	73.455	Turbulento	Transición	22.404	448.073
	182	313025.360408	0.021112	0.000120098	0.001135	0.120	76.348	Turbulento	Transición	23.286	465.722
	183	296322.714991	0.022709	0.000166221	0.001571	0.166	77.763	Turbulento	Transición	23.718	474.354
	184	264813.404186	0.022535	0.000158032	0.001493	0.158	87.351	Turbulento	Transición	26.642	532.842
	185	172226.2726	0.02229416	0.000137075	0.001295154	0.137	135.034	Turbulento	Transición	41.185	823.709

DATOS FINALES POLIETILENO												
# Medición	Día de recirculación	Re	f	Ks	Ks/d	ks	δ'	Flujo 1	Flujo 2	Estudio Biopelículas		
										0.305 δ' (μm)	6.1 δ'	
3	17	211589.2074	0.0274020	0.000309453	0.0029	0.3095	88.8027	Turbulento	Transición	27.085	541.697	
15		146482.8409	0.0167432	1.51159E-06	0.0000	0.0015	164.0989	Turbulento	Transición	50.050	1001.003	
19		126648.406	0.0156890	-1.97571E-05	-0.0002	-0.0198	196.0711	Turbulento	Transición	59.802	1196.034	
20		92205.59506	0.0208363	5.43991E-05	0.0005	0.0544	233.6919	Turbulento	Transición	71.276	1425.520	
64	18	178263.4397	0.0098446	-4.65721E-05	-0.0004	-0.0466	175.8528	Turbulento	Transición	53.635	1072.702	
65		183333.16	0.0112195	-3.86604E-05	-0.0004	-0.0387	160.1706	Turbulento	Transición	48.852	977.041	
66		184264.4524	0.0203701	7.66106E-05	0.0007	0.0766	118.2697	Turbulento	Transición	36.072	721.445	
67		189676.5491	0.0190832	5.06445E-05	0.0005	0.0506	118.7059	Turbulento	Transición	36.205	724.106	
68		192539.0696	0.0205727	8.26799E-05	0.0008	0.0827	112.6282	Turbulento	Transición	34.352	687.032	
69		197612.8969	0.0192267	5.4781E-05	0.0005	0.0548	113.5125	Turbulento	Transición	34.621	692.426	
70		198588.6705	0.0166627	1.25983E-05	0.0001	0.0126	121.3344	Turbulento	Transición	37.007	740.140	
71		199077.6799	0.0183346	3.85257E-05	0.0004	0.0385	115.3858	Turbulento	Transición	35.193	703.854	
72		198344.4465	0.0189562	4.96896E-05	0.0005	0.0497	113.8980	Turbulento	Transición	34.739	694.778	
78		212761.809	0.0131095	-2.10717E-05	-0.0002	-0.0211	127.6798	Turbulento	Transición	38.942	778.846	
79		211220.8796	0.0117877	-2.96868E-05	-0.0003	-0.0297	135.6312	Turbulento	Transición	41.368	827.350	
80		215348.2293	0.0105294	-3.51396E-05	-0.0003	-0.0351	140.7566	Turbulento	Transición	42.931	858.615	
91	23	208568.1471	0.0167338	1.52091E-05	0.0001	0.0152	115.2834	Turbulento	Transición	35.161	703.229	
92		217635.6597	0.0157932	4.65393E-06	0.0000	0.0047	113.7225	Turbulento	Transición	34.685	693.707	
93		215281.0471	0.0148382	-6.00917E-06	-0.0001	-0.0060	118.6081	Turbulento	Transición	36.175	723.509	
94		205767.8372	0.0151621	-4.24043E-06	0.0000	-0.0042	122.7594	Turbulento	Transición	37.442	748.832	
95		184442.5389	0.0104838	-4.20298E-05	-0.0004	-0.0420	164.6990	Turbulento	Transición	50.233	1004.664	
96		144825.4165	0.0138648	-3.17353E-05	-0.0003	-0.0317	182.3936	Turbulento	Transición	55.630	1112.601	
97		191632.2507	0.0122021	-3.11529E-05	-0.0003	-0.0312	146.9350	Turbulento	Transición	44.815	896.303	
98		201236.2299	0.0148138	-8.5955E-06	-0.0001	-0.0086	126.9905	Turbulento	Transición	38.732	774.642	
99		208568.1471	0.0146736	-8.70351E-06	-0.0001	-0.0087	123.1106	Turbulento	Transición	37.549	750.975	
100		212683.4885	0.0144751	-9.90634E-06	-0.0001	-0.0099	121.5533	Turbulento	Transición	37.074	741.475	
158	38-40	91396.03709	0.0304545	0.000423298	0.0040	0.4233	195.0107	Turbulento	Transición	59.478	1189.565	
210		235144.1957	0.0197465	7.03737E-05	0.0007	0.0704	94.1309	Turbulento	Transición	28.710	574.199	

1		216325.5728	0.0200106	7.36566E-05	0.0007	0.0737	101.6420	Turbulento	Transición	31.001	620.016
2		217635.6597	0.0200407	7.44797E-05	0.0007	0.0745	100.9542	Turbulento	Transición	30.791	615.821
3		210362.449	0.0212438	0.000101465	0.0010	0.1015	101.4441	Turbulento	Transición	30.940	618.809
4		215281.0471	0.0202053	7.77618E-05	0.0007	0.0778	101.6420	Turbulento	Transición	31.001	620.016
5		217373.2482	0.0202053	7.80387E-05	0.0007	0.0780	100.6637	Turbulento	Transición	30.702	614.049
6		215281.0471	0.0205210	8.48598E-05	0.0008	0.0849	100.8571	Turbulento	Transición	30.761	615.228
7		215281.0471	0.0210340	9.69639E-05	0.0009	0.0970	99.6196	Turbulento	Transición	30.384	607.679
8		216849.0166	0.0203420	8.10101E-05	0.0008	0.0810	100.5674	Turbulento	Transición	30.673	613.461
9		216325.5728	0.0209486	9.50364E-05	0.0009	0.0950	99.3404	Turbulento	Transición	30.299	605.976
10		215281.0471	0.0208367	9.22444E-05	0.0009	0.0922	100.0901	Turbulento	Transición	30.527	610.550
11		218187.3655	0.0199395	7.23768E-05	0.0007	0.0724	100.9542	Turbulento	Transición	30.791	615.821
12		215802.9165	0.0205397	8.53573E-05	0.0008	0.0854	100.5674	Turbulento	Transición	30.673	613.461
13		215281.0471	0.0211129	9.88894E-05	0.0009	0.0989	99.4332	Turbulento	Transición	30.327	606.542
14		211134.3671	0.0205554	8.50898E-05	0.0008	0.0851	102.7518	Turbulento	Transición	31.339	626.786
15		207292.3571	0.0203880	8.07347E-05	0.0008	0.0807	105.0849	Turbulento	Transición	32.051	641.018
16		198249.9913	0.0191259	5.29214E-05	0.0005	0.0529	113.4455	Turbulento	Transición	34.601	692.018
17		178581.3302	0.0166889	9.10983E-06	0.0001	0.0091	134.8223	Turbulento	Transición	41.121	822.416
18		102072.8285	0.0265071	0.000244839	0.0023	0.2448	187.1629	Turbulento	Transición	57.085	1141.694
19		136426.2413	0.0183957	2.46185E-05	0.0002	0.0246	168.0952	Turbulento	Transición	51.269	1025.381
20		155022.5293	0.0232122	0.000146045	0.0014	0.1460	131.6917	Turbulento	Transición	40.166	803.319
21		171702.7448	0.0235121	0.000158961	0.0015	0.1590	118.1377	Turbulento	Transición	36.032	720.640
22		191874.8608	0.0235974	0.000165162	0.0016	0.1652	105.5265	Turbulento	Transición	32.186	643.711
23		191389.8317	0.0221693	0.000122887	0.0012	0.1229	109.1482	Turbulento	Transición	33.290	665.804
24		173748.6682	0.0224164	0.000126652	0.0012	0.1267	119.5659	Turbulento	Transición	36.468	729.352
25		113595.5918	0.0226779	0.000116329	0.0011	0.1163	181.8227	Turbulento	Transición	55.456	1109.119
28		151017.2401	0.0291914	0.000381358	0.0036	0.3814	120.5473	Turbulento	Transición	36.767	735.339
29		176500.0797	0.0253043	0.000220875	0.0021	0.2209	110.7821	Turbulento	Transición	33.789	675.771
30		186820.0992	0.0216950	0.000109388	0.0010	0.1094	113.0337	Turbulento	Transición	34.475	689.506
31		193822.6281	0.0276045	0.000315911	0.0030	0.3159	96.5866	Turbulento	Transición	29.459	589.178
33		212424.8119	0.0248460	0.000209725	0.0020	0.2097	92.8919	Turbulento	Transición	28.332	566.641
34		215802.9165	0.0243491	0.000193007	0.0018	0.1930	92.3660	Turbulento	Transición	28.172	563.433
35		215281.0471	0.0237964	0.000174745	0.0017	0.1747	93.6590	Turbulento	Transición	28.566	571.320
36		215281.0471	0.0232045	0.000156244	0.0015	0.1562	94.8461	Turbulento	Transición	28.928	578.561
37		215541.8835	0.0235027	0.000165469	0.0016	0.1655	94.1285	Turbulento	Transición	28.709	574.184
38		213460.695	0.0229597	0.00014866	0.0014	0.1487	96.1635	Turbulento	Transición	29.330	586.597
39		209848.8146	0.0231048	0.000152532	0.0014	0.1525	97.5110	Turbulento	Transición	29.741	594.817
40		206529.2213	0.0228973	0.000145898	0.0014	0.1459	99.5262	Turbulento	Transición	30.356	607.110
41		200736.5922	0.0200621	7.2537E-05	0.0007	0.0725	109.3949	Turbulento	Transición	33.365	667.309
42		190422.0654	0.0171495	1.80199E-05	0.0002	0.0180	124.7294	Turbulento	Transición	38.042	760.849
43		184205.825	0.0073845	-5.50859E-05	-0.0005	-0.0551	196.4934	Turbulento	Transición	59.930	1198.610
44		119105.3403	0.0128927	-5.12481E-05	-0.0005	-0.0512	229.9896	Turbulento	Transición	70.147	1402.937
46		118205.6671	0.0251322	0.00019909	0.0019	0.1991	165.9807	Turbulento	Transición	50.624	1012.482
47		185153.8165	0.0209669	9.07439E-05	0.0009	0.0907	116.0144	Turbulento	Transición	35.384	707.688
48		153962.1736	0.0187493	3.64832E-05	0.0003	0.0365	147.5384	Turbulento	Transición	44.999	899.984
49		162791.4356	0.0309877	0.000475846	0.0045	0.4758	108.5388	Turbulento	Transición	33.104	662.087
50		127959.6598	0.0227872	0.000125323	0.0012	0.1253	161.0249	Turbulento	Transición	49.113	982.252

52	45	79583.25607	0.0187705	-2.12848E-06	0.0000	-0.0021	285.2670	Turbulento	Transición	87.006	1740.129
53		155660.9192	0.0236261	0.000159125	0.0015	0.1591	129.9978	Turbulento	Transición	39.649	792.987
55		169447.166	0.0263717	0.000260469	0.0025	0.2605	113.0337	Turbulento	Transición	34.475	689.506
58		162353.6135	0.0262285	0.000253383	0.0024	0.2534	118.2939	Turbulento	Transición	36.080	721.593
59		161262.268	0.0137144	-2.77627E-05	-0.0003	-0.0278	164.6990	Turbulento	Transición	50.233	1004.664
60		216587.1962	0.0168432	1.79253E-05	0.0002	0.0179	110.6538	Turbulento	Transición	33.749	674.988
1	46	244911.5434	0.0197871	7.22825E-05	0.0007	0.0723	90.2840	Turbulento	Transición	27.537	550.733
2		249712.7118	0.0190335	5.77793E-05	0.0005	0.0578	90.2840	Turbulento	Transición	27.537	550.733
3		232872.1615	0.0267395	0.00028401	0.0027	0.2840	81.6802	Turbulento	Transición	24.912	498.249
7		221488.339	0.0130655	-1.99594E-05	-0.0002	-0.0200	122.8563	Turbulento	Transición	37.471	749.424
8		227990.6185	0.0281313	0.000343345	0.0032	0.3433	81.3392	Turbulento	Transición	24.808	496.169
9		240758.0247	0.0224939	0.000138256	0.0013	0.1383	86.1387	Turbulento	Transición	26.272	525.446
	47	248506.9767	0.0227309	0.0001458	0.0014	0.1458	83.0165	Turbulento	Transición	25.320	506.400
		199917.0596	0.0173844	2.31996E-05	0.0002	0.0232	117.9999	Turbulento	Transición	35.990	719.800
		199431.1678	0.0188878	4.85779E-05	0.0005	0.0486	113.4821	Turbulento	Transición	34.612	692.241
		197494.956	0.0226491	0.000137359	0.0013	0.1374	104.6478	Turbulento	Transición	31.918	638.352
		198461.5917	0.0222653	0.000126639	0.0012	0.1266	105.0318	Turbulento	Transición	32.035	640.694
		195091.2079	0.0220247	0.000119526	0.0011	0.1195	107.4283	Turbulento	Transición	32.766	655.313
		186821.8435	0.0219392	0.00011587	0.0011	0.1159	112.4019	Turbulento	Transición	34.283	685.651
		179682.8596	0.0197726	6.26992E-05	0.0006	0.0627	123.1042	Turbulento	Transición	37.547	750.936
		158030.114	0.0205272	7.46611E-05	0.0007	0.0747	137.3747	Turbulento	Transición	41.899	837.986
		189867.302	0.0207491	8.63545E-05	0.0008	0.0864	113.7264	Turbulento	Transición	34.687	693.731
	197494.956	0.0214092	0.000103751	0.0010	0.1038	107.6355	Turbulento	Transición	32.829	656.577	

DATOS FINALES POLIETILENO											
# Medición	Días de recirculación							Estudio Biopelículas			
		Re	f	Ks	Ks/d	ks	δ'	Flujo 1	Flujo 2	0.305δ'	6.1δ'
1	17	323081.7555	0.021	0.000104884	0.001	0.105	73.072	Turbulento	Trancición	22.287	445.741
2		322126.3494	0.021	0.000107827	0.001	0.108	73.072	Turbulento	Trancición	22.287	445.741
3		321808.2657	0.021	0.000108822	0.001	0.109	73.072	Turbulento	Trancición	22.287	445.741
4		305224.1262	0.023	0.00016559	0.002	0.166	73.458	Turbulento	Trancición	22.405	448.092
5		294565.5622	0.024	0.000189173	0.002	0.189	74.885	Turbulento	Trancición	22.840	456.800
6		275382.7371	0.023	0.000166331	0.002	0.166	81.258	Turbulento	Trancición	24.784	495.675
7		253123.8841	0.023	0.000158158	0.001	0.158	88.801	Turbulento	Trancición	27.084	541.685
8		215711.2063	0.027	0.000301946	0.003	0.302	96.075	Turbulento	Trancición	29.303	585.058
9		190768.4023	0.028	0.00034756	0.003	0.348	106.490	Turbulento	Trancición	32.480	649.592
10		170031.4873	0.030	0.000448367	0.004	0.448	115.236	Turbulento	Trancición	35.147	702.942
11		140373.1512	0.035	0.000736588	0.007	0.737	129.502	Turbulento	Trancición	39.498	789.962
12		120806.3098	0.028	0.000298225	0.003	0.298	170.417	Turbulento	Trancición	51.977	1039.545
13		95127.00399	0.030	0.00038411	0.004	0.384	208.718	Turbulento	Trancición	63.659	1273.177
15		160311.3591	0.025	0.000218928	0.002	0.219	133.980	Turbulento	Trancición	40.864	817.277
16		184821.8667	0.027	0.000295351	0.003	0.295	112.251	Turbulento	Trancición	34.236	684.730
17		204688.1966	0.027	0.000282828	0.003	0.283	102.051	Turbulento	Trancición	31.126	622.513
18		217457.8007	0.026	0.00025904	0.002	0.259	97.212	Turbulento	Trancición	29.650	592.993
19		230185.4809	0.026	0.000261528	0.002	0.262	91.787	Turbulento	Trancición	27.995	559.903
20		244701.4509	0.025	0.000210006	0.002	0.210	88.801	Turbulento	Trancición	27.084	541.685
21		271067.8495	0.020	8.29861E-05	0.001	0.083	88.801	Turbulento	Trancición	27.084	541.685
22		18	257824.7257	0.022	0.000113865	0.001	0.114	90.380	Turbulento	Trancición	27.566
23	261082.0604		0.024	0.000200237	0.002	0.200	83.783	Turbulento	Trancición	25.554	511.075
24	246620.5336		0.026	0.000265702	0.003	0.266	85.563	Turbulento	Trancición	26.097	521.931
25	255936.1676		0.025	0.000216024	0.002	0.216	84.659	Turbulento	Trancición	25.821	516.418
26	243997.6891		0.026	0.000250261	0.002	0.250	87.135	Turbulento	Trancición	26.576	531.526
27	299768.2018		0.018	4.90422E-05	0.000	0.049	84.290	Turbulento	Trancición	25.709	514.172
28	148614.945		0.025	0.000221357	0.002	0.221	144.131	Turbulento	Trancición	43.960	879.197
29	163522.2045		0.041	0.001165233	0.011	1.165	103.234	Turbulento	Trancición	31.486	629.729
30	186542.6326		0.020	5.9051E-05	0.001	0.059	131.130	Turbulento	Trancición	39.995	799.891
31	200837.5402		0.020	7.51596E-05	0.001	0.075	119.830	Turbulento	Trancición	36.548	730.965
32	221405.2525		0.019	5.15858E-05	0.000	0.052	112.387	Turbulento	Trancición	34.278	685.562
33	233677.4308		0.020	7.51603E-05	0.001	0.075	103.504	Turbulento	Trancición	31.569	631.375
34	246881.7631		0.020	7.32148E-05	0.001	0.073	98.360	Turbulento	Trancición	30.000	599.997
35	262173.4084		0.020	8.54401E-05	0.001	0.085	91.482	Turbulento	Trancición	27.902	558.039
36	268555.2319		0.021	0.000101308	0.001	0.101	87.887	Turbulento	Trancición	26.806	536.113
37	278679.1769		0.023	0.000143055	0.001	0.143	81.704	Turbulento	Trancición	24.920	498.394
38	285845.1197		0.021	9.48483E-05	0.001	0.095	83.234	Turbulento	Trancición	25.386	507.727
39	295475.3547		0.021	9.41155E-05	0.001	0.094	80.643	Turbulento	Trancición	24.596	491.921
40	303200.8852		0.022	0.000118439	0.001	0.118	76.777	Turbulento	Trancición	23.417	468.342
41	22		275797.365	0.018	4.03307E-05	0.000	0.040	92.663	Turbulento	Trancición	28.26235447
42		281241.0018	0.016	1.55297E-05	0.000	0.016	95.811	Turbulento	Trancición	29.22238494	584.4476988
45		253640.7051	0.012	-2.26054E-05	0.000	-0.023	123.505	Turbulento	Trancición	37.66890581	753.3781162
46		251589.583	0.019	5.56406E-05	0.001	0.056	98.822	Turbulento	Trancición	30.14058869	602.8117739
47		213143.8621	0.015	-5.92685E-06	0.000	-0.006	131.494	Turbulento	Trancición	40.10565156	802.1130312
48		199999.4481	0.019	5.15893E-05	0.000	0.052	123.879	Turbulento	Trancición	37.78322749	755.6645497
49		183544.528	0.020	6.97368E-05	0.001	0.070	131.494	Turbulento	Trancición	40.10565156	802.1130312
50		233341.478	0.016	9.6322E-06	0.000	0.010	115.725	Turbulento	Trancición	35.29606796	705.5213592
51		233341.478	0.065	0.006694401	0.063	6.694	50.357	Turbulento	Trancición	15.35894454	307.1788907
52		293517.8202	0.022	0.000133024	0.001	0.133	78.270	Turbulento	Trancición	23.87232717	477.4465433
53		289829.7419	0.023	0.000170708	0.002	0.171	77.029	Turbulento	Trancición	23.49397791	469.8795581
54		277831.4405	0.023	0.000164377	0.002	0.164	80.662	Turbulento	Trancición	24.60203982	492.0407964
55		283932.2848	0.021	9.41285E-05	0.001	0.094	83.845	Turbulento	Trancición	25.57283404	511.4566809
56		276458.6365	0.021	9.12138E-05	0.001	0.091	86.325	Turbulento	Trancición	26.32923649	526.5847298
57		274540.9226	0.017	2.17327E-05	0.000	0.022	96.553	Turbulento	Trancición	29.44861416	588.5722833
58		272901.6697	0.015	1.73458E-06	0.000	0.002	102.613	Turbulento	Trancición	31.29688495	625.5376989
59		266682.9845	0.013	-1.21095E-05	0.000	-0.012	110.979	Turbulento	Trancición	33.84860177	676.5720353
60		241659.1756	0.014	-8.1072E-06	0.000	-0.008	118.664	Turbulento	Trancición	36.19242781	723.8485562
61		225808.0972	0.026	0.000263338	0.002	0.263	93.464	Turbulento	Trancición	28.50645682	570.1291363

d. Tabla de cálculos realizados con los testigos

Tablas de mediciones de testigos realizadas

- Mediciones Testigos Polietileno

Mediciones de testigos realizadas							
Testigos de Polietileno							
Día de Medición		22/05/2014	27/05/2014	28/05/2014	29/05/2014	03/06/2014	06/05/2014
Días Transcurridos		35	38	39	40	43	46
Testigo	Peso inicial(gr)						
Cabeza	63.3200	64.2849	64.2856	-	64.2949	64.2252	64.3852
1	38.2500	-	-	-	-	38.5469	
2	37.1500	-	-	-	-	37.6779	
3	35.6500	-	-	-	-	36.0159	
4	35.7500	-	-	-	-	36.1250	
5	35.1200	-	-	-	35.5707	35.4915	
6	35.0700	-	-	-	35.7550	35.4172	
7	35.9900	-	-	-	36.3579	36.2001	
8	34.7900	-	-	-	35.3810	35.1301	
9	37.1300	-	-	-	37.1974	37.2691	
10	36.3400	-	-	-	37.2645	36.6191	
11	34.3200	-	-	-	34.9380	34.5662	
12	34.3000	-	-	-	34.7181	34.5701	
13	35.1800	-	-	35.5331	-	-	35.6149
14	35.1500	-	-	35.7253	-	-	35.3645
15	35.6700	-	-	36.2749	-	-	36.0599
16	36.0100	-	-	36.6930	-	-	36.2680
17	34.0100	-	-	34.3895	-	-	34.2537
18	36.3500	-	36.9106	-	-	-	36.7343
19	35.8100	-	36.5250	-	-	-	36.1811
20	34.5000	-	35.2899	-	-	-	34.8412
21	35.6300	-	36.0523	-	-	-	35.9010
22	36.3300	-	37.1365	-	-	-	36.7757
23	35.6900	36.3070	-	-	-	-	35.9432
24	34.7600	35.3984	-	-	-	-	35.1465

- Mediciones Testigos Hierro Galvanizado

Mediciones de testigos realizadas							
Testigos de Hierro Galvanizado							
Día de medicón		22/05/2014	27/05/2014	28/05/2014	29/05/2014	03/06/2014	06/05/2014
Días Transcurridos		35	38	39	40	43	46
Testigo	Peso inicial(gr)						
Cabeza	223.42	224.6300	224.6500	-	224.7000	224.7034	224.7200
1	95.6316	-	-	-		95.9825	
2	96.7699	-	-	-	-	97.2418	
3	89.5085	-	-	-	-	89.9076	
4	91.6932	-	-	-	-	92.1719	
5	91.4125	-	-	-	91.7654	91.7466	
6	96.7445	-	-	-	97.2523	97.1960	
7	91.5751	-	-	-	91.6389	92.0370	
8	99.7335	-	-	-	100.4135	100.3524	
9	88.7652	-	-	-	89.5661	89.3648	
10	90.7514	-	-	-	91.1973	91.0339	
11	89.5372	-	-	-	90.1327	89.7806	
12	91.7182	-	-	-	92.2561	92.1560	
13	90.6755	-	-	91.5338	-		91.2206
14	94.3782	-	-	95.3008	-		94.7370
15	89.8129	-	-	90.1170	-		90.5262
16	89.4841	-	-	90.3024	-		90.0512
17	87.1214	-	-	88.1310	-		87.5734
18	92.1611	-	92.9115	-	-		92.7171
19	90.4915	-	91.3287	-	-		90.7690
20	98.2562	-	99.1248	-	-		98.5475
21	89.9836	-	90.6770	-	-		90.4005
22	98.3403	-	99.1675	-	-		98.8406
23	86.4573	87.1745	-	-	-		87.1896
24	94.8302	95.4925	-	-	-		95.4568

- Mediciones Testigos PVC

Mediciones de testigos realizadas							
PVC		22/05/2014	27/05/2014	28/05/2014	29/05/2014	03/06/2014	06/05/2014
Día de medición							
Días Transcurridos		35	38	39	40	43	46
Testigo	Peso inicial(gr)						
		-	-				
Cabeza	72.9751	73.7040	73.7587	-	73.8820	73.8823	73.8012
1	31.2389	-		-	-	31.5224	
2	30.0681	-	-	-	-	30.1634	
3	30.6822	-	-	-	-	31.2607	
4	29.8254	-	-	-	-	30.0297	
5	31.0336	-	-	-	31.2347	31.1657	
6	29.8599	-	-	-	30.4358	30.2778	
7	28.7945	-	-	-	29.1025	29.0688	
8	30.8067	-	-	-	31.3337	31.2307	
9	30.9797	-	-	-	31.1932	31.1570	
10	32.6797	-	-	-	32.8973	32.8041	
11	30.7291	-	-	-	30.9938	30.8771	
12	31.5033	-	-	-	31.6971	31.6372	
13	30.8493	-	-	30.9856	-		31.2355
14	29.7513	-	-	30.3282	-		29.8972
15	31.0112	-	-	31.5150	-		31.2445
16	32.0188	-	-	32.6498	-		32.3563
17	30.5714	-	-	30.9130	-		30.8164
18	30.0368	-	30.8101	-	-		30.2733
19	29.0827	-	29.4124	-	-		29.2525
20	30.0718	-	30.4539	-	-		30.2211
21	30.5590	-	31.0130	-	-		30.6343
22	31.4652	-	31.9583	-	-		31.7700
23	32.0494	32.7382	-	-	-		32.3650
24	31.4674	31.6209	-	-	-		31.5783

- Cálculos testigos Polietileno

Fecha de medición	# Testigo	Peso Inicial	Peso Medido	peso biomasa gr	espesor cm	espesor (mm)	espesor (µm)	Promedio Total	Promedio Testigos pares	Promedio testigos Impares																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
22/05/2014	23	35.6900	36.3070	0.6170	0.041029114	0.41029114	410.2911397	417.4063993	424.5216589	410.2911397																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	24	34.7600	35.3984	0.6384	0.042452166	0.424521659	424.5216589				27/05/2014	18	36.3500	36.9106	0.5606	0.037278641	0.372786407	372.7864066	424.8275486	455.9529305	378.1394758	19	35.8100	36.5250	0.7150	0.047545894	0.475458938	475.4589382	20	34.6000	35.2899	0.6899	0.0458768	0.458768002	458.768002	21	35.6300	36.0523	0.4223	0.028082001	0.280820013	280.8200134	28/05/2014	22	36.3300	37.1365	0.8065	0.053530438	0.536304383	536.3043827	345.2297376	418.3706167	296.4691514	13	35.1800	35.5331	0.3531	0.023480357	0.234803568	234.8035679	14	35.1500	35.7253	0.5753	0.038256158	0.382561576	382.5615764	15	35.6700	36.2749	0.6049	0.040224491	0.402244911	402.2449115	16	36.0100	36.6930	0.6830	0.045417966	0.454179657	454.179657	29/05/2014	17	34.0100	34.3895	0.3795	0.025235897	0.252358975	252.3589749	342.6795487	435.3275439	250.0315535	5	35.1200	35.5707	0.4507	0.029970538	0.299705375	299.7053754	6	35.0700	35.7550	0.6850	0.045550961	0.455509612	455.5096121	7	35.9900	36.3579	0.3679	0.024464524	0.244645235	244.6452355	8	34.7900	35.3810	0.5910	0.039300172	0.393001724	393.0017237	9	37.1300	37.1974	0.0674	0.004481949	0.044819486	44.81948592	10	36.3400	37.2645	0.9245	0.061477173	0.614771732	614.771732	11	34.3200	34.9380	0.6180	0.04195612	0.410956117	410.9561172	03/06/2014	12	34.3000	34.7181	0.4181	0.027802711	0.278027108	278.0271078	208.8639026	237.1088234	180.6189817	1	38.2500	38.5469	0.2969	0.019743183	0.19743183	197.4318304	2	37.1500	37.6779	0.5279	0.035104164	0.351041641	351.0416412	3	35.6500	36.0159	0.3659	0.024331528	0.24331528	243.3152804	4	35.7500	36.1250	0.3750	0.024936658	0.249366576	249.366576	5	35.1200	35.4915	0.3715	0.024703915	0.247039155	247.0391546	6	35.0700	35.4172	0.3472	0.02308802	0.2308802	230.8802005	7	35.9900	36.2001	0.2101	0.013971178	0.13971178	139.7117803	8	34.7900	35.1301	0.3401	0.022515886	0.22515886	225.15886	9	37.1300	37.2691	0.1391	0.009249838	0.092498375	92.49837525	10	36.3400	36.6191	0.2791	0.018559523	0.18559523	185.5952303	11	34.3200	34.5662	0.2462	0.016371747	0.163717469	163.7174693	06/05/2014	12	34.3000	34.5701	0.2701	0.017961043	0.179610432	179.6104325	215.7852104	213.9232733	217.6471475	13	35.1800	35.6149	0.4349	0.028919873	0.28919873	289.1987304	14	35.1500	35.3645	0.2145	0.014263768	0.142637681	142.6376815	15	35.6700	36.0599	0.3899	0.025927474	0.259274741	259.2747413	16	36.0100	36.2680	0.2580	0.01715642	0.171564204	171.5642043	17	34.0100	34.2537	0.2437	0.016205503	0.162055026	162.0550255	18	36.3500	36.7343	0.3843	0.025555087	0.255550867	255.5508671	19	35.8100	36.1811	0.3711	0.024677316	0.246773164	246.7731636	20	34.6000	34.8412	0.2412	0.016039258	0.160392582	160.3925817	21	35.6300	35.9010	0.2710	0.018020891	0.180208912	180.2089122	22	36.3300	36.7757	0.4457	0.029538049	0.296380488	296.3804878	23	35.6900	35.9432	0.2532	0.016837231	0.168372312	168.3723121	24	34.7600	35.1465
27/05/2014	18	36.3500	36.9106	0.5606	0.037278641	0.372786407	372.7864066	424.8275486	455.9529305	378.1394758																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	19	35.8100	36.5250	0.7150	0.047545894	0.475458938	475.4589382																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	20	34.6000	35.2899	0.6899	0.0458768	0.458768002	458.768002																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	21	35.6300	36.0523	0.4223	0.028082001	0.280820013	280.8200134																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
28/05/2014	22	36.3300	37.1365	0.8065	0.053530438	0.536304383	536.3043827	345.2297376	418.3706167	296.4691514																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	13	35.1800	35.5331	0.3531	0.023480357	0.234803568	234.8035679																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	14	35.1500	35.7253	0.5753	0.038256158	0.382561576	382.5615764																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	15	35.6700	36.2749	0.6049	0.040224491	0.402244911	402.2449115																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	16	36.0100	36.6930	0.6830	0.045417966	0.454179657	454.179657																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
29/05/2014	17	34.0100	34.3895	0.3795	0.025235897	0.252358975	252.3589749	342.6795487	435.3275439	250.0315535																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	5	35.1200	35.5707	0.4507	0.029970538	0.299705375	299.7053754																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	6	35.0700	35.7550	0.6850	0.045550961	0.455509612	455.5096121																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	7	35.9900	36.3579	0.3679	0.024464524	0.244645235	244.6452355																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	8	34.7900	35.3810	0.5910	0.039300172	0.393001724	393.0017237																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	9	37.1300	37.1974	0.0674	0.004481949	0.044819486	44.81948592																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	10	36.3400	37.2645	0.9245	0.061477173	0.614771732	614.771732																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	11	34.3200	34.9380	0.6180	0.04195612	0.410956117	410.9561172																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
03/06/2014	12	34.3000	34.7181	0.4181	0.027802711	0.278027108	278.0271078	208.8639026	237.1088234	180.6189817																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	1	38.2500	38.5469	0.2969	0.019743183	0.19743183	197.4318304																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	2	37.1500	37.6779	0.5279	0.035104164	0.351041641	351.0416412																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	3	35.6500	36.0159	0.3659	0.024331528	0.24331528	243.3152804																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	4	35.7500	36.1250	0.3750	0.024936658	0.249366576	249.366576																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	5	35.1200	35.4915	0.3715	0.024703915	0.247039155	247.0391546																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	6	35.0700	35.4172	0.3472	0.02308802	0.2308802	230.8802005																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	7	35.9900	36.2001	0.2101	0.013971178	0.13971178	139.7117803																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	8	34.7900	35.1301	0.3401	0.022515886	0.22515886	225.15886																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	9	37.1300	37.2691	0.1391	0.009249838	0.092498375	92.49837525																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	10	36.3400	36.6191	0.2791	0.018559523	0.18559523	185.5952303																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	11	34.3200	34.5662	0.2462	0.016371747	0.163717469	163.7174693																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
06/05/2014	12	34.3000	34.5701	0.2701	0.017961043	0.179610432	179.6104325	215.7852104	213.9232733	217.6471475																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
	13	35.1800	35.6149	0.4349	0.028919873	0.28919873	289.1987304																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	14	35.1500	35.3645	0.2145	0.014263768	0.142637681	142.6376815																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	15	35.6700	36.0599	0.3899	0.025927474	0.259274741	259.2747413																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	16	36.0100	36.2680	0.2580	0.01715642	0.171564204	171.5642043																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	17	34.0100	34.2537	0.2437	0.016205503	0.162055026	162.0550255																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	18	36.3500	36.7343	0.3843	0.025555087	0.255550867	255.5508671																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	19	35.8100	36.1811	0.3711	0.024677316	0.246773164	246.7731636																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	20	34.6000	34.8412	0.2412	0.016039258	0.160392582	160.3925817																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	21	35.6300	35.9010	0.2710	0.018020891	0.180208912	180.2089122																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	22	36.3300	36.7757	0.4457	0.029538049	0.296380488	296.3804878																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
	23	35.6900	35.9432	0.2532	0.016837231	0.168372312	168.3723121																																																																																																																																																																																																																																																																																																																									
24	34.7600	35.1465	0.3865	0.025701382	0.257013818	257.0138176																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										

- Cálculos testigos Hierro Galvanizado

Fecha de medición	# Testigo	Peso Inicial	Peso Medido	peso biomasa gr	espesor cm	espesor mm	espesor (µm)	Promedio Total	Promedio Testigos pares	Promedio testigos Impares
22/05/2014	23	86.4573	87.1745	0.7172	0.039698793	0.396987927	396.9879267	381.7936732	366.5994198	396.9879267
	24	94.8302	95.4925	0.6623	0.036659942	0.36659942	366.5994198			
27/05/2014	18	92.1611	92.9115	0.7504	0.041536495	0.415364947	415.3649473	440.2514186	451.3440539	423.6124656
	19	90.4915	91.3287	0.8372	0.046341089	0.463410893	463.4108927			
	20	98.2562	99.1248	0.8686	0.048079157	0.480791569	480.7915688			
	21	89.9836	90.6770	0.6934	0.038381404	0.383814038	383.8140385			
	22	98.3403	99.1675	0.8272	0.045787565	0.457875646	457.8756455			
28/05/2014	13	90.6755	91.5338	0.8583	0.047509026	0.475090264	475.0902642	433.1773727	481.8155895	400.7518948
	14	94.3782	95.3008	0.9226	0.05106819	0.510681903	510.6819035			
	15	89.8129	90.1170	0.3041	0.016832687	0.168326866	168.3268663			
	16	89.4841	90.3024	0.8183	0.045294928	0.452949276	452.9492756			
29/05/2014	17	87.1214	88.1310	1.0096	0.055883855	0.558838554	558.8385538	275.7037423	300.5085686	250.8989159
	5	91.4125	91.7654	0.3529	0.019533887	0.195338872	195.3388725			
	6	96.7445	97.2523	0.5078	0.028107985	0.281079851	281.0798511			
	7	91.5751	91.6389	0.0638	0.003531488	0.035314877	35.31487692			
	8	99.7335	100.4135	0.6800	0.037639681	0.376396807	376.3968073			
	9	88.7652	89.5661	0.8009	0.044331795	0.443317945	443.3179455			
	10	90.7514	91.1973	0.4459	0.024681667	0.246816671	246.8166711			
	11	89.5372	90.1327	0.5955	0.032962397	0.329623969	329.6239687			
03/06/2014	12	91.7182	92.2561	0.5379	0.029774095	0.297740945	297.740945	236.6456544	252.8962176	220.3950913
	1	95.6316	95.9825	0.3509	0.019423182	0.194231823	194.231823			
	2	96.7699	97.2418	0.4719	0.026120831	0.261208314	261.2083137			
	3	89.5085	89.9076	0.3991	0.022091171	0.220911714	220.9117144			
	4	91.6932	92.1719	0.4787	0.026497228	0.264972282	264.9722818			
	5	91.4125	91.7466	0.3341	0.018493261	0.184932608	184.9326078			
	6	96.7445	97.1960	0.4515	0.024991641	0.24991641	249.9164095			
	7	91.5751	92.0370	0.4619	0.025567307	0.255673067	255.6730666			
	8	99.7335	100.3524	0.6189	0.034257645	0.342576447	342.5764471			
	9	88.7652	89.3648	0.5996	0.033189342	0.33189342	331.89342			
	10	90.7514	91.0339	0.2825	0.015637073	0.156370732	156.3707324			
	11	89.5372	89.7806	0.2434	0.013472792	0.134727915	134.727916			
06/05/2014	12	91.7182	92.1560	0.4378	0.024233312	0.242333121	242.3331209	278.4782849	267.5461717	289.4103981
	13	90.6755	91.2206	0.5451	0.030172632	0.301726323	301.726323			
	14	94.3782	94.7370	0.3588	0.019860467	0.198604668	198.6046683			
	15	89.8129	90.5262	0.7133	0.039482918	0.39482918	394.8291803			
	16	89.4841	90.0512	0.5671	0.031390387	0.313903867	313.9038668			
	17	87.1214	87.5734	0.4520	0.025019317	0.250193172	250.1931719			
	18	92.1611	92.7171	0.5560	0.030775974	0.307759742	307.7597424			
	19	90.4915	90.7690	0.2775	0.015360311	0.153603109	153.6031088			
	20	98.2562	98.5475	0.2913	0.016124175	0.16124175	161.2417499			
	21	89.9836	90.4005	0.4169	0.023076445	0.230764454	230.7644543			
	22	98.3403	98.8406	0.5003	0.027692842	0.276928415	276.9284157			
23	86.4573	87.1896	0.7323	0.040534615	0.40534615	405.3461499				
24	94.8302	95.4568	0.6266	0.034683859	0.346838587	346.8385874				

- Cálculos testigos PVC

Fecha de medición	# Testigo	Peso Inicial	Peso Medido	peso biomasa gr	espesor cm	espesor mm	espesor (µm)	Promedio Total	Promedic Testigos pares	Promedio testigos Impares
22/05/2014	23	32.0494	32.7382	0.6888	0.026109144	0.261091442	261.0914422	341.3034652	421.5154883	261.0914422
	24	31.6209	32.7382	1.1173	0.042351549	0.423515488	423.5154883			
	18	30.0368	30.8101	0.7733	0.029312139	0.293121388	293.1213883			
27/05/2014	19	29.0827	29.4124	0.3297	0.012497365	0.124973648	124.9736476	184.3863547	208.2894127	148.5317677
	20	30.0718	30.4539	0.3821	0.01444836	0.144836005	144.8360047			
	21	30.5590	31.0130	0.4540	0.017208989	0.172089888	172.0898878			
	22	31.4652	31.9583	0.4931	0.018691085	0.186910845	186.9108451			
28/05/2014	13	30.8493	30.9856	0.1363	0.005166487	0.051664872	51.66487162	165.9947218	228.9288277	124.0386512
	14	29.7513	30.3282	0.5769	0.021867545	0.218675454	218.6754544			
	15	31.0112	31.5150	0.5038	0.019096671	0.190966708	190.9667081			
	16	32.0188	32.6498	0.6310	0.02391822	0.239182201	239.1822009			
	17	30.5714	30.9130	0.3416	0.012948437	0.129484374	129.4843738			
29/05/2014	5	31.0336	31.2347	0.2011	0.007622748	0.076227481	76.22748116	118.5297531	141.4998443	93.55966204
	6	29.8599	30.4358	0.5759	0.02182964	0.218296402	218.2964018			
	7	28.7945	29.1025	0.3080	0.011674821	0.116748206	116.7482059			
	8	30.8067	31.3337	0.5270	0.019976073	0.199760729	199.7607288			
	9	30.9797	31.1932	0.2135	0.008092773	0.080927734	80.9277336			
	10	32.6797	32.8973	0.2176	0.008248185	0.082481849	82.48184933			
	11	30.7291	30.9938	0.2647	0.010033523	0.100335228	100.3352276			
03/06/2014	12	31.5033	31.6971	0.1938	0.00734604	0.073460397	73.46039706	94.55783393	88.43297541	100.6826925
	1	31.2389	31.5224	0.2835	0.010746142	0.107461417	107.4614167			
	2	30.0681	30.1634	0.0953	0.003612371	0.036123714	36.12371434			
	3	30.6822	31.2607	0.5785	0.021928194	0.219281939	219.2819386			
	4	29.8254	30.0297	0.2043	0.007744045	0.07744045	77.44044953			
	5	31.0336	31.1657	0.1321	0.005007285	0.050072851	50.07285063			
	6	29.8599	30.2778	0.4179	0.015840609	0.158406088	158.4060884			
	7	28.7945	29.0688	0.2743	0.010397413	0.103974133	103.9741327			
	8	30.8067	31.2307	0.4240	0.016071831	0.160718309	160.7183094			
	9	30.9797	31.1570	0.1773	0.006720603	0.067206029	67.20602889			
	10	32.6797	32.8041	0.1244	0.004715415	0.047154145	47.15414548			
	11	30.7291	30.8771	0.1480	0.00609979	0.06099787	56.09978723			
06/05/2014	12	31.5033	31.6372	0.1339	0.005075515	0.050755145	50.75514534	85.50587464	81.1741178	90.03763148
	13	30.8493	31.2355	0.3862	0.014639012	0.14639012	146.3901205			
	14	29.7513	29.8972	0.1459	0.005530378	0.055303777	55.30377673			
	15	31.0112	31.2445	0.2333	0.008843298	0.088432975	88.43297541			
	16	32.0188	32.3563	0.3375	0.012793026	0.127930258	127.930258			
	17	30.5714	30.8164	0.2450	0.009286789	0.092867891	92.86789102			
	18	30.0368	30.2733	0.2365	0.008964594	0.089645944	89.64594378			
	19	29.0827	29.2525	0.1698	0.006436313	0.064363134	64.36313426			
	20	30.0718	30.2211	0.1493	0.00659256	0.06592556	56.59255563			
	21	30.5590	30.6343	0.0753	0.002854266	0.028542662	28.54266201			
	22	31.4652	31.7700	0.3048	0.011553524	0.115535237	115.5352375			
	23	32.0494	32.3650	0.3156	0.011962901	0.119629006	119.6290057			
	24	31.4674	31.5783	0.1109	0.004203694	0.042036935	42.03693516			

e. Mediciones realizadas de temperatura

TEMPERATURA (°C)											
Hora de medición	horas recirculación	21/04/2014	28/04/2014	29/04/2014	30/04/2014	05/05/2014	06/05/2014	09/05/2014	27/05/2014	29/05/2014	04/06/2014
7:30:00 a. m.	0.00	16.10	16.40	17.10	17.60	17.20	15.15	16.50	17.30	17.60	16.90
8:30:00 a. m.	1.00	18.50	16.70	18.15	22.10	19.10	15.80	18.80	22.20	21.17	18.60
9:30:00 a. m.	2.00	19.03	22.50	19.32	23.10	20.03	19.40	20.40	23.20	21.16	19.07
10:30:00 a. m.	3.00	20.08	23.50	20.80	23.90	21.00	21.86	21.00	23.30	22.70	-
11:30:00 a. m.	4.00	21.30	24.10	21.10	24.60	22.78	22.70	21.50	24.00	23.40	-
12:30:00 p. m.	5.00	22.70	25.30	21.30	23.10	-	23.10	-	24.80	24.40	-
1:30:00 p. m.	6.00	24.20	25.70	21.60	23.80	-	24.80	-	24.80	24.60	-
2:30:00 p. m.	7.00	25.10	26.20	22.40	24.57	-	24.90	-	26.40	-	-
3:30:00 p. m.	8.00	25.60	27.10	23.60	25.43	-	25.41	-	27.00	-	-
4:30:00 p. m.	9.00	26.40	27.30	23.80	25.80	-	25.72	-	27.10	-	24.10
5:00:00 p. m.	9.50	26.80	27.80	24.10	26.22	-	26.20	-	27.60	-	24.20
Promedio de temperatura diaria		22.3	23.9	21.2	22.3	19.3	22.5	19.6	24.3	22.1	20.6