

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

REGLAS DE OPERACIÓN PARA EL DESPRENDIMIENTO DE BIOPELÍCULAS  
EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE



Presentado por:  
María Alejandra Escovar Bernal

Asesor:  
Ingeniero Juan Guillermo Saldañaga Valderrama

Bogotá, Colombia

Junio de 2009



*Dedicada a mis padres  
por ser mi ejemplo y apoyo constante.*





## RESUMEN

El siguiente documento, presentado como proyecto de grado de Ingeniería Civil, es la recopilación del estado del arte de los lavados de redes de distribución de agua potable con el fin de remover biopelículas adheridas a la superficie de la tubería, para luego proponer reglas de operación para asegurar la eficacia de los lavados hidráulicos.

El proyecto se divide en el estudio microbiológico y físico de las biopelículas, así como los mecanismos para lograr su desprendimiento; luego se evalúan las redes de distribución de agua potable desde su configuración hasta los criterios típicos de diseño. Más adelante se explican los métodos de lavados hidráulicos de tuberías y se proponen las reglas de operación de lavados hidráulicos convencionales y lavados hidráulicos unidireccionales. Por último se hace una evaluación de diferentes estudios de caso a nivel nacional e internacional.

Se encontró que evaluar la presencia de biopelículas en redes de distribución de agua potable, al igual que controlar su crecimiento, es importante para mantener la calidad del agua que circula por la red. Además, los criterios de diseño basados en el concepto de autolimpieza (velocidad mínima y esfuerzo cortante mínimo) no son siempre suficientes para evitar el crecimiento de biopelículas, por lo que se hace necesaria la implementación de un programa de lavado hidráulico en la red de distribución de agua potable. La optimización de dicho programa y la selección de la ruta de lavado se debe hacer con el análisis histórico de parámetros como la velocidad durante el lavado, la duración y frecuencia del mismo.



## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>8</b>
2.1. General.....	8
2.2. Específicos .....	8
<b>3. BIOPELÍCULAS.....</b>	<b>10</b>
3.1. Definición.....	10
3.2. Crecimiento de Biopelículas.....	11
3.2.1. Factores que afectan el crecimiento.....	12
3.3. Sustancia polimérica extracelular, SPE .....	13
3.4. Biopelículas en redes de distribución de agua potable .....	14
3.5. Mecanismos de desprendimiento.....	16
3.5.1. Desprendimiento de biopelículas por aumento del esfuerzo cortante .....	16
3.5.2. Desprendimiento de biopelículas por disminución de la fuerza interna .....	17
<b>4. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE.....</b>	<b>18</b>
4.1. Diseño y Operación de redes de distribución de agua potable .....	18
4.1.1. Configuración de la red.....	19
4.1.2. Velocidad de autolimpieza y esfuerzo cortante.....	21
4.1.3. Zonas potenciales para el crecimiento de biopelículas .....	21
4.2. Componentes de la red.....	22
4.2.1. Tuberías.....	22
4.2.2. Válvulas.....	23
4.2.3. Hidrantes.....	25
4.2.4. Accesorios para el lavado de las tuberías .....	27
<b>5. LAVADO HIDRÁULICO DE TUBERÍAS .....</b>	<b>28</b>
5.1. Lavado reactivo vs. Lavado preventivo.....	28
5.2. Lavados con flujo a presión .....	30
5.2.1. Lavado Convencional.....	30
5.2.2. Lavado Unidireccional.....	31
5.3. Efectos en la calidad del agua.....	33
<b>6. REGLAS DE OPERACIÓN PARA EL DESPRENDIMIENTO DE BIOPELICULAS .....</b>	<b>36</b>
6.1. Requisitos técnicos .....	36
6.1.1. Velocidades .....	38
6.1.2. Longitudes de tuberías.....	41



REGLAS DE OPERACIÓN PARA EL DESPRENDIMIENTO DE BIOPELICULAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

---

6.1.3.	Válvulas e hidrantes .....	42
6.1.4.	Materiales de tuberías.....	42
6.1.5.	Tiempos de lavado .....	44
6.1.6.	Frecuencia de lavado .....	46
6.2.	¿Cómo seleccionar la ruta de lavado adecuada?.....	47
6.3.	Programas de lavado unidireccional.....	48
6.4.	Evaluación de los resultados .....	53
6.5.	Estrategias a largo plazo luego de realizado el lavado.....	55
6.5.1.	Técnicas de control de crecimiento de biopelículas .....	56
<b>7.</b>	<b>Experiencia .....</b>	<b>59</b>
7.1.	Exterior .....	59
7.2.	Colombia .....	62
<b>8.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>65</b>
<b>9.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>67</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4 -1 Tipo de tubería según diámetro nominal.....	22
Tabla 4-2 Clasificación de hidrantes según su capacidad .....	26
Tabla 5-3 Tabla comparativa entre lavado hidráulico convencional y lavado hidráulico unidireccional.....	33
Tabla 5-4 Beneficios primarios de los lavados hidráulicos.....	34
Tabla 6-5 Velocidad mínima de remoción, AWWA.....	38
Tabla 6-6 Velocidad mínima para la remoción de biopelículas según diferentes autores.....	39
Tabla 6-7 Velocidad mínima para remover partículas de 0.2mm de diámetro, según la densidad relativa.....	40
Tabla 6-8 Valores de rugosidad absoluta.....	43
Tabla 6-9 Metodologías para la medición de los resultados de los lavados.....	54
Tabla 7-10 Experiencia internacional.....	60
Tabla 7-11 Frecuencias de lavado para proyectos en Colombia.....	62
Tabla 7-12 Características físicas del agua potable en Colombia .....	63
Tabla 7-13 Características químicas del agua potable en Colombia .....	63
Tabla 7-14 Características microbiológicas del agua potable en Colombia .....	64

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 3-1 Esquema general de una biopelícula.....	11
Imagen 4-2 Esquema Red en Circuitos Arteriales.....	19
Imagen 4-3 Esquema Red en Malla .....	20
Imagen 4-4 Esquema de Red en Árbol.....	20
Imagen 5-5 Lavado Hidráulico Convencional.....	31
Imagen 5-6 Lavado Hidráulico Unidireccional.....	32
Imagen 5-7 Principales causas de quejas de usuarios en California, Estados Unidos.....	35
Imagen 6-8 Curva diaria de consumo de agua potable .....	37
Imagen 6-9 Calidad del agua de lavado en Portsmouth, Virginia, Estados Unidos .....	37
Imagen 6-10 Crecimiento de biopelículas en tuberías de diferentes materiales.....	44
Imagen 6-11 Perfiles de turbiedad durante lavados hidráulicos.....	45
Imagen 6-12 Formación de la biopelícula en polipropileno bajo diferentes velocidades de flujo .....	47
Imagen 6-13 Diagrama de flujo para lavado hidráulico de tuberías .....	52
Imagen 6-14 Control del riesgo de coloración del agua .....	55
Imagen 6-15 Metodologías para el control del crecimiento de biopelículas .....	56
Imagen 6-16 Métodos de limpieza de tuberías .....	58
Imagen 7-17 Lavados hidráulicos en London, Canadá.....	59



## 1. INTRODUCCIÓN

El control a la calidad de agua potable es indispensable para evitar problemas en salud pública ó reclamos de parte de los clientes de las empresas de servicios públicos. Cuando el agua sale de la planta de tratamiento, debe cumplir con todos los requisitos técnicos de calidad de agua definidos por norma, pero esa misma calidad no se alcanza cuando el agua sale por la llave del usuario. Cambios en la concentración del desinfectante residual, corrosión de las tuberías, infiltraciones, ingreso de contaminantes por reparaciones y crecimiento de películas biológicas, entre otros, son la causa del deterioro de la calidad del agua potable en los sistemas de distribución.

Las biopelículas, o agrupaciones de microorganismos, suelen ser más comunes en sistemas de distribución de agua potable de lo que se puede imaginar. Las condiciones ambientales son ideales para el crecimiento de estas poblaciones, ya que se cuenta con suministro de agua y nutrientes constantes, al pH ideal para su crecimiento y se adaptan fácilmente a condiciones de temperatura de este tipo de entorno.

Por supuesto, es muy importante controlar el crecimiento de las biopelículas en las tuberías ya que se conoce la correlación entre la presencia de biopelículas y los eventos de deterioro de calidad del agua suministrada. Sin embargo, el desarrollo de las biopelículas es inevitable por lo que hay que contar con programas de lavado de tuberías que permitan remover las películas biológicas del sistema y cualquier tipo de contaminación que deteriore el agua potable.

El lavado de tuberías se puede hacer con mecanismos diferentes, lavados mecánicos o lavados hidráulicos. Al momento de seleccionar el método de lavado, se debe evaluar el alcance de cada uno y los objetivos que se buscan cumplir. Los lavados hidráulicos se recomiendan para la remoción de sedimentos y el desprendimiento de biopelículas mientras que los lavados mecánicos son utilizados para la eliminación de incrustaciones de mayor tamaño.

Esta investigación se basa en los lavados hidráulicos como mecanismo para favorecer el desprendimiento de biopelículas en redes de distribución de agua potable. Mediante el análisis del estado del arte referente a este tema, se pretende llegar a proponer reglas de operación para asegurar la eficacia de los lavados hidráulicos.

Para comenzar, se revisará la teoría sobre biopelículas, su crecimiento y mecanismos de desprendimiento en redes de agua potable. Luego, se analizarán los criterios de diseño de las redes de distribución de agua potable y los elementos que la componen. Los siguientes capítulos se concentran en la necesidad del lavado del sistema y los pasos que se deben seguir para lograr un lavado eficiente y efectivo. Por último, se estudiarán diferentes casos de estudio tanto en Colombia como en diferentes ciudades del mundo que ya han implementado este tipo de mantenimiento en sus redes de distribución.



## 2. OBJETIVOS

### 2.1. General

El propósito de este trabajo es proponer alternativas en cuanto a las reglas de operación que se deben cumplir para optimizar los procesos de lavado hidráulico, como método para lograr el desprendimiento de biopelículas en redes de distribución de agua potable; con esto evitar problemas de coloración del agua potable, disminuir los riesgos de salud pública por contaminación del agua con microorganismos patógenos, reducir los costos asociados de la operación de la red con las tuberías en mal estado y mejorar el servicio que recibe el cliente.

Para cumplir este objetivo se debe investigar el estado del arte de los lavados hidráulicos de tuberías que conforman una red de distribución de agua potable; haciendo énfasis en los procesos de crecimiento y desprendimiento de biopelículas, el análisis hidráulico de la red y los requisitos técnicos, ventajas y desventajas de cada método; teniendo en cuenta las características específicas de cada red de acueducto.

En el caso de Colombia, se busca crear la conciencia de incluir dentro de los procesos de mantenimiento preventivo los lavados hidráulicos y llamar la atención sobre todos los beneficios que se pueden obtener al realizar periódicamente estos procedimientos: lograr la satisfacción del cliente.

De la misma manera, se busca plantear inquietudes relacionadas con un sin número de temas sobre la operación y mantenimiento de redes de agua potable del país, que puedan ser base para futuras investigaciones en las cuales se pueda evaluar las relaciones beneficio/costo de la aplicación de los lavados rutinarios en las tuberías bajo las condiciones típicas de diseño, construcción y operación de las redes de acueducto en Colombia.

### 2.2. Específicos

Con el fin de alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos para cada tema que se va incluir en la investigación.

- Conocer los procesos de formación, crecimiento y desprendimiento de biopelículas en sistemas de distribución de agua potable. Investigar sobre el tipo de biopelícula que crece bajo condiciones típicas de las redes de acueducto y metodologías para facilitar su desprendimiento de la superficie interna de la tubería.
- Describir los sistemas de lavado con flujo a presión que son ampliamente utilizados en diferentes partes del mundo. Así como conocer qué requisitos técnicos se necesitan para lograr la mayor eficiencia de lavado, maximizando el desprendimiento de las biopelículas con la mínima interferencia con la operación normal de la red.



REGLAS DE OPERACIÓN PARA EL DESPRENDIMIENTO DE BIOPELICULAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

---

- Evaluar el lavado de tuberías reactivo frente al lavado preventivo. En este punto se desea enfatizar en la importancia de incluir lavados preventivos rutinarios para disminuir los riesgos de deterioro de la calidad del agua potable que le llega al cliente y mantener la infraestructura de la red en óptimas condiciones.
- Comparar los efectos en la calidad del agua antes y después de un lavado hidráulico, con el fin de evaluar los efectos del lavado hidráulico de la red en las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del agua potable.
- Definir procesos de operación para evitar el crecimiento de biopelículas en las redes de distribución de agua potable, que sean viables y se puedan aplicar en las redes de acueducto de Colombia. Con esto se busca incluir diferentes alternativas de operación, para minimizar la contaminación del interior de la red y de esta forma disminuir la frecuencia de ejecución de los lavados hidráulicos.
- Analizar la experiencia que se tiene tanto en el exterior como en Colombia, en cuanto a las metodologías de aplicación de los lavados hidráulicos, efectos en la calidad del agua, impactos en la operación de la red y evaluación de la satisfacción del cliente y prestación del servicio.



### 3. BIOPELÍCULAS

Al estar enterradas, poca atención se le presta al estado real de las tuberías de redes de distribución de agua potable. Solo se notan cambios cuando se puede identificar deterioro en la calidad del agua, que se presentan como mal olor, sabor desagradable y coloración del agua. La causa de estos cambios puede ser la formación de biopelículas en las superficies internas de las tuberías. Las biopelículas son grupos de microorganismos que se unen para sobrevivir de mejor forma la agresividad del entorno.

Es importante analizar estas biopelículas, ya que se puede identificar la presencia de microorganismos patógenos que pueden poner en riesgo la salud pública, pero en mayor medida para mantener la buena calidad estética del agua que consumen en un municipio.

#### 3.1. Definición

Las biopelículas son conglomerados de microorganismos (bacterias, hongos, algas, protozoarios) y sus sustancias poliméricas extracelulares adheridos a una superficie sólida, viva o inerte (Rittman & McCarty, 2001). También pueden contener sustancias inorgánicas como sedimentos y depósitos de corrosión que son su fuente de nutrientes (Murcia, 2009). Estos microorganismos forman agrupaciones que les permiten protegerse de los efectos nocivos del entorno, permiten el intercambio genético y la comunicación entre células, lo que se convierte en una ventaja para sobrevivir.

Para que se desarrolle una biopelícula, se tienen los siguientes componentes básicos: presencia de microorganismos, matriz extracelular y disponibilidad de una superficie. Si hace falta uno de estos tres factores, la biopelícula no crecerá (Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2008). Para el caso de redes de distribución de agua potable, los tres componentes básicos se encuentran disponibles. Los tratamientos de potabilización del agua realizan una desinfección más no una esterilización, los microorganismos siempre producen las sustancias poliméricas extracelulares (SPE) y la superficie disponible es la tubería, que en la mayoría de los casos tiene todo el perímetro en contacto con el agua. Por otro lado, otro aspecto importante para el desarrollo de la biopelícula es el contacto continuo con agua o un medio líquido, que sirva de medio de transporte de nutrientes frescos y de una especie de lavado de desechos producidos por los mismos microorganismos.

Una de las razones para estudiar las biopelículas, especialmente en las redes de distribución de agua potable, se debe a la presencia de patógenos en estas poblaciones de microorganismos. Los patógenos en una biopelícula se pueden proteger de agresiones biológicas, químicas, físicas o ambientales como la predación, la desecación y cambios en el





entorno (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004). El flujo libre de los microorganismos infecciosos es una amenaza para la salud pública de una zona poblada.

### 3.2. Crecimiento de Biopelículas

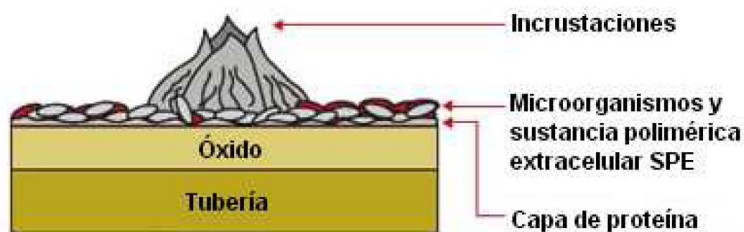
La biopelícula comienza su crecimiento cuando un grupo de bacterias, que se encuentran suspendidas en el agua, se adhiere a una superficie. Para ubicarse en el espacio, estas bacterias liberan protones y moléculas que emiten señales a través del agua (Reyes del Toro, 2004). Cuando la bacteria percibe cambios en la concentración de estas moléculas lo relaciona con la cercanía a una superficie. Luego de acercarse a la superficie, la bacteria produce sustancias poliméricas extracelulares (SPE) que le permiten adherirse a la superficie, generando fuerzas de cohesión que evitan el desprendimiento de las células que empiezan a componer la película biológica (Reyes del Toro, 2004).

El posterior crecimiento de la biopelícula se da por la reproducción de las bacterias que ya hacen parte de la colonia y por la adhesión de microorganismos secundarios que son atraídos por las SPE, fuente de nutrientes aprovechables. Con el aumento en la población, se incrementa el espesor de la biopelícula y con el tiempo se puede llegar a identificar dos microambientes, anaerobio en cercanías a la superficie y aerobio en la zona que está en constante contacto con el agua (Reyes del Toro, 2004).

En superficies que están bajo flujo constante de agua, la biopelícula se desarrolla en la subcapa laminar viscosa, en la cual se presenta flujo laminar y el esfuerzo cortante es bajo. Cuando el espesor de la biopelícula supera esta capa límite, el aumento en el esfuerzo cortante puede provocar el desprendimiento de la película biológica.

Un esquema general de una biopelícula se muestra en la Imagen 3-1. En esta se ve adherida la biopelícula a la superficie de la tubería, con una capa de óxido y de proteína. Los microorganismos forman la matriz celular, junto con la sustancia polimérica extracelular y a estos se adhieren incrustaciones de minerales o de otros microorganismos.

**Imagen 3-1 Esquema general de una biopelícula**



Modificado de:

[http://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2006/03/images/cuni\\_biofouling.jpg](http://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2006/03/images/cuni_biofouling.jpg)



### 3.2.1. Factores que afectan el crecimiento

Las biopelículas son estructuras, que aunque se adaptan a su entorno, están en ambientes que pueden cambiar sus características e inhibir la reproducción de los microorganismos. Algunos aspectos que interfieren el crecimiento de la biopelícula son (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004):

#### Temperatura

La actividad microbiológica está directamente relacionada a la temperatura, especialmente cuando se superan los 15°C. Por ejemplo, para un cambio de 7°C a 17°C se puede medir un aumento en la actividad bacteriana en un 50% (Hallam, West, Forster, & Simms, 2001).

#### pH

El pH del agua, cercano al neutro, coincide con el rango ideal para la supervivencia de los microorganismos.

#### Oxígeno

Para las células que se encuentran en la superficie de la biopelícula, y sobreviven en condiciones aerobias, la concentración de oxígeno disuelto en el agua potable es óptima para su desarrollo. Si por ejemplo, hay eventos de desprendimiento y se expone la capa anaerobia de la biopelícula, el oxígeno sería nocivo.

#### Nutrientes

Para que los microorganismos puedan llevar a cabo las reacciones biológicas primordiales, se requieren concentraciones mínimas de carbono, nitrógeno y fósforo.

En el caso específico de sistemas de distribución, el crecimiento de biopelículas depende de (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004):

- Tiempos de retención del agua en las tuberías: cuando el agua permanece más tiempo dentro de la tubería, las condiciones dentro de esta permanecen más estables favoreciendo a la biopelícula.
- Condiciones del sistema: Para sistemas de edad avanzada y sin procedimientos de mantenimiento, existen incrustaciones o zonas donde la biopelícula puede protegerse del ataque del desinfectante o el esfuerzo cortante.



- Materiales de construcción: Aunque las superficies más lisas retrasan la acumulación inicial de bacterias, esto no parece afectar la cantidad total de la biopelícula que se unirá a la superficie en el largo plazo.
- Temperatura del agua: como ya se mencionó, con un incremento en la temperatura se espera una mayor tasa de crecimiento de la biopelícula.
- Desinfectante residual: Con una mayor concentración de desinfectante residual, se tiene mayor probabilidad de contacto con los microorganismos que se quieren atacar.
- Condiciones hidráulicas: los valores altos de velocidad no evitan la formación y crecimiento de la biopelícula pues su desarrollo se realiza en la capa límite o subcapa laminar del fluido.
- Características físicas, químicas y microbiológicas iniciales del agua potabilizada: Se espera una mayor presencia de microorganismos en aguas de fuente superficial comparadas con aguas subterráneas. En cuanto al tratamiento, los procesos de filtración y desinfección pueden variar la cantidad de microorganismos viables que entran a la red de distribución.

### **3.3. Sustancia polimérica extracelular, SPE**

Las bacterias presentes en la biopelícula producen diferentes sustancias que les permite protegerse del ambiente en el que viven. Las sustancias poliméricas extracelulares permiten la adherencia entre las biopelículas y las superficies, y son específicas para cada especie de microorganismo. Otras funciones de las Sustancias Poliméricas Extracelulares son (Wolfaardt, Lawrence, & Korber, 1999):

- La adhesión a superficies, paso indispensable para el desarrollo de las biopelículas.
- La agregación de microorganismos, formando flocs o biopelículas, que permite la unión entre células y la fijación de partículas inorgánicas que pueden estar en el entorno. Con la maduración de estas estructuras biológicas, se crean medios de comunicación entre células, que posibilita el reconocimiento entre células y su entorno para luego establecer relaciones simbióticas.
- Las Sustancias Poliméricas Extracelulares son elementos estructurales de las biopelículas, que les brinda estabilidad. Adicionalmente, las SPE son barreras que protegen los microorganismos de desinfectantes y antibióticos.

El desprendimiento de células de las biopelículas se da por la degradación de las SPE por lo que este tipo de estructuras se deben evaluar para asegurar la remoción de las biopelículas, así como mecanismos de control de su crecimiento.



### 3.4. Biopelículas en redes de distribución de agua potable

La aparición de microorganismos que crecen como biopelículas en sistemas de distribución de agua potable se da por dos factores principales, según Nagy y Olson, (1985): Las bacterias que se encuentran en el exterior de la tubería, en el suelo o el aire, pueden ingresar al sistema por tanques de agua al aire libre, grietas o agujeros en las tuberías antiguas, o reparaciones de algún tramo de tubería. El segundo factor es el crecimiento de bacterias existentes presentes en el agua. Las bacterias pueden entrar adheridas al material presente en el agua que no es removido en el tratamiento del agua, ya sean sustancias orgánicas o inorgánicas.

Los microorganismos presentes en las biopelículas se deben adaptar fácilmente a un ambiente con límites de concentración de nutrientes y temperaturas bajas, típico en el agua de los sistemas de distribución (Reyes del Toro, 2004). El desarrollo de las biopelículas se da por la presencia de carbón orgánico asimilable en la pared de la tubería (Vreeburg & Boxall, 2007) y los factores de crecimiento antes descritos. El crecimiento de estos microorganismos puede provocar problemas en la calidad de agua como mal olor, mal sabor y coloración de la misma. Estos problemas son más delicados si el interior de la tubería se encuentra en mal estado, ya sea por corrosión o formación de incrustaciones que sirven de barreras de protección para las biopelículas.

Aunque se ha encontrado que la mayoría de los microorganismos presentes en el agua y en la superficie de la tubería son inofensivos, estos son la base de la cadena alimenticia para otros organismos como hongos, protozoos, gusanos y crustáceos que son resistentes a las concentraciones de desinfectante residual (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004). De igual forma, en las biopelículas presentes en los sistemas de agua potable pueden contener microorganismos patógenos causantes de infecciones y enfermedades como los coliformes o patógenos oportunistas, que causan enfermedades bajo ciertas circunstancias y sobre los individuos propensos a ellos o con un sistema inmune deficiente (Reyes del Toro, 2004).

Investigadores como LeChevallier demostraron que la diversidad de los microorganismos encontrados en la red de distribución de agua potable aumenta desde la salida de la planta de tratamiento a medida que el agua recorre la red. En su estudio, LeChevallier encontró que coliformes fecales como *E. coli* se encontraban principalmente en los puntos finales de la red y que solo sobrevive pocos días ya que es más sensible a la concentración de desinfectante residual. Lehtola y otros, (2007) también encontraron que *Mycobacterium avium* y *Legionella pneumophila* y los *calicivirus* lograron sobrevivir entre 2 y 4 semanas en condiciones de alto esfuerzo cortante en tuberías. Bajo condiciones de baja temperatura y cloro, los virus permanecen estables por mucho tiempo y se pueden acumular en las biopelículas.

Hay que tener en cuenta que lo que se conoce en cuanto a los microorganismos que crecen en las paredes de las tuberías es solo una fracción de lo que en realidad ocurre ya que todos estos



no son cultivables con los métodos hoy utilizados. La presencia de microorganismos depende del sitio de muestreo, cloro libre y total, temperatura, pH, y turbiedad, entre otros.

En cuanto a las condiciones hidráulicas, bajo las cuales la biopelícula debe crecer, se conoce que velocidades de flujo altas proveen mayor transferencia de niveles de nutrientes y como consecuencia un mayor crecimiento de bacterias. Aparentemente la biopelícula es capaz de comprimirse bajo presión y tener una mayor resistencia al esfuerzo cortante (que es máximo en la cercanía a la superficie de la tubería); para velocidades entre 0.96 y 1.75 m/s se encontraron filamentos, posiblemente compuestos de Sustancia Polimérica Extracelular, que ayudan a una adhesión fuerte entre bacterias y la superficie. Las propiedades viscosas de la biopelícula contribuyen a incrementar la resistencia por fricción en las tuberías, entonces con mayores velocidades constantes, la biopelícula no se desprende y por el contrario se hace más compacta y estable (Percival, Knapp, Wales, & Edyvean, 1999).

Siguiendo con lo anterior, esfuerzos mecánicos muy altos, tienden a incrementar la densidad de la biopelícula. Ésta puede variar considerablemente, dependiendo de las condiciones físicas y las características de los organismos. El valor de la densidad, basado en sólido volátiles, es de 40mg de sólidos volátiles /cm<sup>3</sup>, pero están en un rango de 5 a 200mg de sólidos volátiles /cm<sup>3</sup>, en entornos de esfuerzos muy altos y condiciones anaeróbicas. Algunas biopelículas de espesor muy alto tienen una predominancia de la acumulación de biomasa inerte, mientras que biopelículas que sufren desprendimientos se componen casi en su totalidad de biomasa activa (Rittman & McCarty, 2001).

Los cambios que se presentan en la red de distribución de agua potable cuando hay crecimiento de biopelículas se dan principalmente en la rugosidad de la tubería, que afecta directamente las pérdidas de energía por fricción y la reducción de la capacidad hidráulica de la tubería. Se ha encontrado, por ejemplo, que “el efecto del número de Reynolds en el factor friccional para un tubo con biopelícula es similar a un tubo con una superficie rugosa en un rango de número de Reynolds de 5000 a 48000” (Carvajal, Gómez, & Ochoa, 2007).

Asimismo se ha encontrado que las biopelículas crean una rugosidad debido a granos de arena como los utilizados por Nikuradse, que es mucho mayor que lo que la estructura de la biopelícula sugiere (Barton, Wallis, Sargison, Buia, & Walker, 2008). La causa de esto puede ser el comportamiento viscoelástico de la biopelícula, la superficie no homogénea y los efectos de la interacción entre las sustancias poliméricas extracelulares y la capa límite.

En cuanto al diseño y la modelación, del estudio de Barton y otros (2008) se concluyó que la tubería cubierta de biopelículas no necesariamente sigue la modelación hecha con la ecuación de Colebrook-White en la transición entre régimen liso y rugoso. El comportamiento viscoelástico de las tuberías hace más complejo el análisis de la rugosidad en tuberías contaminadas.



### 3.5. Mecanismos de desprendimiento

El desprendimiento de biopelículas consiste en la desagregación de la matriz de microorganismos y exopolímeros, que da como resultado la liberación de una fracción de biomasa. Los mecanismos de desprendimiento de biopelículas son la abrasión, erosión, desprendimiento en masa o depredación; que se dan por aumentos en el esfuerzo cortante que deben resistir la biopelícula o por disminución de la fuerza interna de la biopelícula (Reyes del Toro, 2004, Rittman & McCarty, 2001).

- La erosión es causada por fuerzas cortantes entre el fluido en movimiento y la superficie de la biopelícula. La erosión tiene un leve efecto pero permanente en la acumulación y crecimiento de la biopelícula.
- La abrasión ocurre cuando los sedimentos se pueden mover y pueden ocurrir colisiones entre partículas; el número de Reynolds y la cantidad de material en el agua son factores que se relacionan con el desprendimiento.
- El desprendimiento en masa, sloughing en inglés, se refiere a pérdidas de grandes fracciones de biopelícula, definida cuando la longitud de biopelícula desprendida es mayor a su espesor. Puede tener efectos importantes en la posterior acumulación de la biopelícula por la pérdida de soporte. Al parecer, condiciones anaeróbicas en el interior de la biopelícula favorecen el desprendimiento en masa.
- Por último, la depredación es un proceso de selección natural, que en condiciones de baja disponibilidad de nutrientes, hace que los microorganismos se ataquen entre sí.

Rittman & McCarty, (2001) encontraron que para superficies lisas, al tener un espesor de biopelícula menor a 0.003cm, el desprendimiento se relaciona con el esfuerzo cortante que actúa de forma tangencial a la superficie de la biopelícula. Cuando las biopelículas aumentan su espesor, el interior de la biopelícula está protegido de las fuerzas que favorecen el desprendimiento.

Si las superficies son rugosas, los microorganismos se empiezan a acumular en las grietas que los protegen del esfuerzo cortante. Cuando la biopelícula crece y empieza a colonizar toda la superficie, hasta cubrirla y transformarla en una superficie lisa, el desprendimiento se asemeja al de una superficie de soporte liso.

#### 3.5.1. Desprendimiento de biopelículas por aumento del esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante debido al flujo de agua en tuberías de redes de distribución aumenta a medida que se acerca a la pared de la tubería. Este esfuerzo hace las biopelículas más delgadas, densas y fuertes. Los mecanismos de desprendimiento son la erosión y el desprendimiento en masa, cuando se forman gargantas en las que se concentra el esfuerzo.



Fuerzas de desprendimiento muy altas pueden llevar a la formación de una estructura de la biopelícula más lisa y densa que puede ser mecánicamente más estable y puede consolidar la matriz de SPE (Rochex, Godon, Bernet, & Escudié, 2008).

Las colonias aisladas son las que se encuentran en mayor riesgo frente al esfuerzo cortante; sin embargo, son las que más rápido crecen por la disponibilidad de nutrientes y las que son más fácilmente removidas por el mayor esfuerzo que deben soportar. Horn observó que durante el experimento de lavado ocurre un desprendimiento de biomasa en los primeros segundos y luego no se presenta ningún desprendimiento considerable, lo que demuestra la sensibilidad de la biopelícula a cambios en el flujo (Reyes del Toro, 2004).

### **3.5.2. Desprendimiento de biopelículas por disminución de la fuerza interna**

La disminución de la resistencia de la estructura de la biopelícula ocurre por la reducción del nivel de nutrientes presentes en el agua y que son indispensables para la sobrevivencia de los microorganismos. Con este limitante de alimento, aumenta la competencia para lograr sobrevivir.

Del mismo modo, se puede disminuir la resistencia interna por la formación de cavidades y canales internos, que disminuyen la cohesión entre partículas y favorecen el paso del agua entre la matriz, incrementando el esfuerzo que ésta debe soportar (Reyes del Toro, 2004).





## 4. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Una red de distribución de agua potable es el conjunto de tuberías y accesorios por los cuales se reparte el agua tratada desde los tanques de almacenamiento y/o compensación hacia cada consumidor individual. Esta red se divide en red matriz o red primaria, red secundaria y red terciaria, rangos definidos en la normativa nacional, el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. Aunque la capacidad del sistema de distribución se basa en el caudal de diseño proyectado para el horizonte de diseño del proyecto, hay que realizar un análisis especial para asegurar que en todo el tiempo de operación de la red se tengan condiciones de calidad de agua estables.

En este capítulo se concentra la atención en la metodología de diseño de sistemas de distribución de agua potable bajo el criterio de autolimpieza. En general, este consiste en asegurar condiciones hidráulicas que eviten la sedimentación de partículas y el crecimiento de biopelículas. Más adelante en el capítulo se analizarán los componentes de la red indispensables para realizar los lavados hidráulicos de las tuberías.

### 4.1. Diseño y Operación de redes de distribución de agua potable

El agua potable es un servicio público indispensable para la cotidianidad de los seres humanos. Los sistemas de distribución del agua potable son diseñados para brindar al usuario agua para consumo, aseo, riego, protección contra incendios entre otros. De la calidad del diseño y las buenas prácticas de operación y mantenimiento depende la calidad del servicio.

Con el fin de alcanzar este objetivo, el proyecto debe ser diseñado para evitar el ingreso de contaminantes, mantener la concentración de desinfectante residual y minimizar el tiempo de residencia del agua en la red. Algunos aspectos importantes a tener en cuenta en el diseño, propuestos por la Organización Mundial de la Salud (2004) son:

- El sistema no debe tener capacidad excesiva, lo que resulta en tiempos de residencia muy altos.
- Idealmente, se deben evitar los tramos de velocidades muy bajas o puntos muertos, ya que se pueden acumular sedimentos y tener tiempos de residencia también muy altos.
- Evitar las presiones negativas; bajo estas condiciones se pueden infiltrar microorganismos patógenos que se encuentren en el suelo. La presión debe ser la mínima para asegurar que el agua llega según la demanda requerida y no tan alta para mantener la capacidad estructural del sistema.
- Realizar modelos hidráulicos, con estos se puede evaluar si el sistema está operando como debe ser y ayuda a identificar problemas que se presenten en el sistema.





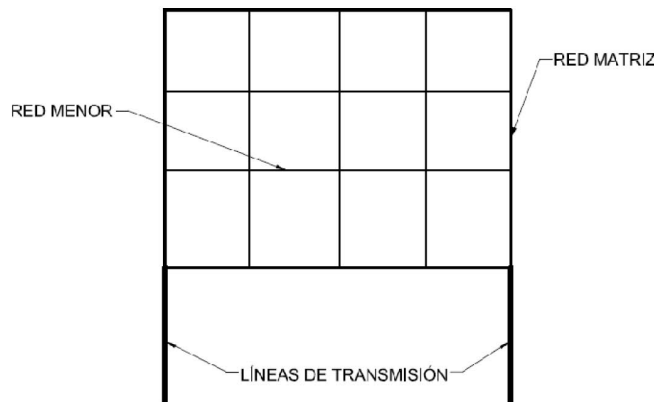
- Suministro intermitente se debe evitar ya que se produce contraflujo por el cambio en la dirección que puede interferir con los sedimentos dentro sistema.

#### 4.1.1. Configuración de la red

Existen tres formas básicas de definir la configuración geométrica de la red, según la localización de las líneas matriz, secundaria y menor: el sistema en circuitos arteriales, sistema en malla y sistema en árbol (Von Huben, 1999).

En sistemas de circuitos arteriales, ver la Imagen 4-2, se cuenta con tuberías de gran tamaño en los límites del área de servicio conectados a la red matriz. El caudal es de buena calidad en toda la red ya que el agua se puede suplir de 4 direcciones, por las conexiones en los dos extremos con la red matriz. En caso de emergencia o cierres temporales de una tubería, el agua siempre cuenta con otro camino para llegar a suplir la demanda cerca a la zona afectada.

**Imagen 4-2 Esquema Red en Circuitos Arteriales**

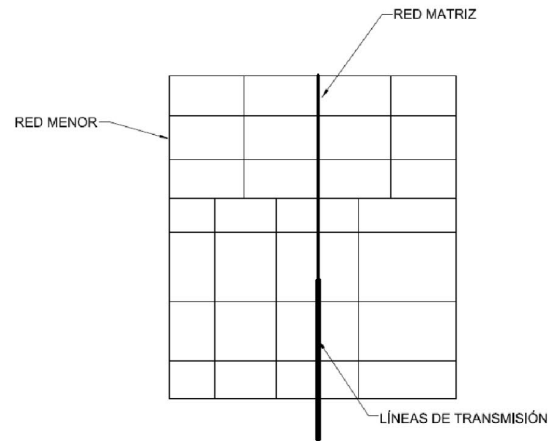


Tomado de: Von Huben, 1999 pág 33

El sistema en malla, mostrado en la Imagen 4-3, es el más utilizado en redes de distribución en el mundo. Consiste en la conexión de la red menor y la red secundaria a una sola tubería de la red matriz. El agua se puede suplir en más de una dirección en los tubos de la red menor, por lo que es menos vulnerable a suspensiones del servicio por fallas o reparaciones.



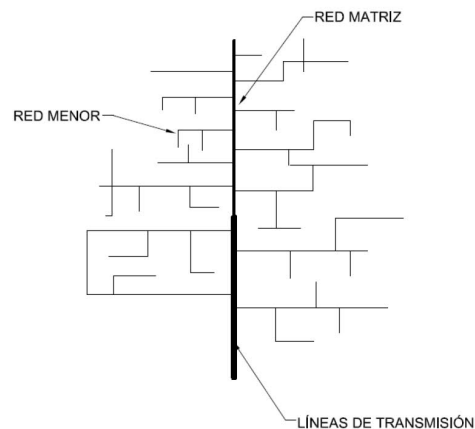
### Imagen 4-3 Esquema Red en Malla



Tomado de: Von Huben, 1999 pág 33

El sistema en árbol, en la Imagen 4-4, cuenta con líneas que llevan el agua al área de servicio que no están conectadas entre sí y como resultado se tienen muchos puntos muertos. No es el diseño más adecuado ya que en caso de emergencia o necesidad de mantenimiento, se debe suspender el servicio a los consumidores. De la misma forma, los clientes que reciben el agua en los puntos finales de la red pueden sufrir problemas de mala calidad del agua.

### Imagen 4-4 Esquema de Red en Árbol



Tomado de: Von Huben, 1999 pág 33



#### **4.1.2. Velocidad de autolimpieza y esfuerzo cortante**

Al contar con una velocidad mínima de flujo en las tuberías, se está previniendo el deterioro del interior de las mismas ya que se evita la sedimentación de partículas suspendidas en el agua y afecta la formación de biopelículas. En la literatura se encuentran diferentes rangos de valores de velocidad, que aplicando teoría de sedimentación de partículas de cierto diámetro, aseguran el continuo movimiento de estas partículas.

De acuerdo con el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, RAS 09, el diseño debe limitar la velocidad mínima a 0.5 m/s, correspondiente al caudal máximo horario (QMH) en el momento de entrada en operación de la red de distribución.

Carrière y sus colaboradores (2005) definieron la velocidad de autolimpieza en el rango de 0.6 a 0.9 m/s. Velocidades entre 0.5-0.8 m/s son suficientes para remover depósitos sueltos y cohesivos y para velocidades mayores a 1.4 m/s se eliminan tubérculos en las tuberías.

Otros investigadores definen el criterio de velocidad mínima en función de la tubería, por ejemplo en el Reino Unido, la velocidad mínima de 0.70 m/s es válida para diámetros de tuberías de 50 mm y 1.3 m/s para tuberías de 200 mm (Vreeburg & Boxall, 2007).

Por su parte, el esfuerzo cortante también es un criterio de autolimpieza, ya que se cree que el proceso de coloración del agua se debe a las interacciones entre el esfuerzo cortante y la interface pared/agua con las capas del material. Entonces el riesgo de eventos de coloración del agua se debe evaluar como el exceso de esfuerzo cortante causado por cambios en las condiciones hidráulicas del sistema. Boxall y Saul, investigadores del Reino Unido, en su trabajo publicado en el 2005 "Modelling discoloration in potable water distribution systems" encontraron que el valor límite del esfuerzo cortante, para evitar el arrastre de sedimentos, es de 1.12 N/mm<sup>2</sup> (Vreeburg & Boxall, 2007).

#### **4.1.3. Zonas potenciales para el crecimiento de biopelículas**

En los sistemas de distribución existen zonas que están en mayor riesgo de contener biopelículas, ya sea por condiciones hidráulicas desfavorables o fallas en la operación del sistema. Como se mencionó en el capítulo anterior, las biopelículas requieren de un entorno estable para desarrollarse ya que son muy sensibles a cambios en la concentración de desinfectantes o en el esfuerzo cortante.

El criterio a tener en cuenta en una zona con baja tasa de formación de biopelícula es garantizar una velocidad mínima de 0.76 m/s y un valor mínimo de cloro residual según el proyecto. Los puntos vulnerables se presentan principalmente en zonas de baja demanda, alto tiempo de permanencia, baja velocidad, puntos cerrados o muertos y zonas de contraflujo (Carvajal, Gómez, & Ochoa, 2007).



Para evitar estos inconvenientes se ha propuesto un nuevo criterio de diseño que consiste en disminuir las demandas de caudales de incendio a 30 m<sup>3</sup>/h en zonas residenciales en las que se cumplen los códigos contra incendio. Con esto se busca reducir el tamaño de la tubería para mover la misma cantidad de agua demandada por los usuarios y al mover el mismo caudal lograr mayores velocidades de flujo. Se pretende que la configuración de la distribución sea sistema tipo árbol, de tuberías de diámetros relativamente pequeños, que van disminuyendo su tamaño con la distancia para asegurar velocidades mínimas y al mismo tiempo suplir la demanda (Vreeburg & Boxall, 2007).

## 4.2. Componentes de la red

Las redes de distribución no solo son el conjunto de tuberías que mueven el agua. Para un correcto funcionamiento se debe contar con válvulas que permiten controlar el flujo que se mueve en la red y con puntos de fácil acceso a la red en caso de emergencia como son los hidrantes. Estos accesorios se deben incluir en el diseño ya que pueden producir pérdidas de energía y su manipulación define la operación de la red.

### 4.2.1. Tuberías

La red de distribución de agua potable se puede caracterizar según el tamaño de las tuberías que la componen, como se define en el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico:

**Tabla 4 -1 Tipo de tubería según diámetro nominal**

Tipo de Tubería	Diámetro Nominal
Tuberías principales o redes matrices	Mayor a 300 mm (12 pulgadas)
Tuberías o redes secundarias de distribución	Menor a 300 mm (12 pulgadas) y mayor a 100 mm (4 pulgadas).
Tuberías o redes menores de distribución	Menor o igual a 100 mm (4 pulgadas)
Tuberías o conexiones domiciliarias	Bajo diámetro (1/2 a 3 pulgadas)

Fuente: Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2009

La aproximación al diseño de tuberías de las redes matriz, secundaria y menor se debe seguir con unas recomendaciones mínimas para mantener la calidad del agua y del servicio. La Organización Mundial de la Salud también tiene sugerencias para tener en cuenta en la etapa de diseño de una red de distribución de agua potable que se describen a continuación:



- Establecer presiones mínimas para prevenir infiltraciones y asegurar el flujo de caudales adecuados en todos los puntos de la red. El RAS define la presión mínima que debe tener la red entre 10 mca y 15 mca, valores que aseguran una buena presión en las residencias y hasta en edificios de 4 pisos.
- Minimizar puntos de flujo lento o zonas muertas para prevenir estancamiento de agua. Esto se debe lograr al preferir sistemas configurados en malla que tipo árbol.
- No diseñar para capacidades muy altas a menos que se requieran para mantener el servicio para una demanda futura. El sobrediseño permite que el agua permanezca por más tiempo en la tubería lo que genera problemas de calidad.
- Evitar presiones negativas, de esta forma se previene la contaminación por infiltraciones del subsuelo.
- Prevenir sobrecargas controlando las bombas y operando las válvulas.
- Si es posible, evitar válvulas reguladoras de presión, incluyendo otros puntos de acceso, que puede permitir el ingreso de contaminantes.
- Evitar materiales que puedan promover el crecimiento de microorganismos.
- Asegurar que la tubería tenga una separación adecuada de fuentes potenciales de contaminación como las líneas de alcantarillado.
- Informar a la comunidad sobre los riesgos de las conexiones erradas o ilegales.

#### **4.2.2. Válvulas**

Las válvulas son elementos utilizados para aislar y controlar el flujo, regulan la presión y al operarlas se pueden evitar contraflujo. Son útiles para la operación del sistema en ocasiones de fallas estructurales, insuficiencias en el suministro, y limpieza de las tuberías. Si no son manipuladas de forma correcta, las válvulas pueden ser puntos de ingreso de contaminantes a la red.

Para poder aprovechar de la mejor forma las válvulas para la operación de la red, las empresas encargadas de estos activos deben tener en cuenta los siguientes aspectos: (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004)

- La localización y referencia de cada válvula debe estar referenciada.
- Las válvulas y equipamientos deben ser accesibles y no deben ser cubiertos por capas de asfalto o concreto.



- Las cajas de las válvulas deben estar libres de escombros, con buen drenaje y no deben mostrar signos de fugas.
- Deben estar siempre listas para ser operadas
- Las válvulas deben permanecer en la posición inicial para las que fueron diseñadas.
- La dirección de giro y el número requerido de vueltas se deben conocer para evitar inconvenientes en momentos de emergencia.
- La operación de las válvulas se debe hacer por personal capacitado.

Algunos tipos de válvulas que se utilizan en las redes de distribución de agua potable son:

- Válvulas de corte o cierre: Son diseñadas para iniciar o parar el flujo, ubicadas al comienzo o al final de la línea de tubería. No se deben usar por períodos prolongados porque la vibración de las compuertas puede producir daños en la válvula.
- Válvula mariposa: Son utilizadas en servicio intermitente. Se presentan mayores pérdidas por fricción que con las válvulas de compuerta pero no tan significativas como las pérdidas por fricción en la tubería.
- Válvulas de cheque: Son diseñadas para permitir el flujo en una sola dirección, ubicadas en la salida de las estaciones de bombeo para evitar el contraflujo por los cambios de operación del sistema.

También hay válvulas reductoras de presión, válvulas de control de nivel, válvulas de alivio y válvulas de ventosa (Von Huben, 1999).

Para mantener la red en óptima operación, se debe verificar con regularidad el funcionamiento de las válvulas para prevenir daños o accidentes. Según el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico, en el literal B.7.11.6, la frecuencia de la inspección depende el uso de la válvula:

1. Cuando la función de la válvula sea el seccionamiento o el aislamiento de parte de la red, la válvula debe operarse con una frecuencia mínima de seis meses.
2. Cuando la función de la válvula sea la de servir de tubería de paso directo (bypass) la frecuencia mínima de operación debe ser una vez cada tres meses.
3. Cuando la función de la válvula sea la de purga o drenaje de la red de distribución, la frecuencia de operación mínima debe ser de una vez al año.



### 4.2.3. Hidrantes

La función principal de los hidrantes es poder contar con un punto de acceso a la red que permita utilizar mayores cantidades de agua para la protección contra incendios. Usos alternativos que se le dan a los hidrantes incluyen la extracción de aire de puntos altos de la red, el lavado de las tuberías para eliminar óxido y sedimentos, obtener grandes volúmenes de agua para el lavado de alcantarillados para arrastrar sedimentos, lavado de vías, riego de prados, entre otros (Von Huben, 1999).

La manipulación de los hidrantes se debe realizar con personal calificado, ya que se pueden presentar accidentes por la cantidad de energía con la que sale el agua de la red; por esta misma razón se debe evitar la colocación de estos elementos en vías principales o lugares muy concurridos. Sin embargo es importante operar los hidrantes con cierta regularidad para evitar daños por corrosión y mantener los tubos cercanos libres de sedimentos.

El problema más común al operar los hidrantes es la resuspensión de material sedimentado en la tubería. Esto puede causar el deterioro de la calidad del agua y quejas de parte de los clientes. Al implementar un programa de lavado de tuberías rutinario se pueden reducir estos inconvenientes. Otro problema que se puede causar es el golpe de ariete. Si un hidrante, ubicado en una tubería de gran tamaño, es cerrado repentinamente, el aumento de la presión causado por la interrupción del flujo del agua puede ser varias veces mayor a la presión normal de operación en la tubería (Von Huben, 1999).

Existen cuatro tipos de hidrantes, generalmente utilizados: de barril seco, barril húmedo, clima cálido y de lavado.

- Hidrante de barril seco: se utilizan en sitios con climas que puedan causar congelamiento, están compuestos por la válvula principal y una válvula especial para drenar el agua cuando la válvula principal está cerrada. Cuando se rompe el hidrante no hay salida de agua porque la válvula se encuentra enterrada.
- Hidrante de barril húmedo: Están llenos de agua todo el tiempo. El hidrante no tiene una válvula principal pero cada boquilla tiene su válvula. La norma que lo regula es la AWWA C503-97, *Wet-Barrel Fire Hydrants*.
- Hidrantes de clima cálido: la instalación de la válvula principal es en la superficie del terreno, entonces, el barril inferior siempre está lleno de agua que está presurizada. No tiene mecanismo de drenaje y cada boquilla tiene una válvula de control de caudal.
- Hidrantes de lavado: son hidrantes de diámetro menor disponibles para la instalación en el punto final de una tubería, con el único propósito de ser operado en procedimientos de lavado. Están disponibles en diámetros de 2 pulgadas con una boquilla de 2-1/2 pulgadas. No se utilizan en caso de incendio.



Para identificar fácilmente la capacidad de cada hidrante se recurre a una convención de colores ampliamente utilizada a nivel mundial, como se muestra en la Tabla 4-2.

**Tabla 4-2 Clasificación de hidrantes según su capacidad**

Tipo de hidrante	CAUDAL		Color
	GPM	L/seg	
<b>AA</b>	1,500	95	Azul claro
<b>A</b>	1,000 a 1,499	63 a 95	Verde
<b>B</b>	500 a 999	32 a 63	Anaranjado
<b>C</b>	<500	<32	Rojo

Fuente: Von Huben, 1999, pág. 105

Las recomendaciones del Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico de Colombia, para sistemas de complejidad alta, áreas comerciales, industriales o residenciales de densidad poblacional mayor a 200 habitantes por hectárea, los hidrantes deben tener una capacidad mínima de 32 L/s. La capacidad mínima de los hidrantes debe ser 5 L/s para áreas de menor densidad poblacional.

En cuanto a la presión mínima que deben resistir los hidrantes, en condiciones normales el valor de la presión mínima es de 3 mca<sup>1</sup>. Si el hidrante está ubicado en una zona residencial, la presión mínima es de 10 mca y si está en un área comercial, industrial o con edificios la presión debe ser de 20 mca. Cuando los hidrantes están en operación, la presión mínima que deben resistir es de 100 mca, hasta una presión de prueba de 200 mca (Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2009).

Con respecto al mantenimiento, al igual que las válvulas, los hidrantes deben ser operados con regularidad de modo que se puedan prevenir fallas en el sistema. Según el artículo 77 de la Ley 9 del año 1979 “Los hidrantes y extremos muertos de la red de distribución de agua deben abrirse con la frecuencia necesaria para eliminar sedimentos. Periódicamente, debe comprobarse que los hidrantes funcionen adecuadamente”. Las frecuencias de inspección van desde una revisión cada tres meses hasta una revisión cada año, según la complejidad del sistema.

Para las operaciones de lavado, es primordial conocer la ubicación y capacidad de cada hidrante que este en el camino al cual se le hace el mantenimiento. Para procedimientos con planificación previa, es importante verificar el buen funcionamiento de los hidrantes para evitar pérdidas de tiempo o accidentes que se puedan presentar.

<sup>1</sup> mca: metros de columna de agua





## 5. LAVADO HIDRÁULICO DE TUBERÍAS

Existen diferentes mecanismos para realizar el lavado de las tuberías. Este puede ser realizado por sistemas mecánicos ó hidráulicos. El lavado mecánico consiste en el uso de diferentes dispositivos que se introducen a la tubería y al raspar la tubería eliminan las biopelículas y tubérculos. Por el contrario, el lavado hidráulico se limita al uso de la fuerza del agua como agente limpiador, al aumentar la velocidad de flujo y el esfuerzo cortante en la pared interior de la tubería.

### 5.1. Lavado reactivo vs. Lavado preventivo

Es poco común conocer el estado real del interior de las tuberías del sistema de distribución de agua, ya sea porque no se implementan metodologías de inspección o simplemente porque no se producen emergencias que centren la atención en el estado real de la tubería. Sin embargo, cuando ocurren eventos de coloración en el agua se puede ver la magnitud de material sedimentado en la tubería.

La sedimentación de partículas en el interior de la tubería se da por diferentes mecanismos como la remoción incompleta de material suspendido en el proceso de potabilización, floculación tardía, corrosión de las tuberías de hierro o por el ingreso de partículas de suelo por fallas de la tubería o procedimientos de reparación (Carrière, Gauthier, Desjardins, & Barbeau, 2005).

Si bien, el diseño de los sistemas de distribución se basa en la autolimpieza de las tuberías<sup>2</sup>; cambios en la hidráulica del flujo, ya sea de velocidad o presión, pueden provocar el desprendimiento de biopelículas o la resuspensión de partículas que le dan color o sabor al agua, deteriorando su calidad. Se debe implementar un programa de mantenimiento tanto reactivo como preventivo de las tuberías para asegurar la calidad del agua que le llega al consumidor final.

La práctica habitual que realizan las empresas encargadas del sistema de distribución de agua potable es el mantenimiento reactivo frente a eventos de coloración. Es decir, en el momento en que se presentan quejas por la mala calidad del agua que le llega a los clientes, la empresa lleva a cabo el lavado de la tubería en la zona afectada. Esto puede llevar a la suspensión de más partículas en las tuberías cercanas y tiene efectos a corto plazo.

Al implementar una metodología de mantenimiento rutinario de las tuberías, el lavado de éstas se realiza para evitar los eventos de coloración al mantener el interior de la tubería con un mínimo de material sedimentado y retardar el crecimiento de las biopelículas. Para tomar buenas decisiones en cuanto el mantenimiento de los sistemas de distribución de agua

---

<sup>2</sup> En base a los criterios de velocidad mínima y esfuerzo cortante mínimo.



potables, es importante contar con información clara y organizada, que permita conocer el estado del sistema (AWWA. American Water Works Association, 2003).

Algunas ventajas del lavado de las tuberías del sistema de distribución de agua potable incluyen el reemplazo de agua de mala calidad, la remoción de sedimentos, de biopelículas, de tubérculos e incrustaciones (AWWA. American Water Works Association, 2003).

### **Reemplazo de agua de baja calidad**

Con el lavado de las tuberías se logra desechar el agua de mala calidad y reemplazar todo este volumen con agua de mejor calidad. El deterioro de la calidad del agua en la red de distribución se puede causar por:

- Partículas suspendidas que han entrado al sistema debido a descuidos en el tratamiento de potabilización.
- Depósitos que se suspenden por cambios en la operación de la red; ya sea por la manipulación de válvulas o hidrantes, daños o reparaciones, contra flujo o demandas muy altas.
- Altas concentraciones de aire disuelto, que le da una apariencia lechosa al agua.
- Presencia de materia orgánica, que puede causar problemas de olor o sabor.
- Bajos niveles de cloro residual debido al estancamiento.
- Presencia de coliformes.
- Nitrificación por altas concentraciones de amonio y nitratos.

### **Remoción de depósitos de sedimentos**

La presencia de sedimentos en el interior de las tuberías pueden causar no solo problemas de calidad de agua, también disminuyen la capacidad hidráulica de la red. En cuanto a la calidad, la acumulación de sedimentos crea un ambiente protegido de la turbulencia y de los desinfectantes, ideal para el crecimiento de biopelículas. Los problemas hidráulicos se deben a la disminución de la sección efectiva de la tubería que puede afectar la adecuada prestación del servicio. Las fuentes de los sedimentos que se pueden encontrar en redes de agua potable según el AWWA son:

- Sedimentos típicos en agua superficial sin filtración.
- Oxidación de hierros y manganeso disuelto en aguas subterráneas.
- Alumbre o partículas de medios filtrantes provenientes de procesos de tratamiento
- Carbonato de calcio y otros precipitados.
- Polvo y arena depositados en tanques de almacenamiento.
- Óxido y otros productos de la corrosión en el sistema de distribución y otras estructuras.
- Arenas y limos de pozos.



## **Remoción de biopelículas, tubérculos e incrustaciones**

La remoción de biopelículas se logra por la erosión causada por el aumento de las fuerzas cortantes entre el fluido y la superficie de los microorganismos. El lavado hidráulico, además de remover partes de la biopelícula, permite controlar su crecimiento ya que la formación de la matriz de microorganismos y polímeros debe iniciar de nuevo. Al controlar el crecimiento de las biopelículas se puede reducir el riesgo de aparición de coliformes y de procesos como la nitrificación, causas del deterioro del agua potable.

Otro beneficio del control de las biopelículas es evitar la corrosión inicial de la pared de la tubería, causado por las reacciones biológicas de los microorganismos. Esto evita que la acumulación de óxido y otros materiales deterioren el interior de la red. Por su parte, la remoción de los tubérculos o incrustaciones que se forman en la tubería no solo contribuye a la hidráulica del sistema al mantener la sección efectiva de la tubería; también ayudan al control del crecimiento de biopelículas, ya que las incrustaciones protegen a la biopelícula de la socavación y la reacción con los desinfectantes.

### **5.2. Lavados con flujo a presión**

El lavado hidráulico se limita a la fuerza del agua para mantener en buenas condiciones la red de distribución de agua potable, causando el mínimo de interrupciones al servicio. Se puede considerar que las redes están en constante proceso de lavado ya que el constante rozamiento del agua en movimiento con la pared de la tubería permite tener esfuerzos cortantes relativamente altos para evitar la acumulación de contaminantes. Sin embargo, para aquellos casos en los cuales la velocidad de la red no es suficiente para su mantenimiento se debe implementar un lavado especial.

Existen dos metodologías principales para el lavado con flujo a presión: el lavado hidráulico convencional y el lavado hidráulico unidireccional. Estos procedimientos se basan en criterios como la velocidad objetivo, la duración del lavado y su frecuencia. Chadderton et al (1992) recomiendan lavados anuales o bianuales según la capacidad del personal, el presupuesto y los problemas de calidad de agua que se presentan en los sistemas de distribución (Carrière, Gauthier, Desjardins, & Barbeau, 2005).

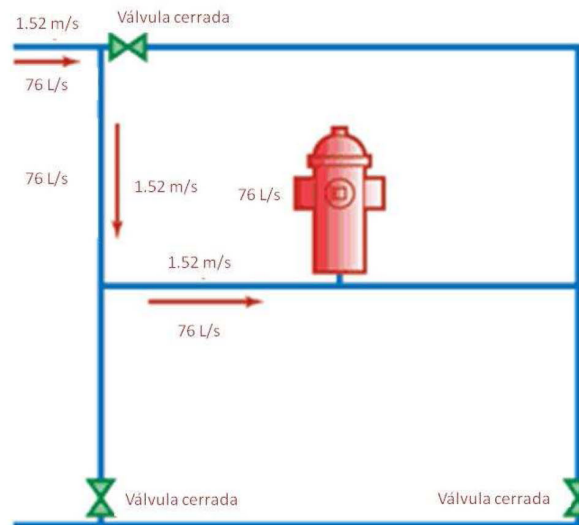
#### **5.2.1. Lavado Convencional**

El lavado convencional consiste en abrir uno o varios hidrantes y permitir que el agua salga de la red hasta que se alcance la calidad de agua que se desea. Se utiliza especialmente en mantenimiento reactivo ya que no requiere mayor planeación y solo se necesita de un operario (AWWA. American Water Works Association, 2003). Como se ve en la Imagen 5-5, el agua recorre todos los tubos cercanos al hidrante que se abrió. El agua no tiene una dirección definida, al dividirse el caudal en los diferentes tramos, la velocidad del agua disminuye.



mantiene la velocidad en los valores máximos, sin olvidar que se presentan pérdidas de energía por fricción y por el paso por los accesorios.

**Imagen 5-6 Lavado Hidráulico Unidireccional**



Modificado de: [http://images.pennnet.com/articles/ww/thm/th\\_260613.gif](http://images.pennnet.com/articles/ww/thm/th_260613.gif)

Se requieren mínimo tres pasos para implementar un sistema de lavado hidráulico unidireccional: (Carrière, Gauthier, Desjardins, & Barbeau, 2005)

1. Seleccionar las válvulas a cerrar para aislar la sección de la red que se va a limpiar. En esta etapa se requiere conocer información de la red, ubicación de las válvulas e hidrantes y del camino que va a recorrer el agua.
2. Abrir los hidrantes y tomar muestras hasta que se alcanza la calidad deseada o el tiempo de lavado objetivo. Los criterios para finalizar el lavado son principalmente la ausencia de partículas visibles en el agua, relacionada con la turbiedad.
3. El paso final es cerrar el hidrante y volver a abrir las válvulas en la red.

Diferentes autores coinciden en que el lavado unidireccional utiliza solo el 60% del agua del lavado convencional bajo condiciones similares (Oberoi y Sordelet 1998).

El lavado unidireccional requiere de mayor trabajo previo, pero mantener información histórica puede hacer que el proceso de optimización sea más sencillo. El agua debe recorrer tuberías que han sido previamente limpiadas, de un diámetro mayor a uno menor. En la Tabla 5-3 se muestra, en resumen, el paralelo entre los dos métodos de lavado hidráulico antes descritos.



**Tabla 5-3 Tabla comparativa entre lavado hidráulico convencional y lavado hidráulico unidireccional**

	Lavado hidráulico convencional	Lavado hidráulico unidireccional
<b>Lavado reactivo</b>	Recomendado por:	No es posible utilizarlo como método reactivo ya que:
	-Aumenta el nivel del cloro residual	-Requiere mayor tiempo para implementarlo
	-Remueve los sólidos suspendidos	-Requiere planeación previa
	-Se utiliza en respuesta a quejas por mal olor, sabor o color	
	-Remueve bacterias y otros contaminantes	
<b>Lavado preventivo</b>	No es tan efectivo en comparación al lavado unidireccional porque:	Es recomendado para limpiar la tubería ya que:
	-Maneja velocidades menores, por lo tanto es menos efectivo para remover sedimentos y biopelículas adheridas	-Remueve los sedimentos asentados
	-No confina los contaminantes, por lo que los resultados a corto plazo pueden ser negativos	-Reduce la demanda de cloro
	-Puede retornar agua de baja calidad al área limpiada	-Remueve una porción de las biopelículas adheridas
	-Utiliza mayor cantidad de agua	-Confina y expulsa los contaminantes
		-El agua fluye desde las tuberías que ya se encuentran limpias
		-No permite el paso de sedimentos a sectores aguas arriba del que se está limpiando
		-Permite operar las válvulas e hidrantes periódicamente
	-Utiliza menos agua	

Fuente: Reyes del Toro, 2004 pág 51

Los costos entre estos dos métodos no se pueden comparar directamente ya que se deben tener en cuenta diferentes factores como los costos de planeación, la cuantificación del agua utilizada, los tratamientos para el agua desechada, el capital humano, las interferencias en el servicio y las molestias que se pueden presentar (AWWA. American Water Works Association, 2003).

### 5.3. Efectos en la calidad del agua

El lavado hidráulico de la red tiene un efecto directo en la calidad del agua que circula por la red. Los objetivos de los programas de mantenimiento preventivo, como el lavado hidráulico, deben incluir la recuperación de la calidad del agua para al menos cumplir las normas que rigen la prestación del servicio.

El agua de la tubería en mantenimiento es reemplazada en su totalidad por agua de mejor calidad, si se siguen las recomendaciones de realizar el lavado desde tuberías limpias. Con esto se espera que las características del agua vuelvan a ser aceptables, tanto por estética, salud pública y mantenimiento de la red. Los beneficios inmediatos de los lavados hidráulico se resumen en la Tabla 5-4, en cuanto al mejoramiento en la calidad del agua y remoción de sedimentos.



**Tabla 5-4 Beneficios primarios de los lavados hidráulicos**

	<b>Mejoramiento de la calidad del agua</b>	<b>Remoción de depósitos de sedimentos</b>
Remoción de bacterias o contaminación del agua	x	
Incrementos del nivel de desinfectante residual al incluir agua fresca	x	
Minimización de la presencia de nitritos y nitratos resultado de la nitrificación	x	
Reducción del riesgo de problemas de mal olor y sabor	x	x
Reducción del riesgo de coloración y mala apariencia	x	x
Incremento de la eficiencia hidráulica del sistema		x
Mejor penetración de los desinfectantes, limitando el crecimiento bacterial		x

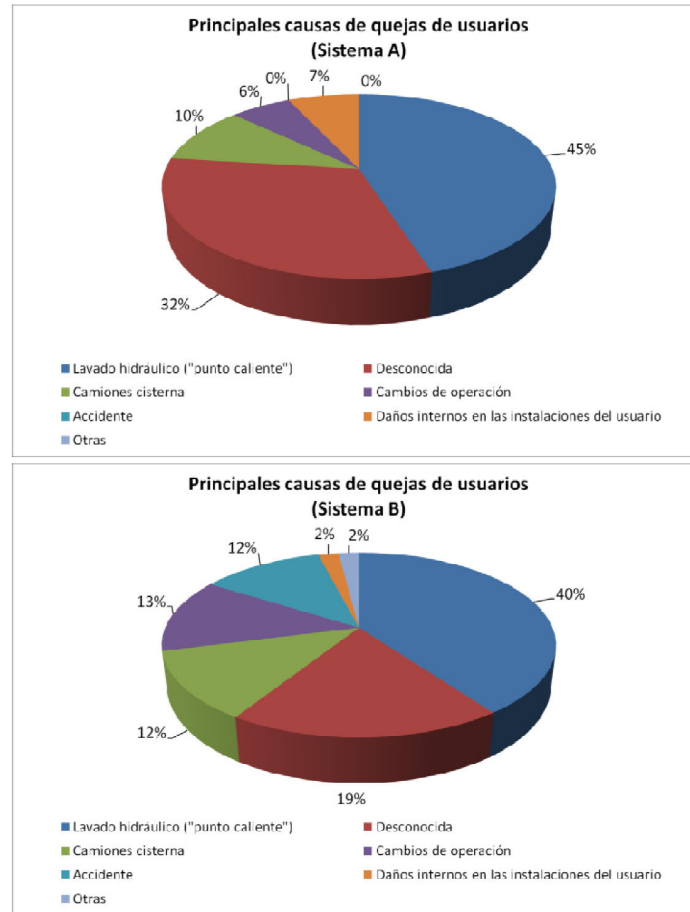
Modificado de: Reyes del Toro, 2004

Se espera que los resultados de lavados hidráulicos convencionales no sean del todo positivos en la zona afectada, puesto que se rompe el equilibrio en el que está la red y se pueden suspender partículas y afectar el color, olor e incluso el sabor del agua. Lo contrario ocurre para los lavados unidireccionales, ya que se aísla el tramo en mantenimiento y la única posibilidad para las partículas es salir de la red.

Esto se evidencia con análisis como el realizado en California, Estados Unidos (Lauer, 2005). Se recolectó la información sobre la causa de los reclamos de parte de los clientes de dos sistemas de distribución de agua potable en el cual se implementan programas de lavado preventivo (ver Imagen 5-7). La causa principal de los reclamos es el efecto secundario de los lavados, para los dos sistemas. Esto demuestra que hay que ser muy cuidadoso en la aplicación de los lavados, pero no hay que olvidar que no se tiene control total del agua ni el efecto del lavado en las redes internas de cada usuario.



### Imagen 5-7 Principales causas de quejas de usuarios en California, Estados Unidos



Fuente: Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2008

En cuanto al desinfectante residual, se pueden presentar dos situaciones. En primer lugar se espera que la concentración sea mayor ya que se presenta una disminución en la demanda de desinfectantes por el menor contenido de microorganismos y materia orgánica que consume químicos como el cloro. Por otro lado, la concentración puede disminuir nuevamente, pues con el lavado se expone el material de la tubería al flujo del agua, aumentando así la demanda del desinfectante (Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2008).





## 6. REGLAS DE OPERACIÓN PARA EL DESPRENDIMIENTO DE BIOPELICULAS

Para realizar un lavado hidráulico que sea efectivo y tenga un efecto a largo plazo, se deben seguir ciertas recomendaciones en cuanto a la operación del sistema en el proceso de lavado. Estos valores se han encontrado luego de hacer diferentes pruebas en campo, en varias ciudades del mundo, al cambiar las condiciones de operación y comparar los valores obtenidos. La mayor parte del desarrollo en este tema lo ha realizado el AWWA, American Water Works Association, que ha publicado diferentes manuales para el lavado de tuberías.

A continuación se proponen diferentes reglas de operación para lograr el desprendimiento de biopelículas de las redes de distribución de agua potable utilizando lavados con flujos a presión. Estas alternativas de operación se basan en las recomendaciones del AWWA, American Water Works Association; también, se tiene en cuenta la experiencia de diferentes países en el mundo, desde Estados Unidos hasta la India, en donde sus ciudades han implementado planes de mantenimiento preventivo de forma regular y ya se pueden evaluar los resultados a largo plazo.

Los parámetros importantes en el diseño, ejecución y evaluación de un lavado hidráulico son:

- Configuración de la red
- Topología de la red
- Velocidad, caudal, presión, demanda de agua
- Calidad del agua

### 6.1. Requisitos técnicos

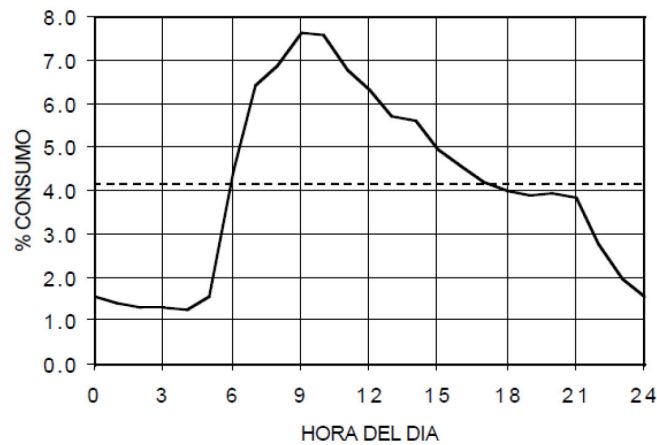
Para lograr una alta remoción de biopelículas de las tuberías de la red de acueducto se debe mantener las velocidades de flujo altas, para lograr mayores esfuerzos cortantes y lograr mayor desprendimiento de la biopelícula.

Si se va a implementar un mantenimiento preventivo, este se debe programar para las horas de la noche, entre las 11 de la noche y las 5 de la mañana (ver Imagen 6-8). Durante este período, el consumo de agua es el mínimo y la presión en la red es máxima, con lo que se pueden lograr mayores velocidades en esta. Otra razón importante para realizar los lavados en la noche es evitar la alteración del servicio de acueducto; en las noches al disminuir la demanda se pueden tener menos reclamos por los efectos del lavado en la red.





### Imagen 6-8 Curva diaria de consumo de agua potable



Fuente: Barrera Tapias, 1996

Más significativo aun es evitar que los consumidores vean la calidad del agua que sale de los hidrantes, ya que son pocos los que se imaginan que el agua en la red de distribución de agua potable pueda adquirir propiedades estéticas poco deseables, como el color que se ve en la Imagen 6-9, esto puede generar desconfianza y rechazo del sistema de agua potable de la ciudad(Von Huben, 1999).

### Imagen 6-9 Calidad del agua de lavado en Portsmouth, Virginia, Estados Unidos



Fuente: [www.portsmouthva.gov](http://www.portsmouthva.gov)



La eficiencia y efectividad del método depende de muchos factores: El uso estricto de agua limpia para realizar el lavado, operar válvulas para aislar las zonas ya limpiadas y controlar la dirección del flujo y asegurar que se remueva entre 2 y 3 veces el volumen de la tubería del agua de lavado (Vreeburg & Boxall, 2007).

También se le debe dar un tratamiento especial al agua de lavado que sale de la red. Esta agua contiene altas concentraciones de sólidos disueltos, posible presencia de microorganismos patógenos y puede llegar a tener altos niveles de desinfectante residual. Cuando agua que contiene cloro residual entra a un cuerpo de agua natural, puede ser tóxico para la vida acuática, especialmente cuando se utilizan especies como las cloraminas (AWWA. American Water Works Association, 2003). La disposición final del agua se debe realizar en el sistema de drenaje del municipio, evitar los cuerpos de agua naturales e inundar las vías cercanas.

En el caso de los lavados reactivos, estos se deben hacer lo más rápido posible en la zona afectada, y en lo posible se deben aislar los tubos en los que se presentó la emergencia para evitar la contaminación de la red. En todos los casos es importante comunicar a la comunidad sobre los planes de mantenimiento que se van a ejecutar y advertir los posibles efectos que los lavados pueden tener en la calidad del agua que reciben en su domicilio.

A continuación se analizan diferentes parámetros a tener en cuenta en el momento de la planificación del lavado hidráulico, enfatizando en el lavado hidráulico unidireccional.

#### 6.1.1. Velocidades

La velocidad es el parámetro más importante para determinar la eficiencia del lavado, ya que de este factor depende la turbulencia que se genera dentro de la tubería, al igual que el esfuerzo cortante entre la biopelícula y el agua en movimiento. Según los objetivos y beneficios que se quieran del proceso de lavado, se puede utilizar un amplio rango de velocidades.

De acuerdo con el AWWA se tiene los siguientes límites de velocidad mínima de remoción según el tipo de material, si la velocidad mínima en la red es 0.7 m/s:

**Tabla 6-5 Velocidad mínima de remoción, AWWA**

MATERIAL	VELOCIDAD MÍNIMA DE REMOCIÓN
Arena y Limos	3.7 m/s
Sedimentos y biopelículas	1.8 m/s

Fuente: AWWA, 2003



Para lograr la remoción de arenas y limos se requiere mayor velocidad en el interior de la tubería que para remover sedimentos y biopelículas adheridas a las paredes internas de la tubería. Limitando la velocidad de la tubería para lograr la remoción de biopelículas, los valores propuestos por diferentes autores son los siguientes:

**Tabla 6-6 Velocidad mínima para la remoción de biopelículas según diferentes autores**

VELOCIDAD MÍNIMA PARA LA REMOCIÓN DE BIOPELICULAS	AUTOR	COMENTARIOS
1.5 m/s	Von Huben, 1999	
0.9 m/s a 1.5 m/s	Friedman, 2001 <sup>3</sup>	Límite inferior para tuberías muy lisas. Si se presenta una rugosidad muy alta se requieren 1.5m/s para remover el 73% de los sedimentos de la superficie.
1.5 m/s	Vreeburg & Boxall, 2007	Valor mínimo para Holanda
0.7m/s para tuberías de 50mm de diámetro 1.3m/s para tuberías de 200mm de diámetro.	Vreeburg & Boxall, 2007	Valores para el Reino Unido

Los rangos de valores para la velocidad mínima según los autores en la Tabla 6-6 se encuentran en un rango entre 0.7 m/s a 1.5 m/s, siendo este último valor en el que más coinciden las diferentes pruebas. De acuerdo con los datos anteriores, para el Reino Unido se requiere una velocidad diferente para tamaños de tubería diferentes. Esto se da porque no se puede superar la capacidad de conducción de cada tubería. En la Tabla 6-7 se evalúa la velocidad que se requiere para remover partículas sedimentadas de 0.2 mm de diámetro, con densidad relativa de 1.5 y 3.0.

<sup>3</sup> En AWWA. American Water Works Association, 2003



**Tabla 6-7 Velocidad mínima para remover partículas de 0.2mm de diámetro, según la densidad relativa.**

DIÁMETRO	ÁREA	CAUDAL PARA UNA DENSIDAD RELATIVA DE 1.5	VELOCIDAD	CAUDAL PARA UNA DENSIDAD RELATIVA DE 3.0	VELOCIDAD
(mm)	(m <sup>2</sup> )	L/s	m/s	L/s	m/s
50	0.0020	1.5	0.76	2.7	1.38
75	0.0044	3.8	0.86	7.2	1.63
100	0.0079	7.6	0.97	15	1.91
150	0.0177	20	1.13	41	2.32
200	0.0314	42	1.34	83	2.64

Modificado de: OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004

Se puede ver que el rango de velocidades de remoción de sedimentos de 0.2 mm de diámetro va desde 0.76 m/s, muy cercano al valor de la velocidad de autolimpieza 0.70 m/s, hasta un valor de 2.64 m/s para la mayor densidad relativa del material a remover en el tubo de mayor diámetro. En todos los casos también se obtienen velocidades mayores para tuberías de mayor tamaño, por lo que se requieren mayores controles en la red para alcanzar mayores velocidades que alcancen a limpiar la superficie interna del tubo.

La velocidad media del flujo afecta tanto el crecimiento como el desprendimiento de la biopelícula. Generalmente, el desarrollo de la biopelícula disminuye con el aumento de la velocidad, porque se presentan mayores esfuerzos cortantes. La velocidad del agua también afecta la formación de sustancias poliméricas extracelulares, necesarias para la adhesión y la supervivencia de la tubería.

En ensayos realizados en laboratorio, se encontró que para biopelículas que crecen a una velocidad de 0.03 m/s, el desprendimiento se presentaba cuando la velocidad llegaba a ser 1.0 m/s. Para microorganismos que crecían en tuberías con velocidades de 1.0 m/s, el desprendimiento se daba cuando la velocidad llegaba a 2.5 m/s y la cantidad de material desprendido de la tubería era proporcionalmente menor que para biopelículas que crecen en velocidades menores (Stoodley, Cargo, Rupp, Wilson, & Klapper, 2002).

El efecto anterior se presenta por las diferentes condiciones en las que se desarrolla la biopelícula. En ambientes más adversos, ésta se adapta para ser más resistente, ya sea por el tipo de sustancia polimérica extracelular que produce, o la separación entre microorganismos,



que hace más fuerte la matriz de la biopelícula. Entonces se espera que para biopelículas que hayan crecido en ambientes más extremos, el proceso de desprendimiento sea más complejo y requiera mayores esfuerzos que con la limpieza con flujo a presión. En todo caso, lograr el desprendimiento en masa de la biopelícula retrasa y complica su crecimiento, logrando mantener el interior de la tubería en mejores condiciones por mayor tiempo.

Otros factores que se deben considerar en el momento de seleccionar una velocidad de lavado son:

- Presión residual: Mantener una mínima presión de 20 psi o mayor en todos los puntos de la red. Si se tiene una presión menor se puede incrementar el riesgo de contaminación por infiltraciones.
- Condición de la tubería: Al incrementar la velocidad se está en riesgo de daño estructural o agrietamiento debido al golpe de ariete.
- Límites de descarga: Hay límites en cuanto a la cantidad de agua que puede ser descargada a los alcantarillados pluviales o sanitarios, evaluando las variables ambientales y los tratamientos que ésta agua requiere.
- Limitaciones por el tamaño de la tubería: Para obtener velocidades suficientes para el desprendimiento de biopelículas en tuberías de diámetros mayores a 300 mm se debe esforzar la red, que puede afectar otras estructuras del sistema como tanques, estaciones de bombeo, entre otras. Se tiene evidencia empírica que las tuberías más grandes requieren de menos limpieza (las velocidades en tuberías grandes son mayores ya que suplen una mayor demanda, los residuos de desinfectantes son mayores).

Las velocidades en un programa de lavado hidráulico unidireccional deben estar entre 1.5 m/s y 1.8 m/s. Para evitar el golpe de ariete en el interior de la tubería en el momento de iniciar y parar el lavado, la velocidad no debe ser mayor a 3.1 m/s (Mays, 2002). Para tuberías grandes, de diámetros mayores a 300 mm, no se recomienda realizar programas de lavado hidráulico ya que se sabe que requieren menos mantenimiento y cuentan con velocidades altas y constantes al ser redes mayores y no hay puntos muertos que puedan afectar la calidad del agua.

### **6.1.2. Longitudes de tuberías**

La longitud de los tramos que se va a lavar debe ser corta. Con esto se tiene mayor control de los procesos en el lavado y se alcanza una mayor velocidad. Para tramos muy largos, las pérdidas de energía, debido a la fricción, hacen que el flujo se desacelere y pierda eficiencia en el lavado. En tramos cortos la logística es menos compleja y se afecta en menor medida la comunidad alrededor de la zona de influencia del lavado.





La longitud del lavado depende también de la ubicación de las válvulas e hidrantes, los puntos de acceso al sistema de alcantarillado o a la zona donde se dispone el agua de lavado y de la capacidad de trabajo de los operadores encargados del trabajo. Para el caso de Colombia, el Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico indica que la distancia mínima entre hidrantes en zonas residenciales es de 200 m. En zonas industriales y comerciales los hidrantes se colocan cada 100 m. En ningún caso la distancia entre hidrantes puede ser mayor a 300 m.

La distancia óptima para el lavado hidráulico de tuberías está entre 500 y 1500 m. Para lavados unidireccionales, lo ideal es contar con una sección aislada de aproximadamente 610 m (AWWA. American Water Works Association, 2003, Von Huben, 1999).

### 6.1.3. Válvulas e hidrantes

En el momento de operar las válvulas e hidrantes para realizar el lavado, si no se hace de forma gradual, se puede producir sobrepresiones o golpe de ariete en la tubería. El golpe de ariete es un fenómeno de una onda de presión generado por cambios repentinos en la velocidad del agua (Mays, 2002). Una válvula en una tubería es un obstáculo para el agua, perturba el flujo, causa pérdidas de energía y afecta la distribución de presiones aguas arriba y abajo de su ubicación.

El golpe de ariete se modela con la ecuación de Joukowsky, que define el aumento de presión debido al cierre repentino de una válvula, y es función de la densidad del agua  $\rho$ , la velocidad sónica de la onda de presión  $a$  y el cambio de velocidad a través de la onda del golpe de ariete  $\Delta V$  (Mays, 2002).

$$\Delta p = -\rho a \Delta V \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Si el tiempo de cierre es 0, es decir que la llave de la válvula rota de la posición completamente abierta a completamente cerrada de forma instantánea, el cambio en la presión puede llegar a ser muy alto y causar problemas en la integridad de la red,

### 6.1.4. Materiales de tuberías

Las biopelículas tiene la capacidad de crecer casi en cualquier tipo de superficie, siempre y cuando cuenten con la matriz de sustancia polimérica extracelular y nutrientes disponibles. La característica principal de los materiales y su susceptibilidad al crecimiento de biopelículas es la rugosidad.

En la Tabla 6-8 se muestra el valor de la rugosidad absoluta para diferentes materiales utilizados en redes de distribución de agua potable. Estos valores corresponden a tuberías



nuevas, con el tiempo la rugosidad absoluta puede ser muy parecida para los diferentes materiales.

**Tabla 6-8 Valores de rugosidad absoluta**

Material	Rugosidad absoluta $k_s$ (mm)
Acero comercial	0.45
CCP <sup>4</sup>	0.12
Hierro dúctil	0.25
GRP <sup>5</sup>	0.030
Polietileno	0.007
PVC	0.0015

Fuente: Centro de Investigaciones de Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2009

La rugosidad de la superficie afecta el transporte y la adhesión de los microorganismos porque fomenta el transporte de masa, protege a las células tanto del esfuerzo cortante como de la turbulencia del agua en movimiento y la acción de los desinfectantes y aumenta el área superficial disponible para la biopelícula (Percival, Knapp, Wales, & Edyvean, 1999). Aunque las superficies lisas retrasan la acumulación inicial de bacterias, esto no parece afectar la cantidad total de biopelícula que se une a la superficie interna del tubo a largo plazo (Carvajal, Gómez, & Ochoa, 2007). Con el tiempo, aunque la superficie del tubo sea lisa, el crecimiento de la biopelícula genera una rugosidad alta, en la que se adhieren más microorganismos y se protegen de los efectos adversos del entorno.

Investigadores en diferentes partes del mundo han estudiado en el laboratorio el efecto del tipo de material en el crecimiento y desarrollo de la biopelícula. Hasta el momento no se ha encontrado un material que inhiba completamente el crecimiento de microorganismos en su superficie; únicamente, el cobre ha demostrado ser el mejor material para controlar el crecimiento de biopelículas (Simoës, Azevedo, Pacheco, Keevil, & Vieira, 2006).

Holden et al. encontraron que el hierro tenía una presencia de biopelícula de un orden de  $10.1 \times 10^7$  ufc/dm<sup>2</sup> mientras que para el MDPE<sup>6</sup> se tenía un valor de  $1.4 \times 10^7$  ufc/dm<sup>2</sup> para las mismas condiciones de ensayo. Según los resultados que obtuvo Hallam y sus colaboradores,

<sup>4</sup> Concreto reforzado

<sup>5</sup> Poliéster reforzado con fibra de vidrio

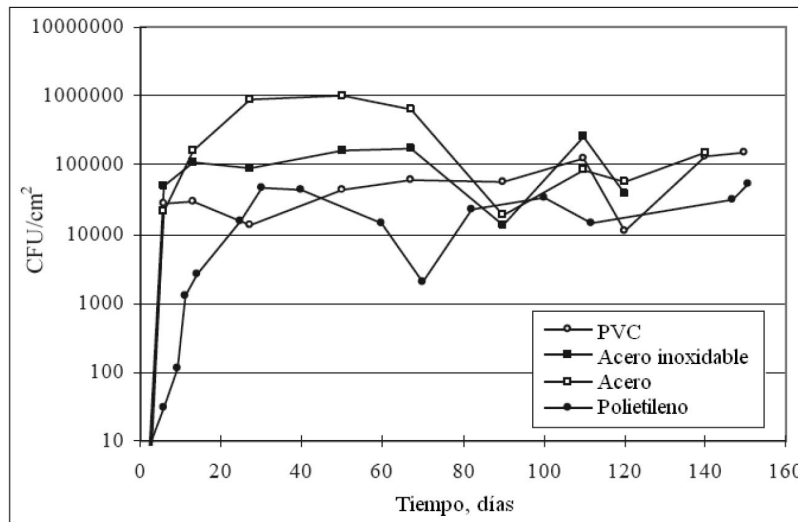
<sup>6</sup> Polietileno de media densidad



el hierro es el material más susceptible al desarrollo de biopelículas en su interior, seguido por el cemento, el MDPE y por último el vidrio (Hallam, West, Forster, & Simms, 2001). Las bacterias pueden crecer en los tubérculos de tuberías de hierro corroídas o en imperfecciones del material, por lo que en el vidrio, el material más liso se tiene menos desarrollo de biopelículas.

Otros estudios demuestran que, aunque en mínimas diferencias, el PVC es más vulnerable a la colonización por una biopelícula que una tubería de acero inoxidable, acero y polietileno como se ve en la Imagen 6-10 (Simoes, Azevedo, Pacheco, Keevil, & Vieira, 2006, Tsvetanova, 2006). Esto muestra que el PVC es un material vulnerable al crecimiento de biopelículas; entonces, incluso en las redes de distribución de agua nuevas que utilizan este material, se deben realizar lavados con el fin de remover microorganismos.

**Imagen 6-10 Crecimiento de biopelículas en tuberías de diferentes materiales**



Fuente: Tsvetanova, 2006

Si bien el tipo de material afecta el desarrollo de la biopelícula, existen otros factores más precisos para el control de esta. La concentración de desinfectante, la velocidad del flujo relacionado con el esfuerzo cortante, la formación de tubérculos y la calidad del agua que se mueve en la tubería influyen en mayor medida en el crecimiento de los microorganismos.

#### 6.1.5. Tiempos de lavado

Para determinar el tiempo de lavado de un sector de la tubería se deben evaluar parámetros como la calidad del agua en la tubería, la cantidad de biopelícula adherida a su superficie, la calidad del agua que se quiere alcanzar y se debe contar con el análisis de información histórica si está disponible. Una aproximación que se puede seguir para calcular la duración



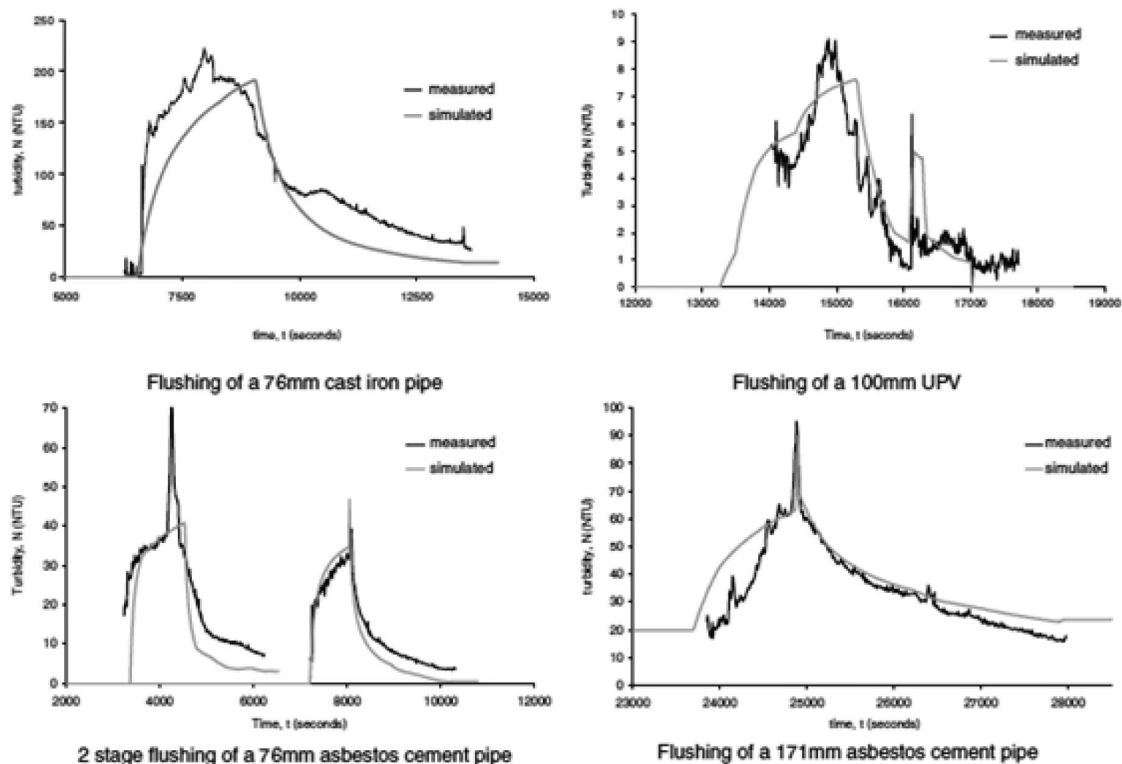


de los lavados es remover hasta 2 veces el volumen nominal de cada tubería (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004).

En evaluaciones en campo se ha encontrado que la mayoría de los depósitos sueltos se evacúa efectivamente durante los primeros 10 minutos del lavado (Carrière, Gauthier, Desjardins, & Barbeau, 2005). Para cada caso en específico, se puede verificar este valor al realizar los perfiles de turbiedad, tomando muestras del agua que sale del hidrante durante la ejecución del lavado. La turbiedad es una medida directa de la cantidad de partículas disueltas en el agua.

Cuatro perfiles típicos de turbiedad en un proceso de lavado se muestran en la Imagen 6-11. Para diferentes materiales y diámetros de la tubería se muestra la variación de la turbiedad, medida en unidades nefelométricas NTU, con respecto al tiempo de lavado. Para todos los casos se tiene el pico en duraciones diferentes, y la pendiente descendente después del pico también es diferente para los cuatro casos. Por eso es importante contar con información específica para cada zona de la red y de esta forma obtener el tiempo de lavado óptimo para cada tramo.

**Imagen 6-11 Perfiles de turbiedad durante lavados hidráulicos**



**Fig. 9 – Results of PODDS model simulation for four different flushing operations (after Boxall et al., 2005).**

Tomado de: Vreeburg & Boxall, 2007



### 6.1.6. Frecuencia de lavado

La frecuencia de lavado se define luego de analizar los resultados acumulados de una serie de lavados programados para el área de interés. Por esta razón es importante contar con un registro detallado sobre la calidad del agua en la zona, los posibles problemas hidráulicos que se presentan, como zonas muertas, y un registro de quejas de los usuarios por el deterioro de la calidad del agua.

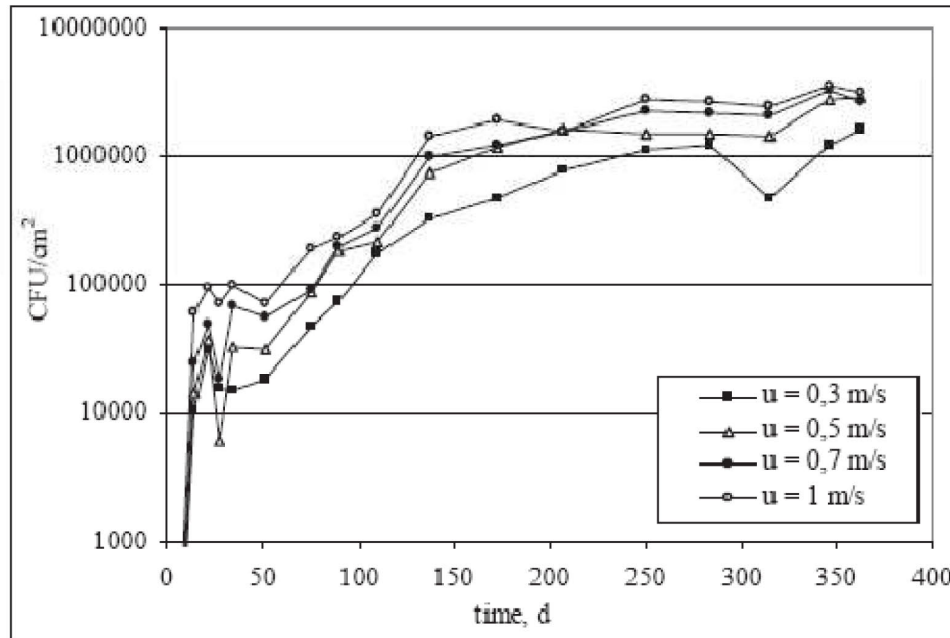
La frecuencia óptima de los lavados es específica para cada sistema de distribución al igual que depende de las características locales del sistema, entonces esto hace que para diferentes zonas del sistema se requieran diferentes frecuencias de lavado. Todas las tuberías de la red deben ser lavadas en algún momento de la operación, lo importante es optimizar los planes de mantenimiento para lograr limpiar todo el sistema con el menor costo y la mayor eficiencia.

Una metodología para determinar la frecuencia de lavado es evaluar las tasas de acumulación de depósitos en las tuberías. Estos valores se caracterizan por el peso de los sedimentos por unidad de longitud de tubería en un período de tiempo. Carrière y demás autores proponen que para redes en las que se presente menos de 1g/m/año los costos relacionados con el lavado son mayores que los beneficios del mantenimiento. Si se tienen tasas de acumulación entre 1 y 10 g/m/año, conviene realizar los lavados cada año o cada dos años. Si se tiene tasas de acumulación más altas se deben evaluar los procesos del tratamiento de agua y la calidad de la red para evitar la entrada de contaminantes a la red (Carrière, Gauthier, Desjardins, & Barbeau, 2005).

En la Imagen 6-12 se muestran los resultados de Tsvetanova para el crecimiento de biopelículas en tuberías de polipropileno, cuando la concentración de desinfectante es casi nula. Se puede ver la relación de dependencia que existe entre las diferentes velocidades de flujo y el desarrollo de la biopelícula. Para la velocidad de flujo más alta, se tenía una densidad de microorganismos por área mucho mayor; aunque para un período largo de tiempo, el crecimiento de la biopelícula alcanza los mismos niveles. Lo importante de resaltar en esta imagen es que en cuestión de días, los microorganismos pueden colonizar la superficie de la tubería sin mayor dificultad. Es importante identificar luego de cuánto tiempo la presencia de altas concentraciones de bacterias puede ser perjudicial para la calidad del agua potable.



### Imagen 6-12 Formación de la biopelícula en polipropileno bajo diferentes velocidades de flujo



Fuente: Tsvetanova, 2006

### 6.2. ¿Cómo seleccionar la ruta de lavado adecuada?

Con el fin de seleccionar la ruta de lavado adecuada, se debe contar con la información detallada de la topología de la red de distribución de agua potable. La división por tramos en la red debe tener en cuenta que cualquier procedimiento de lavado debe empezar desde la fuente de agua hacia la periferia de la red, con esto se logra que el lavado siempre se haga desde una tubería que ya ha sido limpiada y se pasa de diámetros mayores a diámetros menores. En estas contracciones se logra mayor velocidad en el flujo, que aumenta la eficacia en la remoción de biopelículas. También se deben preferir los tramos rectos, para evitar pérdidas de energía por cambios de dirección, que logran desacelerar el flujo.

Cada sección en que se divide la red debe tener en cuenta la capacidad del personal disponible, su experiencia, el tiempo de lavado, la disponibilidad de equipos, y detalles como la capacidad de la planta de tratamiento, tanques de almacenamiento o estaciones elevadoras.

En el turno de una cuadrilla de operadores experimentados, se puede alcanzar a lavar una milla (1.6 km) con el lavado hidráulico unidireccional. Este factor debe ser una limitante en las metas que se propone la empresa encargada del mantenimiento; ya que se debe evitar al máximo dejar válvulas cerradas por mucho tiempo y de esta forma interferir en lo mínimo la prestación del servicio (AWWA, American Water Works Association, 2005).



Hay que tener en cuenta que cambios o desequilibrios en las condiciones hidráulicas de las tuberías pueden exponer los sedimentos a esfuerzos cortantes en exceso y hacer que estos se movilen dentro de la tubería (Vreeburg & Boxall, 2007). Por esto es importante aislar de forma adecuada el sector a lavar, las válvulas e hidrantes se deben operar previamente para asegurar su funcionamiento y deben ser abiertos o cerrados en forma gradual para evitar sobrepresiones o cambios repentinos en la hidráulica de la red.

### **6.3. Programas de lavado unidireccional**

Las empresas encargadas de la infraestructura de la red de distribución de agua potable deben implementar sistemas de lavado de las tuberías. Según el Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, para proyectos de nivel de complejidad altos<sup>7</sup> el diseño y la operación de la red deben incluir la realización de un lavado unidireccional que debe cumplir los siguientes requisitos:

1. Remover las biopelículas debido a las velocidades de flujo que maneja.
2. Remover los depósitos minerales causados ya sea por fenómenos de corrosión al interior de las tuberías y/o depósitos de partículas minerales provenientes de la fuente de agua cruda o causados por el tipo de tratamiento en la planta de potabilización, debido a las velocidades de flujo que maneja.
3. Generar un esfuerzo cortante alto.
4. Poner en movimiento todos los depósitos del material inorgánico al interior de la tubería.

La generación de los planes de mantenimiento se puede realizar en base a un programa de lavado de 4 pasos, propuesto por el AWWA-Research Foundation (AwwaRF) en el año 1998 y publicado en el estudio "Guidance Manual to Maintain Distribution System Water Quality". Los pasos son los siguientes:

1. Determinar la conveniencia del lavado como un componente del programa del mantenimiento de la Empresa de Servicio Público.
2. Planear y administrar el programa de lavado.
3. Implementar el programa de lavado y realizar la toma de muestras.
4. Evaluar y revisar el programa de lavado.

A continuación se hace una descripción de cada paso y se incluyen comentarios

---

<sup>7</sup> Definir nivel de complejidad alto población y capacidad económica



## **1. Determinar la conveniencia del lavado como un componente del programa del mantenimiento de la empresa encargada de la infraestructura de la red de distribución de agua potable.**

La necesidad del lavado se puede determinar en función del tipo de fuente de agua que se utiliza, el tipo de tratamiento para la potabilización del agua y la frecuencia de quejas de parte de los clientes por deterioro en la calidad del agua.

Por ejemplo, se debe evaluar si el agua desde la fuente presenta altas concentraciones de hierro y manganeso, que se pueden precipitar en las tuberías y generar problemas de color en el agua. En cuanto al tratamiento, se debe evaluar el tipo de químicos que se utilizan para la coagulación/floculación y su nivel de remoción del agua a la salida de la planta. También se debe tener en cuenta la calidad de los medios filtrantes y la efectividad de la desinfección en el agua que sale de la planta y la concentración de desinfectante residual.

En este punto, es importante recordar que toda la red de distribución de agua potable debe ser lavada en algún punto de su vida útil. Aunque se tengan procesos muy avanzados o exigentes, es inevitable que el agua potable tenga sustancias disueltas que se precipitan en las tuberías y sobre los cuales se desarrollan los microorganismos que componen las biopelículas.

## **2. Planear y administrar el programa de lavado**

Se pueden seguir una serie de pasos para definir el plan de lavado de la red de distribución del agua potable. Es importante tener objetivos claros y contar con información completa para disminuir los cambios que debe sufrir el programa en campo. La efectividad del lavado y los costos relacionados dependen en gran medida de las decisiones tomadas en la planeación.

- Definir los objetivos del lavado, tanto de calidad de agua como hidráulicos.

En cuanto a la calidad del agua, se debe evaluar la remoción de sedimentos, reducir la demanda de desinfectantes en la tubería, reducir la producción de materiales que fomentan la formación subproductos de la desinfección, remover biopelículas, remover agua contaminada, prevenir la nitrificación y reducir las quejas de los clientes.

En cuanto a las características hidráulicas del sistema, se debe evaluar la integridad estructural del sistema, en la operación normal e incluso en casos de emergencia, y permitir que el personal opere el sistema (abrir válvulas e hidrantes) para identificar posibles fallas y determinar la capacidad hidráulica del sistema.

Luego de tener claras las metas del programa de lavado, se debe seleccionar el tipo de lavado hidráulico que se va a realizar. Se recomienda que para lavados preventivos se utilice siempre el lavado hidráulico unidireccional; se alcanzan mayores velocidades en la tubería con un





menor consumo de agua. En la planeación del lavado hidráulico unidireccional se requieren los siguientes procedimientos preliminares:

- Obtener mapas y modelos hidráulicos

Con esto se pueden identificar las rutas de lavado, la ubicación de válvulas e hidrantes y de los sistemas de alcantarillado pluvial o sanitario para disponer el agua utilizada en el lavado. En lo posible, esos planos deben contener la información de la red como fue construida, y deben incluir los cambios o modificaciones que la red ha sufrido posteriores a su construcción.

Los modelos hidráulicos son herramientas que permiten entender, predecir y controlar situaciones que se presentan en la red. Se puede implementar funciones importantes para analizar los posibles efectos que tiene la ejecución del lavado en la red, ya sean cambios en la hidráulica de la red como sobrepresiones o presiones negativas o inconvenientes por la operación de las válvulas. De la misma forma se puede contar con la modelación de la calidad del agua, modelando el transporte, mezcla y crecimiento o decaimiento de las diferentes sustancias como el cloro residual (Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2008).

- Desarrollar una lista de interesados

Se debe evaluar el área de influencia de la ruta de lavado y los posibles afectados por los procedimientos. La afectación por el programa de lavado incluye los clientes que sufren la suspensión temporal del servicio, las personas que circulan por la zona del lavado y los vecinos que pueden sentir molestias por el ruido o las luces del equipo de lavado.

Del mismo modo, se deben evaluar los impactos ambientales antes de implementar el lavado. Como se tienen grandes volúmenes de agua y sedimentos, esta agua se debe disponer de forma segura, incluyendo remoción de cloro para evitar la contaminación de cuerpos de agua receptores y del suelo.

- Combinar el programa de lavado con otros programas de mantenimiento preventivo.

Con el fin de disminuir las molestias en la comunidad y hacer uso del programa de divulgación de la información y la logística de la planeación, se puede combinar el programa de lavado con otro tipo de mantenimiento preventivo como la inspección de válvulas e hidrantes, microcontadores, conexiones, entre otros.

- Notificar al público

En todos los casos es indispensable informar a la comunidad sobre los procedimientos que se van a realizar y cómo se pueden ver afectados según su ubicación. Con esto se espera la comprensión y colaboración de la comunidad. Se debe informar tanto a los usuarios que van a



sufrir la interrupción del servicio, como aquellos que pueden presentar bajas en la presión, sin importar la hora del día en la que se realiza el lavado.

### **3. Implementar el programa de lavado y realizar la toma de muestras**

Se deben tener en cuenta los siguientes aspectos en el momento de la ejecución del programa de lavado:

- Definir las rutas de lavado.
- Tomar medidas de seguridad.
- Tomar muestras para evaluar el lavado.
- Evaluar las muestras y analizar los resultados.

Siguiendo las recomendaciones planteadas en los literales 6.1 y 6.2 de este documento, se deben definir las rutas de lavado que debe seguir cada cuadrilla de mantenimiento. Las muestras de agua que sale de la red se deben tomar antes, durante y después de realizado el lavado. Al comparar los cambios en parámetros como turbiedad, color, concentración del desinfectante residual, entre otros, se puede determinar la efectividad del lavado y estos valores permanecen como registro histórico del lavado.

El número de parámetros a evaluar y la cantidad de muestras que se toman depende del criterio del diseñador del programa de lavado. Es importante contar con información variada y suficiente para que la muestra sea representativa del estado real del agua en la red y se puedan tomar decisiones con base en esta. En lo posible se debe evitar que la evaluación del lavado se haga únicamente por inspección visual, ya que se pueden tener diferentes criterios y se dejan de analizar otros aspectos de la calidad del agua como la presencia de coliformes, necesario para asegurar la seguridad del agua potable.

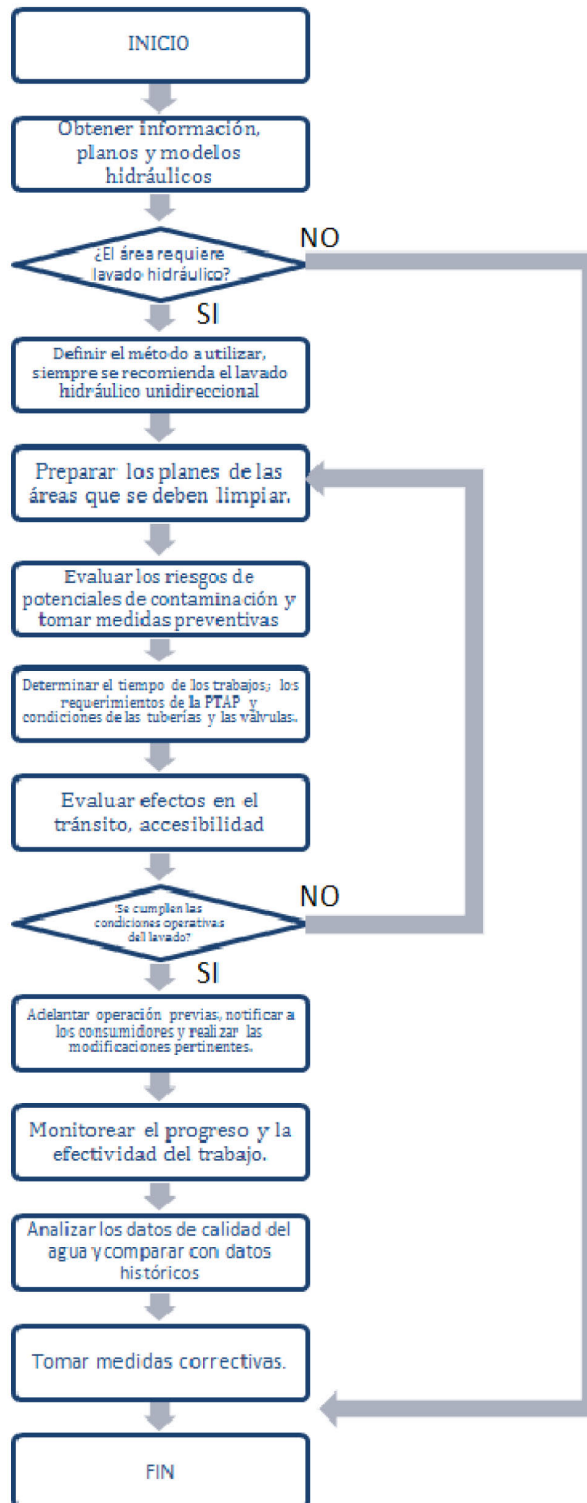
### **4. Evaluar y revisar el programa de lavado.**

Con la información obtenida de los diferentes procesos de lavado, la empresa encargada del mantenimiento de la red debe evaluar los resultados y tomar medidas correctivas con el fin de optimizar el proceso.

En la Imagen 6-13, se muestra un diagrama de flujo basado en las recomendaciones dadas por Stephenson en 1989. Este diagrama es una descripción general de los pasos que se deben seguir para lograr un buen lavado. Se incluyen las labores previas a la planeación, desde la búsqueda de la información, la planeación en sí, la ejecución y los procesos que se deben seguir luego de realizar el lavado. Este diagrama se puede utilizar para otros tipos de lavado de tuberías, identificando los cambios que se deben aplicar según la metodología que se va a aplicar.



**Imagen 6-13 Diagrama de flujo para lavado hidráulico de tuberías**



Basado en: Stephenson 1989 en OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004





#### **6.4. Evaluación de los resultados**

Se puede adoptar diferentes medidas e indicadores para evaluar la efectividad de un programa de lavado. Los parámetros que se pueden comparar incluyen las quejas y reclamos de parte de los clientes, el tiempo y frecuencia de las operaciones de lavado y las variables hidráulicas y de calidad del agua.

##### **Reclamos de los clientes**

Esta es una medida indirecta de la efectividad del lavado. Durante y después de la ejecución del lavado se puede presentar tanto un incremento como una disminución en las quejas que llegan a la empresa encargada de la operación de la red. Si se logró el objetivo de reemplazar el agua de baja calidad, se espera que el número de quejas disminuya por la remoción de partículas y biopelículas de la red. El incremento en los reclamos es la consecuencia de la alteración del equilibrio del sistema, ya que por los cambios en la hidráulica se pueden remover en masa biopelículas o resuspender partículas sedimentadas. Por esa razón es importante contar con un modelo hidráulico adecuado para prever las zonas que pueden ser afectadas por el lavado y las medidas correctivas para evitar molestias en los clientes.

##### **Tiempo y frecuencia de lavado**

En diferentes zonas de la red se pueden necesitar diferentes frecuencias de lavado y la duración de este puede variar. En zonas muertas, de demandas bajas se puede requerir el lavado cada 6 meses, mientras que en tuberías que pertenezcan a la red matriz, la cantidad de agua que por allí se mueve hace que los programas de lavado sean necesarios máximo cada 2 años.

##### **Información hidráulica y de calidad de agua**

En cuanto a parámetros de calidad de agua, se pueden evaluar la turbiedad, el color, la concentración de hierro, sólidos suspendidos y cantidad de microorganismos presentes en el agua (Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2008). Por ejemplo, la turbiedad se debe medir durante el tiempo del lavado, hasta llegar a un valor del orden de 1.0 UNT o según lo que exijan las normas vigentes. Todos los parámetros de calidad deben alcanzar al menos el valor máximo permitido por la autoridad encargada del control de la calidad del agua.

Aunque el lavado no elimina del todo las incrustaciones y no tiene efecto sobre la corrosión de la tubería, implementar el lavado permite el control del crecimiento de las biopelículas y remueve sedimentos con lo que se logra mantener la capacidad hidráulica para la que fue diseñada la tubería (AWWA. American Water Works Association, 2003). Con el lavado se deben esperar mejores condiciones de presión, flujo y menos pérdidas de energía.



En la Tabla 6-9 se muestra la síntesis de las variables a tener en cuenta en un procedimiento de lavado y la efecto en la prestación del servicio. En su mayoría, estos parámetros se pueden evaluar de forma sencilla, tanto en el laboratorio como en campo. La determinación del coeficiente de fricción es un poco más complicado ya que se requiere de un modelo hidráulico adecuado y un proceso de calibración, lo que requiere tiempo y recursos muchas veces no disponibles.

**Tabla 6-9 Metodologías para la medición de los resultados de los lavados**

Parámetro	Indicador
Frecuencia de reclamos de parte de los clientes o encuestas domiciliarias	Percepción del cliente del color, transparencia, sabor y olor
Turbiedad	Contaminación orgánica e inorgánica de diferentes fuentes
Color	Corrosión de la tubería
	Oxidación de hierro o manganeso disuelto en el agua
	Sedimentos de agua sin filtración
Carga de hierro	Corrosión en la tubería
	Hierro disuelto en agua de fuentes subterráneas
HPC <sup>8</sup>	Actividad microbiológica
	Eficacia del desinfectante
Coliformes	Riesgos para la salud
Presencia de coliformes en sedimentos	Riesgo alto para la salud
	Eficacia del desinfectante
Desinfectante residual	La capacidad residual en función de la concentración inicial de desinfectante, tipo de desinfectante, temperatura y tiempo de contacto
Sólidos suspendidos totales	Contaminación orgánica e inorgánica de diferentes fuentes
Tiempo de lavado	Medida relativa de la limpieza de la tubería
Turbiedad de la descarga inicial	Condición del hidrante
Coeficiente de fricción de la tubería	Rugosidad de la tubería, eficiencia hidráulica

Fuente: AWWA. American Water Works Association, 2003, Págs 41-42

Según una encuesta realizada en Canadá, la efectividad de los lavados se basa en criterios visuales (39%), reducción de las quejas de los usuarios (34%), medidas de campo (14%), y medidas en laboratorio de la calidad del agua (12%)(Carrière, Gauthier, Desjardins, &

<sup>8</sup> Heterotrophic plate counts: Conteos en placa de bacterias heterótrofas



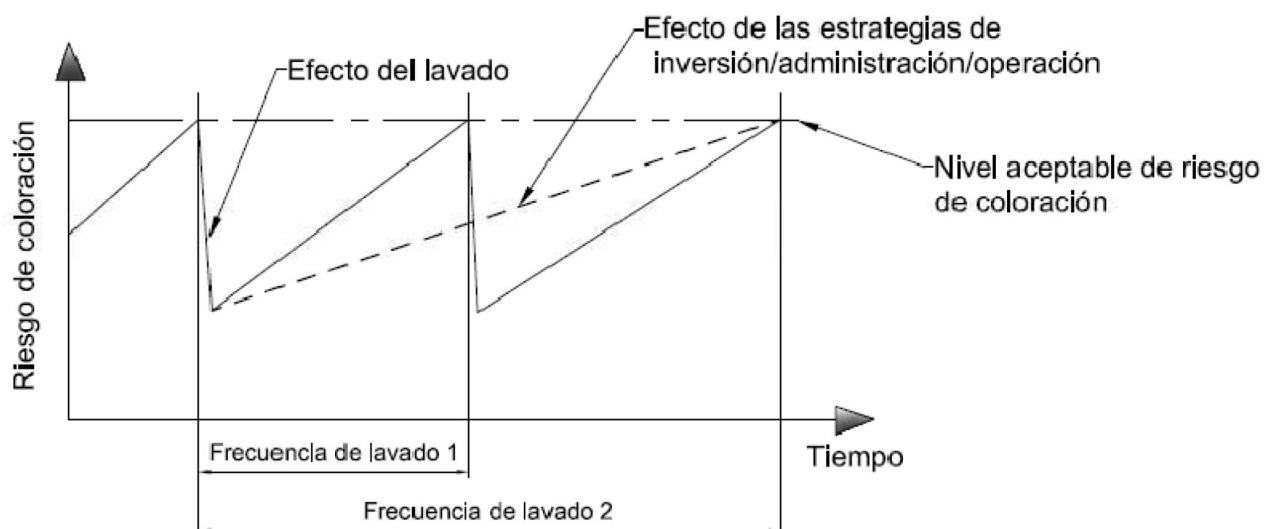
Barbeau, 2005). Esto indica que en la mayoría de los casos no se siguen procedimientos complejos para evaluar la calidad del agua, aunque se recomienda realizar medidas en campo y complementarlas con medidas en laboratorio para asegurar la calidad en las variables que no se pueden caracterizar con una simple inspección visual.

### 6.5. Estrategias a largo plazo luego de realizado el lavado

Luego de realizar el lavado, dependiendo de las características de la red y del agua que ésta mueve, se deben implementar una serie de estrategias para mantener por más tiempo la calidad del agua en la red y disminuir la frecuencia de los lavados. La inversión en metodologías que eviten la contaminación de la red permite tener un mayor beneficio económico y menos interferencias en la prestación del servicio. Las metodologías pueden ser de inversión (mejora en los procesos de tratamiento, reemplazo o rehabilitación de tuberías de hierro), de administración (plan de desinfección para controlar el crecimiento de biopelículas) y operacional (cambios en la hidráulica para favorecer velocidades y esfuerzos cortantes)(Vreeburg & Boxall, 2007).

La Imagen 6-14 muestra un esquema de lo que representa una inversión en metodologías de mantenimiento preventivo. Teniendo el riesgo de coloración del agua en función del tiempo, se observa que el efecto de la inversión disminuye la tasa de riesgo de coloración en el tiempo, con lo que la frecuencia de los lavados es menor.

Imagen 6-14 Control del riesgo de coloración del agua



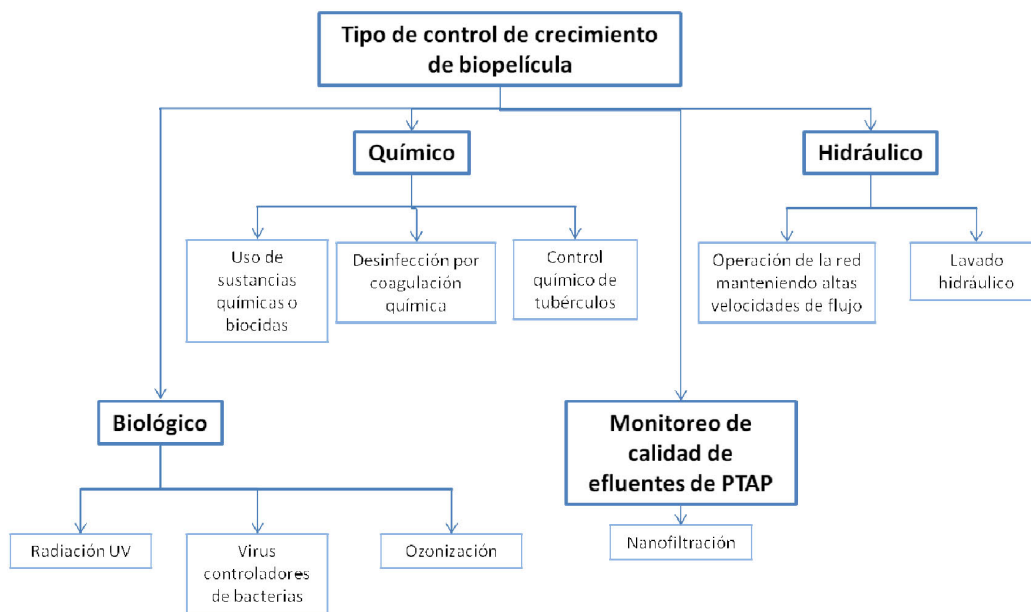
Fuente: Vreeburg & Boxall, 2007



### 6.5.1. Técnicas de control de crecimiento de biopelículas

Los tratamientos para el control de biopelículas en sistemas de distribución de agua potable van desde el control de las propiedades físicas y químicas del agua, hasta el reemplazo de secciones de tubería afectada que no responde a los procedimientos de limpieza ni a los altos niveles de desinfectante. El crecimiento de las biopelículas es afectado por múltiples factores, entonces su control es generalmente más efectivo si se cubren diferentes frentes, no limitándolo únicamente al lavado de la tubería.

Imagen 6-15 Metodologías para el control del crecimiento de biopelículas<sup>9</sup>



Fuente: Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2008, pág. 130

La primera defensa para evitar la entrada de microorganismos al agua potable es la protección de la fuente. Una defensa de la fuente efectiva, incluyendo la construcción de elementos de protección y el control del uso de la tierra en la proximidad al punto de toma, reducirá ampliamente el número de microorganismos patógenos en el agua inicial.

El agua que sale de las plantas de tratamiento de potabilización debe cumplir criterios exigentes para asegurar que la presencia de patógenos se reduce a niveles aceptables. El objetivo no es entregar al consumidor el agua esterilizada, es decir sin presencia de microorganismos viables, lo que no es práctico o económico. Sin embargo, el contenido microbiológico en el agua que sale de la planta sólo debe contener niveles muy bajos de microorganismos heterótrofos y aerobios formadores de esporas, relacionados con la formación de biopelículas o microorganismos patógenos. Se puede lograr que el agua que sale

<sup>9</sup> PTAP: Planta de Tratamiento de Agua Potable



de la PTAP contenga menos de 10 UFC (unidades formadoras de colonias)/ml de microorganismos heterótrofos. A este nivel, coliformes como *E. coli* deben estar ausentes (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004).

Algunos procesos que se pueden incluir en la planta de tratamiento del agua potable son la filtración, y la inactivación de los microorganismos con desinfectantes como cloro, cloraminas, dióxido de cloro, ozono y rayos UV. Se pueden hacer ajustes al nivel de pH para evitar la corrosión, filtración con membranas o nanofiltración para disminuir las partículas en el agua y con esto disminuir la turbiedad y la formación de sedimentos en el interior de la tubería (Baruth, 2004).

En cuanto a la red de distribución, en ocasiones se deben tomar algunas medidas adicionales destinadas a mantener una alta concentración de desinfectante residual. Éste se puede consumir por productos de corrosión de tuberías metálicas, por depósitos de hierro y manganeso en la red, por biomasa orgánica o por la materia orgánica presente en el agua (OMS, Organización Mundial de la Salud, 2004). Autores como LeChavallier demostraron que en tuberías de hierro, solo se lograba la desinfección parcial de los microorganismos hasta con 5mg/L de cloro libre; para tuberías de hierro galvanizado, cobre y PVC, mantener un nivel de 1 mg/L de cloro libre era necesario para el control de microorganismos (Mays, 2002).

Metodologías más radicales e invasivas para el control y remoción de biopelículas incluyen el lavado y la rehabilitación de la tubería. Como se estudio anteriormente en el documento, el lavado hidráulico permite la remoción de biopelículas por el aumento de la velocidad de flujo e la red. Cuando esto no es suficiente para evitar el crecimiento excesivo de microorganismos, se puede recurrir a lavados mecánicos e incluso al reemplazo de la tubería, si los materiales y la ubicación son muy susceptibles al crecimiento microbiano.

El lavado permite remover sedimentos y flocs, además que reemplaza el agua de la tubería con agua de mayor concentración de cloro. El nivel de bacterias crece de nuevo en 1 semana, las bacterias coliformes aparecieron hasta 4 semanas después. Lo mismo ocurrió con el pigging o lavado mecánico. Para lograr que estos métodos sean efectivos se debe lavar todo el sistema, incluso tramos cortos (LeChevallier, Babcock, & Lee, 1987).

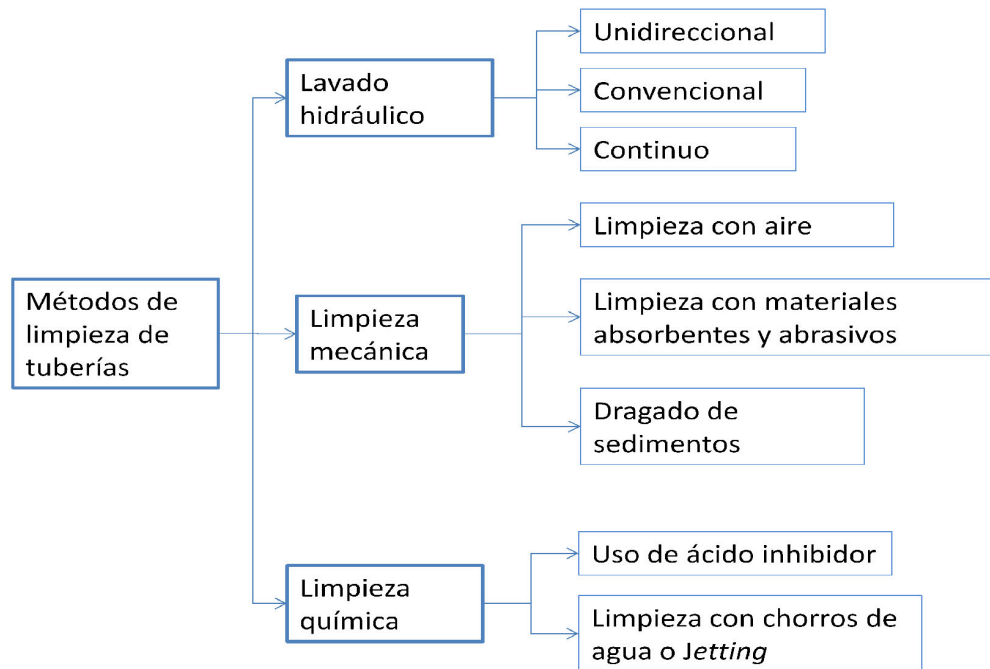
La selección del método de lavado depende los siguientes factores (AWWA. American Water Works Association, 2003):

- Condición estructural de la tubería
- Tamaño de la tubería
- Localización de válvulas, hidrantes, ventosas
- Presión y caudal disponible
- Accesibilidad a la red
- Disposición final del agua de lavado
- Efecto en la prestación del servicio



La selección del método también debe evaluar la disponibilidad de personal capacitado, equipos y recursos económicos. En resumen, las metodologías de lavado de tuberías se muestra en la Imagen 6-16.

**Imagen 6-16 Métodos de limpieza de tuberías**



Fuente: Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA, 2008, pág. 149





## 7. Experiencia

Los lavados hidráulicos son ampliamente utilizados en sistemas de distribución de agua alrededor del mundo, especialmente en países desarrollados. El lavado hidráulico unidireccional se utilizó por primera vez en la ciudad de Edmonton, Canadá en los primeros años de la década de los noventa (EPCOR). Desde entonces, diferentes empresas encargadas en el mantenimiento de la infraestructura de la red de distribución han implementado y optimizado el este procedimiento.

### Imagen 7-17 Lavados hidráulicos en London, Canadá



Fuente: City of London, Canada

Hasta ahora, en Colombia no se ha implementado de forma rigurosa ningún programa de lavado de tuberías de acueducto. Sin embargo, se espera que en los próximos años las empresas encargadas empiecen a implementar este tipo de mantenimiento, puesto que la nueva versión del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable 2009 exige hacer los lavados al menos para las redes de mayor complejidad.

A continuación se hace una compilación de las diferentes experiencias que se tienen alrededor del mundo y un estudio de la normatividad en Colombia.

### 7.1. Exterior

Los lavados hidráulicos de las tuberías son muy comunes como método de mantenimiento preventivo de las tuberías y de control de la calidad del agua. Desde los noventa, el lavado hidráulico unidireccional se ha implementado en ciudades de Estados Unidos, Canadá y Australia, principalmente.

A continuación se resume la información disponible sobre la implementación de diferentes programas de lavado en múltiples ciudades. Todos los casos muestran resultados positivos tanto técnicos como administrativos con la implementación de los programas de lavado.



**Tabla 7-10 Experiencia internacional**

Caso de Estudio	Comentarios
<p>Departamento de Agua y Energía, Los Ángeles, California            (AWWA. American Water Works Association, 2003, pág. xix)</p>	<p>La implementación del programa de lavado resulto en una disminución de los reclamos en 40% para la toda la red            En zonas en donde se realizó el lavado, los reclamos disminuyeron en 95%</p>
<p>Cincinnati Water Works, Ohio            (AWWA. American Water Works Association, 2003, pág. xix)</p>	<p>Con el lavado hidráulico unidireccional de tuberías de hierro se logró una disminución de 90% en el conteo de bacterias HPC            La turbiedad, el color y la concentración de hierro disminuyeron entre 40% y 55%</p>
<p>Yarra Valley Water, Australia            (AWWA. American Water Works Association, 2003, pág. xix)</p>	<p>Flujos de aire a presión y lavado unidireccional son utilizados regularmente para remover sedimentos naturales de la red.            Las quejas de los usuarios han disminuido hasta 50% con lavado unidireccional y 70% con aire a presión.</p>
<p>Edmonton, Canadá            (AWWA. American Water Works Association, 2003, pág. xix)</p>	<p>Los resultados de las pruebas realizadas antes y después del lavado le permiten a la ciudad disminuir la frecuencia de los lavados. Cerca de un tercio de la ciudad se lava cada 4 años.            El lavado no ha sido efectivo para solucionar problemas en tuberías de hierro. Para estos casos se prefiere implementar lavados mecánicos o rehabilitación con revestimiento interno.</p>
<p>Severn Trent Water, Reino Unido            (AWWA. American Water Works Association, 2003, pág. xix)</p>	<p>Los métodos de limpieza se selecciona en base a seis parámetros: calidad del agua, material o revestimiento de la tubería, puntos muertos, quejas de los usuarios, condiciones hidráulicas y actividades en el sistema.            Swabbing, aire a presión y lavado hidráulico unidireccional se utilizan para disminuir los riesgos de incumplimiento junto con regulación de los reclamos.</p>
<p>Sydney Water Corporation, Australia            (AWWA. American Water Works Association, 2003, pág. xix)</p>	<p>El lavado de las tuberías se utilizó para disminuir la frecuencia de pruebas positivas para coliformes. En una zona, con el lavado se lograron mejoras significativas, que hacían parte de una estrategia integrada de mejoramiento de la calidad del agua.</p>





REGLAS DE OPERACIÓN PARA EL DESPRENDIMIENTO DE BIOPELICULAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

<b>Caso de Estudio</b>	<b>Comentarios</b>
Charleston Water System (Kenter, 2009)	La empresa encargada del mantenimiento realizó una matriz para evaluar si una tubería debía tener un mantenimiento de rutina o si debía ser reemplazada. Se consideran factores como el tamaño de la tubería, su edad, material, caudales, número de fallas y fugas, y el potencial de corrosión del suelo. La información se correlaciona con el costo del mantenimiento de la tubería existente, la pérdida de capacidad de la tubería, y la importancia de la tubería, que incluye su ubicación y proximidad a otras estructuras.  Se realiza mantenimiento preventivo a 7,200 hidrantes y 40,000 válvulas. Cerca del 70% del presupuesto de la empresa se destina a programas de mantenimiento
City of Portsmouth Water Utility (City of Portsmouth, Virginia, 2003)	Se realiza lavado hidráulico convencional en la primavera, logrando velocidades de 6 pies por segundo (1.8 m/s) para remover óxido y sedimentos.  El programa de lavado hidráulico unidireccional se diseñó para una tercera parte de la ciudad en el año 1998. En el siguiente año se implementó por primera vez.
City of London's Watermain Flushing Program (City of London, Canada)	En esta ciudad se implementa el lavado hidráulico unidireccional, logrando ahorrar 40% de agua comparado con el lavado convencional. Los lavados se realizan de día por seguridad de los operarios y para poder evaluar fácilmente los cambios en la calidad del agua. En promedio los lavados duran entre 30 minutos y una hora.  El agua de lavado se desecha en el sistema de drenaje urbano. Para remover el cloro residual del agua desechada, utilizan ascorbato de sodio.

Los programas de lavado hidráulico se han implementado tanto en ciudades grandes como pequeñas, con diferentes configuraciones topológicas, de antigüedad, diferentes fuentes de agua y tratamientos de potabilización. En todos los casos se realizó un análisis detallado de la red, que permite identificar parámetros vulnerables o críticos y con esto optimizar los programas de lavado.



## 7.2. Colombia

En la revisión de la literatura, no se encontró evidencia de programas de lavado hidráulico en las diferentes redes de distribución de agua potable en el país. La preocupación para las autoridades relacionadas con el sector del agua potable y el saneamiento básico es aumentar la cobertura de estos servicios básicos, puesto que para el 2007 se tenía un cubrimiento del 83.4% para acueducto y 73.1% para alcantarillado (SIAC-Sistema de Información Ambiental de Colombia, 2009).

Sin embargo, con la nueva versión del Reglamento Técnico de Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico, se definen los lineamientos para realizar los lavados hidráulicos en líneas de conducción y de distribución de agua potable que se describen a continuación.

En el Título B, Literal B.7.12.7 se definen los lavados de las redes de distribución así “Las operaciones de lavado de las redes que conforman el sistema de distribución de agua potable deben quedar establecidas desde el diseño o deben ser diseñadas por la persona prestadora del servicio de agua potable”. Las frecuencias de lavado recomendadas se muestran en Tabla 7-11. Según el RAS, “La frecuencia de lavado debe ser aquella necesaria para mantener un cloro residual en niveles apropiados, aún en las zonas muertas de la red de distribución”.

**Tabla 7-11 Frecuencias de lavado para proyectos en Colombia**

Características del sistema	Frecuencia de lavado	Comentarios
Para Nivel de Complejidad Alto y recomendado para el Medio Alto	Dos veces al año	Para zonas que tengan tuberías de hierro fundido o acero donde estén desalineadas, cuando haya tubérculos en grandes cantidades, o cuando haya quejas frecuentes de olor, color y sabor por parte de los suscriptores.
Sistemas de válvulas de división, hidrantes y tuberías de baja velocidad	Dos veces al año	Para cualquier Nivel de Complejidad
En áreas donde los problemas de calidad de agua son crónicos.	Al menos cada dos meses	El programa de lavado debe definirse haciendo uso del modelo hidráulico de la red de distribución de agua potable



Otros parámetros que se incluyen en las sugerencias del RAS son el horario de los lavados, entre las 11 p.m. y las 5 a.m.; no se recomienda realizar los lavados en tuberías de diámetros mayores a 300 mm y en caso de que existan incrustaciones en tuberías metálicas, se deben ejecutar lavados mecánicos.

En todos los casos, después de realizar el lavado se deben cumplir los valores máximos permisibles de las diferentes variables que afectan la calidad del agua; para el caso colombiano se debe seguir la Resolución 2115 del año 2007 o la norma vigente. En la Tabla 7-12, Tabla 7-13 y Tabla 7-14 se muestran los parámetros que debe tener el agua para que se considere potable. Los parámetros microbiológicos se definen para un nivel de confianza de 95% y técnicas de detención de una UFC<sup>10</sup> o un microorganismo en 100cm<sup>3</sup>.

**Tabla 7-12 Características físicas del agua potable en Colombia**

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable ó No aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (NTU)	2

Fuente: Ministerio de la Protección Social, 2007

**Tabla 7-13 Características químicas del agua potable en Colombia**

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono orgánico Total	COT	5.0
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.1
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10.0
Fluoruros	F <sup>-</sup>	1.0

Fuente: Ministerio de la Protección Social, 2007

<sup>10</sup> UFC: Unidad Formadora de Colonia



**Tabla 7-14 Características microbiológicas del agua potable en Colombia**

<b>Técnicas utilizadas</b>	<b>Coliformes Totales</b>	<b><i>Escherichia coli</i></b>
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm <sup>3</sup>	0 UFC/100 cm <sup>3</sup>
Enzima Sustrato	< de 1 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>	< de 1 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>
Sustrato Definido	0 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>	0 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>
Presencia-Ausencia	Ausencia en 100 cm <sup>3</sup>	Ausencia en 100 cm <sup>3</sup>

Fuente: Ministerio de la Protección Social, 2007

En caso de eventos de coloración por cambios en la operación de la red, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá realiza lavados convencionales, con la apertura de hidrantes en las zonas que se creen se van a ver afectadas por las modificaciones en la red (Nieto Henao, 2009).



## 8. Conclusiones

### 8.1. Biopelículas en redes de distribución de agua potable

- Evaluar la presencia de biopelículas en redes de distribución de agua potable, al igual que controlar su crecimiento, es importante para mantener la calidad del agua que circula por la red. Se deben controlar tanto los factores físicos, químicos y microbiológicos para evitar problemas de salud pública.
- Se requiere de presencia de microorganismos, matriz extracelular y disponibilidad de una superficie para que se desarrolle una biopelícula. Si hace falta uno de estos tres factores, la biopelícula no crecerá.
- Los tratamientos de potabilización del agua realizan una desinfección más no una esterilización, por lo que siempre se espera la presencia de microorganismos viables en las tuberías de agua potable. Otra forma de entrada de bacterias a la red es por grietas o agujeros en las tuberías antiguas, o reparaciones de algún tramo de tubería.
- Las propiedades viscosas de la biopelícula contribuyen a incrementar la resistencia por fricción en las tuberías, entonces con mayores velocidades constantes, la biopelícula no se desprende y por el contrario se hace más compacta y estable.
- El cambio principal en la red de distribución de agua potable con presencia de biopelículas se presenta en la rugosidad de la tubería, que afecta directamente las pérdidas de energía por fricción y la reducción de la capacidad.
- El desprendimiento de las biopelículas se da por aumentos en el esfuerzo cortante que debe resistir o disminución de la fuerza interna de la matriz de microorganismos. Los mecanismos de desprendimiento son la abrasión, erosión, desprendimiento en masa o predación.

### 8.2. Lavados hidráulicos de tuberías

- El diseño de las redes de distribución de agua potable se basan en el concepto de autolimpieza, al mantener una velocidad o esfuerzo cortante mínimo para evitar se sedimentación de partículas y la formación de biopelículas. Cuando estos parámetros no son suficientes, se deben implementar programas de lavado de tuberías.
- Cuando ocurren cambios en la operación hidráulica del sistema, se puede provocar el desprendimiento de biopelículas, que deteriora la calidad del agua que le llega al consumidor.



- El lavado hidráulico se limita a la fuerza del agua para mantener en buenas condiciones la red de distribución de agua potable, causando el mínimo de interrupciones al servicio.
- Existen dos metodologías principales de lavados hidráulicos, el lavado convencional y el lavado unidireccional. El lavado convencional consiste en abrir uno o varios hidrantes y permitir que el agua salga de la red hasta que se alcance la calidad de agua que se desea. El lavado unidireccional se basa en la selección y operación de ciertas válvulas e hidrantes que limitan a un solo camino el recorrido del agua con lo que se logra mayor eficiencia.
- El lavado hidráulico convencional requiere menos planeación y recursos (personal y equipo) pero no alcanza velocidades máximas en la red. Con el lavado hidráulico unidireccional se alcanzan velocidades más altas, mayores esfuerzos cortantes y menos desperdicio de agua, pero requiere de planificación previa.
- Los objetivos del lavado hidráulico debe ser recuperar la calidad del agua para cumplir con los parámetros exigidos por la autoridad encargada.

### **8.3. Implementación de lavados hidráulicos como mantenimiento preventivo**

- La planeación y ejecución de los programas de lavado son una buena forma de mantener actualizada la información que se tiene de la red: su topología, operación hidráulica y zonas susceptibles al deterioro de la calidad del agua.
- Los pasos que se deben seguir para implementar un programa de lavado hidráulico unidireccional son: determinar la conveniencia del lavado, planear y administrar el programa de lavado, implementar el programa y realizar la toma de muestras y por último evaluar y revisar los resultados del programa.
- Los parámetros del mantenimiento como la definición de la ruta del lavado, velocidades durante el lavado, duración y frecuencia del mismo son específicos para cada sitio de la red. Con el análisis de datos históricos se debe lograr su optimización.
- Se puede adoptar diferentes medidas e indicadores para evaluar la efectividad de un programa de lavado. Los parámetros que se pueden comparar incluyen las quejas y reclamos de parte de los clientes, el tiempo y frecuencia de las operaciones de lavado y las variables hidráulicas y de calidad del agua.
- El crecimiento de las biopelículas está vinculado a varios factores por lo que su control no se debe limitar al lavado de las tuberías. Se debe controlar la entrada de microorganismos desde la fuente, controlar los procesos de potabilización, mantener concentraciones de desinfectante residual efectivas y controlar los procesos de corrosión en las tuberías.



## 9. Bibliografía

AWWA, American Water Works Association. (2005). Developing and Implementing a Distribution System Flushing Program. In B. Lauer, *Water Quality in the Distribution System* (pp. 865-883). Denver, CO.

AWWA. American Water Works Association. (2003). *Investigation of Pipe Cleaning Methods*. EEUU: Awwa Research Foundation.

Barrera Tapias, S. (1996). *Problemas y temas selectos de Ingeniería Sanitaria, Conferencias para el Curso de Ingeniería Sanitaria*. Bogotá: UNIANDÉS.

Barton, A. F., Wallis, M. R., Sargison, J. E., Buia, A., & Walker, G. J. (2008). Hydraulic Roughness of Biofouled Pipes, Biofilm Character, and Measured Improvements from Cleaning. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134 (6), 852-857.

Baruth, E. E. (2004). *Water Treatment Plant Design* (Cuarta Edición ed.). (A. W. AWWA, & A. A. Engineers, Edits.) McGraw Hill Handbooks.

Carrière, A., Gauthier, V., Desjardins, R., & Barbeau, B. (2005). Evaluation of loose deposits in distribution systems through unidirectional flushing. *Journal AWWA*, 9 (97), 82-92.

Carvajal, L. F., Gómez, A., & Ochoa, S. (2007). Simulación de un Lavado Hidráulico en Tuberías Para el Control del Crecimiento de Biopelícula. *Dyna*, 74 (152), 63-72.

Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA. (2008). *Informe sobre los factores que generan la formación, crecimiento y posterior desprendimiento de biopelículas en las redes matrices de acueducto*. Bogotá: Universidad de Los Andes.

Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados-CIACUA. (2009). Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico. *Título B: Sistemas de Distribución de Agua Potable*. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.

City of London, Canada. (s.f.). *Watermain Flushing Program: Improving Drinking Water Quality*. Recuperado el 8 de Junio de 2009, de [http://www.london.ca/d.aspx?s=/Water/Watermain\\_Flushing.htm](http://www.london.ca/d.aspx?s=/Water/Watermain_Flushing.htm)

City of Portsmouth, Virginia. (Noviembre de 2003). *"High Speed" Flushing Maintains Water Quality*. Recuperado el 8 de Junio de 2009, de <http://www.portsmouthva.gov/publicutil/newsletters/highspeedflushing.htm>

EPCOR. (s.f.). *Unidirectional flushing*. Recuperado el 8 de Junio de 2009, de <http://www.epcor.ca/en-ca/social-responsibility/environmental-vision/ApplyingTechnologies/CleanerWater/Pages/unidirectional.aspx>



Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F., & Simms, J. (2001). The Potencial for Biofilm Growth in Water Distribution Systems. *Water Research* , 35 (17), 4063-4071.

Kenter, P. (Enero de 2009). *Municipal Sewer and Water Magazine*. Recuperado el 8 de Junio de 2009, de <http://www.mswmag.com/editorial/1339/2009/01>

LeChevallier, M. W., Babcock, T. M., & Lee, R. G. (1987). Examination and Characterization of Distribution System Biofilms. *Applied and Environmental Microbiology* , 53 (12), 2714-2724.

Lehtola, M. J., Torvinen, E., Kusnetsov, J., Pitkänen, T., Maunula, L., Von Bonsdorff, C.-H., y otros. (2007). Survival of Mycobacterium avium, Legionella pneumophlia, escherichia coli, and Caliciviruses in Drinking Water-Associated Biofilms Grown under High-Shear Turbulent Flow. *Applied and Environmental Microbiology* , 73 (9), 2854-2859.

Mays, L. (2002). *Manual de Sistemas de Distribución de Agua* (Primera Edición ed.). McGraw Hill.

McGhee, T. J. (1999). *Ingeniería Ambiental. Abastecimiento de agua y Alcantarillado* (Sexta Edición ed.). McGraw Hill.

Ministerio de la Protección Social. (2007). Resolución 2115 de 2007 Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano. Colombia.

Murcia, M. A. (2009). *Biopelículas: Mecanismos y Procesos para Removerlas de los Sistemas de Distribución de Agua Potable*. Bogotá, Colombia: Tesis Universidad de Los Andes.

Nieto Henao, L. (2009). *Eventos de Coloración en el Agua Potable como Consecuencia del Desprendimiento de Biopelículas: El caso de Bogotá D.C*. Bogotá: Tesis Uniandes.

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2004). *Safe Piped Water: Managing Microbial Water Quality in Piped Distribution Systems*. Londres: IWA.

Percival, S., Knapp, J., Wales, D., & Edyvean, R. (1999). The Effect of Turbulent Flow and Surface Roughness on Biofilm Formation in Drinking Water. *Journal os Industrial Microbiology & Biotechnology* , 22, 152-159.

Reyes del Toro, P. (2004). *Aspectos Hidráulicos para el Lavado de Redes de Distribución de Agua Potable*. Bogotá, Colombia: Tesis Universidad de Los Andes.

Rittman, B. E., & McCarty, P. L. (2001). *Environmental Biotechnology: Principles and Applications* (Primera Edición ed.). Nueva York: McGraw-Hill.

Rochex, A., Godon, J.-J., Bernet, N., & Escudié, R. (2008). Role of Shear Stress on Composition, Diversity and Dynamics of Biofilm Bacterial Communities. *Water Research* , 42, 4915-4922.





SIAC-Sistema de Información Ambiental de Colombia. (11 de Marzo de 2009). *Agua potable y alcantarillado. Panorama General*. Recuperado el 11 de Junio de 2009, de [http://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=302&conID=373#\\_ftn2](http://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=302&conID=373#_ftn2)

Simoes, L. C., Azevedo, N., Pacheco, A., Keevil, C. W., & Vieira, M. J. (2006). Drinking Water Biofilm Assessment of Total and Culturable Bacteria Under Different Operating Conditions. *Biofouling*, 22 (2), 91-99.

Stoodley, P., Cargo, R., Rupp, C., Wilson, S., & Klapper, I. (2002). Biofilm Material Properties as Related to Shear-Induced Deformation and Detachment Phenomena. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 29, 361-367.

Torvien, E., Lehtola, M. j., Martikainen, P. J., & Miettinen, I. T. (2007). Survival of Mycobacterium avium in Drinking Water Biofilms as Affected by Water Flow Velocity, Availability of Phosphorus, and Temperature. *Applied and Environmental Microbiology*, 73 (19), 6201-6207.

Tsvetanova, Z. (2006). Study of Biofilm Formation on Different Pipe Material in a Model of Drinking Water Distribution System and its Impact on Microbiological Water Quality. En *Chemicals as Intentional and Accidental Global Environmental Threats* (págs. 463-468). Sofia, Bulgaria: Springer.

Von Huben, H. (1999). *Water Distribution Operator Training Handbook* (Segunda Edición ed.). Denver, CO: American Water Works Association AWWA.

Vreeburg, J., & Boxall, J. (2007). Discolouration in Potable Water Distribution Systems: A Review. *Water Research*, 41, 519-529.

Wolfaardt, G. M., Lawrence, J. R., & Korber, D. R. (1999). Function of EPS. En J. Wingender, T. R. Neu, & H.-C. Flemming, *Microbial Extracellular Polymeric Substances: Characterization, Structure and Function* (págs. 172-200). Alemania: Springer.