

INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE LA BIOPELÍCULA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PÚBLICA DE AGUA POTABLE



James Giovanni Ospina Restrepo

**construaprende
.com**

Universidad de Medellín

Facultad de Ingeniería Civil

Área de Acueductos y Alcantarillados

Medellín

2003

**INVESTIGACIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE LA
BIOPELÍCULA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PÚBLICA DE AGUA
POTABLE**

James Giovanni Ospina Restrepo

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título
de Ingeniero Civil**

Asesor

Ingeniero Civil Abdón de J. Duque Serna

**construaprende
.COM**

Universidad de Medellín

Facultad de Ingeniería Civil

Área de Acueductos y Alcantarillados

Medellín

2003

Nota de aceptación



Presidente del jurado

Jurado

Jurado



*Para mi padre, por todo el esfuerzo, la paciencia y
el apoyo incondicional que me brindó;
Para mi madre, por todo el amor, cariño y
la esperanza que depositó en mí;
A mis abuelos, que siempre creyeron en mí.*

James G. Ospina Restrepo

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por todo el apoyo moral y económico que me ofrecieron durante toda mi carrera.

Al Ingeniero civil Abdón de J. Duque Serna, por darme la oportunidad de desarrollar una excelente idea, y por todo el apoyo, la motivación y el conocimiento que me brindó.

A las empresas operadoras del servicio de acueducto ingeniería total; CONHYDRA; ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS SOSTENIBLES, ASSA; OPERADORES DE SERVICIOS; SISTEMAS PÚBLICOS Y EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN; por la información suministrada para realizar la encuesta.



CONTENIDO

CONTENIDO	I
RESUMEN	IV
ABSTRACT	VI
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
INTRODUCCIÓN	1
1 CAPÍTULO 1: AGUA POTABLE	4
1.1 ALCANCE	4
1.2 PROPIEDADES	4
1.2.1 Físicas	4
1.2.1.1 Turbiedad	5
1.2.1.2 Color	6
1.2.1.3 Olor y Sabor	7
1.2.1.4 Temperatura	7
1.2.1.5 Sólidos	8
1.2.2 Químicas	8
1.2.2.1 Alcalinidad	8
1.2.2.2 Acidez	9
1.2.2.3 Potencial hidrógeno, pH	9
1.2.2.4 Dureza	10
1.2.2.5 Grasas y aceites	11
1.2.2.6 Hierro y manganeso	11
1.2.2.7 Cloruros	11

1.2.2.8	Sulfatos.....	12
1.2.3	Nutrientes básicos presentes en el agua potable.....	12
1.2.3.1	Carbono.....	12
1.2.3.2	Nitrógeno.....	12
1.2.3.3	Fósforo.....	13
1.2.31.2.4	Microbiología Bacteriología del agua.....	
	132	
1.2.4.1	Parámetros de evaluación microbiológica.....	15
1.2.4.1.1	Método de los tubos múltiples de fermentación.....	16
1.2.4.1.2	Método de filtración por membrana.....	16
1.2.4.1.3	Método del sustrato definido.....	17
1.3	NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DEL AGUA POTABLE EN COLOMBIA. DECRETO NÚMERO 475 DE 1998.....	
	184	
2	CAPÍTULO 2: LA BIOPELÍCULA	
	2117	
2.1	ALCANCE.....	
	2117	
2.2	DESCRIPCIÓN.....	
	2117	
2.3	DESARROLLO Y CRECIMIENTO.....	
	2319	
2.4	COMPOSICIÓN MICROBIOBACTERIOLÓGICA.....	
	3026	
2.4.1	Bacterias.....	
	3026	
2.4.2	Hongos.....	
	3228	
2.4.3	Protozoos y otros invertebrados.....	
	3228	
2.5	FACTORES QUE FAVORECEN EL CRECIMIENTO.....	
	3329	
2.5.1	Factores ambientales.....	
	3329	
2.5.2	FactoresEfectos hidráulicos.....	
	3531	
2.5.3	Disponibilidad de nutrientes inorgánicos y material orgánico biodegradable.....	
	373	
2.5.4	Concentración de desinfectantes residuales.....	
	384	
2.5.5	Materiales de las tuberías de los sistemas de distribución.....	
	4036	

2.5.6	Acumulación de sedimentos	4238
2.5.7	Corrosión.....	4339

3 CAPÍTULO 3: LA BIOPELÍCULA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE Y SUS PROBLEMAS

451

3.1	ALCANCE.....	451
3.2	MICROBIOLOGÍA DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	451
3.2.1	Microorganismos presentes en los sistemas de distribución.....	473
3.2.2	Rutas a través de las cuales los patógenos pueden entrar en los sistemas de distribución.....	495
3.2.2.1	A través de la fuente de agua (fallas en el tratamiento).....	495
3.2.2.2	A través de tuberías rotas, válvulas, uniones y empaques.....	5046
3.2.2.3	A través de la contaminación del agua potable almacenada en tanques.....	5146
3.2.2.4	A través del manejo inapropiado de los materiales, el equipo y el personal en contacto con el agua potable.....	5147
3.2.2.5	A través de un inadecuado sistema de seguridad del sistema....	5147
3.3	PROBLEMAS CAUSADOS POR LA BIOPELÍCULA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	5248
3.3.1	Sobre la calidad del agua.....	4528
3.3.1.1	Propiedades organolépticas del agua.....	5248
3.3.1.2	Pérdida de la utilidad de organismos indicadores.....	5349
3.3.1.3	Efectos sobre la salud.....	5349
3.3.2	Sobre los elementos del sistema de distribución.....	540
3.3.2.1	Corrosión.....	540

3.4	CÓMO RECONOCER LA PRESENCIA DE UNA BIOPELÍCULA...	562
3.4.1	Exploración de la superficie de las tuberías.....	573
3.4.2	Medida de los niveles de nutrientes.....	6056
3.4.3	Corrosión.....	6258
3.4.4	Análisis de la hidrodinámica del sistema.....	5628

4 CAPÍTULO 4: ESTRATEGIAS DE CONTROL DE LA BIOPELICULABIOPELÍCULA

6459

4.1	ALCANCE.....	6459
4.2	PLAN DE CONTROL DE LA BIOPELÍCULA.....	6459
4.2.1	UN EXTENSIVO PROGRAMA DE MANTENIMIENTO.....	650
4.2.1.1	Implementación de un rutinario procedimiento de “Flushing”.....	650
4.2.1.2	Dispositivos propulsados por fluidos: “Pigging”.....	672
4.2.1.3	Dispositivos atados a cables: “Cable Attached Devices”.....	6738
4.2.1.4	Reemplazo de tuberías.....	7469
4.2.2	CONTROL DE LA CORROSIÓN.....	750
4.2.3	CONTROL DEL NIVEL DE NUTRIENTES.....	750
4.2.4	PRÁCTICAS DE DESINFECCIÓN ADECUADAS.....	761
4.2.4.1	Cloro.....	761
4.2.4.2	Monocloraminas.....	783
4.2.4.3	Ozono.....	783

5 CAPÍTULO 5: ENCUESTA SOBRE BIOPELÍCULA

80A

5.1	ALCANCE.....	
	8075	
5.2	FORMULATO DE ENCUESTA.....	
	8075	
5.3	BASE DE DATOS.....	
	861	
5.4	RESULTADOS DE LA ENCUESTA.....	
	8905	
6	CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	
	88 94	
7	BIBLIOGRAFÍA.....	
	982	
	APÉNDICE A: GLOSARIO DE TÉERMINOS.....	
	10296	
	APÉNDICE B: ENCUESTAS.....	107





RESUMEN

El término BIOPELÍCULA, se refiere a la película biológica que crece en las paredes internas de las tuberías de los sistemas de acueductos,. La cual es creada por diferentes tipos de microorganismos y una sustancia polimérica que ellos mismos segregan, que les proporciona la suficiente fuerza para adherirse de las paredes de las tuberías, resistir la fuerza cortante del agua, obtener los nutrientes necesarios para su desarrollo y protegerse de la acción de los desinfectantes.

Investigaciones realizadas en los años 70's, afirman que durante el recorrido del agua potable a través de las tuberías de los sistemas de acueductos, se produce una deterioroperdida de su calidad, tanto organoléptica como bacteriológica. Además, afirmanY que la fuente de esta contaminación eran las biopelículas presentes en las tuberías.

El fenómeno de crecimiento de biopelícula en los sistemas de distribución de agua potable, apenas está despertando, en nuestro medio, el interés por parte de los ingenieros a investigar junto con los biólogos, cuales pueden ser las consecuencias de su presencia dentro de los sistemas de distribución, sobre la calidad del agua y la integridad de la infraestructura.

Los sistemas de distribución de agua potable constituyen un ambiente favorable para la formación y desarrollo de una película bacteriana. Las condiciones hidrodinámicas del flujo regulan el transporte de nutrientes hacia, desde y en la biopelícula. La estructura de la biopelícula parece especialmente diseñada para permitir el intercambio de nutrientes y productos con el medio ambiente, favoreciendo su transporte y difusión. Los microorganismos adheridos a una biopelícula presentan una resistencia al cloro 150 veces mayor que los microorganismos en suspensión. Esto indica que ; lo que hace a una biopelícula, es un ambiente que sirve como protección ante los desinfectantes.

Diferentes tipos de bacterias como: *E. coli*, *Legionella Pneumophila*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Arthrobacter*, *Acinetobacter*, *Sarcina*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Bacillus*, *Klebsiella* y *Enterobacter*; han demostrado tener la habilidad de sobrevivir en los sistemas de distribución, con la posibilidad de crecer en y/o producir biopelículas. Estos pueden entrar a los sistemas de distribución por una variedad de caminos que incluyen: problemas en el proceso de potabilizacióntratamiento, deficiencias en la infraestructura de los sistemas de distribución. La presencia microorganismos en los sistemas puede resultar en una colonización de las superficies de las tuberías. Una vez la biopelícula se genera, los

microorganismos que entran en el sistema, encuentran un lugar ideal para sobrevivir y desarrollarse.

La biopelícula puede incrementar la corrosión de las tuberías, afectar la hidrodinámica del sistema al disminuir la capacidad hidráulica de las tuberías, o reducir la eficiencia del método de coliformes totales como indicador de contaminación del agua. El crecimiento bacteriano en las biopelículas puede resultar en una deterioración de la calidad del agua, generando mal olor y sabor, y la proliferación de macro invertebrados. Los organismos presentes en las biopelículas y sus productos pueden disminuir los niveles de desinfectante (al incrementar la demanda de desinfectante) y ser un potencial riesgo para la salud.

La presencia de biopelículas y por lo tanto sus problemas asociados a ella, pueden ser controlados implementando planes de control, compuestos por la combinación de diferentes estrategias, como por ejemplo: realizar un completo programa de mantenimiento; realizar un extensivo control de la corrosión; utilizar prácticas de desinfección adecuadas y realizar un control de los nutrientes en el agua. El programa de mantenimiento se lleva a cabo implementando algunos métodos de limpieza de tuberías como el *flushing*, *pigging* y la utilización de dispositivos atados a cables. Los controles de la corrosión son: el realizar un ajuste del pH del agua, ó el uso de inhibidores químicos como el silicato de sodio. Además, se deberán utilizar el desinfectante más efectivo en la dosis correcta y controlar los niveles de nutrientes del agua a través de filtros de carbón activado.

Finalmente, se realizó una encuesta con empresas operadoras de sistemas de acueductos en nuestro medio (Antioquia); y se contactaron por medio de una base de datos de correos electrónicos y por la participación en el foro de discusión AQCUAFORO de Heastad Methods (www.heastad.com) otras empresas en Colombia y América Latina. Con la mala fortuna de no obtener respuestas positivas (únicamente se recibió la respuesta a la encuesta por parte de la empresa ENACAL, que es la encargada de operar el acueducto de Managua, capital de Nicaragua). Indiferencia atribuida al poco conocimiento del fenómeno y sus potenciales problemas. Las encuestas realizadas en la ciudad de Medellín, a cinco operadores de sistemas de acueducto en cargados de los sistemas de algunos municipios del departamento de Antioquia y del valle de Aburrá, confirman la presencia de biopelícula dentro de las tuberías de los acueductos locales y el poco conocimiento del fenómeno por parte de los técnicos encargados de su operación y mantenimiento. Únicamente las Empresas Públicas de Medellín se encuentra realizando un estudio, con el fin de conocer más sobre el fenómeno, para poder tomar los correctivos necesarios para controlarlo y evitar sus problemas.

ABSTRACT

BIOFILM, refers to the biological film that grows in the internal walls of the distribution system pipes,. wWhich is created by different types of microorganisms and a polymeric substance that is segregated by themselves providing them no only with force enough to adhere to the pipe walls, but also to resist the sharp force of the water, obtain the necessary nutrients for its development and be protected from the action of the disinfectants.

Research carried out in the 70's, shows that during the running of the drinking water through distribution systems pipes, a loss of its quality takes place, both organoleptic and bacteriological quality,. A and what causes this contamination was the biofilm presence in the pipe walls.

The phenomenon of biofilm growth in the drinking water distribution systems is encouraging both engineers and the biologists to research which can be the consequences of its presence inside the distribution systems, about the quality of the water and the integrity of the infrastructure.

The water distribution systems constitute a suitable environment atmosphere for the formation and development of a bacterial layerfilm. The hydrodynamic conditions of the flow regulate the conveytransporting of nutrients thoroughoward, from and in tohe the biofilm. Biofilm structure seems to be specially designed to carry out allow tthe exchange of nutrientstious and products with the environment, favoring its conveying transport and diffusion. The microorganisms stuck to a biofilm showpresent a resistance to the chlorine 150 times stronger adult thant the microorganisms in suspension;. It that makes to a biofilm, onean environment in which atmosphere that the microorganisms are protected from disinfectants.serves as protection before the disinfectants.

Different types of bacteriasbacteria, such as like: *E. Coli*, *Legionella Pneumophila*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Arthrobacter*, *Acinetobacter*, *Sarcina*, *Micrococcus*, *Proteus*, *Bacillus*, *Klebsiella And Enterobacter*; have proven demonstrated toto have the ability to survive in the distribution systems, with the possibility of growing inside and/or producing e biofilms. These can enter to the water distribution systems by a variety of ways that include: treatmenttreatment process problems, water distribution systems infrastructure failuresdeficiencies. The presence of these microorganisms in the systems resultingcan be in a colonization of the surfaces of the pipes walls. Once the biofilm is generated, the

microorganisms taking over that to enter in the system, find an good ideal place to survive and to be developed.

Biofilm can increase pipe corrosion, to affect the system hydrodynamic system by when decreasing diminishing the hydraulic capacity of the pipes, or to reduce the efficiency utility of the method of total coliform as a indicator of pollution of the water pollution. The bacterial growth in Biofilm can be in a deteriorate the quality water quality and deteriorate, generating bad smell scent and taste.flavor, and the spineless macro proliferation. The biofilm present organisms in the biofilm and their products can decrease diminish the levels of disinfectant (when increasing the demand of disinfectant), and to be a potential risk for the health.

Biofilm presence as well as and therefore its the problems associated to it, can be controlled implementing control plans, composed by the combination of different strategies, for example: to carrying out a complete maintenance program; to carrying out an extensive control of the corrosion; to using an adequate disinfection practices of adapted disinfection and to carrying out a control of the nutrients in the water. The maintenance program is performed by carried out implementing some methods of pipes cleaning of pipes, such as like *flushing*, *pigging* and the use of cable attached devices. The controls of the corrosion are: carrying out an adjustingment of the pH of the water, or or the using of chemical inhibitors as the silicato of sodium. The most effective disinfectant Also, they will be used the most effective disinfectants should be used with in the right correct dosagee and to a special control over the levels of nutrients should also be taken.tious of the water through filters of activated coal.

Finally, one one carries out the survey was done with the companies water distribution systems companies operators in our means (Antioquia), and Other companies in Colombia and Latin America were contacted by e-mail and by participating in the discussion forum ACUAFORO of Heastad Methods AQUAFORO (www.heastad.com). Unfortunately the only company that answers the survey was ENACAL. With the bad fortune of not obtaining positive answers (only we get the answer to the survey by ENACAL, which that is the one in charge of operating the the Managua distribution system operation, in at Nicaragua). It mean and difference attributed to the little knowledge about of the phenomenon and its potential problems. The surveys carried out in the city of Medellín, to five six operators of water distribution systems of the state department of Antioquia, show confirm the biofilm película presence inside the pipes of the local aqueducts and the little knowledge of the phenomenon on the part of the technicians in charge of their operation, maintenance. Only Empresas Públicas de Medellín is carrying out a study, with the purpose of taking the necessary steps correctives to control the phenomenon and to avoid its their problems.

LISTA DE TABLAS

No.	Tabla	Pag
1.1	Conversión unidades de turbiedad.....	6
1.2	Tabla del NMP cuando se utilizan tubos de 10mL.....	18
1.3	Normas de calidad físico química del agua potable.....	19
1.4	Normas de calidad bacteriológica del agua potable.....	20
2.1	Temperatura estacional del sistema de distribución (°C), porcentaje de muestras con contenido de coliformes, y conteo de coliformes en el sistema de agua de New Haven, Connecticut, entre 1986 y 1988.....	34
2.2	Análisis comparativo de materiales de tuberías en función de su capacidad para permitir el desarrollo de una biopelícula y lixiviar nutrientes.....	41
3.1	Bacterias comúnmente encontradas en los sistemas de distribución de agua potable y su posible significado.....	48
3.2	Métodos de medida del CODB basados en la determinación de la disminución del COD.....	61
3.3	Métodos de obtención del COA basados en la medida de la biomasa celular.....	62
4.1	Procedimientos de limpieza de tuberías.....	65
5.1	Base de datos de correos electrónicos de empresas operadoras de acueductos.....	86

LISTA DE FIGURAS

No.	Figura	Pag
1.1	Escala de pH.....	10
1.2	Principales formas de vida.....	14
1.3	Caja de Petri, donde se realiza la incubación y el conteo de las bacterias coliformes y <i>E. coli</i>	17
2.1	Flujo de agua a través de la biopelícula.....	23
2.2	Transporte y adsorción de moléculas orgánicas sobre una superficie limpia, formando una capa condicional “ <i>conditional layer</i> ”.....	24
2.3	Transporte de las células bacteriales a la superficie condicional, su adherencia reversible, el desprendimiento, y su adherencia irreversible a la superficie.....	25
2.4	Material polimérico extracelular de las bacterias.....	26
2.5	La biopelícula está constituida por bacterias y una matriz de polímero extracelular.....	26
2.6	Las bacterias y otros microorganismos desarrollan una biopelícula que puede poseer diferentes capas: una aeróbica y otra anaeróbica.....	28
2.7	El sistema de distribución de agua, visto como un reactor.....	28
2.8	Sección transversal de una biopelícula adherida a una superficie y su proceso de erosión.....	29
2.9	Cambio de diversidad de especies durante los meses.....	34
2.10	Máximo espesor de la biopelícula, comparados en dos puntos del sistema con diferentes velocidades.....	36

2.11	Comparación del tamaño de una bacteria y la rugosidad de la tubería.....	42
2.12	Imagen de una tubería de hierro dúctil, donde se pueden observar los tubérculos formados por la biocorrosión	43
3.1	Diagrama de un sistema de distribución, sus componentes y la presencia de biopelícula en las tuberías y los filtros en los sistemas de potabilización.....	46
3.2	Este esquema presenta el comienzo de una fisura debido al consumo de oxígeno debajo de una biopelícula	55
3.3	Detalle del dispositivo de muestreo desarrollado por Donlan y Pipes.....	58
3.4	Presencia de biopelícula en una tubería de hierro dúctil con recubrimiento de mortero de concreto	59
3.5	En esta imagen, se puede apreciar la una capa de biopelícula de forma regular que se desarrolla en una tubería de concreto	59
3.6	Tubérculos productos de la biocorrosión, presentes en la superficie de una tubería de acero recubierto con mortero de concreto	60
4.1	Descarga del agua durante el proceso de “flushing”.....	67
4.2	Ilustración de un proceso de “pigging”.....	68
4.3	Fotografía de una tubería antes y después de un proceso de “pigging”	68
4.4	Diferentes formas de las marranitas “pigs”	69
4.5	Diferentes formas de las marranitas “pigs”.....	70
4.6	Pigs durante la limpieza de una tubería.....	70
4.7	Configuración típica del lugar de inicio donde se introducirán los “pigs”.....	71
4.8	Configuración típica del lugar donde se recuperan los “pigs”.....	71
4.9	Esquema de una operación de “Pigging”.....	72
4.10	Scraper de diámetro pequeño.....	73
4.11	Dispositivo atado a cables llamado Plunger.....	74

4.12	Difusor de turbina para la mezcla de ozono.....	79
5.1	Materiales de tuberías en los sistemas de distribución.....	91



INTRODUCCIÓN

Las comunidades y las industrias consumen cada vez más cantidades de agua potable; lo que representa un gran reto para los ingenieros, el satisfacer estas demandas en cualquier punto de nuestro territorio y para cualesquiera que sea el uso para la que sea requerida, pero enfocados a cumplir dos requisitos primordiales: que llegue con la suficiente cantidad y con la calidad adecuada para satisfacer las necesidades de los consumidores. Los esfuerzos para cumplir estos 2 requisitos, algunas veces resultan afectados durante la distribución, lo cual se manifiesta en una degradación en algunos aspectos de la calidad del producto y en generar preocupación por parte de los consumidores.

Los problemas más comunes que se presentan en las redes de distribución pueden ser divididos en seis categorías, llamadas: deterioro de las propiedades organolépticas (sabor a tierra); deterioro de las propiedades estéticas (color, sedimento, olor); colonización del sistema por organismos micro-invertebrados y protozoos; crecimiento bacterial; corrosión de las tuberías y liberación de metales de los materiales de las tuberías del sistema de distribución en el agua. Éstos, son el resultado de la complejidad de los sistemas de distribución, sus pobres condiciones hidráulicas, y las reacciones químicas y biológicas que pueden ocurrir dentro de él.

En este trabajo se hará énfasis en los problemas causados por el crecimiento bacterial que se presenta en las superficies internas de las tuberías, y que trae consigo, problemas de corrosión, taponamiento de los filtros de agua y la acumulación de bacterias, que contribuyen a la degradación de la calidad tanto estética, como microbiológica del agua potable. Este fenómeno, se describe como la acumulación, crecimiento y propagación de una película biológica llamada *biofilm*; la cual está constituida por bacterias libres flotantes presentes en el agua, que sobreviven al proceso de tratamiento o potabilización, las cuales logran adherirse a las superficies de las tuberías, agruparse y sobrevivir a la fuerza del flujo de agua y a los desinfectantes que con esta viajan. Estos microorganismos forman colonias que atrapan su alimento del agua, se desarrollan y se extienden por toda la tubería, provocando los problemas mencionados anteriormente.

Estas biopelículas, que son el refugio de muchas de las bacterias libres flotantes en el agua potable, pueden causar ciertas infecciones y enfermedades, tanto en personas con bajo nivel de defensas como en animales, causar el rechazo de implantes médicos o generar una rechazo por parte de los consumidores.

INTRODUCCIÓN

Con el objeto de diseñar y operar sistemas de distribución que entreguen la calidad bacteriológica requerida por los consumidores, debemos entender cómo las biopelículas se desarrollan, los problemas que pueden causar, y cómo pueden ser controladas. En el medio, el entendimiento del fenómeno apenas se está desarrollando. Objetivo central de este trabajo es hacer una recopilación bibliográfica sobre el estado del arte de la biopelícula (*biofilm*) en las redes de distribución pública de agua potable, para describir los anteriores aspectos. Y por medio de una encuesta realizada a diferentes operadores de sistemas de acueducto en nuestro medio (Antioquia), determinar la presencia del fenómeno dentro de los sistemas, su conocimiento por parte de los entes que los administran y los modelos correctivos que se hayan tomado al respecto. Además, se participó en los foros de discusión de Heastad Methods (www.heastad.com) y se creó una base de datos con los correos electrónicos de diferentes empresas operadoras de acueductos de Colombia y otros 5 países de Sudamérica, a quienes se les envió la encuesta. Únicamente se recibió por parte de la empresa ENACAL, la única respuesta a la encuesta. Indiferencia que se atribuye al desconocimiento del fenómeno, por falta de información disponible en nuestro idioma.

En el primer capítulo de este trabajo, se presenta un resumen de las principales características estéticas y bacteriológicas que deberá presentar el agua potable, y se establecerán los requerimientos de calidad del agua potable establecidos por parte del Ministerio de Salud en el Decreto 475 de 1998 para todo el territorio nacional, que deberán cumplir todos los entes encargados de ese servicio.

En el capítulo dos, se presenta una información general sobre el fenómeno de biopelícula: se da una descripción de la manera como se da su desarrollo y crecimiento, y bajo qué condiciones se puede presentar, y se mencionan que tipo de microorganismos pueden ser potenciales creadores de una biopelícula.

En el capítulo tres, se presentan las características bacteriológicas de los sistemas de distribución de agua: se listan los microorganismos que pueden estar presentes y cuáles pueden ser las vías de entrada de los mismos; se describen los principales problemas causados por la biopelícula, tanto sobre la calidad del agua, como sobre los elementos físicos de los sistemas de distribución; y por último se dan parámetros que nos pueden servir como evidencia para determinar si existe o no, un crecimiento de biopelícula dentro de las tuberías de los sistemas de distribución.

En el capítulo cuatro, se describen algunos procedimientos que deberán ser llevados a cabo para obtener un control del crecimiento de la biopelícula, por parte de los organismos encargados del mantenimiento de los sistemas de distribución de agua potable.

En el capítulo cinco, se presenta la base de datos con correos electrónicos de operadores de acueducto, a quienes se les hizo llegar la encuesta y se presentan los resultados de la misma hecha a los operadores de sistemas de acueducto en el ámbito local.

INTRODUCCIÓN

Dentro del capítulo 6, se presentan las conclusiones y recomendaciones producto de este trabajo, con el objetivo de resaltar la importancia de estudiar este fenómeno, con el fin de optimizar los sistemas de distribución de agua y ayudar a la futura investigación, no sólo para desarrollar métodos eficaces de tratamiento, sino para explotar los posibles beneficios que podría traer las biopelículas en el área de tratamiento de aguas.

Finalmente, en el apéndice A se presenta un glosario de términos que ayudará al lector al mejor entendimiento de algunos conceptos; y en el apéndice B, se presentan las encuestas respondidas por cada una de las empresas consultadas.



CAPÍTULO 1

AGUA POTABLE

1.1 ALCANCE

La calidad del agua que se consume es de vital importancia para la salud. Es esencial para cada comunidad contar con un abastecimiento limpio y constante de agua. Por lo tanto no se puede ser ajeno a conocer las propiedades que deba tener el agua potable que se consume. Debido a que el efecto más importante que tiene el fenómeno de la biopelícula, dentro de los sistemas de distribución pública de agua potable, está relacionado con la degradación de las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del agua potable, se pretende en este capítulo, el describir cuáles son estas propiedades, y el resumir las magnitudes establecidas en Colombia por el Ministerio de Salud en la Norma de Calidad del Agua Potable (Decreto Número 475 de 1998)²⁹, que debe cumplir el agua potable para poder ser consumida sin ningún riesgo a la salud de la población.

1.2 PROPIEDADES

La norma técnica de calidad de agua potable²⁹, define el agua potable como: “Aquella agua que por reunir los requisitos físicos, químicos y microbiológicos, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a su salud”.

El agua es una sustancia líquida formada por la combinación de dos volúmenes de hidrógeno y un volumen de oxígeno, que constituye el componente más abundante en la superficie terrestre (H₂O). A continuación se describen las principales propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del agua potable.

1.2.1 Físicas

El agua pura es un líquido inodoro e insípido. A la presión atmosférica (760 mm de mercurio) el punto de congelación del agua es de 0° C y su punto de ebullición de 100° C.

El agua alcanza su densidad máxima a una temperatura de 4° C y se expande al congelarse².

Las características más relevantes del agua potable son: turbidez, color, olor y sabor, temperatura, sólidos en suspensión.

1.2.1.1 Turbiedad

La turbiedad es una expresión de la propiedad o efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua; en otras palabras, la turbiedad es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea reemitida y no transmitida a través de la suspensión².

La turbiedad en el agua puede ser causada por la presencia de partículas suspendidas y disueltas ó líquidos y sólidos, tanto orgánicos como inorgánicos, con un rango de tamaños desde el coloidal (diámetros menores a 10^{-3} mm) hasta partículas macroscópicas, dependiendo del grado de turbulencia. La gran cantidad de materiales en suspensión, pueden ser partículas de arcillas, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos y microorganismos.

Las principales causas de la turbiedad son: la erosión causada por las corrientes; el crecimiento de microorganismos y los desechos domésticos e industriales.

Existen 3 métodos comúnmente empleados para medir la turbiedad⁸:

Método del Turbidímetro Hellige.

Método del Nefelómetro Fotoeléctrico.

Método Turbidimétrico de Bujía de Jackson.

Anteriormente, la expresión estándar para medir la turbiedad era la unidad de turbiedad de Jackson, UTJ, la cual es una cantidad empírica basada en el turbidímetro de bujía de Jackson. Actualmente, el método más usado para determinar la turbiedad es el método nefelométrico, en el cual se mide la turbiedad mediante un nefelómetro y se expresan los resultados en unidades de turbiedad nefelométrica, UTN. Este método compara la intensidad de la luz dispersada por la muestra, con la intensidad de luz dispersada por una suspensión estándar de referencia bajo las mismas condiciones de medida. Como suspensión de referencia se utiliza una suspensión de un polímero de formacina.

La UTN fue definida como “la obstrucción óptica de la luz, causada al agregar 1mg de sílice SiO₂ a 1 L de agua destilada”⁸.

Los valores de turbiedad pueden variar desde cero hasta varios miles de unidades en aguas altamente turbias.

La unidad utilizada normalmente es la UTN, otras unidades que aún se usan se pueden transformar utilizando la tabla 1.1:

TABLA 1-1: Conversión unidades de turbiedad.

Unidad	JTU	NTU	SiO ₂ mg/L
UTJ	1.0	1.09	2.5
UTN	0.053	1.0	0.3
SiO ₂ mg/L	0.4	7.5	1.0

La eliminación de la turbiedad, se lleva a cabo mediante procesos de coagulación, asentamiento y filtración.

La turbiedad es de importante consideración en las aguas para abastecimiento público por tres razones:

Estética: cualquier turbiedad en el agua para beber, aunque no tiene ningún efecto sobre la salud, produce en el consumidor un rechazo inmediato y pocos deseos de ingerirla y utilizarla en sus alimentos.

Filtrabilidad: la filtración del agua se vuelve más difícil y aumenta su costo al aumentar la turbiedad.

Desinfección: un valor alto de la turbiedad, es una indicación de la probable presencia de materia orgánica y microorganismos que van a aumentar la cantidad de cloro u ozono que se utilizan para la desinfección de las aguas para abastecimiento de agua potable, reduciendo su eficiencia.

La turbiedad se determina en el laboratorio por medio de aparatos (turbidímetro), o por comparación visual mediante el empleo de patrones.

1.2.1.2 Color

El color se debe a materias en solución en forma coloidal. Las causas más comunes de color en el agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal o en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, madera, raíces, etc., en diferentes estados de descomposición y la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales.

Dos tipos de color se reconocen en el agua: el **color aparente** que incluye no solamente el color de las sustancias en solución y coloidales sino también el color debido al material suspendido, y el **color verdadero**, o sea el color de la muestra una vez que su turbiedad ha sido removida.

El color aparente se determina sobre la muestra original sin filtración o centrifugación previa. El color verdadero en las aguas de abastecimiento, se debe en general a la presencia de colorantes procedentes de la descomposición de vegetales.

El color del agua, además de dar motivo para que los consumidores hagan objeciones sobre su aspecto, tiene el inconveniente que puede manchar ropa y ser perjudicial para algunos procesos industriales.

Las unidades en las que se expresa el color se denominan **unidades de color**, y éste se mide por comparación con un estándar de platino-cobalto. La **unidad de color** es el color producido al agregar un 1mg de platino como cloro platino de potasio, a 1 L de agua destilada. La determinación del color se hace por comparación visual de la muestra con soluciones de concentración de color conocida o con discos de vidrio de colores adecuadamente calibrados.

La remoción de color es una función del tratamiento del agua, y se practica para hacer un agua adecuada para usos generales o industriales. La determinación del color es importante para evaluar las características del agua; cualquier grado de color es objetable por parte del consumidor y su remoción es, por lo tanto, objetivo esencial del tratamiento.

La intensidad del color depende del pH, por lo tanto se acostumbra medirlo junto con éste. Normalmente el color aumenta con el aumento del pH.

1.2.1.3 Olor y sabor

Los olores y sabores en el agua frecuentemente ocurren juntos. Aunque muchas pueden ser las causas de olores y sabores en el agua, estas son las más comunes: materia orgánica en solución, H₂S, cloruro de sodio, sulfato de sodio y manganeso, fenoles, aceites, productos de cloro, diferentes especies de algas, hongos, etc.

En su forma pura, el agua no produce sensaciones olfativas o gustativas. La evaluación del olor y sabor en el agua es útil para evaluar la calidad de la misma y su aceptabilidad por parte del consumidor, para el control de los procesos de una planta y para determinar en muchos casos la fuente de una posible contaminación.

Aunque hasta ahora no se ha desarrollado ninguna teoría satisfactoria para detectarlas, ambas propiedades pueden describirse cualitativamente. El método más usado consiste en determinar la relación de dilución a la cual el olor o sabor es apenas detectable. El valor de dicha relación se expresa como **numero detectable de olor o de sabor**.

1.2.1.4 Temperatura

La temperatura es el grado de calor que presenta el agua. Esta es importante, porque actúa como elemento que retarda o acelera la actividad biológica, la absorción de oxígeno y bióxido de carbono de la atmósfera por el agua, e influye en la proliferación de algas y en la precipitación de compuestos.

Las altas temperaturas producen mal gusto al agua y aumentan la corrosión de tuberías metálicas.

La lectura de cifras de temperatura se utiliza en el cálculo de diversas formas de alcalinidad, en el cálculo de la salinidad y en las operaciones generales de laboratorio.

1.2.1.5 Sólidos

Se define como **sólidos** la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103°C de una muestra de agua. Este proceso se realiza en una cazuela previamente pesada, sobre un baño de María, y luego se seca a 103 – 105°C.

Los **sólidos totales** incluyen el valor del material disuelto y no disuelto (sólidos suspendidos).

Los procedimientos usados en la determinación del contenido de sólidos son métodos gravimétricos y como tales requieren la determinación del peso de crisoles o de cazuelas con o sin residuos.

En aguas potables, la determinación de los sólidos totales, es la de mayor interés, por ser muy pequeña la cantidad existente de sólidos suspendidos. En general se recomienda en aguas para suministro público un contenido de sólidos totales menor de 1000mg/L.

1.2.2 Químicas

El agua es el compuesto químico más familiar para nosotros, el más abundante y el de mayor significado para nuestra vida. Su importancia desde el punto de vista químico, radica en que todos los procesos químicos que ocurren en la naturaleza, tiene lugar entre sustancias disueltas en agua. Normalmente se dice que el agua es el disolvente universal, puesto que todas las sustancias son de alguna manera solubles en ella.

Teniendo en cuenta su posible presencia en el agua, los efectos adversos que pueda tener sobre la salud, la influencia que tienen en los procesos de tratamiento, estas son las propiedades químicas más importantes del agua potable.

1.2.2.1 Alcalinidad

La alcalinidad en el agua es su capacidad para neutralizar ácidos y constituye la suma de todas las bases titulables. La alcalinidad es la medida de una sola propiedad agregada del agua, y solamente puede interpretarse en términos de sustancias específicas cuando se conoce la composición química de la muestra.

La alcalinidad es importante en muchos usos y tratamiento de aguas naturales y residuales. Las impurezas que dan origen más corrientemente a la alcalinidad son los carbonatos de calcio, sodio y manganeso.

Aguas con alto contenido de alcalinidad presentan un sabor desagradable y para el control de corrosión, determinar la alcalinidad total y las distintas formas de alcalinidad de la muestra, resulta de vital importancia.

La alcalinidad del agua se determina volumétricamente por titulación; su concentración se expresa en mg/L como CaCO_3 .

La fenolftaleína y el metil naranja ó el metacresol púrpura y el bromo cresol verde, son los indicadores usados para la determinación de la alcalinidad.

1.2.2.2 Acidez

La acidez de un agua es su capacidad cuantitativa para reaccionar con una base fuerte hasta un pH designado. La acidez constituye la medida de una propiedad sobreañadida del agua y puede interpretarse en términos de sustancias específicas solamente cuando se conoce la composición química de la muestra⁴.

El agua adquiere acidez en forma natural por la interacción con la atmósfera, desde la cual puede tomar bióxido de carbono dependiendo de ciertas condiciones de temperatura y presión.



Esta acidez, posee poca importancia desde el punto de vista de la salud pública, pero tiene el inconveniente que destruye equipos, plantas de tratamiento y tuberías en general, por corrosión; y además, interfiere los índices de reactividad química, su especificación y los procesos biológicos. La medida también refleja la variación de la calidad de la fuente. Otras fuentes de acidez en el agua, pueden ser la contaminación industrial, la cual genera una acidez mineral, que en altas concentraciones disminuye la flora acuática y aumenta el problema de corrosión.

La acidez se determina en el laboratorio por titulación y su concentración se expresa en mg/L como CaCO_3 .

1.2.2.3 Potencial Hidrógeno, pH

El pH, es un término usado universalmente para expresar la intensidad de las condiciones ácidas o básicas de una solución cualquiera, mediante la concentración del ión hidrógeno.

La molécula de agua tiene la posibilidad de ionizarse así:



Definiendo la constante de ionización del agua como:

$$K_w = [OH^-] \times [H^+]$$

Se tiene que a 25°C y por medio de un electrodo de hidrógeno, se determina que el agua para ionizarse produce 10^{-7} mol/L de $[OH^-]$ y 10^{-7} mol/L de $[H^+]$

$$K_w = [OH^-] \times [H^+] = 10^{-7} \times 10^{-7} = 10^{-14}$$

La expresión de concentración del ión $[H^+]$ en términos de la concentración molar es escasamente utilizada. Para obviar este problema se recurrió a la utilización de logaritmos, y fue Soranso en 1909⁴, quien propuso expresar aquella concentración en términos del logaritmo negativo y designar tal valor como pH.

$$pH = -\log[H^+]$$

Se construyó entonces la escala de pH, figura 1-1, la cual posee cierta semejanza con un termómetro; ésta indica la intensidad de la acidez y de la alcalinidad y numéricamente varía de 0 a 14.

Esta escala da el valor de la concentración del ión $[H^+]$, y por consiguiente el grado de acidez o de alcalinidad que tiene el agua pero no mide ni la acidez, ni la alcalinidad total de la misma.

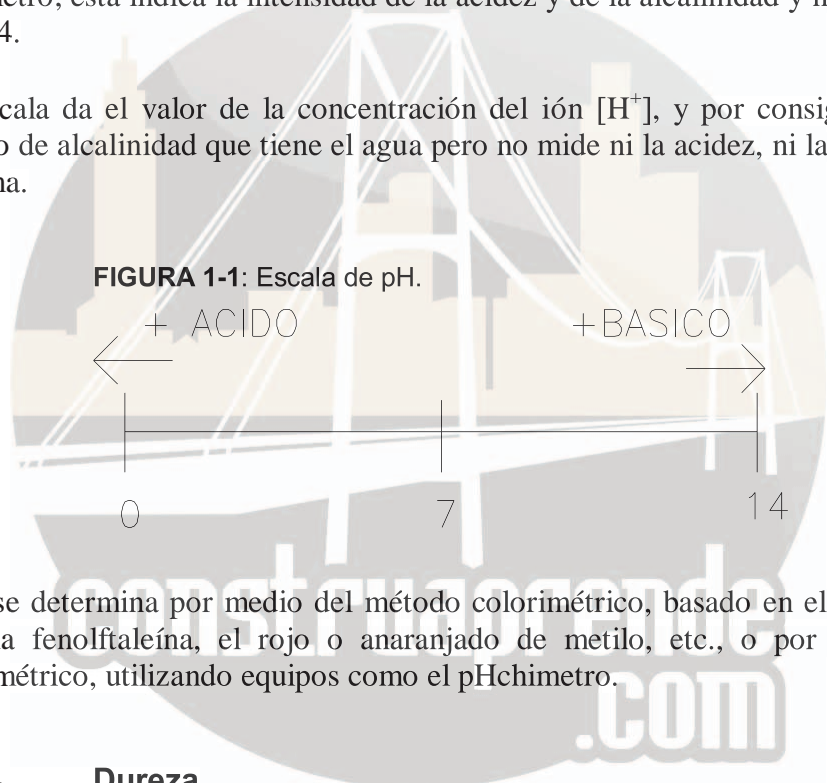


FIGURA 1-1: Escala de pH.

El pH se determina por medio del método colorimétrico, basado en el uso de indicadores como la fenolftaleína, el rojo o anaranjado de metilo, etc., o por medio del método electrométrico, utilizando equipos como el pHchímetro.

1.2.2.4 Dureza

La presencia de cationes polivalentes, principalmente los de calcio y magnesio, dan origen a la dureza de las aguas. Estos son capaces de reaccionar con el jabón para formar precipitados, y con ciertos aniones presentes en el agua para formar incrustaciones.

De acuerdo con los criterios actuales, la dureza total se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, ambos expresados como carbonato de calcio, en miligramos por litro.

Se conoce como **agua dura** cuando éstas requieren altas cantidades de jabón para producir espuma.

Desde el punto de vista sanitario, tanto las agua duras como las blandas son satisfactorias para el consumo humano; su problema radica cuando se utiliza para el lavado, debido a que requiere grandes cantidades de jabón para producir la espuma deseada.

La dureza se determina en el laboratorio por titulación y se expresa en mg/L como CaCO_3 . Desde el punto de vista de la dureza las aguas se clasifican en:

Aguas blandas:	0 - 75 mg/L CaCO_3
Aguas moderadamente duras	75 - 150 mg/L CaCO_3
Aguas duras	150 - 300 mg/L CaCO_3
Aguas muy duras	> 3000 mg/L CaCO_3

1.2.2.5 Grasas y aceites

Se entiende por grasas y aceites el conjunto de sustancias pobremente solubles que se separan de la porción acuosa y flotan formando natas, películas y capas iridiscentes sobre el agua, muy ofensivas estéticamente.

La presencia de estos elementos genera problemas de olor y sabor, y pueden ser un riesgo potencial para la salud. Por lo anterior estos elementos deben estar ausentes en el agua potable.

1.2.2.6 Hierro y manganeso

Ambos elementos están fuertemente asociados y son raras las aguas que los contienen en forma independiente. Estos elementos crean serios problemas en las aguas de servicio público.

La presencia tanto de hierro como de manganeso no tiene efectos de salubridad, pero afecta fuertemente el sabor del agua, produce manchas en aparatos sanitarios y se deposita dentro de las redes de distribución ocasionando obstrucciones, alteraciones de la turbiedad y color en el agua y soportando el crecimiento de bacterias de hierro: *Crenothrix*, *Leptothrix*, *Galionella*, y del manganeso: *Sphaerotilus*, *Leptothrix*. También ocasionan una alta demanda de cloro.

La determinación de estos elementos se realiza por métodos colorimétricos, con la ayuda de reactivos específicos que producen determinado color que puede medirse por comparación visual o por espectrofotómetros.

1.2.2.7 Cloruros

La forma más común de ocurrencia de los cloruros en el agua es el cloruro de sodio o sal común.

La presencia de estos elementos en el agua se considera importante, más por razones de sabor, que por motivos de salud.

Los cloruros se miden por procesos volumétricos utilizando indicadores, esto es, por titulación.

1.2.2.8 Sulfatos

Cuando estos elementos se presentan en cantidades apreciables en el agua, tienen efectos sobre el sabor y son laxantes cuando simultáneamente se encuentran con el manganeso y el sodio.

Los sulfatos son reducidos por las bacterias sulfato reductoras, dando origen al ácido sulfhídrico, lo que produce mal olor en el agua y disminuye el pH aumentando su poder corrosivo.

Existen otros elementos que pueden estar presentes en el agua (Zinc, Cobre, Nitratos, Fluoruros) algunos poseen beneficios para los consumidores del agua, pero en grandes cantidades traen ciertos problemas, por lo tanto se recomienda tener aguas con contenidos limitados de estos elementos. Estas limitaciones están contenidas en las normas de calidad de agua de cada país o en las normas internacionales como las de la Organización Mundial de la Salud. (OMS).

1.2.3 Nutrientes básicos presentes en el agua potable

1.2.3.1 Carbono

El carbono forma parte de casi todos los tejidos vegetales y animales. En las fuentes de agua, la mayoría de componentes de carbón presentes son de origen natural., derivados de la descomposición de material vegetal. Estos componentes pueden incluir el ácido húmico, carbohidratos poliméricos y proteínas.

El carbón orgánico en agua potable es medido en tres formas: como carbón orgánico total (COT), el cual es la cantidad total de carbón orgánico presente en el agua (soluble e insoluble); carbón orgánico disuelto (COD), el cual es la fracción soluble del COT; y el carbón orgánico asimilable (COA), el cual es la fracción del COD que puede ser fácilmente digerido y usado para el crecimiento por los organismos acuáticos.

1.2.3.2 Nitrógeno

Aguas naturales o de desecho pueden contener nitrógeno en diferentes formas: nitritos, nitratos, amoníaco y nitrógeno orgánico.

El nitrógeno está a menudo presente en fuentes de agua superficial debido a la descomposición vegetal, en aguas servidas con contenido de fertilizantes de agricultura, o

descargas de aguas negras. En los sistemas de distribución de agua se presenta en forma de nitritos, a partir de su uso como inhibidor de la corrosión de tuberías metálicas.

El nitrógeno orgánico incluye materiales naturales como proteínas y péptidos, ácidos nucleicos y numerosos compuestos orgánicos sintéticos.

Cantidades excesivas de nitrógeno en forma de nitratos en agua potable, contribuyen con el mal conocido como “*metahemoglobinemia infantil*”; por lo cual un límite de 10mg/L de nitratos se ha establecido para el agua potable para prevenir dicho mal.

Los nitratos se encuentran en pequeñas cantidades en los desechos domésticos, pero en los efluentes de las plantas de tratamiento biológico nitrificante pueden alcanzar concentraciones hasta de 30mg/L.

Este es un nutriente básico para muchos autótrofos fotosintéticos y en algunos casos ha sido identificado como el nutriente limitante del crecimiento bacterial en el agua.

1.2.3.3 Fósforo

El fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente en forma de fosfatos. Ocurren en solución, en partículas o detritus o en los cuerpos de los organismos acuáticos. En el agua potable su presencia se debe a que algunos fosfatos condensados son liberados en el agua durante su potabilización.

El fósforo es de gran importancia en los estudios de calidad del agua ya que influye sobre los procesos de productividad acuática, reduce la eficiencia de los procesos de coagulación, es difícil de remover mediante tratamientos convencionales para obtener bajas concentraciones, forma gran variedad de compuestos y posee la característica de cambiar de una u otra forma en determinadas condiciones.,

Al igual que el carbono y el nitrógeno, el fósforo forma parte de los nutrientes primarios, esenciales para el crecimiento de los organismos. Por lo cual su presencia puede ocasionar crecimientos excesivos de algas y malezas en los cuerpos de agua.

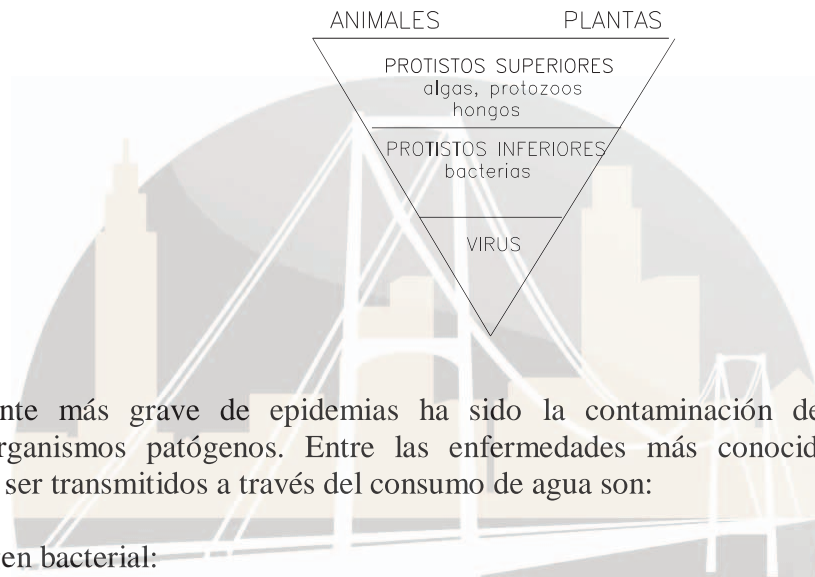
Los fosfatos pueden aparecer en los sedimentos de fondo, tanto en formas inorgánicas precipitadas como incorporados a compuestos orgánicos.

1.2.4 Microbiología del agua

La microbiología es la ciencia que estudia los microorganismos y sus actividades, a través del conocimiento de su forma, estructura, reproducción, fisiología, metabolismo e identificación³⁴.

El agua contiene suficientes sustancias nutritivas para permitir el desarrollo de diferentes microorganismos. Algunos de los microorganismos que se pueden presentar en el agua, presentan características vegetales, otros se asemejan más a los animales, y algunos poseen propiedades comunes tanto de unos como de otros. Además, existen otros organismos llamados virus. E. H. Haeckel, un zoólogo alemán, propuso en 1866³⁴, el reino de los protistos; los cuales se subdividen en protistos superiores (algas, hongos, protozoos) y en protistos inferiores (bacterias). En el final de la pirámide se encuentran los virus (figura 1-2):

FIGURA 1-2: Principales formas de vida.



La fuente más grave de epidemias ha sido la contaminación de agua potable con microorganismos patógenos. Entre las enfermedades más conocidas cuyos gérmenes pueden ser transmitidos a través del consumo de agua son:

De origen bacterial:

Fiebre tifoidea	(salmonella typhi)
Fiebre paratifoidea	(salmonella paratyphi)
Cólera	(vibrio cholera)
Tularemia	(sbrucella tularensis)
Desintería basilar	(shigella spp.)
Gastroenteritis	(salmonella spp.)
Enfermedad de Weil	(leptospira icterohaemorrhagiae)
Infecciones del oído	(pseudomas aeruginosa)

Protozoos patógenos:

Disentería amibiana	(entamoeba histolytica)
Giardiasis	(giardia lambia)
Meningoencefalitis	(naegleria gruberi)
Criptosporidiosis	(cryptosporidium)

Virus, los principales virus asociados con el agua son:

Gastroenteritis viral
Diarrea viral
Hepatitis infecciosa
Virus del polio
Virus Adeno
Virus Echo
Virus coxackie, grupo A
Virus coxackie, grupo B
Virus Reo

Además de estos problemas de salud, los microorganismos presentes en el agua pueden tener otros efectos, tanto sobre la potabilidad del agua potable, como sobre los elementos que constituyen las redes de distribución como: tuberías, filtros, válvulas.

Algunos de los problemas más comunes son:

Toxicidad, algunos de los compuestos tóxicos que se pueden encontrar en aguas de abastecimiento, están relacionados con la actividad biológica de las algas, bacterias y plantas superiores.

Sabor y olor, la presencia de algas genera la presencia de olor y sabor desagradable en el agua. En nuestro medio decimos que el agua tiene sabor a “tierra”.

Color y turbiedad, la presencia de microorganismos en el agua ejerce dos tipos de influencia: primero, debido a su presencia como partículas en suspensión o como productores de pigmentos solubles, y segundo, indirectamente por la interferencia que causan en los procesos, ya sea por alteración del pH, aumento de lodos sedimentados u obstrucción de filtros.

Biopelícula, se ha encontrado que los microorganismos presentes en el agua que se distribuye en las redes de distribución, han adquirido la característica de acumularse en las superficies de las tuberías en forma de una película biológica (motivo principal de este trabajo), generando un ecosistema que les ayuda a desarrollarse, evolucionar y sobrevivir a los desinfectantes presentes, ocasionando una disminución de las características organolépticas del agua y estimulando la corrosión de las tuberías.

1.2.4.1 Parámetros de evaluación microbiológica

Los análisis microbiológicos en el agua potable están dirigidos a detectar, identificar y, cuando es necesario, cuantificar los organismos microbiológicos presentes en una muestra de agua. Los análisis se basan en la identificación de bacterias coliformes y *Escherichia coli*. Estas técnicas involucran procedimientos estandarizados.

1.2.4.1.1 Método de los tubos múltiples de fermentación

Este método contiene tres diferentes tipos de pruebas: *la presuntiva, la confirmativa y la de comprobación final.*

La *prueba presuntiva* consiste en la inoculación de una cantidad previamente determinada de una muestra de agua, en frascos o tubos de fermentación que contienen un medio de cultivo apropiado, examinando al cabo de determinado tiempo de incubación las reacciones provocadas por los organismos coliformes. Los medios de cultivos son muy variados, los más utilizados son el caldo lactosado, el de McConkey con rojo neutro o púrpura de bremocresol como indicadores. La incubación dura hasta 48 horas a temperaturas de 35 a 37 °C. Las muestras que se consideran positivas, son aquellos tubos que muestran gas, acidez o enturbiamiento antes de agotar el plazo de incubación⁴.

Se le denomina presuntiva a causa de que las reacciones observadas pueden ser provocadas por otros microorganismos no coliformes, por lo que la presunción de que la reacción es debida a organismos coliformes debe ser confirmada.

La *prueba confirmativa* se realiza mediante un subcultivo de cada tubo positivo en medios de confirmación líquidos o sólidos. Medios líquidos, empleando dos tubos de fermentación de los cuales uno se somete a incubación a 35-37 °C durante un máximo de 48 horas, y el otro a 44-45 °C durante un máximo de 24 horas, para confirmación de bacterias coliformes fecales. Y en medios sólidos se realiza en cajas Petri con alguno de los siguientes medios: agar Mac Conkey o medio de Endo. La formación de colonias típicas demuestra la presencia de estos gérmenes.

En las *pruebas de confirmación final*, algunas de las colonias aisladas en los medios de confirmación sólidos o aquellas obtenidas en uno de los medios por resiembra de los tubos positivos en medios de confirmación líquidos, se inoculan en tubos de fermentación con lactosa y placas de agar. La formación de gas en el caldo lactosado y la evidencia de bacilos en el cultivo de agar correspondiente demuestran la existencia de algún germen del grupo coliforme en la muestra.

Conocida la dilución de la muestra y los resultados proporcionados por los tubos de fermentación iniciales, se puede, con la ayuda de tablas estadísticas, conocer en la muestra examinada el número más probable (NMP) de organismos coliformes presuntivos o confirmados, según nos refiramos a una u otra prueba⁴.

1.2.4.1.2 Método de filtración por membrana

Este método consiste en hacer pasar una cantidad previamente determinada de agua a través de una membrana o filtro especial esterilizado en cuya superficie quedan retenidos los microorganismos. Estos filtros son de unos 150 µm de espesor y con un radio de poros de 0.45 µm. Luego, el filtro o membrana se coloca una caja de Petri, en la que se ha depositado un medio de cultivo adecuado (agar) y se somete a continuación a incubación a

35-37 °C para coliformes fecales durante 20 horas. Se asume que cada bacteria atrapada en el filtro crecerá en colonias separadas. Al cabo de este periodo se observarán las colonias aparecidas (figura 1-3). Con el conteo de estas colonias, se puede determinar directamente el número de bacterias presentes en el agua filtrada⁴.

Ofrece este método la ventaja de una gran rapidez, pero su uso es inadecuado cuando se tienen aguas de alta turbidez y pocos organismos coliformes, y en aguas cuya proporción de organismos no coliformes es elevado, ya que su crecimiento interfiere al de organismos coliformes.

A pesar de tener limitantes para su uso, las ventajas que ofrece son tan enormes, que en diferentes normas de calidad de agua de diferentes países, se establece como metodología esencial para el control de calidad microbiológica.

La cantidad de bacterias son expresadas en términos del número de bacterias formadoras de colonias (UFC) por cada 100mL de agua filtrada⁴.

FIGURA 1-3: Caja de Petri, donde se realiza la incubación y el conteo de las bacterias coliformes y *E. coli*



1.2.4.1.3 Método del sustrato definido

Este método puede ser utilizado en la detección de bacterias coliformes y *E. coli*. Consiste en tomar una cantidad previamente determinada de una muestra de agua e introducirla en 10 tubos esterilizados que contienen un medio de cultivo (10mL de Fluorocult LMX) para luego ser incubados a 35 ± 0.5 °C durante 24 horas.

Posteriormente, se examina cada tubo para identificar algún cambio en el color de la muestra con respecto al color de una muestra patrón (color que depende del sustrato utilizado). Si la intensidad del color es mayor, la muestra es positiva y puede contener bacterias coliformes. Si no hay color observado la muestra se considera como negativa⁴.

Dependiendo del número de tubos que se consideren positivos, se realizará una lectura en la tabla de NMP (Número Más Probable)/100mL (tabla 1-2) para determinar la cantidad de bacterias coliformes presentes en la muestra de agua⁴.

TABLA 1-2: Tabla del NMP cuando se utilizan tubos de 10mL

No de tubos con reacción positiva de 10mL	NMP/ 100mL	95% Límite de Confianza (aproximado)	
		Menor	Mayor
0	<1.1	0	3.0
1	1.1	0.03	5.9
2	2.2	0.26	8.1
3	3.6	0.69	10.6
4	5.1	1.3	13.4
5	6.9	2.1	16.8
6	9.2	3.1	21.1
7	12.0	4.3	27.1
8	16.1	5.9	36.8
9	23.0	8.1	59.5
10	>23.0	13.5	Infinito

1.3 NORMA TÉCNICA DE CALIDAD DEL AGUA POTABLE EN COLOMBIA DECRETO NÚMERO 475 DE 1998

Las normas de calidad están constituidas por las metas de calidad del agua que cada país se impone de acuerdo con las condiciones ambientales, sociales, económicas y culturales existentes. Existen guías de calidad del agua elaboradas por organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), para ser utilizadas por los diferentes países como base para el desarrollo de sus propias normas.

El Ministerio de Salud, mediante el Decreto 475 de 1998, establece las Normas Técnicas de Calidad que debe presentar el agua potable en nuestro país²⁹.

Básicamente el agua de servicio público debe cumplir dos condiciones:

- No debe ser peligrosa para la salud o la vida de los consumidores, condición que es imprescindible; y

- El sistema debe poder operarse a un costo razonable, es decir, las características del agua deben ser tales que no ocasionen daños a la red de distribución, a la industria, a la economía privada, y que se logre este propósito sin tener que hacer a la misma un tratamiento excepcionalmente costoso.

La Tabla 1-3 presenta las normas de calidad físico-químicas del agua potable, según los artículos 7° y 8° del decreto 475.

El artículo 9° limita la cantidad de cloro residual libre en cualquier punto de la red de distribución de agua potable a los valores comprendidos entre 0.2 y 1.0 mg/L.

TABLA 1-3: Normas de calidad físico-química del agua potable

SUSTANCIA O CARACTERÍSTICA	UNIDADES	MINISTERIO DE SALUD COLOMBIA DECRETO 475 DE 1998
Valor admisible		
<i>Propiedades físicas y organolépticas</i>		
Turbiedad	Unidades Nefelométricas turbiedad(UNT)	de < 5
Color verdadero	Unidades cobalto	platino ≤ 15
Olor y sabor		Aceptable
Sólidos totales	mg/L	< 500
Sustancias flotantes		Ausentes
<i>Criterios de calidad química</i>		
Acidez	mg de CaCO ₃ /L	50
Alcalinidad total	mg de CaCO ₃ /L	100
Potencial hidrógeno	U de pH	6.5 – 9.0
Detergentes		
Gasas y aceites		
Dureza	mg de CaCO ₃ /L	160
Calcio	mg de Ca/L	60
Cloruros	mg de Cl/L	250
Hierro	mg de Fe/L	0.3
Manganeso	mg de Mn/L	0.1
Magnesio	mg de Mg/L	36
Fluoruros	mg de F/L	1.2
Fosfatos	mg de PO ₄ /L	0.2
Sulfatos	mg de SO ₄ /L	250
Zinc	mg de Zn/L	5

<i>Normas para elementos y sustancias químicas</i>		
Aluminio	mg de Al/L	0.2
Antimonio	mg de Sb/L	0.005
Arsénico	mg de As/L	0.01
Bario	mg de Ba/L	0.5
Boro	mg de B/L	0.3
Cadmio	mg de Cd/L	0.003
Cianuro total	mg de CN/L	0.1
Cobre	mg de Cu/L	1.0
Cromo	mg de Cr ⁺⁶ /L	0.01
Fenoles totales	mg de Fenol/L	0.001
Mercurio	mg de Hg/L	0.001
Níquel	mg de Ni/L	0.02
Nitritos	mg de NO ₂ /L	0.1
Nitratos	mg de NO ₃ /L	10
Plata	mg de Ag/L	0.01
Plomo	mg de Pb/L	0.01
Selenio	mg de Se/L	0.01
Sustancias activas al azul de metileno	ABS	Ausentes
Trihalometanos totales	THMS	0.1

En cuanto a las normas bacteriológicas del agua potable, los artículos 24 y 25, establecen los valores admisibles que desde el punto de vista bacteriológico debe tener el agua potable, y los métodos adecuados para determinarlos (tabla 1-4).

TABLA 1-4: Normas de calidad bacteriológica del agua potable.

Valores admisibles de microorganismos patógenos		
<i>Microorganismos indicadores</i>	<i>Técnica utilizada</i>	<i>Sustrato definido</i>
	<i>Filtración por membrana</i>	
Coliformes totales	0 UFC/100cm ³	0 microorganismos/100cm ³
Escherichia coli	0 UFC/100cm ³	0 microorganismos/100cm ³

Los métodos aceptados para análisis microbiológico del agua son los siguientes:

Para Escherichia Coli: Filtración por membrana y sustrato definido. Para Coliformes Totales: Filtración por membrana y sustrato definido.

Se establece dentro del artículo 26, que ninguna muestra de agua deberá contener E-coli, independiente cual sea la técnica utilizada para su detección, en 100 cm³ de agua.

CAPÍTULO 2

LA BIOPELÍCULA

2.1 ALCANCE

Como es ya conocido, agua potable no significa agua estéril; lo que indica nos indica que el agua potable puede contener algunos microorganismos, elementos o nutrientes, no perjudiciales para la salud de los consumidores, que de algún modo, sobreviven al tratamiento, y pasan a ser parte del agua que se transporta en los sistemas de distribución. Una vez dentro del sistema, estos microorganismos tienen la habilidad de adherirse a la superficie de las tuberías que los transportan, en forma de una película biológica, dentro de la cual obtienen lo necesario para sobrevivir y desarrollarse.

Con objeto de dar una idea general del fenómeno de la biopelícula dentro de los sistemas de distribución de agua potable, en este capítulo se describe su formación y crecimiento, cuáles son los microorganismos que comúnmente la conforman, y cuáles son las condiciones que favorecen su crecimiento.

2.2 DESCRIPCIÓN

Algunos pueden no estar familiarizados con el término “*biofilm*”. Éste significa, película biológica ó biopelícula, y es el resultado de la acumulación de microorganismos presentes en el agua, unidos a una superficie inerte o viviente, rodeados por agua y por una sustancia pegajosa que ellos mismos segregan.

La biopelícula se encuentra en muchos lugares y los seres humanos estamos en muchos casos, en contacto directo con ella: la placa en los dientes, el limo resbaladizo en las rocas de los ríos, la capa en las paredes de los intestinos de los animales y la película de gel que se forma en el interior de un jarrón, el cual a retenido flores durante una semana, son algunos claros ejemplos de biopelícula.

En la bibliografía se presentencontraron distintas definiciones para biopelícula. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA (*Environmental Protection Agency*), la define como: “superficie de depósitos orgánicos y/o inorgánicos, compuesta por

microorganismos, productos microbianos y detritus”³⁹; en otras publicaciones le dan la característica de: “complejos y tenaces entramados en los cuales se organizan los microbios responsables de muchas infecciones”⁶. Algunos investigadores utilizan el término biopelícula, para denotar “la biomasa (bacterias, hongos microscópicos, protozoos, levaduras) adheridas a las superficies de las tuberías y distribuidas de una forma heterogénea parecida a una película”⁷. Otros la definen como “una comunidad de microorganismos incluidos en una matriz orgánica polimérica empotrada a una superficie. La matriz polimérica es conocida como EPS por el nombre “*Extracellular Polymeric Substances*” (sustancias poliméricas extracelulares) y esta constituida por polisacáridos y gluco-proteínas”⁶.

Anteriormente, los microbiólogos se habían enfocado en estudiar el crecimiento de bacterias libres flotantes en el laboratorio; pero, recientemente se ha descubierto que muchos de estos organismos no emplean mucho tiempo flotando como células aisladas, sino que más bien se adhieren a una gran variedad de superficies húmedas en colonias organizadas, que a su vez y sorprendentemente, forman diversas comunidades dentro de las cuales se comportan diferente¹².

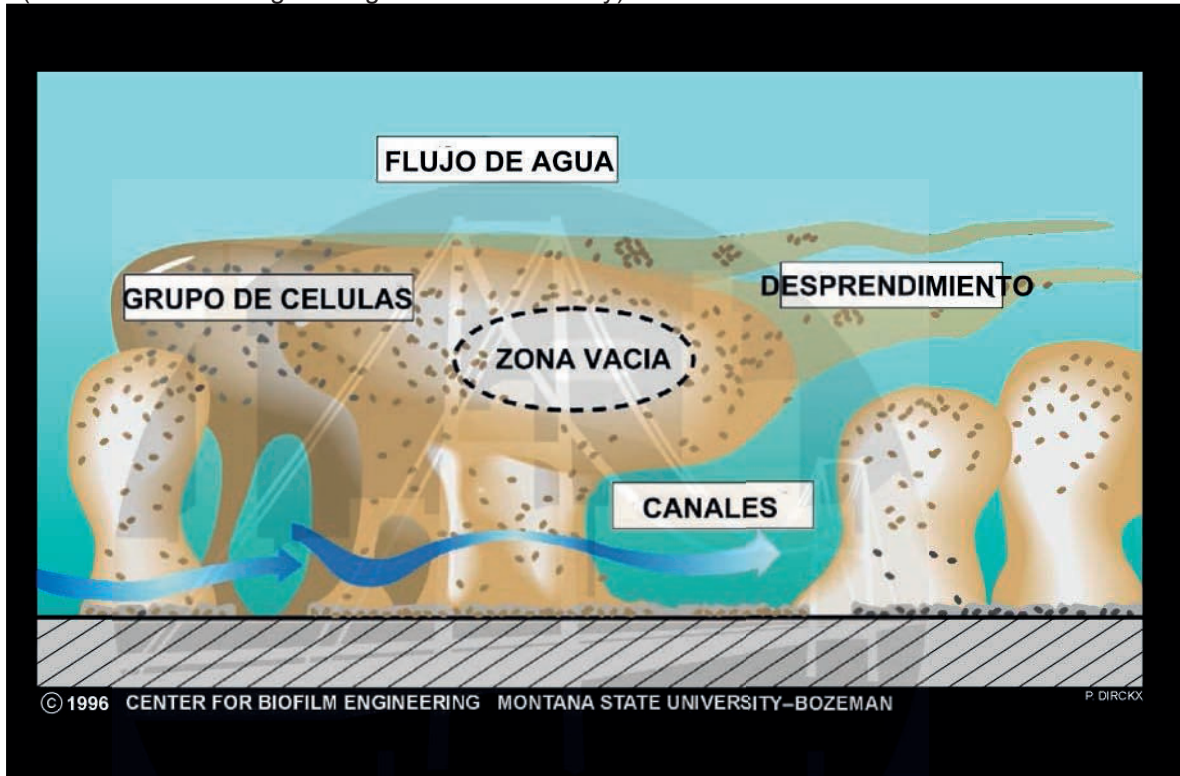
La presencia de una biopelícula en las redes de distribución de agua potable tiene importancia debido a la formación de productos que pueden deteriorar la calidad organoléptica del agua, o la creación de problemas sanitarios derivados de la presencia de bacterias potencialmente patógenas que han conseguido sobrevivir a los procesos de potabilización (Donlan *et al.*, 1994; Keevil *et al.*, 1995)²⁷.

En las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable, la biopelícula se forma cuando las células microbianas se adhieren a su superficie y luego se multiplican, para formar una película o capa delgada sobre la pared de la tubería.

En la naturaleza las biopelículas constituyen un modo de crecimiento protegido que permite la supervivencia de las bacterias en un medio hostil. Las estructuras que forman estas micro-colonias contienen canales por los que circulan los nutrientes (figura 2-1); en las distintas partes de la biopelícula las células expresan diferentes genes, como si fueran un tejido organizado.

El término biopelícula, no implica en algún sentido la existencia de una película homogénea de espesor regular⁷. El estilo de vida de en una biopelícula provee muchas ventajas a las bacterias y a los otros microorganismos, que puedan ocupar estas pegajosas estructuras. Allí, logran conseguir más fácilmente los nutrientes necesarios para su supervivencia (moléculas que contienen carbón, oxígeno y otros elementos), que cuando se encontraban flotando libremente; y en adición a esto, se encuentran protegidas de muchos peligros de la vida diaria. La arquitectura organizada de la biopelícula con su sistema de canales, permite que los nutrientes sean repartidos a todas las células en la comunidad y les provee una eficiente remoción de productos de desecho. Además, la vida en una biopelícula provee una ventaja adicional: la facilidad de intercambio de nutrientes, ya que, un producto de desecho de un organismo, puede ser la comida favorita de otro¹⁸.

FIGURA 2-1: Flujo de agua a través de la biopelícula . (Center for biofilm engineering Montana University)



Algunos expertos estudiosos de la biopelícula, argumentan que todas las bacterias son capaces de formar una biopelícula; además, y que ese es el fin de la historia; pero en realidad, se conoce sabemos que dependiendo del tipo de algunas bacterias, estas forman biopelículas mucho más elaboradas y mucho más resistentes que otras bacterias (Greenberg)¹⁸.

2.3 DESARROLLO Y CRECIMIENTO

El agua potable, especialmente aquella proveniente de sistemas de potabilización de agua de alta calidad, es un ambiente con contenido limitado de nutrientes; pero, aún con concentraciones muy bajas de éstos, son suficientes para el crecimiento y reproducción microbiana, siempre y cuando tengan una superficie sobre la cual desarrollarse. Esto hace a la superficie de las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable, un potencial entorno para el desarrollo de una biopelícula.

En el momento en que las tuberías de la red de distribución son llenadas con agua, la biopelícula comienza a formarse. De acuerdo con Mittelman (1985)¹⁶ el desarrollo de una biopelícula madura puede tardar de varias horas a varias semanas, dependiendo de los tipos de microorganismos presentes en el agua y de las diferentes condiciones del sistema. Algunas bacterias como las *Pseudomonas*, se adherieron a la superficie de las tuberías de acero, con apenas 30 segundos de exposición al agua (Vanhaecke, 1990)¹⁶. Sea que consista de simplemente una o múltiples especies, las biopelículas bacteriales experimentan distintas etapas de desarrollo. La formación de una biopelícula, no es el simple acto de una bacteria rebotando al azar sobre una superficie, hasta conseguir adherirse allí, para luego crecer sin problemas. EÉste, es un proceso muy específico que se inicia por la reunión de diferentes características, incluyendo niveles de nutrientes y temperatura adecuados, dentro de un mismo entorno y con la presencia de una superficie que permita la adherencia de los microorganismos³³.

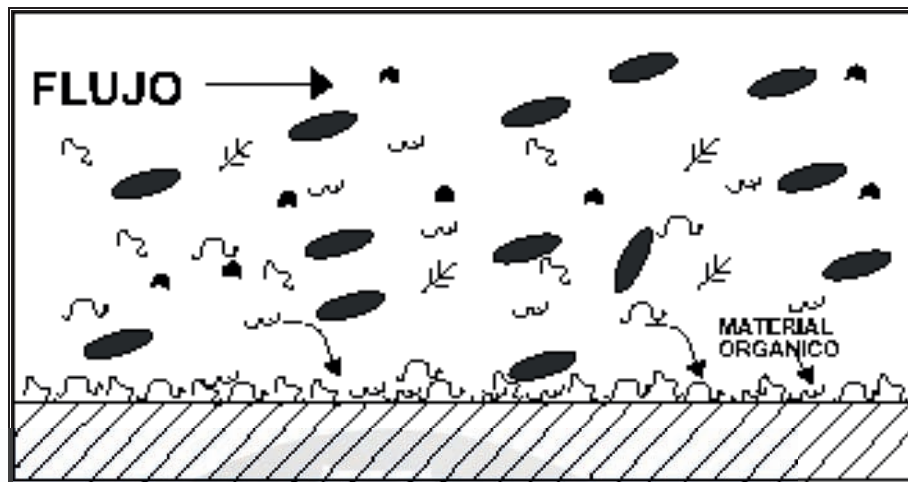
Una vez la bacteria se ha adherido a la superficie, ésta comienza a crecer y a multiplicarse, como también a reclutar células planctónicas adicionales, de sus alrededores. Las células luego comienzan a desplazarse a través de la superficie, primero formando una mono-capa y luego congregándose dentro de grupos relativamente pequeños de bacterias llamados micro-colonias. El estado final del ciclo de la biopelícula, se presenta cuando la comunidad madura comienza a envejecerse y a estar sobre poblada, lo que genera que grandes trozos de biopelícula puedan ser desprendidos por el flujo y transportados aguas abajo para colonizar nuevas superficies.

Para explicar más detalladamente el desarrollo de la biopelícula, se describen las siguientes etapas:¹⁶

1. Acondicionamiento de la superficie.

Inmediatamente después de que la superficie de la tubería entra en contacto con el agua potable, las moléculas orgánicas contenidas en ella se adhieren a la superficie del tubo, formando una capa orgánica en la interfase sólido-líquida (figura 2-2). Esta capa es llamada “capa condicional”(conditioning layer), y es la encargada de neutralizar la carga de superficie, la cual puede repeler las células bacterianas más cercanas y no permitir su adhesión; y en adición, les sirve como nutriente.

FIGURA 2-2: Transporte y adsorción de moléculas orgánicas sobre una superficie limpia, formando una capa condicional “conditional layer”.



2. Adhesión de la bacteria pionera.

En el flujo de agua, algunas bacterias se aproximan a la superficie del tubo y comienzan a entrar a la capa límite (zona en donde la velocidad del flujo es cero); algunas de estas células bacterianas golpean y se adhieren a la superficie por un corto tiempo, para luego desprenderse. Este procedimiento es llamado *adherencia reversible*, el cual está basado en atracciones electrostáticas y fuerzas físicas. Posteriormente, algunas de las células bacterianas adheridas reversiblemente comienzan a realizar unas preparaciones para conseguir una adherencia más prolongada, formando unas estructuras que permitan una adherencia permanente a la superficie de la tubería; este proceso se denomina *adherencia irreversible*, y al final, las bacterias quedan totalmente adheridas a la superficie de la tubería (figura 2-3).

FIGURA 2-3: Transporte de las células bacteriales a la superficie condicional, su adherencia reversible, el desprendimiento, y su adherencia irreversible a la superficie.

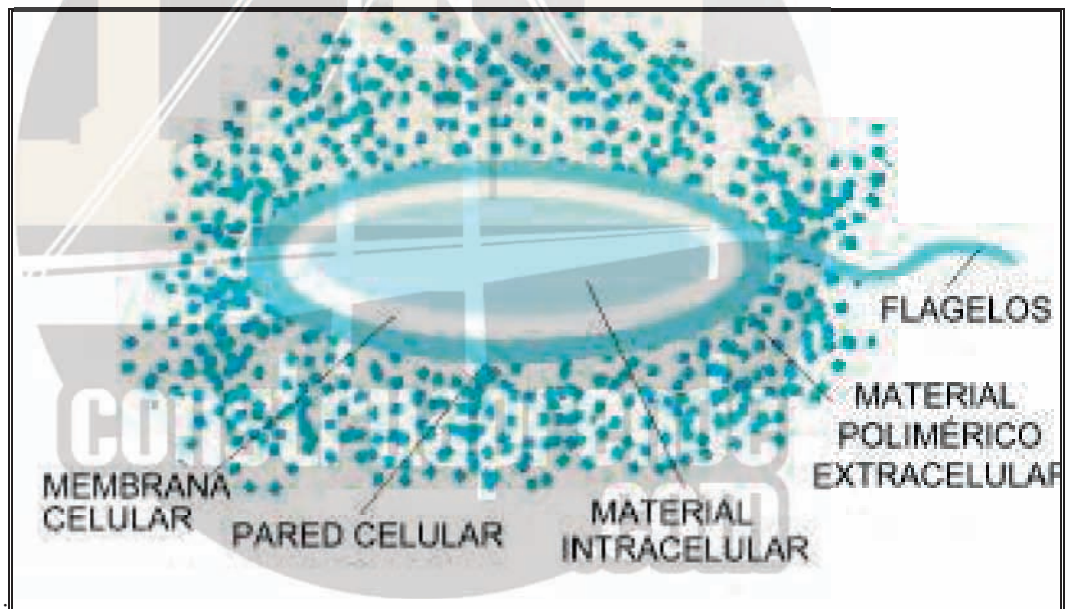


3. Formación del glycocalyx

Las bacterias de la biopelícula excretan una sustancia polimérica extracelular EPS (por las iniciales en inglés de “*Extracellular Polymeric Substances*”) o polímero pegajoso,

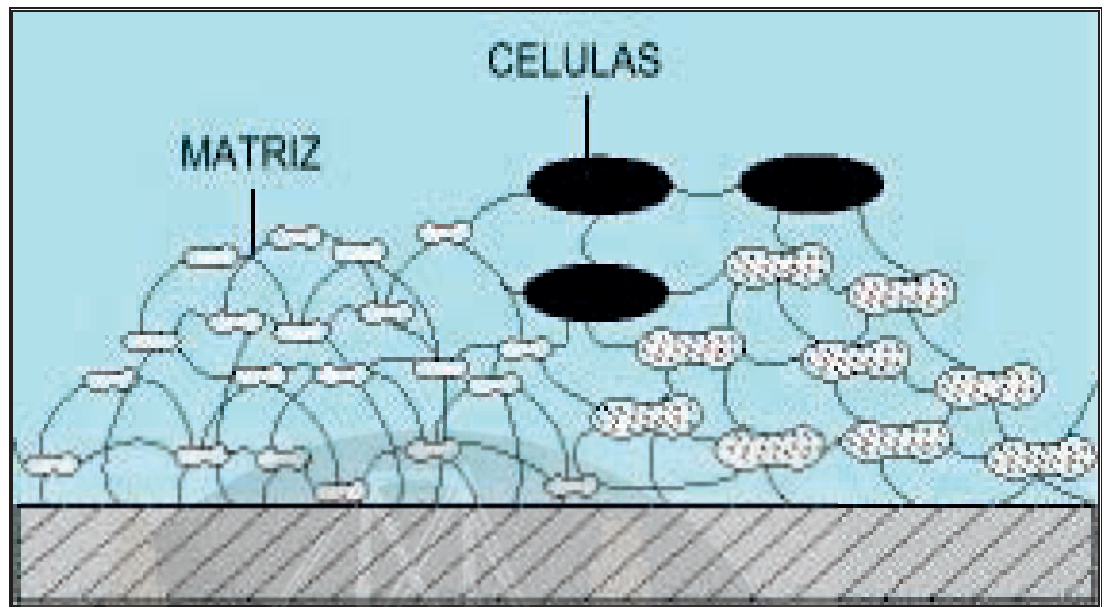
el cual mantiene unida a la biopelícula, la asegura a la superficie de la tubería y aumenta su tamaño (Figura 2-4). El EPS se extiende desde el cuerpo de la bacteria, y es llamado, *glycocalyx*. Una vez formada una capa base de biopelícula, ésta se convierte en un lecho viscoso que actúa como un sistema de captura de células y nutrientes, formando en ocasiones una superposición de micro colonias entre las cuales puede circular agua. El *glycocalyx* también actúa como una capa protectora para las bacterias adheridas, mitigando el efecto de los desinfectantes y otras sustancias toxicostóxicas.

FIGURA 2-4: Material polimérico extracelular de las bacterias.



Cuando los nutrientes se acumulan o se capturan, las células pioneras proceden a reproducirse. Las células hijas, luego producen sus propios *glycocalyx*, aumentando apreciablemente el volumen de la película. Muy pronto, se establece una próspera colonia de bacterias (figura 2-5).

FIGURA 2-5: La biopelícula está constituida por bacterias y una matriz de polímero extracelular.



En biopelículas maduras, la mayoría del volumen, es ocupado por una matriz organizada de *glycocalyx* (aproximadamente del 75-95%; %), mientras que las células de bacterias ocupan el volumen restante (5-25%) (Geesey, 1994)¹⁶. Debido a que la matriz de *glycocalyx* atrapa mucha agua, la superficie de las biopelículas es gelatinosa y resbaladiza.

4. Colonizadores secundarios

Además de atrapar moléculas nutrientes, la red de *glycocalyx* atrapa otros tipos de células microbianas por medio de resistencia física e interacción electrostática. Estos nuevos organismos son llamados colonizadores secundarios. Éstos metabolizan los desechos de los primeros colonizadores, como también producen su propio desecho, el cual en su momento, lo usan otras células.

5. Funcionamiento total de la biopelícula. Un gremio cooperativo de especies

Una biopelícula madura funcionando completamente, es como un tejido vivo en la superficie de la tubería. Es una comunidad compleja metabólicamente cooperativa, conformada por diferentes especies de bacterias, cada una viviendo en un micronicho (micro-ambiente) adecuado.

Una biopelícula puede extenderse a su propio ritmo por medio de la división ordinaria de células; ó también, por medio de la liberación periódica de nuevas células pioneras, que colonizarán, aguas abajo, nuevas secciones de tubería. La capa última limita el espesor de la biopelícula. En las capas más superficiales, algunas porciones de biopelícula pueden ser desprendidas por pérdidas de cohesión o adherencia debido al efecto del movimiento del fluido y de la acción mecánica de otras partículas que chocan contra ella (Characklis, 1988)²⁷.

Dentro de la estructura de la biopelícula, se puede desarrollar una capa anaeróbica, por debajo de una capa aeróbica, la cual es la que está más expuesta a la fuerza cortante del flujo de agua (figura 2-6). Esto indica que las biopelículas pueden contener tanto organismos aerobios como anaerobios, formando diferentes micro ambientes, en función de su accesibilidad al sustrato y al oxígeno (LeChevallier et al., 1987; Characklis y Marshall, 1990)²⁷.

Algunos textos ven los sistemas de distribución de agua como un reactor, que se asemeja a un sistema de dos fases, en la cual una fase es el agua y la fase sólida consiste en las superficies de las tuberías y las partículas suspendidas que entran en el flujo de agua. (figura 2-7)⁷. El agua circundante sirve de medio de transporte para los nutrientes y las bacterias, y las paredes de las tuberías favorecen el lugar adecuado para que ocurra el fenómeno de fijación bacteriana y formación de la película biológica²⁷.

FIGURA 2-6: Las bacterias y otros microorganismos desarrollan una biopelícula que puede poseer diferentes capas: una aeróbica y otra anaeróbica.



FIGURA 2-7: El sistema de distribución de agua, visto como un reactor.



© 1996 CENTER FOR BIOFILM ENGINEERING, MSU-BOZEMAN



© 1996 CENTER FOR BIOFILM ENGINEERING, MSU-BOZEMAN

La formación de una biopelícula, está gobernada por lo menos de cuatro factores conocidos (Bryers, 1987; Lawrence y Caldwell, 1987; Trulear y Characklis, 1982)⁷, que son:

- Depositación y adsorción de microorganismos tanto vivos como muertos, desde la fase acuosa hasta la fase sólida.
- Crecimiento de microorganismos adheridos en estado activo, a la despena de materia orgánica biodegradable en el agua.
- La muerte de algunos de los microorganismos adheridos.
- Erosión continuúa de la biomasa por el flujo de agua.

FIGURAGRAFICA 2-8: Sección transversal de una biopelícula adherida a una superficie y su proceso de erosión.



Las biopelículas presentes en sistemas de distribución, son un microsistema dinámico que está constantemente siendo erosionado y reestablecido (figura 2-8); dándose dentro de éste procesos como metabolismo, crecimiento, y formación de productos, y finalmente separación o erosión de la biopelícula de la superficie del tubo (Characklis, 1981)³⁹.

Realmente, el crecimiento de bacterias dentro del sistema, ocurre exclusivamente en el nivel de la biopelícula y no en el agua.

Las características de la biopelícula (especies presentes, número de células, gravedad específica y espesor) están controladas por el número y diversidad de bacterias presentes en el agua, la concentración y naturaleza de materia orgánica biodegradable en el agua, el régimen hidráulico al cual el sistema está sujeto, y las características del material de la superficie (tubería) que colonizarán las bacterias, etc.

La tasa de formación de la biopelícula depende de las propiedades físico-químicas (químicas y termodinámicas) de la interfase, la rugosidad física de la superficie, y los factores fisiológicos de los microorganismos adheridos. La biopelícula puede crecer hasta donde la capa de biopelícula comienza a desprenderse dentro del agua, por causa de la fuerza cortante que el flujo de agua posee.

Se han realizado varias observaciones importantes, que explican la habilidad de las bacterias a sujetarse a las superficies de las tuberías dentro del flujo de agua, generalmente en ambientes deficientes de nutrientes (como es el caso de agua potable):⁷

- Las macromoléculas tienden a acumularse en una interfase líquido-sólida, creando un ambiente favorable en situaciones deficientes de nutrientes.
- Una alta tasa de flujo en el sistema puede transportar tremendas cantidades de nutrientes combinados con microorganismos, aún cuando la cantidad de nutrientes en el agua es baja.
- La producción de EPS ayuda a anclar las bacterias sujetas a la superficie, como también es un factor importante en la captura de nutrientes.
- Las bacterias empotradas (escondidas) en las matrices de EPS están protegidas de los desinfectantes por fenómenos físicos y de transporte.

2.4 COMPOSICIÓN MICROBIOLÓGICA BACTERIOLÓGICA

Las biopelículas pueden ser desarrolladas por cualquier especie de bacterias, y estas pueden albergar ciertos microorganismos que entran a ser parte de la compleja estructura que forman. Algunos de estos microorganismos son: bacterias, hongos, protozoos y otros invertebrados.

2.4.1 Bacterias

Las bacterias comprenden la mayor parte de la población que sobrevive en una biopelícula. Las bacterias pueden sobrevivir al proceso de desinfección para colonizar los sistemas de distribución en el momento de la instalación, o pueden ser introducidos a través de las conexiones entre elementos del sistema, eventos hidrológicos (crecientes) u operaciones de reparación.

Todas las bacterias son potenciales formadoras de biopelículas, no se conoce ninguna que sea totalmente no adherente. Algunas son: *Listeria Monocytogenes*, *Escherichia Coli*, *Staphylococcus Aureus*, *Streptococcus Termophilus*, *Salmonella Typhimurium*, *Pseudomonas Fluorescens* Y *Pseudomonas Aeruginosa*, entre otras.

Aunque las bacterias heterótrofas no están relacionadas con riesgos a la salud pública, son un grupo que está cercanamente relacionado con el grupo de coliformes totales; las cuales, pueden estar presentes en grandes cantidades tanto en aguas contaminadas con heces animales y/o humanas, como en ambientes no contaminados (agua potable).

Los tipos de bacterias coliformes encontradas en las biopelículas dentro de los sistemas de distribución pueden variar de acuerdo con la localización y el procedimiento usado para analizar las muestras. Tanto las bacterias pertenecientes a ambientes fecales, como a los no fecales, pueden entrar en los sistemas de distribución y crecer en las biopelículas, aún en la presencia de exceso de cloro residual después del tratamiento. (LeChevallier 1987)³⁹. Sin embargo, las bacterias coliformes que no implican ninguna amenaza contra la salud, pueden interferir en la habilidad de los sistemas en detectar aquellas bacterias que si posean algún efecto adverso sobre ésta.

PATOGENOS OPORTUNISTAS

Las bacterias patógenas son Un patógeno oportunista es un microorganismos que pueden causar enfermedades en individuos con sistemas de defensas deficientes; los ancianos, los niños, las mujeres embarazadas, pacientes con cáncer que se encuentren recibiendo quimioterapia o radiación, o pacientes con trasplantes en hospitales, pueden ser especialmente susceptibles a infecciones con estos microorganismos (Jarvis, 1990)³⁹.

Las bacterias oportunistas incluyen algunas especies de *Pseudomonas aeruginosa*, *Legionella spp.*, *Aeromonas spp.*, *Flavobacterium spp.*, y algunas especies de *Klebsiella* y *Serratia* (Geldreich, 1988)³⁹.

Para algunos patógenos, los sistemas de distribución son un ambiente físico, químico y biológico inapropiado para su crecimiento. Sin embargo, las bacterias patógenas se pueden acumular en una biopelícula,; la cual puede ayudar a la supervivencia de éstos, proporcionándole protección contra los desinfectantes.

BACTERIAS RESISTENTES A LOS ANTIBIÓTICOS

Algunas de las bacterias han desarrollado o adquirido cierta resistencia a los antibióticos como resultado de su previa exposición a éstos. Armstrong et al (1981)³⁹, mostró que el tratamiento de agua actual, puede incrementar el porcentaje de bacterias presentes en el agua potable, que sean resistentes a muchos antibióticos. Como resultado, un gran porcentaje de las bacterias heterótrofas presentes en biopelículas dentro de sistemas de distribución, pueden ser resistentes a los antibióticos.

BACTERIAS RESISTENTES A LOS DESINFECTANTES

La mayoría de las bacterias sobreviven en agua potable desinfectada, encontrando o creando ambientes donde están protegidas de los desinfectantes residuales. Algunos factores relacionados con el incremento de la supervivencia de bacterias en agua con cloro, incluyen la adherencia a las superficies, la encapsulación, la agregación, los niveles de nutrientes para el crecimiento.

Una extensiva investigación ha demostrado que las bacterias son más resistentes cuando están adheridas o asociadas con alguna superficie, tales como partículas de turbiedad, macro invertebrados, algas, partes de carbón provenientes de los filtros utilizados en el de tratamiento o la superficie de las tuberías (Tracy et al, 1966; Ridgway y Olson, 1982; LeChevallier et al., 1980, 1988)³⁹.

Las biopelículas no sólo proveen de protección contra los desinfectantes a las bacterias; también, sirven como un ambiente donde las bacterias afectadas por el desinfectante, pueden reparar el daño celular y de esta forma, crecer.

2.4.2 Hongos

Los hongos, los cuales incluyen las levaduras y los mohos, pueden ser encontrados en agua potable y pueden colonizar y multiplicarse en los sistemas de tuberías. (Jarvis 1990; Geldreich, 1990a)³⁹. Se ha encontrado en superficies de tuberías, hongos con densidades que varían de 0.0 a 5.6×10^4 células/100 cm² para levaduras y para mohos de 0.0 a 2.0×10^3 unidades formadoras de colonia/ 100 cm² (Nagy y Olson, 1985)³⁹. Las levaduras son más resistentes a la desinfección que las bacterias, probablemente debido a su maciza pared de células.

La principal preocupación de los hongos en el agua potable son los inconvenientes de olor y sabor, aunque pueden causar reacciones alérgicas y toxicostóxicas cuando se inhalan en vapor o a través del contacto mientras se limpian. Sin embargo el agua potable no es la mayor fuente de infecciones causadas por los hongos.

Algunos de los hongos que han sido encontrados en biopelículas dentro de tuberías son: *Aspergillus flavus*, *Stachybotrys chartarum*, y *Pseudallescheria boydii*.

Aunque se han encontrado hongos en biopelículas dentro de los sistemas de distribución de agua potable, estos no han sido concretamente vinculados con enfermedades producidas por el agua.

2.4.3 Protozoos y otros invertebrados

Las biopelículas pueden contener una variedad de protozoos y otros invertebrados incluyendo amibas y nematodos. El *Cryptosporidium*, *Giardia*, *Toxoplasma*, *Cyclospora* están presentes en agua naturales en un estado de protección reproductiva. Datos

disponibles sugieren que estos organismos pueden adherirse a, y acumularse sobre la biopelícula de las tuberías y persistir.

Algunos macro invertebrados puede colonizar los sistemas de distribución, incluyendo pequeños nematodos (lombriz), ácaros, larvas de insectos, y pequeños crustáceos.

No hay evidencia que estos organismos representen una amenaza para la salud, aunque recientes investigaciones han mostrado que *Legionella* puede crecer y sobrevivir dentro de ciertas ameibas.

2.5 FACTORES QUE FAVORECEN EL CRECIMIENTO

Una variedad de factores físicos, químicos y biológicos afectan el desarrollo de la biopelícula en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable. Desde la década de los 70's, los investigadores han tratado de encontrar cualescuáles son los factores que favorecen el crecimiento de la biopelícula.(Geldreich et al, 1972, 1977; Hutchinson y Ridgway, 1977)³⁹; llegando ha concluir que en general, el crecimiento del biopelícula ocurre cuando la materia orgánica y los sedimentos se acumulan en las tuberías de los sistemas de distribución; los desinfectantes residuales se disipan; y la temperatura del agua se incrementa. Posteriormente, Smith (1990) y LeChevallier (1990)³⁹, relacionaron los factores ambientales (pH, temperatura, precipitación); la disponibilidad de nutrientes inorgánicos y de materia orgánica biodegradable; la presencia y efectividad del desinfectante residual; la corrosión interna y la acumulación de sedimentos; y los efectos hidráulicos, con el desarrollo bacteriano en los sistemas de distribución de agua potable.

2.5.1 Factores ambientales

a)2.5.1.1 Temperatura

La temperatura es sin duda, el factor más importante que afecta el crecimiento bacterial en los sistemas de distribución; y directa o indirectamente, afecta todos los demás factores que gobiernan el crecimiento bacterial: la ratatasa de crecimiento bacterial, la eficiencia del proceso de desinfección, las ratatasa de corrosión de las tuberías (LeChevallier, 1989)²³. El cambio de temperatura genera oportunidades para que las bacterias entren en el sistema de distribución. Donde los nutrientes son adecuados, las bacterias generalmente crecen más rápidamente en aguas con temperaturas tibias, que con temperaturas frías (Donlan y Pipes, 1988; LeChevallier et al, 1996)²³. Así, las temperaturas tibias o cálidas facilitan el crecimiento de patógenos oportunistas en las biopelículas.

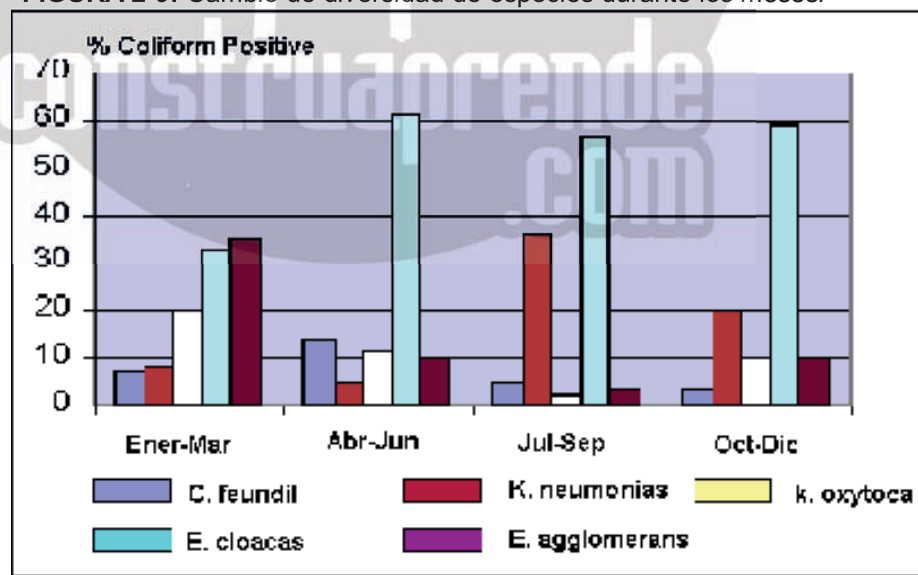
Debido a que dentro de los sistemas de distribución se puede hacer muy poco para controlar la temperatura, los esfuerzos se concentran en controlar los parámetros sobre los que la temperatura ejerce influencia.

Muchos investigadores (Howard, 1940; Donlan y Pipes, 1988)³⁹ han observado una significativa actividad bacteriana en el agua, a temperaturas de 15°C y mayores. LeChevallier et al (1980)³¹, mostró la habilidad de la bacteria para crecer y sobrevivir en un rango determinado de temperatura. Smith et al (1990)³⁹, notó una aparente tendencia relacionada con el paso de las estaciones: se presenta un nivel más alto de bacterias coliformes en períodos calientes, que durante los meses fríos del invierno (tabla 2-1). También concluyó, que las diversidad de especies de bacterias coliformes presentes, varían con ella cambio de la temperatura del agua y con el paso de las estaciones.(figura 2-9).

TABLA 2-1: Temperatura estacional del sistema de distribución (°C), porcentaje de muestras con contenido de coliformes, y conteo de coliformes en el sistema de agua de New Haven, Connecticut, entre 1986 y 1988. en New Haven, Connecticut, sistema de agua de 1986 al 1988 (Smith et al, 1989)³⁹.

ESTACION	TEMPERATURA (°C)	PORCENTAJE DE MUESTRAS CON CONTENIDO DE COLIFORMES	CONTEO DE CELULAS (cel/100MmL)
PRIMAVERA (marzo-mayo)	10.2 +/- 2.9	5.2 +/- 4.9	0.57 +/- 1.07
VERANO (junio-agosto)	19.2 +/- 3.1	12.3 +/- 8.3	1.98 +/- 1.89
OTOÑO (sept. - nov.)	16.0 +/- 3.2	9.4 +/- 6.0	1.15 +/- 4.41
INVIERNO (dic.-febr.)	7.1 +/- 1.8	2.0 +/- 2.1	0.14 +/- 0.28

FIGURA 2-9: Cambio de diversidad de especies durante los meses.



En un minucioso estudio, Fransolet en 1985, encontró que la temperatura del agua influenciaba no solamente la ratatasa de crecimiento del biopelícula, sino también el *lag time* (longitud de tiempo después de que un microorganismo entra en el sistema, y antes de que se produzca la adherencia y posterior división de las células)³⁹. Lo que demuestra que a bajas temperaturas las células pueden ser transportadas por los sistemas de distribución, sin que se experimente un crecimiento bacterias en las superficies de las tuberías.

2.5.1.2 pH del aguaDEL AGUA

El pH del agua afecta la efectividad de los desinfectantes residuales. La liberación de coliformes desde las biopelículas puede ser causada por cambios estacionarios en el pH del agua²³.

b)2.5.1.3 PRECIPITACIÓN Precipitación (lluvia)(lluvia)

Éste, es otro factor muy influyente sobre la calidad bacterias del agua potable. Con grandes precipitaciones, la turbiedad del agua se ve afectada, aumentando los niveles de nutrientes orgánicos presentes en el agua y por lo tanto generándose un incremento de la densidad bacterias después de un período de tránsito y crecimiento. LeChevallier et al (1990)³⁹ observó que las bacterias coliformes rutinariamente aparecieron siete días después de que ocurrieran grandes precipitaciones, debido a que el incremento de los niveles de turbiedad en el agua, puede proveer a la bacteria de partículas para su adherencia y posterior protección contra el tratamiento y la desinfección. Además, las partículas de turbiedad pueden proteger microorganismos patógenos, que son adheridos por éstos desde la desinfección.

Para algunos sistemas, los eventos de grandes precipitaciones (aguaceros) pueden permitir una vía de acceso a las bacterias, desde el sistema de tratamiento directamente hasta dentro del sistema de distribución.

2.5.2 FactoresEfectos hidráulicos

Las características hidráulicas de los sistemas de distribución es uno de los factores más influyentes, en el control de la actividad biológica de una biopelícula (Volk y LeVhevallier, 1999)²³. Una variedad de condiciones hidráulicas como: largos tiempos de residencia, provocados por bajas tasas de flujo o puntos muertos (lugares donde la velocidad es casi cero, tapones); altas tasas de flujo; o tasas de flujo fluctuantes, pueden ser influyentes sobre el crecimiento y la supervivencia de las bacterias en las biopelículas. En realidad, en una biopelícula no existe una relación simple entre los efectos hidráulicos y el crecimiento bacterias²³.

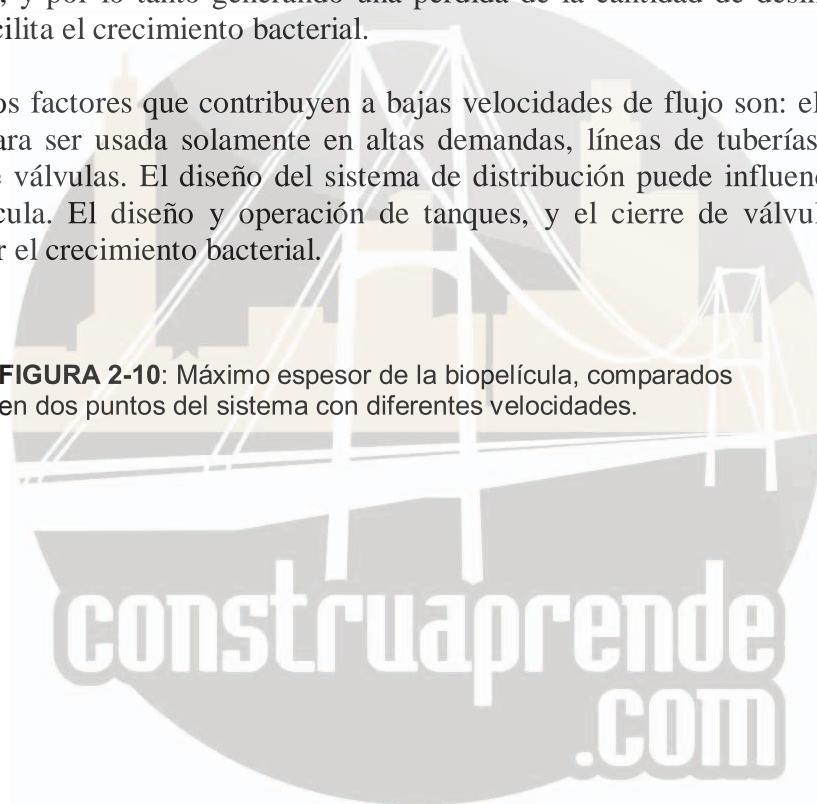
La velocidad del flujo puede regular el crecimiento microbiano en las superficies de las tuberías de varias formas. Altas velocidades de flujo puede incrementar el nivel de nutrientes y desinfectantes en contacto con la biopelícula; interrumpir el flujo de agua o

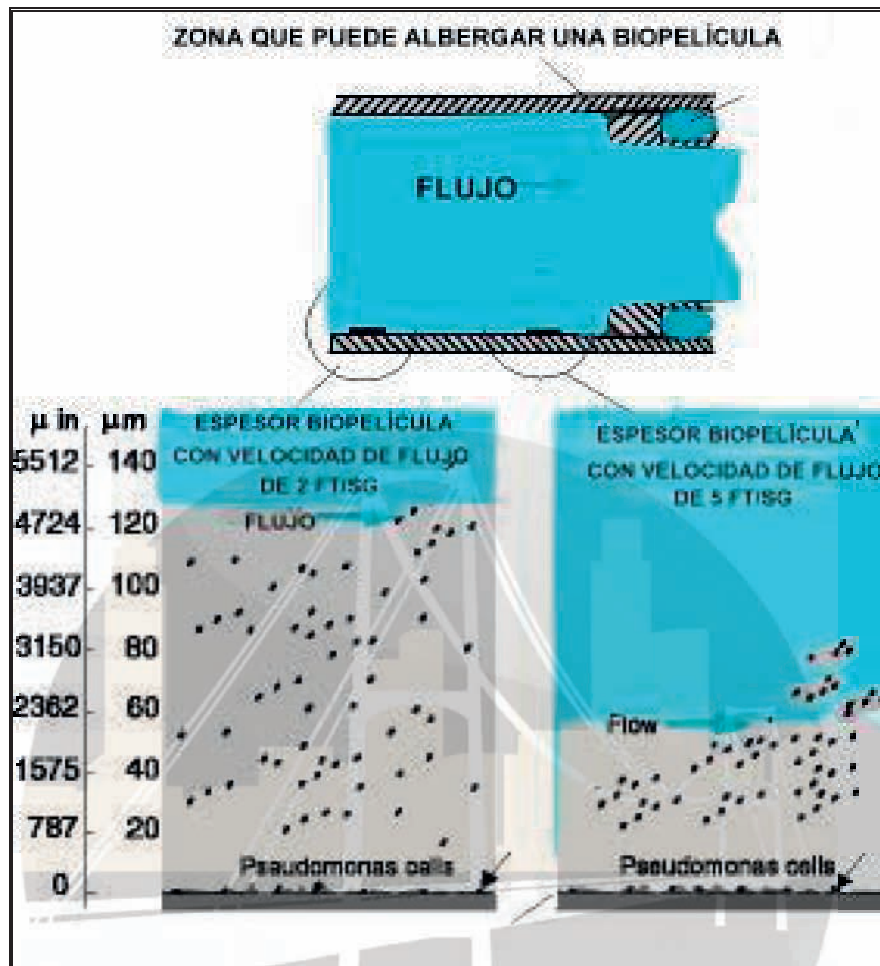
detenerlo (golpe de ariete), provoca una inversión de la dirección del flujo dentro de las tuberías, lo que puede causar el corte de partes de biopelícula,; las cuales, producen la liberación de las bacterias contenidas en éste, y permiten su acumulación y proliferación en áreas de flujo bajo o en puntos muertos, en donde generan una liberación de altos niveles de contaminantes a la masa de agua. Opheim et al (1988)³⁹ encontró por medio de un modelo de sistema de distribución, que el detener y reiniciar el flujo, incrementa los niveles de bacterias; y cuando el modelo fue expuesto a fuerzas de físicas de vibración, se observaron grandes liberaciones de bacterias.

Las bajas velocidades de flujo dentro de los sistemas de distribución, pueden resultar en aguas detenidas en puntos muertos, aumentando el tiempo de residencia del agua dentro del sistema, y por lo tanto generando una pérdida de la cantidad de desinfectante residual, lo cual facilita el crecimiento bacterial.

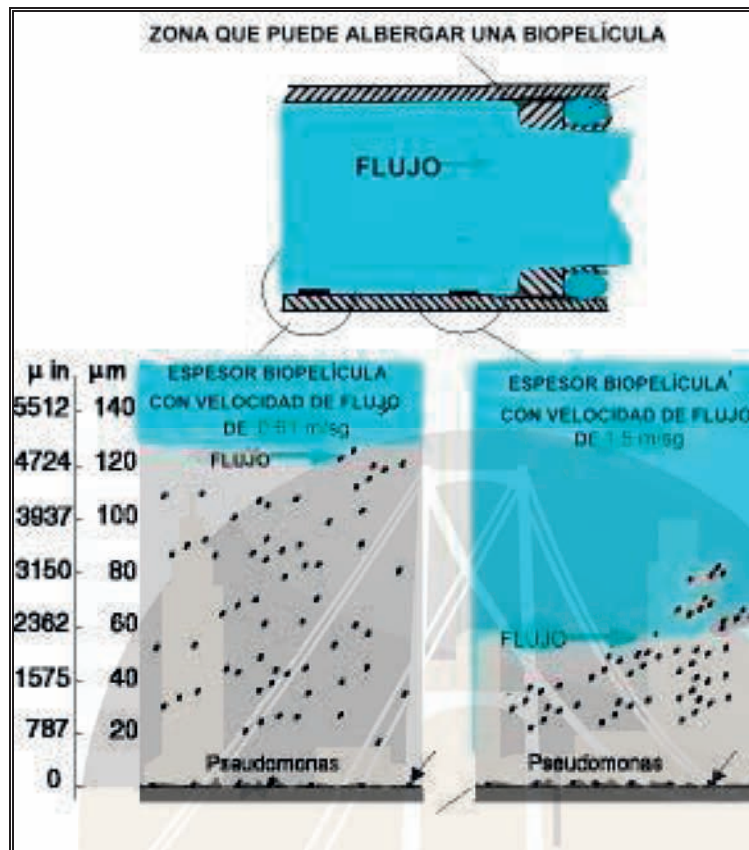
Algunos factores que contribuyen a bajas velocidades de flujo son: el almacenamiento de agua para ser usada solamente en altas demandas, líneas de tuberías sobre diseñadas, la falta de válvulas. El diseño del sistema de distribución puede influenciar la formación de biopelícula. El diseño y operación de tanques, y el cierre de válvulas, también pueden permitir el crecimiento bacterial.

FIGURA 2-10: Máximo espesor de la biopelícula, comparados en dos puntos del sistema con diferentes velocidades.





construaprende.com



Los cambios en la velocidad del flujo pueden ser causados por condiciones estacionarias. Un cambio estacionario de la demanda de consumo, se refleja en cambios que ocurrirán en la hidráulica y la presión del agua, a través del sistema de distribución. Donlan y Pipes (1988)³⁹ mostraron que la velocidad del agua tiene una relación inversa con la cantidad de biopelícula; y ésta, puede variar con el sistema y tipo de tuberías.

En los laboratorios Edstrom¹⁶, se realizaron algunos experimentos dentro de tuberías de acero inoxidable, que demuestran que a mayor velocidad de flujo, la biopelícula se desarrollaría en una capa más delgada. El ensayo se realizó para velocidades de flujo de 2 ft/s y 5 ft/s. (60.96 cm/s y 152.4 cm/s), figura 2-10.

La hidráulica de los sistemas de distribución también puede afectar la corrosión de las tuberías y la acumulación de sedimentos dentro de éstas³⁹.

2.5.3 Disponibilidad de nutrientes inorgánicos y material orgánico biodegradable

Para crecer, los organismos tienen que obtener del ambiente todas las sustancias que requieren para sintetizar el material celular y generar energía. Para las bacterias heterótrofas y los coliformes, los principales nutrientes son el fósforo, el nitrógeno, y el carbón

orgánico. Estos nutrientes tienden a acumularse en la interfase sólido-líquida dentro de las tuberías, creando un ambiente favorable para el crecimiento del biopelícula.

2.5.3.1 Ccarbón orgánico

El carbón orgánico es utilizado por las bacterias heterótrofas para la producción de nuevo material celular (asimilación) y como fuente de energía (disimilación). Las bacterias heterótrofas requieren una cantidad de carbón, nitrógeno y fósforo, en una relación de 100:10:1 (C:N:F),; lo cual hace al carbón orgánico un nutriente que limita el crecimiento bacterial.

El carbón orgánico en agua potable es medido en tres formas: como carbón orgánico total (COT), el cual es la cantidad total de carbón orgánico presente en el agua (soluble e insoluble); carbón orgánico disuelto (COD), el cual es la fracción soluble del COT; y el carbón orgánico asimilable (COA), el cual es la fracción del COD que puede ser fácilmente digerido y usado para el crecimiento por los organismos acuáticos.

Frecuentemente el nivel de COA presente en el agua, controla la ratatasa y la extensión del desarrollo de la biopelícula.

2.5.3.2 Ffósforo y nitrógeno

El nitrógeno es utilizado por los organismos para generar aminoácidos y material genético. El rol exacto del nitrógeno en el crecimiento de bacterias coliformes no es claro, especialmente porque algunos tipos de *Klebsiella* pueden preparar nitrógeno molecular. El nitrógeno esta a menudo presente en fuentes de agua superficial debido a la descomposición vegetal, en aguas servidas con contenido de fertilizantes de agricultura, o descargas de aguas negras.

l amoniaco, una forma reducida de nitrógeno, puede promover el crecimiento bacterial en los sistemas de distribución.

El fósforo en el ambiente se presenta en la mayoría de veces, como ortofosfato (PO_4^{3-}). El fósforo es algunas veces un limitador del crecimiento bacterial dentro de los sistemas de distribución; pero, los fosfatos que son algunas veces adicionados a la fuente de agua para controlar la corrosión, no poseen ninguna influencia significante sobre el crecimiento de bacterias coliformes.

En algunos sistemas de distribución, se asume que la materia orgánica biodegradable es el nutriente limitante del crecimiento bacterial, aunque en pocos estudios se sugirió que el fósforo puede ser el factor limitante para algunos sistemas (Miettinen et al, 1999)

2.5.4 Concentración de desinfectantes residuales

Los organismos adheridos a las biopelículas son más resistentes a la desinfección, que aquellos que se encuentran flotando libremente, debido a que un organismo adherido es susceptible de ser atacado por una sola zona, mientras que los organismos suspendidos libremente pueden ser atacados por todo su perímetro²⁷. Las ratas de difusión del desinfectante, la reacción de la biopelícula y la demanda de desinfectante son factores importantes en el control de la biopelícula, cuando se usan desinfectantes²³.

En algunos casos, la incapacidad para mantener una cantidad de desinfectante residual adecuado en la tubería, puede permitir el crecimiento bacteriano en los sistemas de distribución de agua potable³⁹.

La acumulación de biopelícula, la extensión del desarrollo de la biopelícula, y la población bacteriana pueden ser influenciadas por la concentración de cloro. El hecho que las biopelículas son más altamente desarrolladas en sus capas inferiores, impide que el desinfectante penetre todo el espesor de ésta, y llegue a las partes más internas, donde las concentraciones de cloro residual, por lo tanto, serán mucho menores. Un excesivo crecimiento de la biopelícula, puede resultar en una pérdida de desinfectante residual. (Crozes y Cushing, 2000)²³.

El mantener una cantidad residual de cloro como desinfectante no necesariamente controla totalmente la formación de la biopelícula. Una vez éste se ha establecido, puede necesitar grandes cantidades de cloro residual (mucho más que 0.2 mg/L) para reducir los niveles bacterianos significativamente (LeChevallier, 1989)²³.

Mantener un alto nivel de cloro puede ser complicado por la necesidad de controlar los subproductos de la desinfección (formación de trihalometanos, THM), la corrosión de tuberías, y para minimizar los problemas de olor y sabor.

LeChevallier (1990b)²³ encontró que con bajos niveles de cloro o mono-cloruros (1mg/L), se pudieron reducir la cantidad de biopelículas en las superficies de tuberías de acero galvanizado, cobre o PVC; sin embargo, para tuberías de hierro concentraciones de 3 a 4 mg/L de cloro residual, fueron inefectivas para el control de la biopelícula. Characklis *et al* (1979)²³ reportó que se requirieron la aplicación de 12.5mg/L de cloro libre durante 60 minutos de contacto, para reducir el espesor de la biopelícula en un 29 por ciento en un reactor turbulento anular. Ninguna experiencia obtuvo una remoción completa de la biopelícula, utilizando desinfectantes.

La inhabilidad de los desinfectantes para penetrar en las biopelículas de los sistemas de distribución puede estimarse por la ocurrencia de bacterias coliformes en aguas altamente cloradas.

La eficiencia desinfectante del cloro sobre los microorganismos fijados en una biopelícula depende al menos de cuatro factores:

- ✓ Demanda de cloro del agua y de la biopelícula.
- ✓ Cantidad de biopelícula acumulada.
- ✓ Concentración de cloro en la interfase agua-materia.
- ✓ Dosis de cloro aplicada (Characklis y Marshall, 1990)²⁷.

La dificultad para estimar la eficiencia de un desinfectante, reside en la imposibilidad de predecir exactamente los niveles de tratamiento necesarios para eliminar o limitar la acumulación de una película biológica responsable del deterioro de la calidad del agua, así como de aplicar el desinfectante más adecuado en razón del tipo y la edad de la biopelícula acumulada (LeChevallier *et al*, 1990)²⁷.

Algunos trabajos han confirmado que los organismos adheridos a alguna superficie experimentan una alteración de su morfología y de su tasa de crecimiento dependiendo del sustrato y de las características físico-químicas del medio. Por estas razones, la resistencia aparente de la biopelícula a los biocidas puede ser el resultado de la alteración química de la superficie celular y de los mecanismos de adsorción, afectando de este modo la penetración del desinfectante en la película biológica; por otra parte, una tasa de crecimiento lento de las células hace que su metabolismo y sus ácidos nucleicos sean menos resistentes al efecto de los biocidas en puntos específicos (Keevil *et al.*, 1995)²⁷. De este modo, las células presentes en la biopelícula están protegidas y solamente son inactivadas con concentraciones de biocidas de un orden de magnitud superior al necesario para inactivar las células suspendidas (Characklis, 1988; Clark *et al.*, 1994)²⁷.

Durante el tiempo que permanece en la red, el cloro utilizado como desinfectante reacciona con la materia orgánica presente en el agua, disminuyendo su concentración y limitando así el número de células sobre las que puede actuar. Las cloraminas son menos reactivas a los compuestos orgánicos, lo que permite una mayor penetración y difusión dentro de la película que con el cloro. Un estudio realizado por LeChevallier *et al* (1988)²³ indica que la resistencia a la desinfección de las bacterias adheridas es 150 veces mayor que el de las bacterias suspendidas cuando se utiliza cloro, pero cuando se utiliza monoclóraminas esta resistencia se convierte en soloso sólo dos veces mayor que con las células aisladas. El cloro es pues un desinfectante eficaz para limitar la proliferación bacteriana, pero no consigue impedirla totalmente (de Beer *et al.*, 1994)²⁷.

La eficacia desinfectante del cloro depende del tipo de superficie a la que está adherida la biopelícula, de la edad de la película biológica, del encapsulamiento de las células y de la cantidad de nutrientes presentes; por el contrario, la eficacia desinfectante de las monoclóraminas tan soloso sólo se ve afectada por el tipo de superficie²⁷.

2.5.5 Materiales de las tuberías de los sistemas de distribución

El contacto del agua con ciertos materiales dentro de la red de distribución puede favorecer el crecimiento bacteriano. Se descubrió que algunos materiales usados en las tuberías de conducción pueden permitir la multiplicación de bacterias patógenas oportunistas (van der

Kooij y Veenendall, 1993)²⁷. El acero inoxidable es tan susceptible como las tuberías de plástico (PVC) ó cobre. Mayette (1992)¹⁶ afirmó que “hasta el momento, no ha sido descubierto el material de las tuberías que no presente adherencia bacterial. Los estudios han demostrado que las bacterias se adherirán al acero inoxidable, teflón, PVC y cobre con igual o mayor facilidad”.

El crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua, incluyendo los depósitos de almacenamiento (tanques) y el sistema de acometidas y domiciliarias conducción de las viviendas, puede verse estimulado por la liberación de compuestos promotores del crecimiento por parte de los materiales en contacto con el agua potable. La biopelícula es capaz de desarrollarse sobre las paredes de las tuberías más fácilmente, si los materiales que las constituyen le suministran los nutrientes para su crecimiento²⁷. La lixiviación de iones metálicos por parte de los materiales plásticos es suficientemente baja como para causar efectos tóxicos, pero aportan cationes esenciales para la función enzimática de las bacterias. Las células bacterianas en contacto con los materiales absorben más fácilmente los iones, por lo que los materiales con base orgánica pueden ser directamente utilizados por algunos microorganismos de la biopelícula (Rogers et al., 1994)²⁷. Colbourne et al. (1988) han atribuido la presencia de patógenos en sistemas de abastecimiento de agua potable a la supervivencia de estos organismos en biopelículas formadas sobre las juntas de caucho integrantes de los grifos y duchas. Los materiales de base orgánica (revestimientos, sellantes, plásticos y caucho) o con aditivos orgánicos (mortero de cemento con compuestos orgánicos) pueden favorecer un intenso crecimiento microbiano. Se ha revelado un incremento considerable de la concentración de microorganismos en el agua y un crecimiento microbiano visible sobre depósitos recubiertos con pinturas bituminosas y resinas epóxicas, películas de PVC y algunos plásticos (Schoenen, 1989)²⁷.

Ali Vehmas, reportó que el crecimiento de biopelícula fue más rápido y más abundante sobre PVC que sobre polietileno (PE)⁴⁰. Aunque, el crecimiento microbiano ha sido observado sobre los materiales que liberan materia orgánica, en los materiales inorgánicos como: fibrocemento, hormigón, hierro colado, hierro dúctil y acero, los cuales han sido utilizados desde hace muchos años para la construcción de sistemas de distribución de agua, se ha descubierto crecimiento de biopelícula.

Pedersen (1990)⁴⁰, observó que el tiempo necesario para la formación de una biopelícula sobre acero inoxidable fue de cuatro meses aproximadamente, mientras que Donlan et al. (1994) observaron que el desarrollo de la biopelícula sobre hierro colado se dio al cabo de sólo un mes; diferencias que podrían deberse a la composición química de los materiales o al tipo de desinfectante utilizado en el tratamiento del agua potable, así como a la velocidad del agua, a la composición biológica de la misma y a la temperatura²⁷.

El área de la superficie es uno de los factores que influyen en el desarrollo de la biopelícula. Los sistemas de bombeo, a diferencia de la mayoría de los ambientes naturales (lagos y ríos), ofrecen una gran cantidad de superficie para el desarrollo de una biopelícula. Membranas RO, resinas DI, tanques de almacenamiento, y los sistemas de tuberías proveen una gran superficie potencial para el crecimiento bacterial³⁹.

El resultado de los estudios realizados por Schoenen (1989)²⁷ sobre diferentes materiales en contacto con agua, mostraron que las pinturas bituminosas y el caucho clorado dieron origen a crecimientos superficiales, siempre que la dosis de cloro en el agua fuera inferior a 0.15 mg/L. Por otro lado, Rogers et al (1994) observaron que todos los materiales utilizados en las redes de distribución tenían un alto nivel de colonización en comparación con el vidrio, como material patrón; registrando para el acero inoxidable una concentración de flora bacteriana a las 24 horas de comenzado el estudio de 5.24×10^4 UFC/cm²; mientras que para los elastoméricos (látex y etileno propileno usados como control positivo de crecimiento) exhibieron concentraciones superiores a 1×10^7 UFC/cm². Para el acero dulce y los materiales plásticos llegaron a desarrollar biopelículas con concentraciones del orden de 10^5 a 10^6 UFC/cm² en el mismo período de tiempo. La tabla 2-2 presenta la medida del crecimiento bacteriano registrado en cada material al cabo de los 28 días de duración del ensayo.

TABLA 2-2: Análisis comparativo de materiales de tuberías en función de su capacidad para permitir el desarrollo de una biopelícula y lixiviar nutrientes.

Material de tubería	Película biológica (a) UFC/cm ²	COT (b)
Vidrio (control)	1.90×10^3	2.78 ± 0.40
Cobre	-----	4.15 ± 0.17
Acero inoxidable	2.13×10^5	-----
Polipireno	4.54×10^5	5.98 ± 1.56
PVC _c (clorado)	5.14×10^5	6.02 ± 0.11
PVC _u no plastificado	6.23×10^5	5.42 ± 0.11
Acero dulce	1.69×10^6	-----
Polietileno	2.75×10^6	179 ± 0.82
Etileno-propileno	1.08×10^7	157 ± 0.84
Látex	5.50×10^7	320 ± 19.4

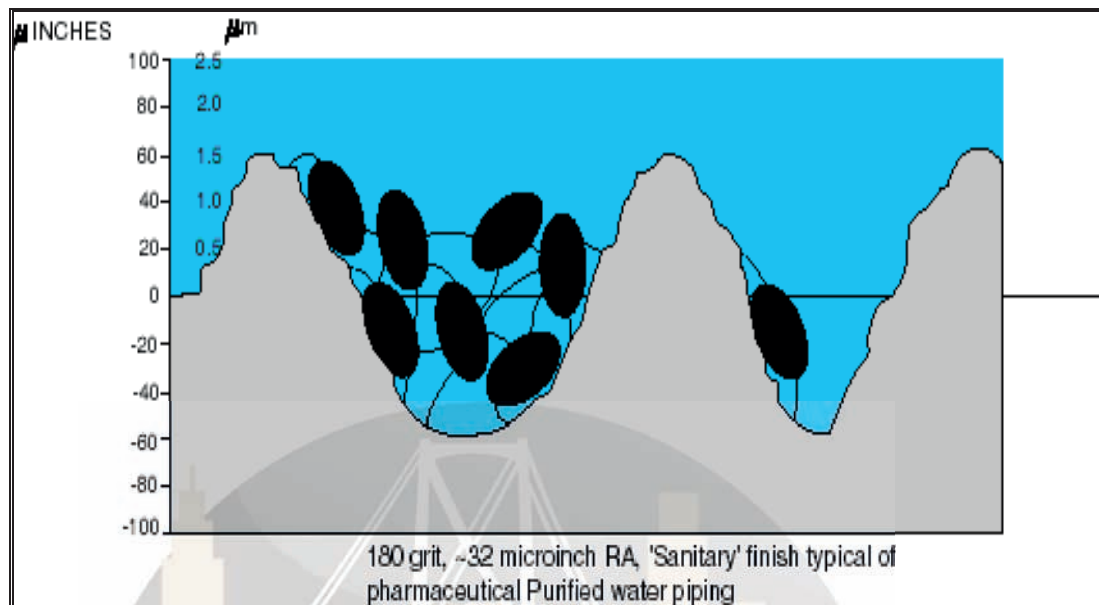
(a) Valores medios tras un período de incubación de 28 días.

(b) Valores medios del carbono orgánico total después de tres días de incubación.

..... No medido.

Aunque la rugosidad de las superficies retarda la adherencia inicial de las bacterias, no afecta significativamente la cantidad total de biopelícula en la superficie después de varios días; y proveen a las bacterias de un lugar de protección contra el flujo de agua. En la figura. 2-11, se muestra que en las irregularidades de las superficies se pueden albergar varias capas de *Pseudomonas aeruginosa*.

FIGURA 2-11: Comparación del tamaño de una bacteria y la rugosidad dela tubería



Aunque la rugosidad de las superficies retarda la adherencia inicial de las bacterias, no afecta significativamente la cantidad total de biopelícula en la superficie después de varios días; y proveen a las bacterias de un lugar de protección contra el flujo de agua. En la figura. 2-11, se muestra que en las irregularidades de las superficies se pueden albergar varias capas de *Pseudomonas aeruginosa*.

2.5.6 Acumulación de sedimentos

Los sedimentos y partículas en los sistemas de tuberías pueden ser potenciales hábitats para crecimiento microbiano y brindar protección de la desinfección a las bacterias. Una significativa actividad microbiana puede ocurrir en sedimentos acumulados. Los sedimentos se pueden acumular en áreas de bajo flujo o en puntos muertos de los sistemas de distribución. Las partes de biopelícula que son desprendidas de una sección de tubería se pueden acumular en la periferia de los sistemas de distribución, permitiendo la acumulación de sedimentos y la proliferación de algunos microorganismos. (van der Kooij, 2000)²³. Efectos biológicos y antiestéticos pueden ser observados siguiendo la liberación de sedimentos acumulados desde zonas de bajo flujo de los sistemas de distribución (Geldreich, 1990)²³.

Varios estudios han identificado microorganismos patógenos y no patógenos en sedimentos acumulados. Estos incluyen bacterias, virus, protozoos, algas, hongos, e invertebrados. Algunos patógenos oportunistas como *Legionella*, y *Mycobacteria*, han sido detectados y comprobado que se pueden multiplicar en los sedimentos. Otros patógenos oportunistas encontrados en los sedimentos incluyen a *Pseudomonas fluorescens* y *Flavobacterium spp.* Los sedimentos también pueden liberar nutrientes dentro del agua lo cual estimula el crecimiento de biopelícula aguas abajo.

2.5.7 Corrosión

La corrosión provee una superficie de protección para los microorganismos, genera flujos lentos de agua, y contribuye a la ocurrencia de la inversión del flujo en algunas zonas, cuando la superficie de la pared del tubo de hierro se corroe. La corrosión de las tuberías de los sistemas de distribución, se puede presentar debido a acciones químicas, físicas o biológicas (O'Connor y Banerji, 1984)³⁹. En tuberías de hierro, las reacciones electroquímicas en la superficie de la tubería disuelven el metal en forma de pits (liberación de iones ferrosos) en un punto, mientras construye un tubérculo ó nódulo (compuesto de hidróxido férrico) en un lugar remoto (figura 2-12). Los pits o nódulos formados pueden capturar y concentrar nutrientes. En raspaduras de las tuberías de varios sistemas de distribución, fueron encontrados altos niveles de coliformes asociados con tubérculos de hierro.

Figura 2-12: Imagen de una tubería de hierro dúctil, donde se pueden observar los tubérculos formados por la biocorrosión.





El cloro libre por si mismo, promueve la corrosión de las tuberías por la reacción con iones ferrosos y la precipitación de hidróxido férrico. La corrosión también puede ser causada por bacterias ferrosas o sulfurosas.

Victoreen (1977, 1980, 1984)³⁹ indicó que el hierro puede ser un nutriente importante para el crecimiento microbiano. Él encontró en sus estudios, que el crecimiento de coliformes fue estimulado substancialmente por óxidos de hierro encontrados en tubérculos dentro del sistema de distribución.

CAPÍTULO 3

LA BIOPELÍCULA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y SUS PROBLEMAS

3.1 ALCANCE

A principio de los años 70`s, se consideraba que la calidad del agua potable que se introduce en un sistema de abastecimiento se conserva inalterada hasta su llegada al punto de consumo. Sin embargo, artículos científicos publicados a finales de esa década, evidencian la existencia de una pérdida de calidad del agua a lo largo de su recorrido por la red de abastecimiento debida a la acción de los microorganismos presentes en las biopelículas, que se desarrollan en las paredes de las tuberías.^{27,32}

Por lo tanto, para entender un poco más a fondo, el porqué se da este fenómeno dentro de las redes de distribución de agua, en este capítulo, inicialmente se presenta una descripción de la diversidad de especies de microorganismos que pueden estar presentes dentro de los sistemas y pueden ser potenciales creadores de biopelículas. Luego, se identifican los posibles medios (vías) por los cuales los microorganismos se pueden introducir dentro de los sistemas y sobrevivir dentro de estos. Posteriormente se describen los principales problemas que se pueden generar por la presencia de las biopelículas, tanto para los elementos físicos que conforman el sistema de distribución, como sobre la calidad del agua potable. Por último, se dan algunas pautas, que servirán como herramienta, al evaluar una posible presencia del fenómeno de crecimiento de biopelícula dentro de un sistema de distribución de agua

3.2 MICROBIOLOGÍA DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

El agua cruda normalmente contiene organismos vivos (bacterias, hongos, macro invertebrados, etc.). Los procesos de potabilización no intentan producir agua estéril, simplemente la vuelven agradable para beber (clara y libre de algún olor indeseable) y no perjudicial para la salud.

En la mayoría de los casos, los sistemas de distribución transportan agua conforme con las normas de calidad para agua potable de cada país. El problema real asoma como resultado

del incremento en la densidad de microorganismos presentes (crecimiento bacteriano), con el incremento de los tiempos de residencia y/o la distancia viajada entre el proceso de potabilización y el lugar de consumo, produciendo un indeseable cambio en las propiedades de un agua, que en un principio, poseía una excelente calidad.

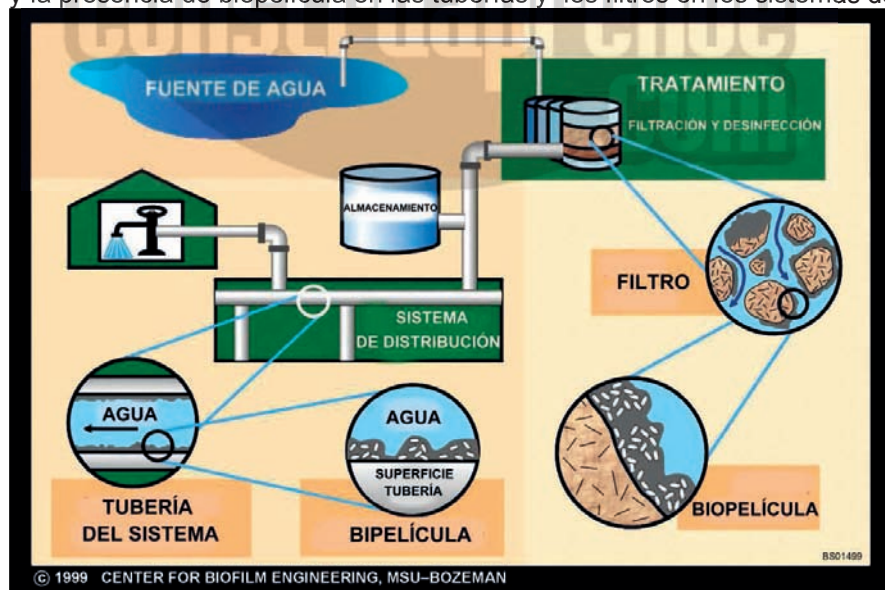
Las posibles causas del crecimiento bacterial dentro de los sistemas son numerosas, y algunas son:

- Falla en la eliminación por el proceso normal de potabilización;
- Contaminación ocasionada por la presencia y reparación de tuberías rotas;
- Crecimiento bacterial en el agua o en las superficies de las tuberías utilizando pequeñas concentraciones de materia orgánica disuelta en el agua.

Las fuentes de abastecimiento de agua contienen compuestos orgánicos que tienen la facilidad de promover el crecimiento bacteriano en los sistemas de distribución, incluso aún después de la desinfección final a la que se somete al agua durante su potabilización. Este desarrollo bacteriano depende fundamentalmente del contenido de materia orgánica biodegradable y de nutrientes inorgánicos, de la eficiencia del desinfectante residual, de la temperatura, del tiempo de residencia del agua en los conductos y depósitos de almacenamiento, del pH del agua y del material de construcción de las tuberías.

Los sistemas de almacenamiento y distribución de agua potable constituyen un ambiente idóneo para la proliferación bacteriana; el flujo de agua favorece el transporte de nutrientes y bacterias; mientras que las paredes de las tuberías y las partículas presentes en el agua sirven de superficie adherente para los microorganismos, los cuales aumentan su eficacia para absorber nutrientes y además hacerse más resistente a ambientes con escasez de nutrientes y la presencia de desinfectantes.

FIGURA 3-1: Diagrama de un sistema de distribución, sus componentes y la presencia de biopelícula en las tuberías y los filtros en los sistemas de potabilización



Una red de abastecimiento de agua potable tiene dos fases diferenciadas que interactúan entre sí formando un ecosistema particular. Por un lado se encuentra el agua circulante, que sirve de medio de transporte para los nutrientes y las bacterias, y por otro lado están las paredes de las tuberías y los filtros, donde ocurren fenómenos de fijación bacteriana y formación de película biológica (figura 3-1).

3.2.1 Microorganismos presentes en los sistemas de distribución

Existen varios tipos de bacterias que han demostrado una habilidad para sobrevivir dentro de los sistemas de distribución, de las cuales, algunas poseen la facilidad de crecer y producir biopelículas, lo cual conlleva a la colonización de la infraestructura de los sistemas de distribución.

Para los microorganismos que se puedan encontrar en un sistema de distribución de agua potable, se ha propuesto una clasificación subjetiva en cuatro grupos⁷:

- *Especies nativas*: están compuestas por la mayoría de microorganismos encontrados en el suelo, en la comida, etc.; como las bacterias, hongos microscópicos y levaduras.
- *Especies Adventius*: se presentan esporádicamente en el grifo del consumidor. Estos pueden incluir, entre otros, organismos como protozoos, y macro invertebrados del género *Asella*, los cuales, cuando accidentalmente se introducen en los sistemas de distribución, pueden sobrevivir y multiplicarse a un nivel de varios miles por metro cúbico (Boet, 1984; Levy et al, 1986)⁷.
- *Especies molestas*: las cuales aumentan el problema de corrosión química o dan lugar a la presencia de un indeseable sabor en el agua.
- *Especies peligrosas*: estas pueden ser muy perjudiciales para la salud si consisten de patógenos oportunistas, los cuales habrían entrado al sistema como resultado de una contaminación accidental.

Además, existe una segunda clasificación para los microorganismos encontrados en los sistemas de distribución de agua potable, los cuales pueden ser agrupados en dos categorías⁷:

- Primero, aquellos totalmente aclimatados al ambiente del agua potable y por lo tanto que forman un ecosistema microbiano el cual es estable, y cuya erradicación es extremadamente difícil. Las personas encargadas de la distribución del agua, intentan limitar el crecimiento de las poblaciones bacterianas, la mayoría de las cuales son organismos heterotróficos del género *Pseudomonas* y *Flavobacterium*.
- Segundo, los microorganismos que son transportados a través del sistema por el flujo de agua y son virtualmente incapaces de establecerse o de multiplicarse prósperamente (en particular organismos indicadores fecales).

No es sorpresa que en la literatura los investigadores tiendan a producir una larga lista de géneros y especies bacterianas. La tabla 3-1 presenta los microorganismos que son más comúnmente encontrados dentro de los sistemas de distribución y sus potenciales efectos⁷.

TABLA 3-1: Bacterias comúnmente encontradas en los sistemas de distribución de agua potable y su posible significado. (Dott et al; 1986)⁷

BACTERIAS	POTENCIALES EFECTOS
<i>Acinetobacter</i>	Potencial rival para otros indicadores bacteriales
<i>Acromonas</i>	Potencial patógeno oportunista
<i>Alcaligenes</i>	--
<i>Arthrobacter</i>	Colorea el agua
<i>Bacillus</i>	Reducción de nitrato, corrosión, rival para otros indicadores bacteriales
<i>Beggiatoa</i>	Colorea el agua con rojizo (bacterias ferrosas), oxidación de sulfuros
<i>Clostridium</i>	--
<i>Corynebacterium</i>	--
<i>Crenothrix</i>	Colorea el agua con rojizo (bacterias ferrosas)
<i>Desulfovibrio</i>	Potencial patógeno
<i>Edwarsiella</i>	Potencial patógeno oportunista
<i>Eterobacter</i>	--
<i>Escherichia</i>	Indicador de contaminación fecal
<i>Flavobacterium</i>	Potencial patógeno oportunista
<i>Gallionella</i>	Colorea el agua con rojizo, corrosión (bacterias ferrosas)
<i>Klebsiella</i>	Potencial patógeno
<i>Legionella</i>	Potencial patógeno
<i>Leptothrix</i>	Colorea el agua con rojizo, (bacterias ferrosas)
<i>Methanomonas</i>	Oxidación de metano
<i>Micrococcus</i>	Reducción de nitrato, corrosión, rival para otros indicadores bacteriales
<i>Moraxella</i>	Patógeno oportunista
<i>Mycobacterium</i>	Potencial patógeno
<i>Nitrobacter</i>	Producción de nitratos, corrosión
<i>Nitrosomas</i>	Producción de nitratos, corrosión
<i>Nocardia</i>	Potencial patógeno
<i>Proteus</i>	Posible rival de otros indicadores
<i>Providencia</i>	Patógeno oportunista
<i>Pseudomonas</i>	Patógeno oportunista
<i>Salmonella</i>	Potencial patógeno
<i>Serratia</i>	Patógeno oportunista
<i>Sphaerotilus</i>	Colorea el agua con rojizo, (bacterias ferrosas)
<i>Staphylococcus</i>	Potencial patógeno
<i>Streptococcus</i>	Indicador de contaminación fecal
<i>Strptomyces</i>	Olor y sabor
<i>Yersinia</i>	Potencial patógeno

3.2.2 Rutas a través de las cuales los patógenos pueden entrar a los sistemas de distribución

Los microorganismos pueden entrar en los sistemas de distribución por medio de una variedad de caminos²³.

Una constante cantidad de bacterias, hongos, protozoos, algas, nematodos y otros microorganismos entran en los sistemas de distribución a través de la fuente de agua, o en algún lugar dentro del sistema. El agua tratada tiene una gran posibilidad de contaminarse dependiendo de las características de la construcción, operación, y mantenimiento de los sistemas de distribución de agua (Berger et al; 1993)⁷. Algunas otras formas de contaminación incluyen la contaminación en sistemas de almacenamiento sin cubierta, penetraciones en sistemas de almacenamiento cubiertos, en lugares donde se realizan operaciones de reparación, en las secciones de empalme o durante eventos de contaminación transitoria, como por ejemplo, momentos de bajas presiones que permitan el cambio de la dirección del flujo dentro de las tuberías. La severidad de las consecuencias potenciales sobre la salud que puede resultar de la contaminación del agua de los sistemas de distribución depende, en parte, de la ruta de entrada.

En síntesis, los organismos patógenos pueden presentarse en sistemas de agua tratada debido a diferentes patrones de contaminación: desde la facilidad de la potabilización; un rompimiento de la integridad del sistema (secciones de empalme, tuberías rotas); o por el crecimiento bacterial dentro de las biopelículas.

3.2.2.1 A través de la fuente de agua (fallas en el tratamiento)

Ha sido demostrado que la mayoría de organismos que colonizan las superficies de las tuberías en los sistemas de distribución pueden ser encontrados en la fuente de agua. Algunos organismos traspasaron las barreras de la potabilización (Schaule y Fleming, 1997)³⁹, particularmente luego de eventos de crecientes.

La principal causa de crecimiento bacterial, es la falla de los procesos de desinfección primaria y la pérdida de desinfectante residual. Una inefectiva potabilización también puede permitir que hongos y organismos planctónicos entren al sistema de distribución (Doggett, 2000)⁷. Hudson et al en 1983, en su investigación en el sistema de distribución de agua potable de Springfield, Illinois, responsabilizó de una la elevada presencia de coliformes, a fallas en el sistema de potabilización⁷.

Se podrá realizar un cuestionamiento a la eficiencia del proceso de potabilización del agua, sí dentro del sistema de distribución son detectadas bacterias coliformes, partículas de turbiedad, o se presentan periodos de bajo cloro residual.

La presencia de organismos coliformes en plantas de potabilización puede ocurrir aún cuando los afluentes aparenten tener una buena calidad microbiológica. Además, una incompleta

desinfección solamente puede herir las bacterias, las cuales no pueden ser detectadas usando el medio coliformes estándar. Observaciones hechas por McFeter (1986, 1989)⁷, indican que las bacterias coliformes heridas en las corrientes dentro de las plantas de potabilización, pueden ser recuperadas en un medio convencional después de gastar un tiempo en el sistema de distribución. Posteriormente Watters y McFeters, (1990)⁷ mostraron que las bacterias heridas en los procesos de potabilización y desinfección, pueden recuperar su lesión celular y revivir en las biopelículas de los sistemas de distribución.

Las bacterias pueden traspasar las barreras del tratamiento por medio de la adhesión a partículas orgánicas e inorgánicas.

3.2.2.2 A través de tuberías rotas, válvulas, uniones y empaques

Tuberías rotas o con escapes, válvulas con escapes, uniones o sellos, proveen una ruta de acceso potencial para la entrada de bacterias que pueden luego desarrollarse y residir en una biopelícula. Aún en sistemas que usan buenas prácticas sanitarias, las roturas o fugas en elementos pueden resultar en una entrada de contaminación (LeChevallier, 1999b)⁷. El envejecimiento de la estructura también influye para que se presenten fallas por rotura de tuberías o fugas, y puede ser una causa significativa de contaminación del agua potable.

La intrusión puede resultar de fluctuaciones en la presión del agua dentro de las tuberías. Presiones negativas pueden introducir contaminación dentro del tubo por medio de una gotera que se presente por la fisuración de alguna tubería en algún punto del sistema de distribución. Aún en sistemas de distribución muy bien operados, el goteo puede representar del 10 al 20 por ciento del agua producida (LeChevallier, 1999b)²⁷. Una vez se presenta una fisura, la contaminación bacteriana en los alrededores del lugar, puede potencialmente entrar al sistema de distribución dado el cambio de presión que ocurre durante el goteo. Las fallas o goteras pueden también introducir altas concentraciones de bacterias coliformes perjudiciales (indetectables por las técnicas estándar para coliformes) dentro del sistema de distribución.(LeChevallier, 1999b)⁷.

Algunas causas de presiones pasajeras son el encendido y apagado de bombas, las operaciones de limpieza, la apertura y cerrado de hidrantes para incendio, un cambio súbito en la demanda, procesos de llenado de tanques, clausura de válvulas de altitud, mal funcionamiento de la liberación de aire, válvulas de presión y vacío, cerrado rápido de válvulas de aire. En adición a estas causas de presiones transitorias, causas observadas de reducción de presión incluyen flujo de incendios, cambios de elevación, fallas en la línea de servicio.

Las secciones de conexión que no están protegidas con una prevención contra flujo inverso, representan un potencial riesgo para introducir contaminación bacterial. Las bacterias introducidas como resultado de fallas en las conexiones o a efectos de flujo inverso, pueden convertirse en parte de la matriz de una biopelícula y pueden ser liberadas tiempo después.

3.2.2.3 A través de la contaminación del agua potable almacenada en tanques

Tanto los tanques donde se almacena agua potable cubiertos como los no cubiertos, poseen algún riesgo para una contaminación bacteriana de los sistemas de distribución, y la subsiguiente inclusión en las biopelículas. La contaminación de agua almacenada puede entrar en las tuberías de distribución de agua cuando ésta es drenada desde el tanque hacia el sistema de tuberías. La contaminación introducida fácilmente a través de puntos en el sistema de distribución puede ser aumentada durante el almacenamiento. Los tanques de almacenamiento pueden acumular sedimentos, aumentando la habilidad de las bacterias para prosperar durante el almacenamiento.

En tanques abiertos los contaminantes bacterianos pueden entrar por fenómenos naturales, por los animales o los humanos. Los pájaros y otros animales pueden introducir contaminantes a través de sus heces, o a través de un contacto directo con el agua potable. Algunos reservorios de agua tratada pueden también ser afectados por corrientes superficiales que pueden estar contaminadas.

Desafortunadamente, los seguros tanques de almacenamiento cubiertos pueden permitir que una contaminación bacteriana, entre en los sistemas de distribución. La contaminación por parte del aire, puede suceder cuando éste es aspirado a través de los respiraderos del tanque, para reemplazar el agua que sale del tanque. Los animales y humanos pueden entrar en los tanques de almacenamiento de agua potable cubiertos inadecuadamente. Tanto los tanques de almacenamiento enterrados, como los elevados y a nivel, son susceptibles de contaminación animal y humana.

3.2.2.4 A través de manejo inapropiado de los materiales, el equipo y el personal en contacto con el agua potable

Los materiales, el equipo y el personal que hacen parte del funcionamiento del sistema de distribución, también pueden ser una potencial fuente de contaminación bacteriana. Dentro de los materiales se pueden incluir los filtros, las tuberías, superficies de válvulas, sellantes y otros (Schaele y Fleming, 1997)⁷. Las operaciones de mantenimiento, reparaciones de los elementos del sistema de distribución o de los tanques de almacenamiento, pueden ser una fuente para la introducción de contaminación por parte del personal que interviene en esta labor y que entra en contacto con el agua o algunos elementos. Equipos colocados dentro de los sistemas de distribución, tales como equipos de limpieza de tanques o equipos de video utilizados en la inspección de líneas de tuberías, pueden introducir contaminantes si no son descontaminados antes de su uso.

3.2.2.5 A través de un inadecuado sistema de seguridad del sistema

La falta de una adecuada seguridad, puede resultar en la entrada de bacterias al sistema, seguida de la incorporación de contaminación bacteriana dentro de las biopelículas del sistema de distribución. El vandalismo o el terrorismo pueden causar una interrupción

intencional de la seguridad del sistema; también, algunos usuarios no autorizados pueden generar una contaminación intencional al golpear las tuberías del sistema de distribución ó por la presencia de nadadores en los tanques de almacenamiento o reservorios.

Los sistemas de distribución pueden tener miles de tuberías, y muchos tanques de almacenamiento e interconexiones, por lo cual, pueden ser susceptibles a permitir contaminación, si no se provee de un sistema de seguridad adecuado o se realiza una constante rutina de mantenimiento.

3.3 PROBLEMAS CAUSADOS POR LA BIOPELÍCULA EN LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN

El crecimiento bacteriano en forma de biopelícula dentro de los sistemas de almacenamiento y distribución de agua potable, en general presenta dos problemas: produce un deterioro de la calidad del agua, llegando a afectar su conformidad con las normas microbiológicas de calidad, y tiene un efecto perjudicial sobre los elementos del sistema, como tuberías, tanques y válvulas.

Estos son algunos de los problemas relacionados con las biopelículas en los sistemas de distribución de agua potable:

- Contaminación del agua y pérdida de sus propiedades organolépticas,
- Desarrollo excesivo de biomasa,
- Proveer un hábitat a microorganismos patógenos oportunistas,
- Incrementar la tolerancia en contra de los biocidas,
- Incrementa la demanda de desinfectante
- Aumenta el fenómeno de corrosión de tuberías influenciada microbiológicamente.

3.3.1 Sobre la calidad del agua

La presencia de biopelículas puede degradar la calidad del agua potable alterando sus propiedades organolépticas, produciendo una pérdida de utilidad del método de coliformes totales, y albergando microorganismos patógenos que pueden generar un riesgo para la salud de los consumidores.

3.3.1.1 Propiedades organolépticas del agua

Aunque los problemas estéticos pueden no representar un riesgo para la salud pública, la presencia de estos problemas puede indicar que se está presentando deterioro de las tuberías, o la presencia de una fuerte biopelícula²³. Algunas bacterias heterotróficas que viven en las biopelículas pueden causar problemas estéticos como mal sabor, presencia de olores y colores, dentro de las cuales se encuentran el *Actinomyces*, las bacterias ferrosas y sulfurosas, y las algas (especialmente algas verdes y azules). Algunas bacterias como las *Pseudomonas* pueden producir compuestos de sulfuro de mal olor. Cuando son encontradas

en una biopelícula, las bacterias del genero *Hiphomicrobium*, pueden causar tonalidades negras en el agua (van der Wende y Characklis, 1990)²³. Microorganismos como *Streptomyces*, *Nocardia*, y *Arthrobacter*, también son generadoras de problemas en la calidad organoléptica del agua potable, cuando están presentes en las biopelículas (Geldreich 1990). En aguas potables con concentraciones de 10 organismos por litro de *Streptomyces* y de *Nocardia* spp., se han presentado quejas sobre olores y sabores³⁰.

El porcentaje de quejas a los sistemas de distribución relacionados con problemas estéticos es a menudo alto y puede cambiar con las estaciones²³.

3.3.1.2 Pérdida de la utilidad de organismos indicadores

Una extensa y totalmente desarrollada biopelícula puede comprometer la efectividad del método de coliformes totales como indicador de la calidad del agua potable de dos formas. Primero, un alto nivel de bacterias heterotróficas en una biopelícula, más una cantidad de sedimentos, pueden interferir con el análisis de coliformes totales. Esto ocurre cuando altos niveles de bacterias heterotróficas se desprenden de la biopelícula y entran en el flujo de agua, dando como resultado, que las muestras de agua recolectadas para el análisis de coliformes totales, contengan un gran número de bacterias que, por inhibición competitiva por nutrientes y producción de varias toxinas, puede prevenir el crecimiento, y de ese modo la detección, de los coliformes con al menos algo de normalidad utilizando medios analíticos. Como segundo, las condiciones que facilitan el crecimiento bacterial en las tuberías pueden resultar en un crecimiento de coliformes como parte de la biopelícula, las cuales pueden liberarse en el flujo de agua y resultar en muestras positivas de coliformes. Sin embargo, un resultado positivo de coliformes resultante de un crecimiento de coliformes en la biopelícula puede representar una deficiencia del sistema de distribución por causa de condiciones que permiten su proliferación en la biopelícula, y pueden también permitir el crecimiento de muchas otras bacterias incluyendo patógenos oportunistas. Además, una biopelícula con presencia de coliformes podría reflejar un alto grado de corrosión y deterioro de las tuberías del sistema, como también, problemas operacionales del sistema de distribución de agua²³.

3.3.1.3 Efectos sobre la salud

Pocos de los organismos que viven en las biopelículas de los sistemas de distribución representan un riesgo para los consumidores. Algunos problemas de salud se relacionan con las biopelículas de forma indirecta, la presencia de algunos organismos perjudiciales (patógenos oportunistas) que pueden sobrevivir al proceso de potabilización y alojarse en una biopelícula, tienen capacidad de causar enfermedades en individuos con bajo niveles de defensas.

Aunque las biopelículas pueden representar una gran concentración de material biológico (biomasa) en los sistemas de distribución, inspecciones de salud conducidas en sistemas con problemas de crecimiento de biopelícula no han revelado un incremento en enfermedades debidas a agua potable contaminada (Geldreich 1988)³⁰.

Bacterias patógenas responsables de enfermedades relacionadas con el agua incluyen a *Legionella*, *Salmonella typhi*, *Shigella*, y el *Vibrio cholerae*.

Mientras las biopelículas por si mismas no constituyen un serio riesgo a la salud, cuando están combinadas con una inadecuada cantidad o ausencia de desinfectante residual, pueden brindar la oportunidad para que bacterias oportunistas desarrollen un verdadero peligro para la salud.

3.3.2 Sobre los elementos del sistema de distribución

Otros efectos que trae una biopelícula dentro de un sistema de distribución de agua son: el poder reducir la capacidad hidráulica de las mismas, acelerar su corrosión y hacer más difícil el mantenimiento de una concentración residual de desinfectante.

Una capa de biopelícula, puede disminuir la capacidad hidráulica de una tubería, generando mayores pérdidas por fricción en el transporte del agua, lo que se traducirá, en una baja de la presión del sistema. Cuando se presenta en los filtros, puede generar un taponamiento y una pérdida de la efectividad en su función. Pero sin duda, el mayor problema que puede presentar una biopelícula, es el de estimular la corrosión de las tuberías de acero y hierro.

3.3.2.1 Corrosión

La presencia tanto de bacterias como de sus actividades metabólicas, sobre una superficie metálica puede causar una *corrosión influenciada microbiológicamente* (MIC, Microbiologically Influenced Corrosión), o biocorrosión¹⁶.

Dependiendo de la naturaleza y extensión de las biopelícula, esta puede ser perjudicial o benéfica para las tuberías de acero. Una capa de biopelícula puede servir como una barrera a la eliminación de productos de la oxidación en la superficie de la tubería, y así inhibir la corrosión. Esta barrera reducirá la turbulencia, retardará la penetración de oxígeno a la superficie de la tubería y, además, precipitará el hierro disuelto sobre la acumulación bacterial antes de que pueda entrar dentro del flujo de agua.

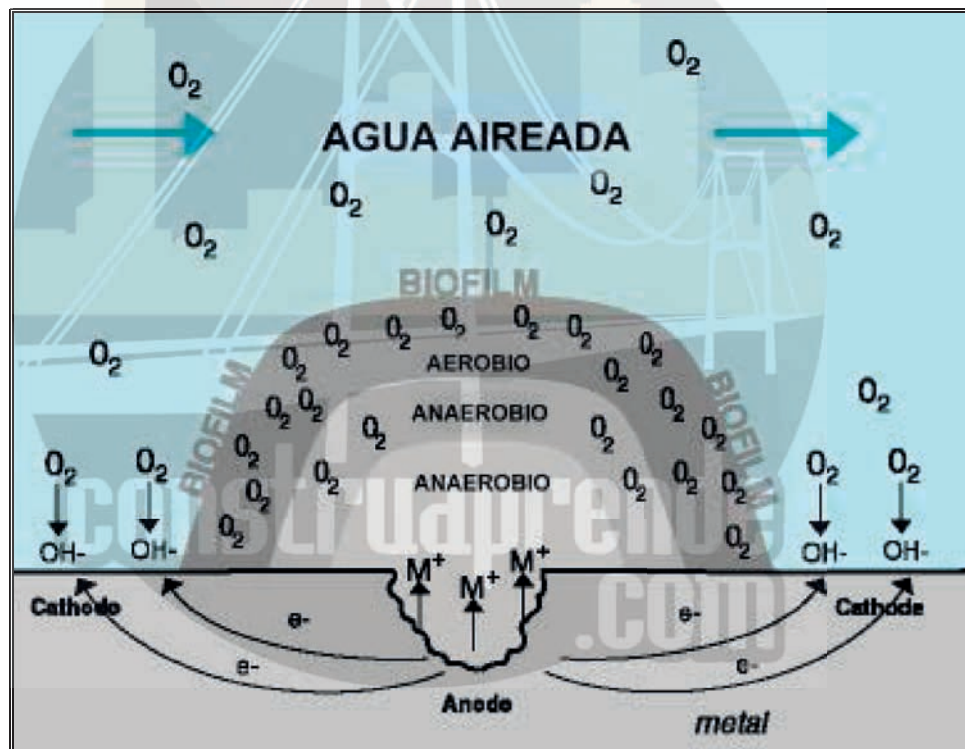
Contrariamente, un excesivo crecimiento de la biopelícula puede crear zonas puntuales de bajo pH en la superficie de la tubería por la generación de CO₂. Puede ser posible que exista un bajo pH debajo de la biopelícula, aún sí el pH del flujo de agua en muy alto³².

La eliminación del oxígeno en las superficies de las tuberías también provee una condición para que organismos anaerobios como las bacterias sulfato reductoras se desarrollen. Este grupo de bacterias es una de las más frecuentes causas de biocorrosión. Estas reducen el sulfato a sulfuro de hidrógeno el cual reacciona con los metales para producir sulfuros de metal como productos de la corrosión.

Cuando dentro de la biopelícula se forma una zona aerobia y otra anaerobia, la diferencia de concentraciones de oxígeno entre ambas zonas causa una diferencia en el potencial eléctrico y consecuentemente causa la corrosión.

La corrosión provee una superficie protectora a los microorganismos, bajos flujo de agua, y en los lugares donde se corroen las superficies de las tuberías de hierro, presenta zonas de turbulencia. En tuberías de hierro, reacciones electroquímicas en la superficie del tubo disuelven el metal en forma de pits, (liberación de iones ferrosos) en un lugar, mientras que otro punto del sistema se construye un tubérculo o nódulo (componente de hidróxido férrico). Los pits y nódulos formados pueden capturar y concentrar nutrientes y proveer a los organismos de una protección de la fuerza cortante del flujo³⁰.

FIGURA 3-2: Este esquema presenta el comienzo de una fisura debido al consumo de oxígeno debajo de una biopelícula. (Borenstein, 1994).¹⁶



Con el tiempo, el material de las tuberías se erosionará inevitablemente. La velocidad de este proceso es afectada por la composición del material, la corrosión del agua sobre la tubería, la actividad bacteriana en la biopelícula de la tubería, y otros factores (Geldreich, 1996)²³. La corrosión con el tiempo, se puede convertir en un problema lo suficiente serio como para restringir el paso del agua, producir problemas de olor y sabor, causar roturas en las tuberías, y acelerar el desarrollo de la biopelícula (Gerldreich, 1996)²³.

La corrosión puede ser causada por factores no biológicos como la rapidez del flujo del agua o procesos de oxidación química (Schock, 1999)²³. Sin embargo las bacterias en las biopelículas pueden también jugar un papel importante en la corrosión de las tuberías. Últimamente, la corrosión puede permitir goteras en las tuberías, creando una vía para que organismos patógenos entren en el agua potable. La biopelícula representa un complejo y dinámico ecosistema que influye en el proceso de corrosión. Los organismos más cercanamente identificados con la corrosión de tuberías son las bacterias de hierro como *Gallionella* y las bacterias de azufre.

La calidad estética del agua puede ser reducida por la liberación de partículas subproductos de la corrosión. La corrosión no necesariamente afecta la seguridad del agua potable directamente, ésta reducirá la vida útil de las tuberías, y en tuberías viejas, incrementará la probabilidad de goteras, fisuras y contaminación.

Donde las acumulaciones bacteriales son lo suficientemente significativas como para desarrollar una región anaerobia, las bacterias sulfato reductoras pueden reducir los sulfatos a sulfuro de hidrógeno. La actividad de estos organismos puede escapar inicialmente a la detección y aún ser altamente significativa en la destrucción del cloro residual y el deterioro de la calidad del agua³².

3.4 CÓMO RECONOCER LA PRESENCIA DE UNA BIOPELÍCULA

Algunos de los siguientes síntomas, indican que una posible biopelícula pueda estar desarrollándose dentro de las tuberías de un sistema de distribución de agua potable²⁷:

- ✓ Ausencia de desinfectante residual o dificultad de mantener una constante cantidad de éste.
- ✓ Presencia de un material viscoso, proveniente de los grifos o sobre las superficies de las tuberías.
- ✓ Una disminución en la velocidad del flujo.
- ✓ Presencia de color y olor a humedad o moho, en el agua.
- ✓ Presencia de crecimiento bacterial en los muestreos realizados, acompañados con presencia de bacterias coliformes u organismos patógenos.

En sistemas con problemas de biopelícula, el fenómeno de crecimiento bacterial se caracteriza principalmente por la constante ocurrencia de coliformes en el agua potable.

Algunas características de las poblaciones de bacterias encontradas en los sistemas de distribución son: la diversidad de las especies de bacterias encontradas en las muestras de agua, la persistencia de coliformes aún en presencia de una cantidad de desinfectante residual adecuada y una prolongada duración de la época de coliformes, pueden ser indicio del desarrollo de una biopelícula. Más aún, cuando se encuentran bacterias coliformes, sabiendo que se han llevado a cabo las operaciones y prácticas de mantenimiento (mantener

una presión positiva constante en el sistema de distribución; implementar un agresivo programa de control en las secciones de conexión y realizar un minucioso lavado de las tuberías “*flushing*”) después de procesos de reparación y nuevas construcciones, necesarios para mantener la calidad del sistema.

Geldreich (1988) notó que especies de coliformes como *Klebsiella* o *Enterobacter* normalmente predominan en sistemas de distribución con problemas de biopelícula. Lo que indica que si se encuentra una alta diversidad de especies coliformes en las muestras de agua, entonces una biopelícula está suministrando un ambiente favorable para el crecimiento bacterial³⁹.

Un crecimiento crónico de coliformes, como principal evidencia de la presencia de una biopelícula en los sistemas de distribución, se distingue principalmente al ser encontradas altas densidades de bacterias coliformes en las muestras de agua tomadas dentro del sistema de distribución, cuando en las corrientes de las plantas de potabilización, no se han detectado estos organismos a pesar de utilizar metodologías muy sensibles para lograrlo.

Cuando ocurre el crecimiento de coliformes, el incremento de los niveles bacteriales sucede de una forma esporádica en los diferentes tipos de tuberías, válvulas y accesorios en todo el sistema de distribución. A menudo, ningún parámetro de la calidad del agua (Conteo Heterotrófico de Placa, CPH; niveles de cloro; temperatura) indica algún deterioro de esta; solamente, el nivel de coliformes en las muestras de agua, presenta alguna diferencia con la norma de calidad del agua.

El monitoreo rutinario de los niveles de bacterias en el agua potable dentro de los sistemas de distribución es una parte esencial del control de calidad. La forma clásica de enumerar la bacteria en el agua es por medio de un *conteo de placa*, el cual es un cultivo de un volumen conocido de una muestra de agua sobre la superficie de un medio en el laboratorio y el conteo del número visible de colonias que se desarrollan después de un período de tiempo. Sin embargo, debe ser reconocido que los conteos de placa pueden sobreestimar el número total de bacterias presentes en el sistema de distribución.

El crecimiento de bacterias heterotróficas frecuentemente ocurre antes de que las bacterias coliformes sean detectadas en muestras de agua en los grifos de las viviendas. Aunque los niveles de conteo de placa de bacterias heterotróficas variarán en la mayoría de sistemas, niveles de más de 1,000 UFC/mL (Unidades Formadoras de Colonia por mililitro de agua), pueden indicar un problema de crecimiento de biopelícula en el sistema.

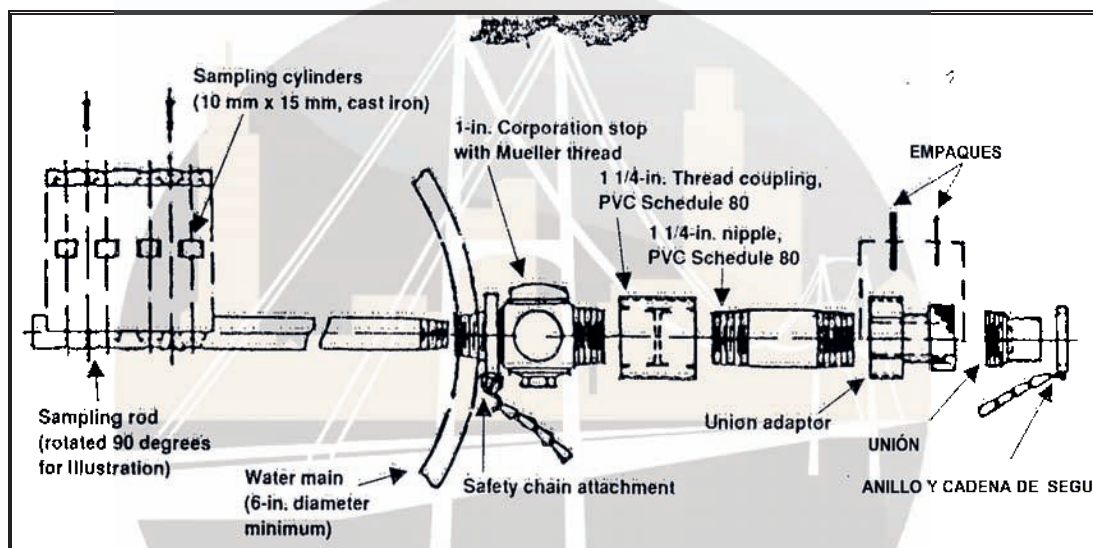
3.4.1 Exploración de la superficie de las tuberías

Un método directo para el análisis de una biopelícula es la exploración directa de la superficie de la tubería. Este método es complejo y deberá ser considerado en una investigación a largo plazo. Debido a que las bacterias coliformes se presentan en diferentes

y específicos lugares dentro de los sistemas de distribución, un análisis al azar de las superficies de las tuberías puede no detectar estos organismos³⁹.

Donlan y Pipes¹⁵, desarrollaron un dispositivo de muestreo (*Corporation Sampling Device*, figura 3-3) que puede ser usado para insertar partes de tuberías dentro del flujo presurizado de agua. Con este dispositivo, varios tipos de materiales pudieron ser insertados dentro de diferentes secciones del sistema de distribución para examinar los efectos de la velocidad del flujo, la temperatura del agua, y de la cantidad de desinfectante residual sobre el desarrollo de la biopelícula relativo al tipo de material de la tubería.

FIGURA 3-3: Detalle del dispositivo de muestreo desarrollado por Donlan y Pipes



En las figuras 3-4 a 3-6, se presenta algunas imágenes de tuberías extraídas de algunos sistemas de distribución, donde se puede apreciar claramente la presencia de la biopelícula en las superficies internas de estas.

Figura 3-4: Presencia de biopelícula en una tubería de hierro dúctil con recubrimiento de mortero de concreto.

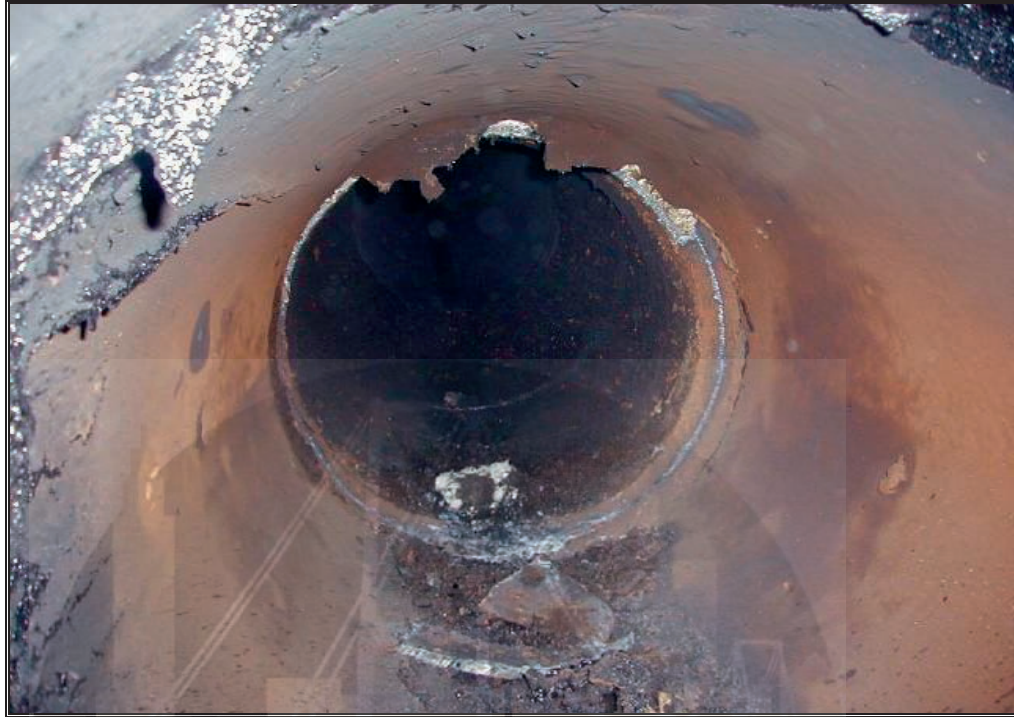


Figura 3-5: Capa de biopelícula de forma regular que se desarrolla en una tubería de concreto



Figura 3-6: Tubérculos productos de la biocorrosión, presentes en la superficie de una tubería de acero recubierto con mortero de concreto.



3.4.2 Medida de los niveles de nutrientes

El nivel de nutrientes del agua juega un papel muy importante en el crecimiento de las biopelículas. Las bacterias heterótrofas obtienen su energía y el carbono para su desarrollo, a partir de la materia orgánica biodegradable (MOB). La mayor parte de carbono y energía las aportan las moléculas de carbono disueltas (COD) en el agua de origen. Además de la fracción de MOB presente en el agua de origen, los procesos de ozonación o cloración, que someten al agua a un proceso de oxidación parcial de la materia orgánica, aumentan generalmente la cantidad de carbono orgánico biodegradable (COBD) del agua. Otros autores postulan la teoría de que el crecimiento bacteriano es debido a la liberación de carbono por parte de los materiales de las tuberías²⁷.

El carbón orgánico asimilable (COA) es la porción de COBD de un agua que puede ser convertida en masa celular, medido mediante el máximo crecimiento bacteriano (N_{max}) que una muestra de agua puede promover en condiciones normalizadas. La disminución de los niveles de COA es consistente con el crecimiento bacteriano dentro de los sistemas de distribución. La medición de los niveles de COA y de COBD en diferentes puntos del sistema de distribución puede ayudar a determinar la actividad de las biopelículas en las tuberías. Debido a la importancia del carbono disuelto en el agua, como posible fuente promotora de crecimiento bacteriano, diversos investigadores han propuesto diferentes métodos para medir la fracción de carbono que puede ser utilizado por las bacterias. Estos métodos se clasifican en dos grandes grupos:

- ✓ **Métodos de evaluación del CODB.** El principal objetivo es el medir la cantidad de carbono orgánico disuelto biodegradable (COBD) mediante la determinación de la disminución que experimenta el carbono orgánico disuelto (COD) debido a la actividad bacteriana

Los investigadores han optado por desarrollar métodos que permitan calcular la disminución experimentada por el carbono orgánico disuelto en una muestra de agua, tras inocularlo con una flora bacteriana autóctona y someterla a un proceso de incubación²⁷.

En 1987, Servais et al^{27,39}, desarrollaron un método en el cual se les permite a determinadas bacterias crecer por un determinado tiempo establecido en una muestra de agua, para luego ser removidas por filtración a través de un filtro de membrana prelavado de 0.22µm. Finalmente, se mide la cantidad de COD permanente en el agua filtrada y se obtiene la disminución de la cantidad de COD durante el proceso de incubación.

Joret et al, en 1986³⁹, desarrolló un método para medir la cantidad de carbono orgánico biodegradable usando biopelículas aireadas sobre partículas de arena.

En la tabla 3-2, se resumen algunas características de estos dos métodos.

TABLA 3-2: Métodos de medida del CODB basados en la determinación de la disminución del COD ²⁷

Método	Preparación Para La Muestra	Inóculo	Incubación Días	Temperatura °C	Parámetro Medido
Joret et al. 1986	Ninguna	Arena de filtro de planta de tratamiento sin precolación	11	≈20	COD
Servais et al. 1987	Esterilización por filtración	Agua de la muestra o de río	10 – 30	20±0.5	COD

- ✓ **Métodos de evaluación del COA.** Estos métodos se basan en el seguimiento de la evolución de la biomasa bacteriana de una muestra de agua previamente inoculada. El nivel máximo alcanzado por la biomasa bacteriana se transforma en unidades de carbono orgánico mediante un factor experimental que relaciona la biomasa bacteriana con el carbono asimilable presente en el agua. Se han propuesto varias metodologías para evaluar la cantidad de COA presente en una muestra de agua, la tabla 3-3 las resume.

TABLA 3-3: Métodos de obtención del COA con base en la medida de la biomasa celular

Método	Inóculo	Preparación muestra	Incubación Días	Temperatura °C	Calibración	Parámetro medido
Van der Kooij 1982	Cepas puras de P17 y NOX	Pasteurización	<20	15	Acetato sódico	UFC/ml
Kemmy et al 1989	<i>P. fluorescens</i> <i>Curtobacterium sp</i> <i>Corynebacterium sp</i>	Esterilización por filtración	6	20	Mezcla de compuestos orgánicos	UFC/ml
Rice et al 1989	<i>E. coli</i> <i>Enterobacter cloacae</i> <i>Klebsiella oxytoca</i>	Esterilización por filtración	5	20	Ninguna	UFC/ml
Werner 1985	Agua de una muestra	Esterilización por filtración	2.5 a 5	=20	Ninguna	Pendiente de la curva
Jago y Stanfield, 1984	Agua de río o de sistema de abastecimiento	Esterilización por filtración	Hasta alcanzar el máximo valor de ATP	20	Factor de conversión estándar asumido	ATP
Sevais et al 1987	Efluente de la planta	Esterilización por filtración	10 a 30	=20	ninguna	Celulas/ml y tamaño

Todos los métodos propuestos anteriormente, evidencian una gran dispersión en los procedimientos de trabajo, tales como el inóculo utilizado (entre 1 y 4 especies de bacterias conocidas normalizadas o un inóculo mixto de bacterias autóctonas), el tiempo de incubación de las muestras inoculadas y la forma de manipulación de las mismas, la forma y el instrumental de laboratorio utilizado, y el procedimiento de limpieza. Por todo lo anterior, ha sido muy difícil la normalización de los métodos, por lo que ninguno puede ser considerado apto para un uso sistemático en los sistemas de potabilización de agua. El método de van der Kooij ha sido propuesto como método de referencia en la última edición del *Standard Methods (1995)*.

3.4.3 Corrosión

Como se describió anteriormente, la acumulación de productos de la corrosión, puede suministrar un hábitat protector para el crecimiento de bacterias heterotróficas y coliformes. Sin embargo, si la presencia de bacterias coliformes se reduce en respuesta por mejorar los controles de la corrosión, las biopelículas pueden ser la fuente de la contaminación bacterial³⁹.

3.4.4 Análisis de la hidrodinámica del sistema

Si la hidrodinámica del sistema cambia, puede influenciar el transporte y la liberación de materiales en la interfase tubería-agua. La reducción del flujo puede crear zonas donde el agua se estanca y causar la pérdida de desinfectante residual, mientras que un incremento repentino del flujo puede incrementar el desprendimiento de parte de la biopelícula. Estos cambios en la dinámica del flujo dentro de los sistemas de distribución, pueden traer como resultado un incremento en los niveles de bacterias coliformes. Las zonas llamadas puntos muertos pueden mostrar un incremento en los niveles de coliformes debido a la pérdida de

desinfectante residual y a la presencia de bacterias desprendidas de las biopelículas presentes aguas arriba. Smit et al. (1989)³⁹ encontró los más altos niveles de bacterias coliformes en lugares del sistema de distribución con bajas velocidades de flujo.



CAPÍTULO 4

ESTRATEGIAS DE CONTROL DE LA BIOPELÍCULA

4.1 ALCANCE

Cuando dentro de los sistemas de distribución de agua potable, se detectan problemas relacionados con la presencia de biopelículas, se deberán tomar inmediatamente ciertas medidas para limitar los factores que favorecen el crecimiento bacteriano y por lo tanto controlar la presencia de éstas. Algunas de las medidas correctivas, hacen parte de los programas de mantenimiento de tuberías y de tanques de almacenamiento que se implementan en los sistemas de distribución, y cuyo objetivo es velar por la calidad del agua que se entrega a los consumidores. En este capítulo se describen los procedimientos que deberán ser llevados a cabo, para prevenir y controlar el crecimiento de biopelículas en los sistemas de distribución.

Las estrategias de control de la biopelícula, pueden ser tratamientos físicos y químicos. Químicos, como el uso de diferentes tipos de desinfectantes como el cloro, y físicos, por medio de la implementación de procesos de limpieza de tuberías como: *flushing*, *pigging*, y la utilización de dispositivos atados a cables.

4.2 PLAN DE CONTROL DE LA BIOPELÍCULA

Para llevar a cabo un plan de control de la biopelícula en los sistemas de distribución de agua potable, se deberán ejecutar algunas estrategias. El siguiente esquema, resume cuales pueden ser:

- Un completo programa de mantenimiento:
 - Procesos de *flushing*.
 - Dispositivos propulsados por fluidos (*pigging*).
 - Dispositivos propulsados por cables.
 - Reemplazo de tuberías.
- Un extensivo control de la corrosión:
 - Uso de inhibidores químicos.
 - Ajuste del pH.

- Utilizar prácticas de desinfección apropiadas:
 - Incrementar la cantidad de cloro residual libre.
 - Usar desinfectantes alternativos.
- Reducir los niveles de nutrientes, usando:
 - Filtros de carbón activado.
 - Filtros combinados de carbón / arena.

Conocidas las condiciones que permiten que las bacterias pasen dentro del sistema de distribución y los factores que favorecen el crecimiento bacterial, los encargados de la seguridad de los sistemas de distribución pueden desarrollar diferentes estrategias de monitoreo para identificar lugares donde se pueda presentar crecimiento de biopelículas, antes de que estas causen grandes problemas.

Un plan de control de biopelícula no es solamente un plan para dar solución a los posibles problemas encontrados, sino que también, se puede llevar a cabo como un programa de prevención de los mismos.

4.2.1 UN EXTENSIVO PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

Los programas de mantenimientos para los sistemas de distribución son esenciales para controlar y prevenir el crecimiento de biopelículas (tabla 4-1). Algunos procesos de mantenimiento son:

- ✓ Una rutinaria implementación del proceso de “*flushing*”.
- ✓ Dispositivos propulsados por fluidos: “*pigging*”.
- ✓ Dispositivos propulsados por cables: “*Cable Attached Devices*”.
- ✓ El reemplazo de tuberías.

TABLA 4-1: Procedimientos de limpieza de tuberías.

Flushing	Convencional
	Unidireccional
	Descarga Continua
Dispositivos atados a cables (Cable Attached Devices)	Drag Cleaning
Dispositivos propulsados por el agua (Fluid Propelled Devices)	Pigging

4.2.1.1 Implementación de un rutinario procedimiento de “*Flushing*”

El *flushing* es un componente primario del programa de mantenimiento de los sistemas de distribución. El *flushing* es un proceso en el cual el agua es transportada a través de la tubería a una alta velocidad, con el propósito de crear una acción de raspado, por fricción del agua con la superficie de la tubería. Luego el agua es descargada a través de un hidrante, por medio del cual se expulsa el material que se haya desprendido por acción del agua, dentro de la tubería. El material removido por este proceso es inofensivo y no requiere un tratamiento especial.

El proceso de *flushing* conlleva la apertura de hidrantes en un orden particular, para generar un flujo de agua mayor que el normal dentro del sistema (mayor presión). El incremento del flujo de agua aflojará los sedimentos acumulados en la parte superior de las tuberías, permitiendo ser extraído a través de los hidrantes. Éste es un método efectivo de eliminación de la suciedad del agua, localizada en los puntos muertos de los sistemas, como extremos de tuberías y tapones.

Dentro de un sistema de distribución se puede implementar el proceso de *flushing* para todo el sistema y el cual se denomina “*comprehensive flushing*”; o sólo para una parte aislada del sistema, caso en el cual se le denomina “*spot flushing*”²⁶.

Hay tres tipos de *flushing*: el unidireccional, el convencional y el de descarga continua. Cada uno tiene un uso específico y puede ayudar a lograr objetivos específicos sobre la calidad del agua.

- a. *Flushing unidireccional*: este procedimiento consiste en aislar una sección de tubería, típicamente comprendida entre válvulas cercanas, y la apertura de los hidrantes de una manera organizada y secuencial. Debe ser cuidadosamente ingeniado teniendo en consideración la cantidad de personal, la duración, la disponibilidad de equipo, y la localización de las fuentes de agua, como la planta de potabilización, tanques de almacenamiento, estaciones de bombeo, etc. Se puede implementar un proceso de *flushing unidireccional* tanto a todo el sistema (*Comprehensive Flushing*), como a parte de este (*Spot Flushing*). El término unidireccional es a menudo asociado con velocidades de 1.83 m/s (6ft/sg), las cuales se piensa son adecuadas para la remoción de la biopelícula, los productos de la corrosión y otras partículas adheridas a las superficies de las tuberías. Este método usa una velocidad de agua mayor con una menor cantidad de agua.
- b. *Flushing convencional*: es potencialmente el procedimiento de *flushing* más usado en los sistemas de distribución; consiste en la apertura de hidrantes en un área específica del sistema hasta que se obtenga los criterios de calidad del agua requeridos. Estos criterios pueden ser: detección del desinfectante residual, reducción/eliminación de color, reducción de turbiedad, etc. Este procedimiento necesita menor planeación que el procedimiento anterior. Además, es importante notar que el aislamiento de válvulas no es parte de este tipo de *flushing*.
- c. *Descarga continua*: para algunos sistemas de distribución que tienen numerosos puntos muertos y severos problemas de circulación, un procedimiento de descarga continua puede ser conducido para forzar un flujo de baja velocidad a través de una pequeña parte del sistema. El uso de este procedimiento puede ayudar a los sistemas a restaurar la cantidad de desinfectante residual y reducir el tiempo de residencia del agua. Este tipo de *flushing* requiere la utilización de una gran cantidad de agua.

El uso regular del proceso de *flushing* ayuda a distribuir el desinfectante residual a todas las partes del sistema y a limpiar por fricción las biopelículas presentes en las paredes de las tuberías.

FIGURA 4-1: Descarga del agua durante el proceso de “flushing”



El uso de técnicas de *flushing* es esencial para el mantenimiento de la calidad del agua y del sistema de distribución. La ventaja de este método es que no presenta una interrupción del suministro de agua. Sin embargo, se puede experimentar una leve disminución en la presión de servicio del sistema.

El *flushing* es una de las herramientas más efectivas disponibles para mantener y optimizar la calidad del agua en los sistemas de distribución. En la figura 4-1, se muestra el lugar de descarga del agua durante un proceso de *flushing*.

Limpieza con Chorros de Aire

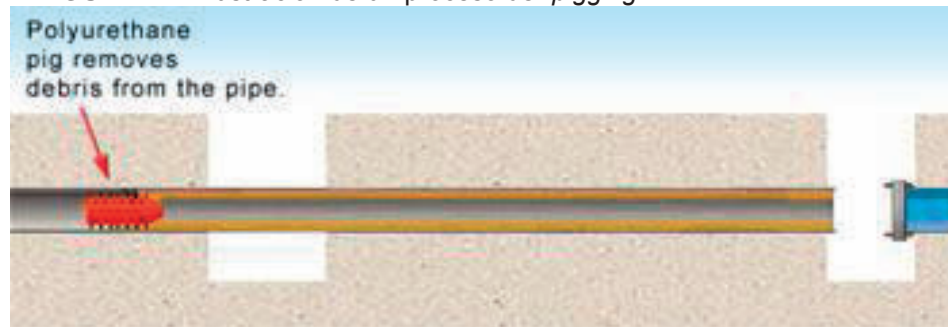
El procedimiento de *flushing* también puede realizarse con corrientes de aire comprimido dentro de la tubería de agua. El paso de las corrientes alternativas de aire y agua desalojarán el sedimento, el cual será expulsado dentro de una unidad de filtro en un hidrante de descarga. Este método requiere de un alto grado de planeación y obliga la interrupción del suministro de agua.

4.2.1.2 Dispositivos propulsados por fluidos: “Pigging”

Cuando se necesita de un procedimiento de limpieza más agresivo (por ejemplo, cuando la corrosión es severa o cuando las biopelículas son muy resistentes), pueden ser utilizados los dispositivos propulsados por fluidos o procesos de “*pigging*” (figura 4-2).

El *Pigging* es una técnica de limpieza de tuberías que usa piezas en forma de bala de poliuretano, para limpiar las tuberías de los sistemas de distribución. Los “*pigs*” (marranos) son propulsados por la presión del agua y mecánicamente despegan los sedimentos y el material adherido a las superficies interiores de las tuberías.

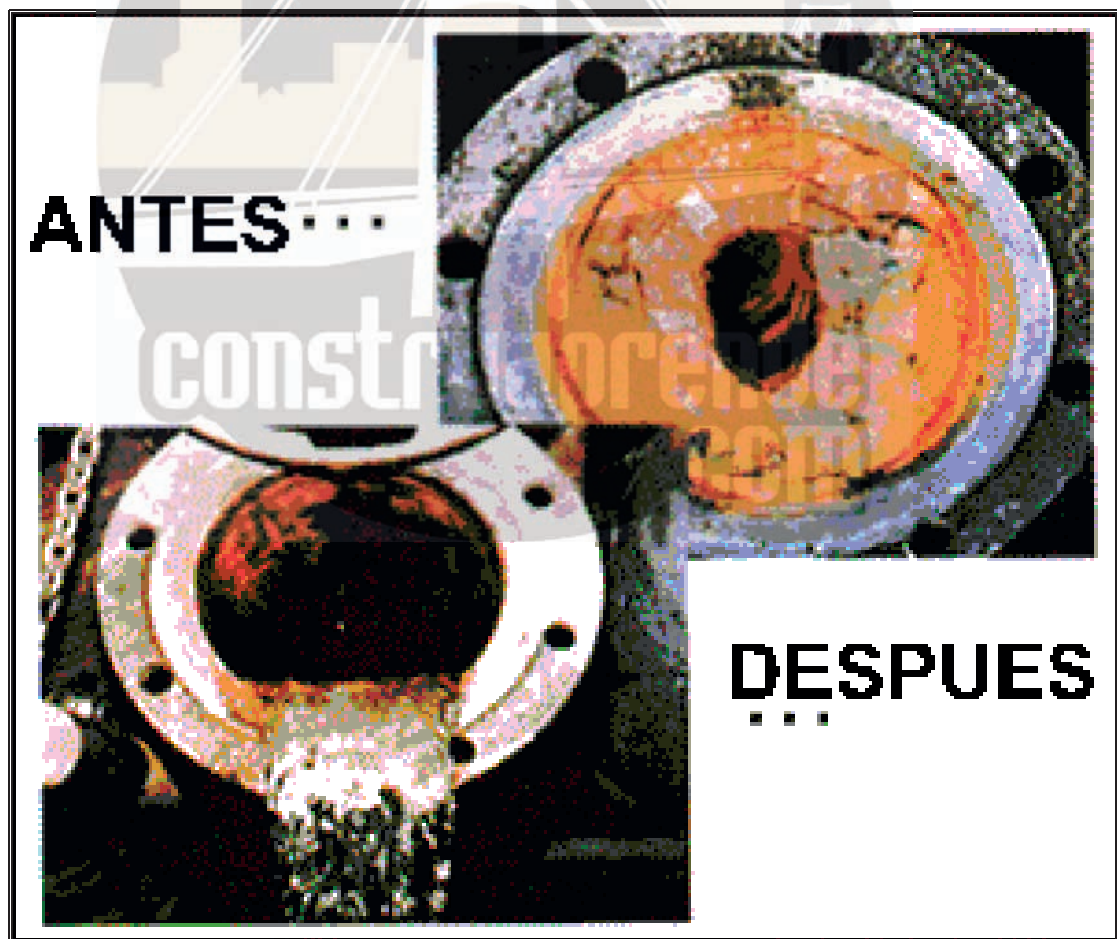
FIGURA 4-2: Ilustración de un proceso de “pigging”



Algunos de los beneficios del *pigging* incluyen:

- Agua segura y limpia para la comunidad.
- Mejora el flujo hidráulico.
- Prolonga la vida útil de las tuberías.
- Disminuye los costos de bombeo.
- Elimina la biopelícula de las tuberías (figura 4-3).

FIGURA 4-3: Fotografía de una tubería antes y después de un proceso de “pigging”



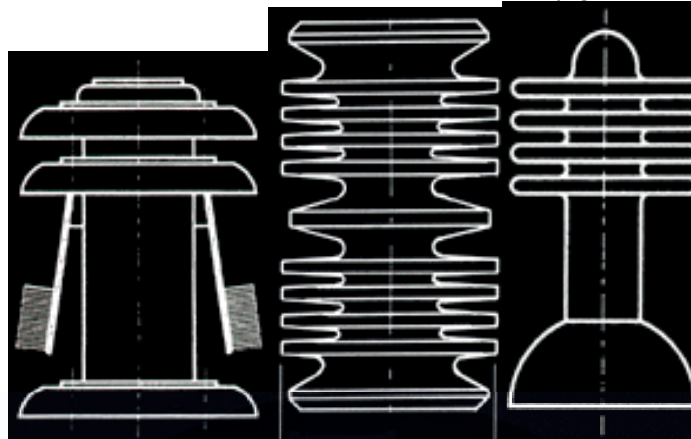
Esta técnica es originaria de las industrias petroleras donde los productos de desecho dentro de las tuberías tienen un alto valor. Las largas piezas que son propulsadas a una alta presión y velocidad a lo largo de las tuberías, hacen una especie de chirrido cuando están desplazándose, por lo cual se les denomina con el nombre de marranitas o “pigs”.

Los *pigs* están disponibles en varias densidades de espumas de poliuretano (duras y blandas)²⁶, y pueden viajar a través de codos, tees, válvulas, varios materiales de tuberías y tamaños. Comprendidos entre tamaños estándar de 2 a 48 pulgadas, los *pigs* pueden ser manufacturados en varias longitudes, diámetros, estilos y configuraciones según la aplicación que se les quiera dar. La longitud de los *pigs* es comúnmente dos veces el diámetro de la tubería. Estos dispositivos han sido usados en líneas de tuberías de 50mm hasta más de 1800mm de diámetro.

FIGURA 4-4: Diferentes formas de las marranitas “pigs”²²



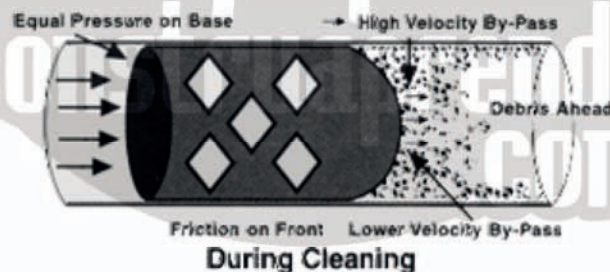
FIGURA 4-5: Diferentes formas de las marranitas “pigs”.



Un *pig* se define como “un dispositivo que se mueve a través del interior de una línea de tuberías con el propósito de limpiar, dimensionar o inspeccionar”. Esta definición cubre unos 500 diferentes diseños y tipos³¹. En las figuras 4-4 y 4-5, se muestran algunos de ellos.

La presión creada por el fluido sobre la parte posterior del *pig* lo comprime longitudinalmente. Esto incrementa el arrastre por fricción sobre las paredes de la tubería y la acción raspadora del *pig* (figura 4-6). Algunos fluidos pasan alrededor o a través del cuerpo espumoso creando una alta velocidad. Los sedimentos son atrapados en la parte delantera del *pig* y son arrastrados hacia fuera de la línea de tuberías.

FIGURA 4-6: *Pigs* durante la limpieza de una tubería.



Típicamente hay cuatro tipos de pigs: sencillos, cubiertos y dos tipos de pigs raspadores. El pig sencillo es el de menor densidad (entre 32 y 96kg/m³); es comúnmente usado para identificar la dirección del flujo y buscar dobleces, reducciones y obstrucciones desconocidas.

Un típico procedimiento de *Pigging* puede seguir los siguientes pasos:

1. Excavar los puntos de inicio y recuperación de los *pigs*.

Se identificarán los lugares donde se introducirá y se recuperará el *pig*. En la figuras 4-7, 4-8 y 4-9 se muestra la configuración típica de estos lugares y los accesorios utilizados.

FIGURA 4-7: Configuración típica del lugar de inicio donde se introducirán los “pigs”.

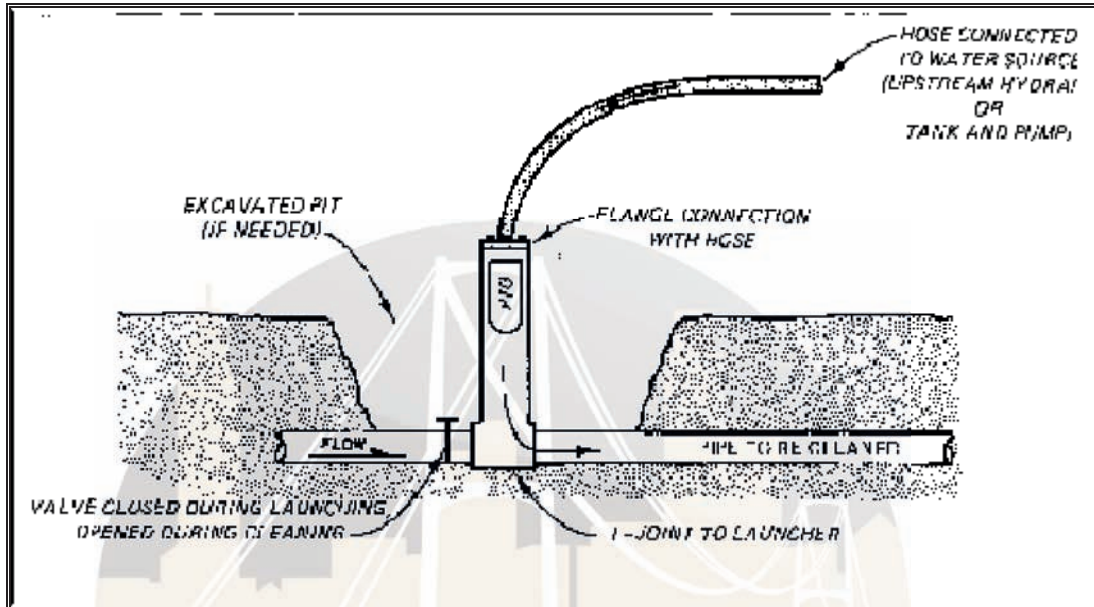


FIGURA 4-8: Configuración típica del lugar de recuperación de los “pigs”.

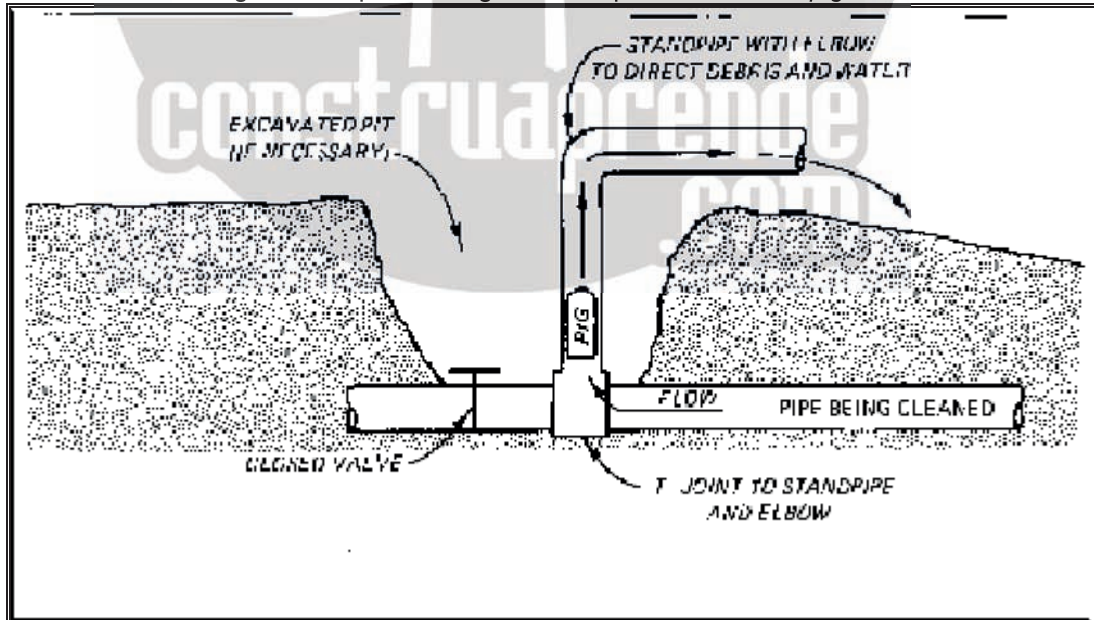
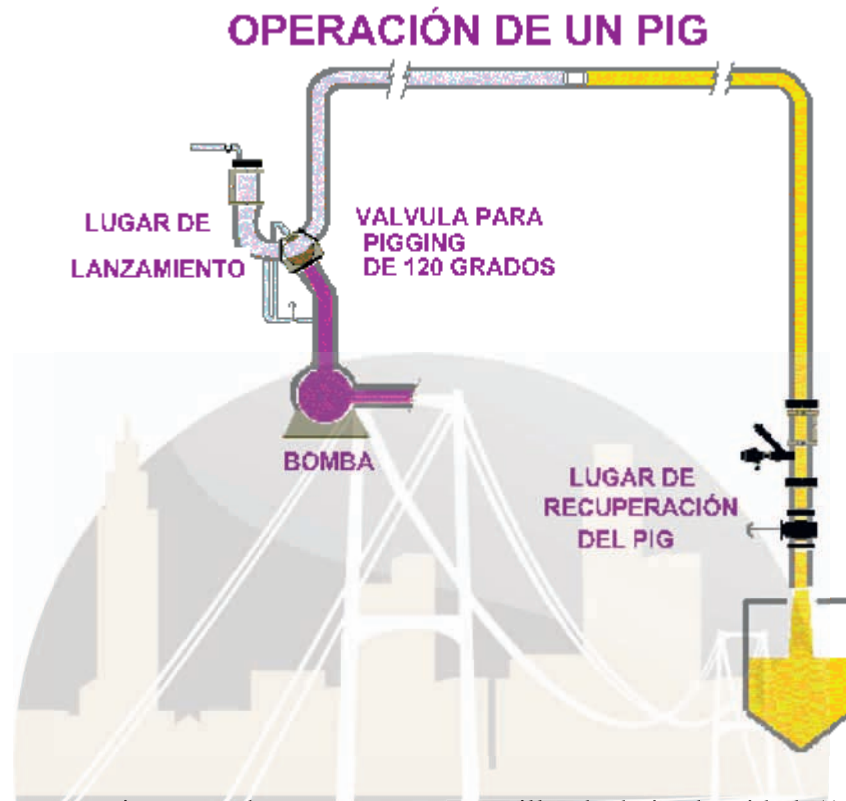


FIGURA 4-9: Esquema de una operación de *Pigging*.



2. Realizar un primer sondeo con un *pig* sencillo de baja densidad ($16-32 \text{ kg/m}^3$), llamado “*swab*”, con el objeto de determinar la dirección del flujo y buscar posibles obstrucciones que puedan causar problemas durante el recorrido de la limpieza.
3. Lanzar otro *pig* sencillo o uno cubierto para determinar el verdadero diámetro de la tubería. Medir el diámetro del *pig* luego de retirarlo para determinar el diámetro del *pig* limpiador inicial.
4. Lanzar el primer *pig* limpiador, que debería ser cubierto, con un diámetro igual al del diámetro final del *pig* utilizado en el anterior paso. Los fabricantes recomiendan repetir este proceso hasta que el *pig* sea descargado en una condición que permita su uso nuevamente (que no esté muy dañado por el proceso). Para una máxima limpieza, mantener la velocidad del *pig* entre 2 y 5 pies por segundo.
5. En tuberías con un fuerte contenido de biomasa (biopelícula), los dos o tres últimos ciclos del proceso pueden ser realizados con *pigs* raspadores, para permitir la completa evacuación de la misma. Estos *pigs* están recubiertos con fibras de alambre entrecruzados, que generan la acción de raspado sobre la superficie de las tuberías.
6. Introducir un *pig* sencillo para evacuar cualquier material que permanezca dentro de la tubería.
7. Desinfectar el sistema después de que la operación de *pigging* sea completada.

Al igual que con el sistema de *flushing*, se deberá informar a los usuarios de la implementación del método, debido a los posibles cambios en el color del agua que se puedan presentar.

La cantidad de personal necesaria para llevar a cabo un procedimiento de *pigging*, son dos trabajadores en el punto inicial, uno para operar las válvulas, otro trabajador en el punto donde se recogerán los *pigs*, y un supervisor, quien supervisará el proceso.

4.2.1.3 Dispositivos atados a cables: “*Cable Attached Devices*”

En algunos sistemas de distribución se pueden emplear algunos dispositivos atados a cables para realizar los procesos de limpieza de las tuberías. El “*drag scraping*” es un método que utiliza un “*scraper*” (raspador de hoja metálicos, *spring steel scraper blades*, figura 4-10) atado a cables de acero para realizar esta función. Una vez el cable este listo dentro de la tubería, los *scrapers* son adheridos y repetidamente son halados hacia a delante y hacia atrás hasta que los sedimentos estén completamente removidos de la superficie de la tubería.

Este proceso se puede usar en tuberías con diámetros de 75 a 1050mm, aunque es raramente usado en tuberías con diámetros mayores que 450mm.

En la figura 4-11, se presenta un dispositivo llamado *plunger*, el cual es utilizado como un lavado preliminar a un proceso de *pigging*.

FIGURA 4-10: *Scraper* de diámetro pequeño

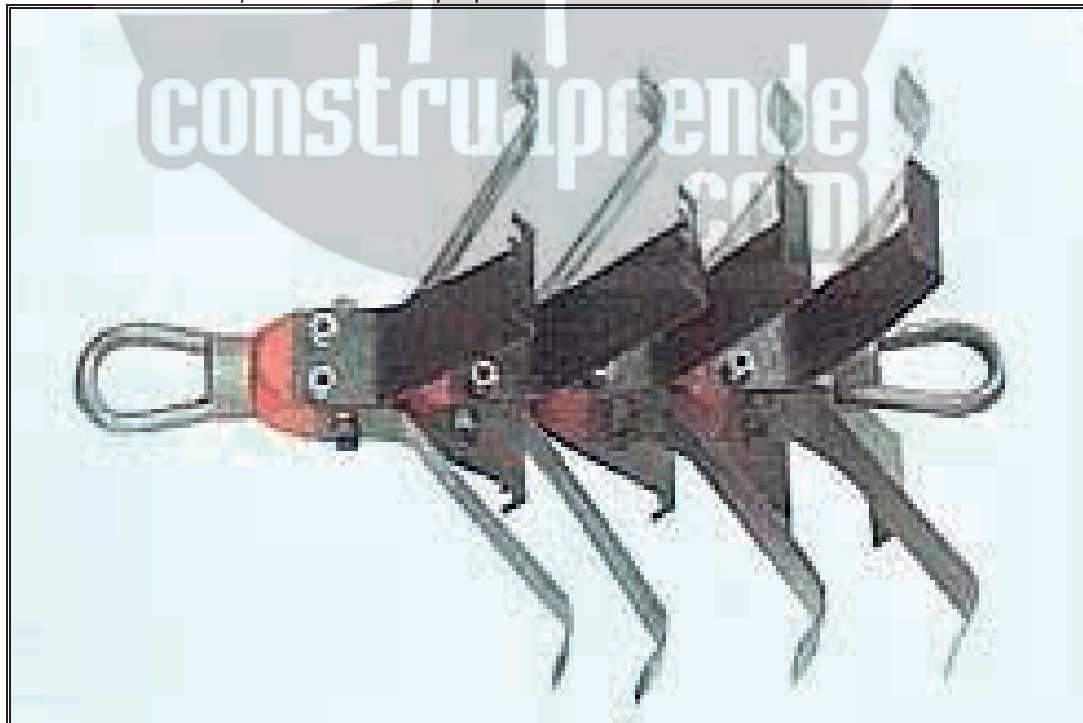
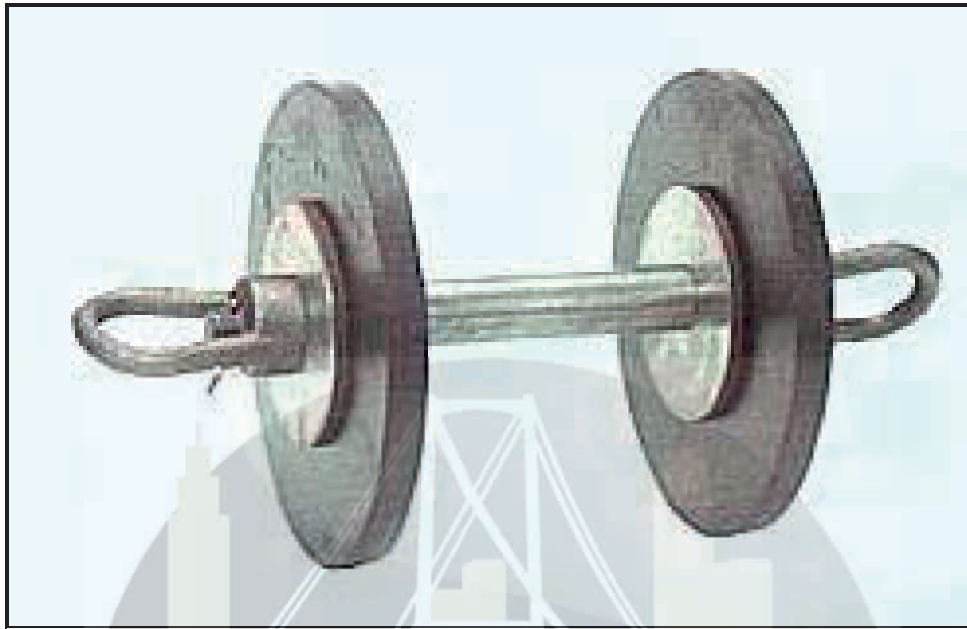


FIGURA 4-11: Dispositivo atado a cables llamado *Plunger*.



4.2.1.4 Reemplazo de tuberías

En algunos casos puede ser más económico el reemplazar las tuberías o rehabilitar secciones de tuberías, que continuar aplicando más soluciones temporales como los procesos de *flushing* y *pigging*.

Cuando nuevas partes son adicionadas o usadas para reemplazar secciones viejas del sistema de distribución, los siguientes procedimientos deberán ser seguidos, según la norma AWWA (1986)³⁹:

- ✓ Elegir materiales no porosos para las uniones de las tuberías (por ejemplo, plástico, papel tratado o caucho) y usar lubricantes no nutritivos para los sellos. Los microorganismos pueden colonizar los materiales de las uniones, obteniendo los nutrientes necesarios de los lubricantes utilizados en los sellos.
- ✓ Mantener las secciones de tuberías nuevas, accesorios y válvulas, cubiertas mientras están almacenados, y protegerlos contra una posible colonización por parte de animales.

Después de usar nuevos materiales, se deberá:

- ✓ Realizar un proceso de *flushing* a todas las tuberías, con agua limpia para remover partículas y suelo visible.
- ✓ Las tuberías llenas de agua contienen 50mg/L de cloro residual y se mantiene por 24 a 48 horas. Los niveles de cloro no deberán bajar menos de 25mg/L.
- ✓ Realizar pruebas de coliformes totales y bacterias heterotróficas. Repetir los procesos de desinfección hasta que no se detecten coliformes y los niveles de bacterias heterotróficas sean menores a 500/mL.

4.2.2 CONTROL DE LA CORROSIÓN

Limitar la corrosión de las tuberías de los sistemas de distribución, inherentemente limitará el crecimiento de la biopelícula, por la reducción de la cantidad de potenciales lugares disponibles para la adherencia de los microorganismos. La corrosión puede ser monitoreada directa o indirectamente.

La presencia de bacterias de hierro o sulfuro en las muestras de agua también pueden dar una indicación de que está ocurriendo un proceso de corrosión dentro del sistema.

Cuando la corrosión ocurre en la superficie de las tuberías e involucra reacciones químicas entre el material de tubería y el agua, métodos primarios para controlar la corrosión sirven para separar el agua y la tubería, o cambiar las características corrosivas de una u otra. Estos métodos incluyen:

- ✓ Modificar la calidad del agua (ejemplo, cambiar el pH y/o reducir el oxígeno contenido) para hacerla menos corrosiva.
- ✓ Proveer una barrera protectora entre el agua y la tubería, tales como un revestimiento resistente a la corrosión, recubrimientos o pinturas.
- ✓ Usar inhibidores de corrosión (como por ejemplo, silicato de sodio o inhibidores basados en fósforo) que forman una capa molecular sobre la superficie de la tubería, protegiéndola del agua.

Las medidas de un control de corrosión como el uso de inhibidores químicos o los ajustes al pH del agua, han estado mostrando un incremento en la efectividad del cloro residual para la desinfección de las biopelículas sobre tuberías de hierro (LeChevallier et al, 1990b)³⁹.

4.2.3 CONTROL DEL NIVEL DE NUTRIENTES

El control del nivel de nutrientes disponibles para el crecimiento bacteriano tiene la más directa influencia sobre el control de los problemas causados por las biopelículas en los sistemas de distribución de agua potable. Infortunadamente, es también uno de los procesos más difíciles.

Una vía para reducir el nivel de COA en el agua es a través del uso de filtros de carbón activado. El carbón activado granulado (GAC, *Granulated Activated carbón*) y el carbón activado pulverizado (PAC, *Powdered Activated carbón*) son partículas porosas que absorben y retienen los contaminantes orgánicos. Son comúnmente utilizados para remover contaminantes que causan problemas de olor y sabor en el agua potable. En el contexto del control de la biopelícula, estos son utilizados en la remoción de material orgánico disuelto en la fuente de agua, desalentando el crecimiento bacteriano.

Filtros combinados de GAC y arena pueden ser más efectivos para reducir los niveles de COA que aquellos hechos con arena solamente. Los filtros de GAC y arena, poseen una mejor remoción de la turbiedad, duran más, usan menos energía, muestran una mayor actividad biológica y son menos afectados por los cambios de la temperatura del agua³⁹.

Para poder controlar la cantidad de nutrientes en el agua, los métodos que actualmente se utilizan, tendrán que adoptar nuevas técnicas de monitoreo y tratamiento³⁹.

4.2.4 PRÁCTICAS DE DESINFECCIÓN ADECUADAS

Uno de los primeros pasos para controlar los problemas de crecimiento bacterial es el incrementar la cantidad de desinfectante residual. Sin embargo, el desinfectante escogido deberá ser evaluado cuidadosamente. Se requiere un desinfectante que sea capaz de penetrar en la biopelícula e inactivar los microorganismos adheridos. También deberá ser relativamente estable para que sea capaz de persistir en los sistemas de distribución, y además, tiene que ser potable y no producir subproductos perjudiciales.

En algunos casos se utilizan biocidas químicos, los cuales pueden ser divididos en dos grupos: los oxidantes y los no oxidantes.

Mittelman¹⁶ dice que la efectividad del biocida oxidante en sistemas de agua potable sobre una dosis básica igual a un miligramo por litro decrece en el siguiente orden:

Ozono → dióxido de cloro → cloro → yodo

4.2.4.1 Cloro

El cloro es probablemente el más efectivo y el menos costoso de todos los biocidas oxidantes o no oxidantes. La actividad del cloro en contra de las biopelículas es particularmente alta; no solamente bacterias planctónicas y las de la biopelícula son destruidas, sino que también reacciona con y destruye la matriz polimérica de la biopelícula deteriorando su adherencia a la superficie de la tubería. Debido a la destrucción de los polímeros extracelulares, el cloro rompe la integridad física de la biopelícula. Sin embargo, una biopelícula bien desarrollada, puede dificultar y reducir la penetración del cloro hacia sus capas interiores y por lo tanto actuar como una barrera protectora para los microorganismos que allí se encuentran.

Durante el tiempo que el agua permanece en la red, el cloro utilizado como desinfectante reacciona o se combina con la materia orgánica presente en el agua o adherida a la pared de la tubería, disminuyendo su concentración y limitando así el número de células sobre las cuales pueda actuar. En realidad, el cloro libre reacciona rápidamente con la materia orgánica, por lo que se consume antes de penetrar en la biopelícula.

Characklis (1990)¹⁶ recomienda el desarrollar un programa de potabilización con cloro, por medio de la toma de las siguientes medidas:

1. Incremento de la concentración de cloro en la interfase agua-biopelícula.
Como el cloro se difunde dentro de la biopelícula, este es usado para incrementar las reacciones con las bacterias. A bajos niveles de cloro, las bacterias de la biopelícula pueden producir material celular más rápido, que la difusión del cloro a través de estas, porque éstas están protegidas en el limo. Con un incremento de la concentración, el cloro se difundirá más adentro en la biopelícula. Cuando se comienza con la desinfección de la biopelícula, altas concentraciones de cloro para cortos tiempos de residencia son más efectivos, que bajas concentraciones para duraciones largas.
2. Incremento de la fuerza cortante del flujo en la interfase agua-biopelícula.
Un simultáneo saneamiento con cloro y procesos de *flushing* resultan en un alta demanda de cloro por la biopelícula y un gran desprendimiento debido al incremento de la transferencia de masa de cloro desde la masa de agua a la biopelícula.

La rotura de la biopelícula durante la exposición al cloro, expone nuevas superficies de biopelícula para el ataque del cloro. Por lo tanto se da un decrecimiento del espesor de la biopelícula
3. Uso de controles de pH.
Un alto pH favorece el desprendimiento de la biopelícula, y un bajo pH intensifica la desinfección ácida de hipo cloruros de películas delgadas. Characklis²¹ propuso que un interesante procedimiento sería una alternativa entre continuar la coloración a un pH de 6.5 y detenerse a un pH de 8.

La acción bactericida del cloro resulta de su fuerte poder oxidante en la estructura química de las células de las bacterias, destruyendo el proceso enzimático requerido para la vida. La cantidad de inactivación microbiana depende de la concentración en forma de cloro residual disponible, el pH, la temperatura del agua y del tiempo de contacto

La eficiencia desinfectante del cloro sobre los microorganismos fijados en una biopelícula depende de los siguientes factores:

1. La demanda de cloro del agua y de la biopelícula.
2. La cantidad de película biológica acumulada.
3. La concentración de cloro en la interfase agua-materia.
4. Del encapsulamiento de las células
5. Del tipo de superficie a la que está adherida la biopelícula
6. De la concentración de nutrientes presente.

Sin embargo, la dificultad para estimar dicha eficiencia reside en la imposibilidad de predecir exactamente los niveles de potabilización necesarios para eliminar o limitar la

acumulación de una película biológica responsable del deterioro de la calidad del agua, así como de aplicar el desinfectante más adecuado en razón del tipo y la edad de la biopelícula acumulada²⁷.

El dióxido de cloro tiene actividades desinfectantes similares a las del cloro. Pero debido a que es inestable, tiene que ser mezclado y preparado en sitio. Como el cloro, el dióxido de cloro es corrosivo para los metales y tiene que ser manipulado con cuidado.

4.2.4.2 Monocloraminas

Las monocloraminas son un desinfectante alternativo que se forma cuando se adiciona cloro a un agua con contenido de amonio. Estas tienen una alta efectividad (aproximadamente un 99.9% en reducción) a un alto nivel de dosis encontrada (1.5 mg/L) para 60 y 180 minutos de tiempo de exposición.

Las monocloraminas pueden ser un efectivo desinfectante para la inactivación de la bacteria *Legionella* cuando está presente en las biopelículas de los sistemas de distribución²⁸.

Estudios hechos por LeChevallier²⁸ en 1990, demostraron que las monocloraminas tienen una alta efectividad para inactivar los organismos que componen una biopelícula, especialmente a aquellos organismos adheridos en las superficies de las tuberías de hierro. En general, se encontró que la cantidad de monocloramina residual necesaria para inactivar las bacterias adheridas es de 2mg/L aproximadamente. Su eficiencia sólo se ve afectada por el tipo de superficie de las tuberías del sistema de distribución.

Las monocloraminas tienen una relativa ventaja sobre el cloro, cuando se usa como desinfectante: el uso de cloro puede aumentar los niveles de COT y de carbohidratos en el agua, por la liberación del material inactivado de la biopelícula dentro del flujo de agua; mientras que las monocloraminas son menos reactivas con el material capsular, lo que significa que este no se libera de la superficie de la tubería y por lo tanto no afecta estos factores.

4.2.4.3 Ozono

El ozono es un oxidante, y tiene aproximadamente el doble de poder que el cloro en iguales concentraciones. Como el dióxido de cloro, el ozono tiene que ser generado en sitio por su alta reactividad y su relativa inestabilidad.

Este es más rápido en su actuación, pero además es inodoro e insípido y no se le conocen derivados que puedan ser perjudiciales para la salud. Además, el ozono es el oxidante más potente que puede producirse industrialmente de forma económica. Pero la principal razón de su poco uso son los costos. Comparado con el cloro, resulta mucho más caro. Por ello es comprensible que su uso nunca se haya difundido, ya que la industria del agua siempre ha tratado de proveer agua potable al menor costo.

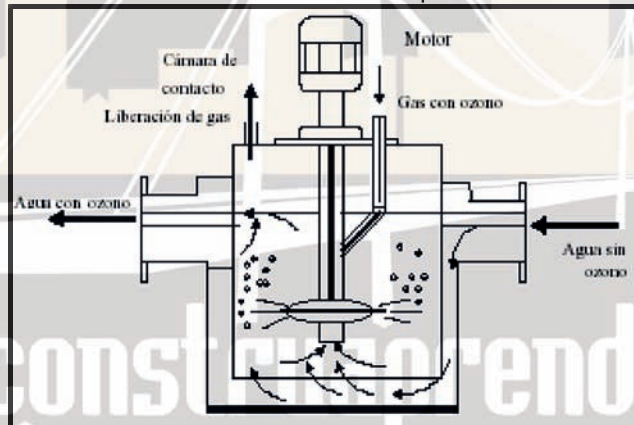
Durante años se han realizado numerosos trabajos para establecer el poder relativo del cloro y el ozono en la destrucción de bacterias y virus, llegando a la conclusión de que el ozono es, como desinfectante, mucho más eficaz y rápido que el cloro¹⁴.

El ozono destruye los virus y quistes, los hongos y las toxinas, y a elevadas concentraciones destruye algas y protozoos. El ozono es el desinfectante más rápido y efectivo que existe actuando, entre otras, sobre biopelículas que contienen bacterias de tipo⁴²:

- Escherichia Coli.
- Streptococcus Faecalis.
- Clostridium.
- Staphylococcus Aureus

Como vehículo portante se emplea aire con una concentración determinada de ozono que se hace borbotear directamente, o por medio de difusor para pequeños volúmenes de agua (figura 4-12); o se inyecta por medio de un eyector tipo venturi con características y tecnología propias.

FIGURA 4-12: Difusor de turbina para la mezcla de ozono¹⁴.



Las ventajas del ozono radican en su alta efectividad germicida, su habilidad para remover muchos problemas de color, olor y sabor, y en que su potencia no se ve alterada por los compuestos de amoníaco ni por el pH. Como ventaja y desventaja tiene que, como el oxígeno, es poco soluble en agua y debido a su inestabilidad no deja residual en ella, o sea que una vez descompuesto el único material residual es más oxígeno disuelto.

En general, la elección del desinfectante depende de los mecanismos de resistencia observados en las bacterias de las biopelículas; y la eficiencia de estos se ve afectada principalmente por el tipo de material que compone la tubería.

CAPÍTULO 5

ENCUESTA SOBRE LA BIOPELÍCULA

5.1. ALCANCE

El fenómeno de crecimiento bacteriano en las paredes de las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable, ha despertado un gran interés en los países desarrollados por parte de los ingenieros y profesionales encargados de esta labor. Los problemas causados por la biopelícula sobre la calidad del agua y sobre los elementos del sistema, han enfocado la atención de muchos investigadores en el mundo.

En contraste, en Latinoamérica el problema de crecimiento de biopelícula, no ha sido estudiado muy a fondo; son muy pocos los sistemas de distribución que han tenido en cuenta este fenómeno como posible generador de problemas. En este capítulo se presenta el formulario de encuesta desarrollado; una base de datos con los respectivos correos electrónicos de empresas operadoras de acueductos en Colombia y en algunos países de Latinoamérica, y el resultado y posterior análisis de las encuestas realizadas.

5.2. FORMULARIO DE ENCUESTA

El siguiente formulario de encuesta, se ha desarrollado con el fin de obtener información sobre la calidad del agua que distribuye cada sistema; se realizan algunas preguntas sobre procesos de mantenimiento de la calidad del agua del sistema y se indaga sobre los tipos de problemas que han tenido dentro del sistema, y si estos se relacionan con el fenómeno de biopelícula.

El objetivo principal con el desarrollo de esta encuesta, es el de determinar si las empresas prestadoras del servicio de agua potable, han identificado el problema de biopelícula dentro de sus sistemas; qué tanto conocen sobre el fenómeno y si se realiza algún proceso de control en los sistemas.

FORMULARIO DE ENCUESTA

NOMBRE DEL SISTEMA:

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA

a. TUBERÍAS

1. MATERIALES: Marque con una X los materiales utilizados en la siguiente lista:

Acero inoxidable	_____	Hierro forjado	_____
Acero galvanizado	_____	Cobre	_____
Asbesto	_____	Concreto	_____
Hierro dulce	_____	PVC	_____
Otros	_____		
Cuales?			

2. DIÁMETROS: Indique los valores de los diámetros:

Mínimo _____ mm (pulg.)

Máximo _____ mm (pulg.)

3. LONGITUD:

Longitud Total de redes _____ Km

b. TANQUES DE ALMACENAMIENTO

Cantidad
Capacidad Total _____ m³
Material _____

Tipos de tanques: Elevado _____
Superficial _____
Enterrado _____

c. POBLACIÓN QUE ABASTECE

Cantidad de Habitantes _____

d. FUENTE DE AGUA: Marque con una X las fuentes, en la siguiente lista:

Ríos	_____	Embalse artificiales	_____
Embalse Naturales	_____	Pozos	_____
Combinaciones	_____		
Cuales?			
Otros	_____		
Cuales?			

e. MÉTODOS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA

Marque con una X los procesos utilizados en la siguiente lista:

- | | | | |
|-------------------------|-------|--------------|-------|
| Floculación-Coagulación | _____ | Desinfección | _____ |
| Sedimentación | _____ | Osmosis | _____ |
| Filtración | _____ | | |
| Combinaciones | _____ | | |
| Cuales? | _____ | | |
| Otros | _____ | | |
| Cuales? | _____ | | |

f. CALIDAD PROMEDIO DEL AGUA A LA SALIDA DE LA PLANTA

Indique los valores en la columna de valor, y aclarar los ensayos no disponibles con ND.

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	VALOR
Turbiedad	UNT	
<i>Color</i>		
<i>Olor y sabor</i>		
<i>Sólidos totales</i>	mg/L	
<i>Acidez</i>	mg de CaCO ₃ /L	
<i>Alcalinidad</i>	mg de CaCO ₃ /L	
<i>pH</i>		
<i>Cloro residual</i>	mg/L	
<i>COT</i>	mg/L	
<i>DBO</i>	mg/L	
<i>DQO</i>	mg/L	
<i>Coliformes</i>	NMP/100 ml	

g. PROCESO DE DESINFECCIÓN

Indique con una X los tipos de desinfectante utilizado:

- | | | | |
|------------|-------|--------------------|-------|
| Cloro | _____ | Yodo | _____ |
| Cloraminas | _____ | Rayos ultravioleta | _____ |
| Ozono | _____ | Radiación Solar | _____ |
| Otros | _____ | | |
| Cuales? | _____ | | |

Cantidad de desinfectante _____ mg/L.

h. MUESTREO BACTERIOLÓGICO

1) Métodos utilizados en el análisis bacteriológico. Marque con una X en la siguiente lista los métodos utilizados:

- Método del Sustrato definido _____
- Método del filtro de membrana _____
- Método de los tubos múltiples de fermentación _____
- Método de recuento de placa _____
- Otros _____
- Cuales? _____

2) Se han detectado cambios en la calidad bacteriológica del agua, después de algún proceso de reparación o de incidente dentro del sistema?
R/.

3) Identifique los tipos de organismos que comúnmente encuentran en un análisis bacteriológico del agua en la siguiente lista:

- Bacterias heterótrofas _____
- Bacterias Coliformes _____
- Organismos mesófilos _____
- Otros? _____
- Cuales? _____
- Hongos _____
- Protozoos _____

i. INFORMACIÓN GENERAL

1) Han realizado procedimientos de lavado de tuberías? SI _____ NO _____
Cuales: Flushing _____
Dispositivos atados a cables _____
Dispositivos impulsados por el flujo _____
Otros? _____
Cuales? _____

Con qué frecuencia se realizan estos procedimientos?
R/.

2)Cuál es la velocidad promedio de flujo dentro del sistema?
R/.

3)Cuál es el tiempo de residencia promedio del agua dentro del sistema?
R/.

4) Tienen identificados los lugares denominados “colas de circuito, puntos muertos (dead ends) ó tapones” dentro del sistema?

Realizan algún mantenimiento especial en estas zonas?R/.

5) Realizan procesos de control de la corrosión interna, en tuberías metálicas?

SI _____ NO _____

Cuales: Ajuste del pH y la alcalinidad _____
 Utilización de inhibidores de la corrosión _____
 Adición de calcio _____

j. BIOPELÍCULA

1) Han realizado algún estudio o han determinado la presencia del fenómeno de biopelícula en el sistema de distribución?

SI _____

NO _____ (Si su respuesta es negativa continúe en la pregunta 10)

2) Qué tipo de estudio se realizó?

R/.

3) Cuáles fueron las razones más importantes para realizar este estudio?

R/.

4) Cuáles fueron los indicios más importantes y cuáles las metodologías empleadas para determinar la presencia de la biopelícula dentro de su sistema de distribución?

R/.

5) En qué lugares del sistema se presenta mayor presencia de biopelículas?

R/.

6) Qué tipos de microorganismos forman la biopelícula?

R/.

7) Han detectado la presencia de patógenos oportunistas dentro de la biopelícula?

R/.

8) Cuáles son las estrategias de control o de eliminación que han utilizado para contrarrestar el fenómeno?

R/.

9) Qué tipo de inconvenientes o problemas han experimentado por la presencia de la biopelícula? (corrosión, taponamiento de filtros, pérdida de capacidad hidráulica)

R/.

10) Tienen alguna información o conocimiento sobre el fenómeno de biopelícula en las redes de distribución de agua potable y sus posibles consecuencias? (el personal encargado del sistema de distribución conoce el fenómeno?)

R/.

11) Han reportado la presencia de turbiedad, color o sabor en el agua, después de realizar procesos de reparaciones?

R/.

12) Han reportado la presencia de partículas de turbiedad, color o sabor en el agua, durante cambios en el régimen hidráulico de flujo, dentro del sistema?

R/.

13) Qué tiempo se tarda el agua en aclararse después de realizar un proceso de lavado de tuberías?

R/.

14) Se realizan inspecciones de tuberías, han detectado la presencia de una capa de aspecto limoso en las paredes de las tuberías? Describa el aspecto y color de la tubería.

15) En algún momento se ha detectado la presencia de bacterias coliformes o de organismos patógenos (como *escherichia coli*) dentro del sistema de distribución?

R/.

16) Han detectado alguna disminución de la cantidad de desinfectante residual, desde la salida de la planta de tratamiento hasta los sitios de muestreo en la red?Cuál es su magnitud?

R/.

17) Han detectado la presencia de sedimentos dentro de las tuberías o tanques de almacenamiento? De que tipo?

R/.

18) Han tenido brotes de epidemias de infecciones relacionadas con el consumo de agua, dentro de la población que abastecen?

R/.

19) Por qué no han hecho estudios sobre biopelícula?

R/.

k. DESEA RECIBIR UNA COPIA MAGNÉTICA DEL TRABAJO FINAL?

Si. _____

No _____

Dirección electrónica de envió: _____

5.3. BASE DE DATOS

A continuación se presenta una base de datos, como resultado de una búsqueda intensiva por medio de Internet y con ayuda del directorio del sector de agua potable y saneamiento básico publicado en la revista ACODAL¹. En la tabla 5-1 se presentan las páginas web y/o correos electrónicos de empresas encargadas de la distribución de agua potable en Colombia y algunos países de Latinoamérica; a quienes se les hizo llegar el formulario de encuesta realizado.

TABLA 5-1: Base de datos de correos electrónicos de empresas operadoras de acueductos.

ORGANIZACIÓN	CIUDAD	PAÍS	EMAIL
SOCIEDAD COOPERATIVA POPULAR LIMITADA DE COMODORO RIVADAVIA	Comodoro Rivadavia	ARGENTINA	rrpp@scplcr.com
AZURIX BUENOS AIRES S.A.	Buenos Aires	ARGENTINA	lduarte@azurixbasa.com.ar
JVP CONSULTORES S.A.	Buenos Aires	ARGENTINA	jvp1@jvpconsultores.com.ar
HIDRA	Buenos Aires	ARGENTINA	hidra@speedy.com.ar
SOCIEDAD COOPERATIVA POPULAR LIMITADA DE COMODORO RIVADAVIA	Comodoro Rivadavia	ARGENTINA	gerencia@scplcr.com
AGUAS DE LA RIOJA S.A.	La Rioja	ARGENTINA	escribanos@aguasdela rioja.com.ar
CAPRIL S.A.	Puerto Rico	ARGENTINA	capril@prico.com.ar
SISTEMA DE REGULACIÓN SECTORIAL SUPERINTENDENCIA DE AGUAS (SIRESE)		BOLIVIA	supaguas@ceibo.entelnet.bo
SERVICIO LOCAL DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADO DE ORURO		BOLIVIA	ofsela@nogal.oru.entelnet.bo
ADMINISTRACIÓN AUTÓNOMA PARA OBRAS SANITARIAS DE POTOSÍ (AAPOS)		BOLIVIA	gtzphi@cedro.pts.entelnet.bo
ASOCIACIÓN NACIONAL DE EMPRESAS E INSTITUCIONES DE SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO ANESAPA		BOLIVIA	anesapab@ceibo.entelnet.bo
EMPRESAS DE SERVICIOS SANITARIOS DE ARAUCANFA S.A	Temuco	CHILE	servicioalcliente@essar.cl
EMPRESAS DE OBRAS SANITARIAS DE VALPARAISO S.A.	Valparaíso	CHILE	infoesval@esval.cl
EMPRESA DE SERVICIOS SANITARIOS DE BIO BIO ESSBIO	Concepción	CHILE	info@essbio.cl
SERVICIO DE AGUA POTABLE DE BARNECHEA	Barnechea	CHILE	info@edc-ven.com
EMPRESA DE SERVICIOS SANITARIOS DE LOS LAGOS S	Puerto Montt	CHILE	clientes.essal@essal.cl
EMPRESA DE SERVICIOS SANITARIOS DEL LIBERTADOR S.A.		CHILE	central@essel.cl

ORGANIZACIÓN	CIUDAD	PAÍS	EMAIL
EMPRESA DE SERVICIOS SANITARIOS DE TARAPACÁ S.A. ESSAT	Tarapacá	CHILE	atencion.clientes@essat.cl
EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS DE SIBATE	Sibate	COLOMBIA	sibateesp@hotmail.com
SEAQA	Tunja	COLOMBIA	seraga@col1.telecom.com.co
RUITOQUE E.S.P.		COLOMBIA	ruitesp@latino.net.co
EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE AGUACHICA	Aguachica	COLOMBIA	pelikan@col1.telecom.com.co
OPERADORES Y SERVICIOS DEL NORTE S.A	Malambo	COLOMBIA	opns@metrotel.net.co
METROAGUA DE SANTA MARTA	Santa Marta	COLOMBIA	metrosis@compunet.net.co
METROAGUA S.A.	Santa Marta	COLOMBIA	larboleda@aaa.com.co
CONCESIONARIA TIBITOC S.A.	Bogota	COLOMBIA	josevsanchez@yahoo.com
INGENIERIA TOTAL DE SERVICIOS PÚBLICOS S.A.	Segovia	COLOMBIA	itsegovia@edatel.net.co
INGENIERIA TOTAL DE SERVICIOS PÚBLICOS S.A.	Salgar	COLOMBIA	itsalgar@edatel.net.co
INGENIERIA TOTAL DE SERVICIOS PÚBLICOS S.A.	Jardín	COLOMBIA	itjardin@edatel.net.co
INGENIERIA TOTAL DE SERVICIOS PÚBLICOS S.A.	Ciudad Bolívar	COLOMBIA	itcbolivar@edatel.net.co
INGENIERIA TOTAL DE SERVICIOS PÚBLICOS S.A.	Andes	COLOMBIA	itandes@edatel.net.co
INGENIERIA TOTAL DE SERVICIOS PÚBLICOS S.A.	Medellín	COLOMBIA	ingetotal@epm.net.co
CORPACERO	Bogotá	COLOMBIA	info@corpacero.com
EMPRESAS PÚBLICAS DE ARMENIA EPA	Armenia	COLOMBIA	gerencia@epa.net.co
CONHYDRA S.A.	Medellín	COLOMBIA	gerencia@conhydra.com
SOCIEDAD DE ACUEDUCTO ALCANTARILLADO Y ASEO	Barranquilla	COLOMBIA	folmos@aaa.com.co
EMPRESAS PÚBLICAS DE FUSAGASUGA	Fusagasuga	COLOMBIA	espfsga@col1.telecom.com.co
ESAQUÍN S.A	Armenia	COLOMBIA	esaquin@netxos.com.co
EMTULUA ESP	Tulúa	COLOMBIA	emtulua@teletulua.com.co
EMPRESAS MUNICIPALES DE TULUÁ ESP	Tulúa	COLOMBIA	emtulua@teletulua.com.co
EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS-SOPO EMSERSOPÓ	Sopó	COLOMBIA	emsersopo@yahoo.com
EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS DE DOS QUEBRADAS	Dos Quebradas	COLOMBIA	emsdrg@col2.telecom.com.co
MUNICIPIO DE DOS QUEBRADAS, EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS	Dos Quebradas	COLOMBIA	emsdrg@col2.telecom.com.co
EMQUILICHAO E.S.P.	Emquilichao	COLOMBIA	emquilic@colombianet.net
ACUEDUCTO MUNICIPAL DE EL COLEGIO	El Colegio	COLOMBIA	empucol@tutopia.com
EMPRESAS PÚBLICAS DE PUERTO BOYACÁ	Puerto Boyacá	COLOMBIA	empoboyaca@telecom.col2.com.co
EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE VALLEDUPAR	Valledupar	COLOMBIA	emdupar@teleupar.net.co

ORGANIZACIÓN	CIUDAD	PAÍS	EMAIL
EMPRESAS MUNICIPALES DE CARTAGO EMCARTAGO S.A.	Cartago	COLOMBIA	emcartager@uniweb.net.co
EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE MADRID	Madrid	COLOMBIA	aaaam_madrid@sky.net.co
CONHYDRA S.A.	Río negro	COLOMBIA	cony_60@edatel.net.co
CONHYDRA S.A.	Turbo	COLOMBIA	cony_29@edatel.net.co
CONHYDRA S.A.	Puerto Berrío	COLOMBIA	cony_22@edatel.net.co
CONHYDRA S.A.	Marinilla	COLOMBIA	cony_21@epm.net.co
COMPAÑIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE SOGAMOSO	Sogamoso	COLOMBIA	compusog@col1.telecom.com.co
PUERTO COLOMBIA, SOCIEDAD DE ACUEDUCTO ALCANTARILLADO	Puerto Colombia	COLOMBIA	cgutier@aaa.com.co
OPERADORES DE SERVICIOS DE LA SIERRA S.A.	Ciénaga Magdalena	COLOMBIA	catv61@latinmail.com
UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL DE CONTROL DE SERVICIOS PÚBLICOS DE SAN ANDRÉS Y PROVIDENCIA	San Andrés	COLOMBIA	armadt@col1.telecom.com.co
AGUAS DE MANIZALES SA ESP	Manizales	COLOMBIA	aguasmzl@emtelsa.com.co
AGUAS DEL HUILA	Neiva	COLOMBIA	aguashuila@multiphone.net.co
AGUAS DE CAJICÁ S.A.	Cajicá	COLOMBIA	agcajica@latino.net.co
SOCIEDAD DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DEL VALLE DEL CAUCA		COLOMBIA	acuavalle@emcali.com.co
ACUASAN	San Gil	COLOMBIA	acuasan@multinet.com.co
ACUAGYR	Girardot	COLOMBIA	acuagyr@col1.telecom.com.co
ACUAGYR, AGUAS DE GIRARDOT, RICAURTE Y LA REGIÓN	Girardot	COLOMBIA	acuagyr@col1.telecom.com.co
ACUAVALLE	Cali	COLOMBIA	acuagerencia@col.net.co
INGENIERIA TOTAL	Andes	COLOMBIA	acardona@ingetotal.com.co
ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS SOSTENIBLES S.A.	Medellín	COLOMBIA	aassa_esp@epm.net.co
ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYAN	Popayán	COLOMBIA	aadepop@emtel.net.co
ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE POPAYAN S.A.	Popayán	COLOMBIA	aadepop@emtel.net.co
AGUAS DE CARTAGENA S.A	Cartagena	COLOMBIA	gerencia@acuacar.com
ENACAL EMPRESA NICARAGUENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS		NICARAGUA	gciagral@enacal.com.ni
SEDAPAL SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LIMA	Lima	PERU	sedanet@sedapal.com.pe
EPS SEDA JULIACA S.A. SERVICIO DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO JULIACA	San Román Juliaca	PERU	sedajuliaca@terra.com.pe

ORGANIZACIÓN	CIUDAD	PAÍS	EMAIL
SEDAPAR S.A. EMPRESA DE SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE AREQUIPA S.A.	Arequipa, Camaná,	PERU	planif@chasqui.lared.net.pe
EPS NOR PUNO S.A. EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO NOR PUNO S.A.	Azángaro, Huancané	PERU	norpuno@terra.com.pe
EPS SEDACUSCO S. A. ENTIDAD PRESTADORA DE SERVICIOS DEL CUSCO S.A.	El Cusco	PERU	gg@sedacusco.com.pe
EPS MOYOBAMBA S.R.L ENTIDAD PRESTADORA DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO DE MOYOBAMBA S.R. LTDA.	Provincias: Moyobamba	PERU	eps moyobamba@terra.com
EPS DE CAJAMARCA SEDACAJ		PERU	epscjgg@telematic.com.pe
EMPRESA PRESTADORA DE SERVICIO DE ABANCA		PERU	emusap@mail.cosapidata.com.pe
EMSA PUNO S.A. EMPRESA MUNICIPAL DE SANEAMIENTO BÁSICO DE PUNO S.A.	Puno, Chucuito, El Collao	PERU	emsapuno@terra.com.pe
EMAPAT S.R.LTDA. EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE TAMBOPATA S.R.LTDA.	Tambopata	PERU	emapat@terra.com.pe
EMAPA SAN MARTIN S.A. EMPRESA MUNICIPAL DE SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE SAN MARTÍN S.A.	San Martín, Lamas,	PERU	emapasm@terra.com.pe
EMAPA HUACHO S. A. EMPRESA DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LA PROVINCIA DE HUAURA	Huaura	PERU	emapahuacho@yahoo.com
EMAPA CAÑETE S.A. EMPRESA MUNICIPAL DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO CAÑETE S.A.	Cañete	PERU	emapac@terra.com.pe
EMAPA HUARAL S.A. EMPRESA MUNICIPAL DE LOS SERVICIOS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE HUARAL S.A.	Huaral	PERU	emapac@terra.com stochi@terra.com

5.4. RESULTADOS DE LA ENCUESTA

A continuación se presenta el análisis realizado con los resultados de la encuesta.

Desdichadamente, de los contactos realizados por medio de correo electrónico, no se recibió ninguna respuesta de la encuesta. Se realizó una participación en el foro de discusión de Heastad Methods (www.heastad.com), obteniendo una respuesta por parte de la empresa ENACAL, que es la encargada de operar los acueductos de Nicaragua, y refiriéndose específicamente al acueducto de Managua, capital de Nicaragua. Además, se realizó la encuesta con los operadores de acueductos con sede en la ciudad de Medellín que operan los sistemas del Valle del Aburrá y algunos municipios de Antioquia. Dichas empresas son:

CONHIDRA S.A.

Empresa que opera los acueductos en las siguientes cabeceras municipales del departamento de Antioquia: Turbo, Chigorodó, Mutatá, Santa Fe de Antioquia, Marinilla, Sonsón, Puerto Berrío, y el de la Vereda El Capiro en Río Negro.

INGENIERIA TOTAL SERVICIOS PÚBLICOS S.A.

Empresa encargada de operar 5 sistemas de acueducto en las siguientes cabeceras municipales del departamento de Antioquia: Salgar, Jardín, Andes, Segovia y Ciudad Bolívar.

ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS SOSTENIBLES S.A., AAS SA.

Empresa encargada de mantener y operar los sistemas de acueducto en las siguientes cabeceras municipales del departamento de Antioquia: Santa Rosa, San Pedro, Amalfi, Ituango, Anori, Armenia Mantequilla, Corregimiento de Bolombólo, Puerto Triunfo, Titiribí, Yali y San José de la Montaña.

EMPRESAS PÚBLICAS DE MEDELLÍN, EPM.

Empresa encargada de operar los sistemas de acueducto y alcantarillado del Valle del Aburrá, que cubre los municipios de Medellín, Itagüí, Envigado, Sabaneta, Bello, Copacabana, Caldas y Barbosa.

SISTEMAS PÚBLICOS S.A.

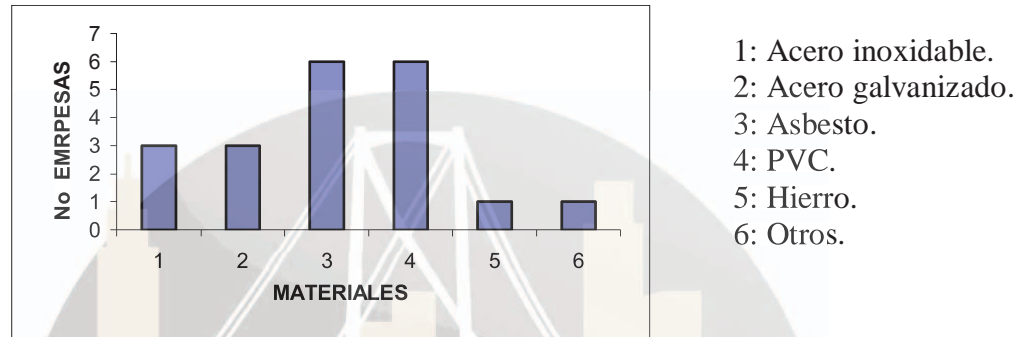
Empresa encargada de operar los sistemas de distribución que abastecen con agua potable de los municipios de Necoclí y San Pedro de Urabá en el departamento de Antioquia.

En cada empresa se realizó personalmente la encuesta, con su respectivo gerente o con una persona perteneciente al área técnica delegada por el gerente de cada empresa. El número de encuestas es 6, las cuales representan las condiciones de un total de 34 sistemas de acueducto en el departamento de Antioquia, más el aporte de la encuesta respondida por el acueducto de Managua en Nicaragua.

El análisis realizado con la información de dicha encuesta es el siguiente:

1. Los materiales más usados en los sistemas de acueducto son: acero inoxidable, asbesto y PVC; en todas las empresas encuestadas lo utilizan (figura 5-1). Únicamente, las Empresas Públicas de Medellín, reportó en la encuesta la utilización de otro tipo de material: tuberías construidas con acero revestido con mortero (ACCP), hierro dúctil (HD) y fibra de vidrio (GRP).

FIGURA 5-1: Materiales de tuberías en los sistemas de distribución.



2. En el 100% de los sistemas se transporta agua, que generalmente ha sido tratada por medio de los siguientes procesos: floculación-coagulación; sedimentación; filtración y desinfección con cloro, dependiendo de las condiciones específicas del agua de la fuente.
3. El cloro es el desinfectante utilizado en todos los sistemas
4. Todos los sistemas utilizan como método para el análisis bacteriológico de las muestras de agua el método de filtro de membrana.
5. Todos los sistemas reportan un aumento en la turbiedad del agua cuando se realizan procesos de reparación en el sistema.
6. Únicamente las Empresas Públicas de Medellín EEPPM y la empresa ENACAL que es la encargada de operar el acueducto de Managua, practican el método de *flushing*, como metodología de lavado de tuberías. Los otros operadores no realizan ninguna práctica de limpieza de tuberías.
7. Se encontró que en los sistemas se tienen identificados los puntos muertos, y realizan procesos de purga para mantener la calidad del agua en estos puntos.
8. En ningún sistema se realizan procesos de control de la corrosión para tuberías metálicas.

9. Cuando se realizan procesos de inspecciones de tuberías, los operarios coinciden en describir la presencia de una “capa limosa fina”, que en algunos casos es amarilla y en otros de color rojiza, en las paredes de las tuberías.
10. En todos los sistemas se ha reportado la presencia de bacterias coliformes en las muestras de agua y se han encontrado sedimentos acumulados en las zonas de menor velocidad de flujo.
11. Todos los sistemas (excepto EEPPM) atribuyen a la falta de información disponible en el medio, y al desconocimiento del fenómeno, el no realizar estudios sobre la biopelícula y sus problemas, en cada sistema de acueducto.
12. Únicamente, las Empresas Públicas de Medellín reporta en la encuesta conocimiento sobre el fenómeno y la presencia de biopelícula en sus tuberías. Además, se encuentra realizando un estudio sobre biopelícula para determinar su composición y las posibles consecuencias en sus sistemas. En contraste, ningún operador de las otras empresas encuestadas, afirma tener información sobre las características del fenómeno de biopelícula y sus problemas.

Estas son algunas de las conclusiones que se desarrollaron a partir del análisis de las encuestas:

- * El desinfectante que se usa en todas los sistemas de distribución es el cloro. En ningún caso se ha optado por utilizar un desinfectante diferente. En todos los casos, a pesar de utilizar la cantidad de cloro residual establecida por la Norma de calidad de agua potable en Colombia (entre 0.2 y 1 mg/L), se presenta una disminución de la cantidad de este a medida que el agua se mueve por los sistemas de tuberías, presentando una mayor pérdida de desinfectante residual, en las zonas llamadas puntos muertos o colas del circuito, que en todos los sistemas se encuentran bien identificadas.
- * En ningún momento se ha presentado alguna epidemia en la población consumidora, causada por el consumo de agua; a pesar de que se han detectado la presencia de organismos coliformes y organismos mesófilos, en las muestras de agua examinadas.
- * En ninguno de los sistemas de distribución, se realizan pruebas para determinar la presencia de COT presente en el agua. Lo que indica que no se tiene información de la cantidad de materia orgánica presente en el agua, que sirve como fuente nutriente a las bacterias, para desarrollar biopelículas.
- * En ninguno de los sistemas de operación encuestados, se realizan procesos de control de corrosión para las tuberías metálicas. De acuerdo con la encuesta realizada, se concluye que las empresas prestadoras del servicio de agua potable, tienen todos sus esfuerzos puestos en satisfacer la demanda de agua potable en una cantidad y calidad adecuada. Pero en ningún caso, tienen implementado algún plan de mantenimiento que controle la corrosión y la presencia de biopelículas en tuberías metálicas.

- * La mayoría del personal involucrado en la distribución de agua potable, reconoce la presencia de una capa limosa dentro de las tuberías; pero no le dan mayor importancia debido al desconocimiento del fenómeno y sus consecuencias.
- * En todos los sistemas de acueductos, que operan estas empresas, se realiza el método de purga de tuberías, como metodología de limpieza. En ningún sistema se implementa un correcto método de *flushing*, o se han realizado limpiezas de tuberías utilizando procedimientos de *pigging* o dispositivos atados a cables. Pocas empresas tienen la información sobre estas metodologías. El procedimiento más común que realizan es el de reemplazar las tuberías dañadas o agrietadas por tuberías nuevas, con la consiguiente purga del sistema.



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- ✓ El término biopelícula no es muy conocido por parte de las personas encargadas de operar los sistemas de acueducto que participaron de la encuesta. En la mayoría de los casos, se le distingue como la capa limosa encontrada en la superficie de las tuberías, pero no la relacionan con ningún problema en especial. Las biopelículas comúnmente existen en todos los sistemas de distribución de agua, y son reconocidas como una parte normal de estos y son responsables de muchos de los procesos que allí se generan. En nuestro medio no se tiene la suficiente información sobre su proceso de desarrollo, las condiciones que favorecen su crecimiento, la variedad de organismos que la pueden conformar y las posibles consecuencias que conllevaría su presencia sobre la calidad del agua potable y la infraestructura de los sistemas.
- ✓ La composición química de los materiales en contacto con el agua es un factor determinante del desarrollo de la biopelícula, pues los compuestos orgánicos liberados por dichos materiales favorecen el crecimiento de los microorganismos que la integran. Lo que lleva a afirmar, que deberán realizarse investigaciones por parte de las empresas constructoras de tuberías, sobre el potencial efecto que los materiales de éstas, puedan tener en la estimulación para el crecimiento de la biopelícula dentro de los sistemas de distribución.
- ✓ El material orgánico (nitrógeno y fósforo principalmente) presente en el agua, es el factor limitante del crecimiento de la biopelícula en superficies en contacto con el agua. Debido a la necesidad de este nutriente para el desarrollo de la biopelícula, se plantea un campo de acción, en el cual se desarrollen nuevas metodologías que evalúen más precisamente la cantidad de materia orgánica dentro de las muestras de agua y así, establecer procedimientos para eliminar esta materia orgánica del agua.
- ✓ Controlar el fenómeno de crecimiento bacterial dentro de los sistemas de distribución, controlar niveles de nutrientes, realizar metodologías de mantenimiento y lavado de tuberías, mantener la integridad de la infraestructura del sistema, permitirán en efecto, una limitación de otros problemas como: la corrosión biológica, desarrollo de macro invertebrados en números apreciables y la aparición de olores y sabores indeseables en

el agua, como también la presencia de organismos coliformes y patógenos en las muestras de agua.

- ✓ Para un mejor control de la presencia y crecimiento de patógenos dentro de las biopelículas de los sistemas de acueductos, se deberán desarrollar investigaciones que evalúen la efectividad de los indicadores de la presencia de biopelículas como: la pérdida de desinfectante residual, los niveles de COA y COT, la corrosión de tuberías y la presencia de olor y color en el agua.
- ✓ Lo que más se hace para controlar el crecimiento bacterial en los sistemas de distribución parece ser el incrementar la cantidad de cloro del agua, con una disminución pH de la misma. Sin embargo, existen otros tipos de desinfectantes que pueden llegar a tener un mejor efecto sobre la biopelícula. Por lo tanto se resalta la necesidad de realizar investigaciones con los diferentes tipos de desinfectantes como: el ozono y las monocloramias, que determinen cuales pueden ser las ventajas y desventajas que cada uno pueda tener, en las diferentes condiciones que presenta cada sistema de distribución individualmente, y llegar a determinar cual puede ser la dosis necesaria para tener una máxima efectividad en el control del crecimiento de la biopelícula, o desarrollar programas específicos de desinfección, basados en una alternancia de desinfectantes, que permita asegurar el control adecuado del crecimiento de la biopelícula.
- ✓ Según la encuesta, la principal preocupación que tienen la mayoría de empresas operadoras de los acueductos, es ampliar su cobertura y así satisfacer la necesidad de agua potable durante las veinticuatro horas del día, lo que le ha restado un poco de importancia a la implementación de diferentes tipos de procesos de mantenimiento como *flushing* y *pigging*, que además de mejorar y mantener la calidad del agua, controla la cantidad de biopelícula que se desarrolla en las superficies de las tuberías y minimiza los problemas que conlleva su presencia.
- ✓ Debido a la poca aplicación de los procesos de mantenimiento como *flushing* y *pigging* en el medio, se genera un campo de acción en donde los ingenieros deben intervenir, con el objeto adquirir un mayor conocimiento de estas técnicas, para poder llegar a aplicarlas en los sistemas de una forma técnica y económicamente viable, y así, controlar el crecimiento de biopelícula en las tuberías, preservar la integridad física de los acueductos y mantener un agua de mejor calidad.
- ✓ La biopelícula puede estimular la biocorrosión de las tuberías de hierro y acero, lo que genera la presencia de fisuras y/o grietas en las mismas. La mayoría de operadores de sistemas de distribución de agua, tienen como metodología el reemplazar las tuberías que presenten fisuras y/o grietas, con una consecuente purga del sistema para reestablecer las condiciones normales del sistema y además, no emplean ningún tipo de control de la corrosión.

- ✓ Últimamente, el fenómeno de biopelícula en sistemas de distribución de agua, ha tomado gran importancia, debido al potencial problema que pueda traer sobre la salud de los consumidores. Además de este trabajo, se están desarrollando otros trabajos por parte de la Universidad de Antioquia, la Universidad de los Andes en Bogotá, y la Universidad Nacional, que buscan resaltar la importancia de controlar el fenómeno y evitar sus posibles problemas. Por lo tanto, se hace un llamado a los operadores de acueductos del país, para que se enteren sobre el fenómeno, sus consecuencias y posibles efectos sobre la calidad del agua.
- ✓ Desafortunadamente, el censo realizado con los operadores de sistemas de distribución de agua potable en Suramérica (por vía e-mail), no fue respondido por ninguno de los contactos realizados. Únicamente se obtuvo respuesta a la encuesta, por parte de ENACAL, que es una empresa encargada de operar los sistemas de abastecimiento de agua y alcantarillado sanitario de toda Nicaragua. La encuesta se realizó tomando como referencia al acueducto de Managua, capital de Nicaragua. Lo que lleva a concluir, que no se tiene el conocimiento básico sobre el fenómeno y sus problemas, por parte de estas empresas en el continente. Lo que indica que este fenómeno no ha despertado el suficiente interés, para ser tratado o controlado en los sistemas de distribución de Latinoamérica. Se requiere el realizar más trabajos, enfocados a resaltar la importancia que tiene el controlar la presencia del fenómeno dentro de las tuberías de los acueductos y el desarrollar técnicas de control más efectivas, que conlleven a la distribución de un agua de mejor calidad y que preserve la integridad de los elementos físicos que componen los sistemas de distribución.
- ✓ Según la encuesta, en todos los sistemas de distribución se ha detectado la presencia de biopelícula indirecta o indirectamente. Sólo Empresas Públicas de Medellín tienen identificado el problema de biopelícula y actualmente está realizado un trabajo sobre este fenómeno. Los otros operadores reportan el crecimiento de una capa de aspecto limoso de color rojizo y amarillo en las paredes de las tuberías, pero en ningún caso habían relacionado esta película, con problemas de presencia de coliformes o de olores y sabores en el agua. Además, argumenta el desconocimiento sobre el fenómeno, a la escasa información disponible en el medio en español.
- ✓ La consecución y el mantenimiento de una adecuada calidad bacteriológica y organoléptica del agua requiere no sólo limitar la concentración de nutrientes en el agua, antes y después de la potabilización, sino también, efectuar un control de los materiales utilizados en las conducciones de agua, un riguroso mantenimiento de las instalaciones de distribución y un programa de desinfección adecuado.

6.2 RECOMENDACIONES

- ✓ La mejor forma de contrarrestar los problemas de biopelícula dentro de los sistemas de distribución es anticiparse a su ocurrencia. Conocer los factores que contribuyen al crecimiento de la biopelícula, permite al personal encargado del sistema de distribución, adoptar estrategias para limitar el crecimiento de la biopelícula dentro de las tuberías. Este trabajo fundamenta la necesidad de capacitar las personas que se encuentren a cargo de distribuir el agua potable, con la información básica para entender el desarrollo del fenómeno y sobre las posibles metodologías disponibles para controlar su presencia
- ✓ A pesar de que se conocen las fuentes potenciales de entrada de contaminación a los sistemas de distribución, se tiene una escasa certeza de cual de las rutas de acceso, que se han descrito en este trabajo, va a ser la responsable de la contaminación en un determinado sistema de distribución. Por lo que se recomienda el realizar un monitoreo constante de la integridad de los sistemas de distribución con el objetivo de detectar posibles fuentes de contaminación y minimizar el riesgo de una posible presencia de organismos creadores de biopelícula en el agua.
- ✓ Una vez se ha determinado que el problema de biopelícula dentro de un sistema de distribución se ha convertido en severo, los procesos de mantenimiento como *el flushing* y *pigging* que son efectivos procedimientos de prevención, no son suficientes para resolverlo. Por consiguiente, deberá desarrollarse un completo plan de control de biopelícula, que combine estos procedimientos con procesos de medición y control de nutrientes en el agua, la selección y el uso de un desinfectante eficiente. Los sistemas de distribución que posean buenos hábitos de mantenimiento como: mantener una cantidad adecuada de desinfectante residual, realizar procedimientos de *flushing* y *pigging* a las líneas de tuberías regularmente, tendrán menores riesgos de desarrollar problemas de biopelículas.
- ✓ Como resultado de la encuesta se puede decir que en los sistemas de distribución consultados para este trabajo (únicamente 2 empresas reportaron la implementación de *flushing* en sus sistemas, EEPPM y en el acueducto de Managua, Nicaragua), no realizan procesos de lavado de tuberías. Solo realizan una purga del sistema luego de procesos de reparaciones. Esta purga, que se realiza sin planeamiento, es simplemente la acción de cerrar y abrir algunas válvulas, para forzar al agua a salir del sistema. Los procesos de *flushing* son procedimientos más complejos que necesitan una planeación previa, en la cual se establecen los objetivos del procedimiento, se realizan las respectivas modelaciones del sistema para identificar las áreas a cubrir y las velocidades de flujo que se experimentarían en las tuberías. Por lo tanto es de vital importancia, que las personas encargadas de la operación y mantenimiento de los sistemas de distribución en Colombia, se interesen en adquirir el conocimiento necesario sobre los diferentes métodos de limpieza de tuberías, para poder implementarlo en las condiciones del medio y así, obtener una mejor operación y mantenimiento de las tuberías.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACODAL. Directorio sector de agua potable y saneamiento básico. 2002.N°195. ISN-0120-798
2. Aguamarket. Que es el agua?
www.aguamarket.com/temas_interes/025.asp#
3. Angel Grimalt. Biología: propiedades físicas y químicas del agua.
www.lafacu.com
4. APHA, AWWA. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. (1992), APHA, AWWA y WPCF, Washington, D.C. 17 Edición.
5. Are Our Pipes Safe?. Chlorine Chemistry Council.
www.c3.org-index.html
6. ARENDA, Horacio. FUDESA. Es el biofilm evitable o inevitable en el ámbito hospitalario?
www.drwebsa.com.ar/fudesa/info_16.htm
7. ARMAND, Maul; VAGOST, Danier y BLOCK, Jean Claude. Microbiological analysis in water distribution networks.
8. AVANTEL. Determinación de la turbidez.
www.avantel.net
9. AWWA (American Water Works Association) Research Foundation 1998. Pathogens in model distribution system biofilms. American Water Works Association, Denver, CO. ISBN 0-89967-932-X
10. BIOFILM
www.vernagene.com/biofilm.htm
11. CHARACKLIS, Willian G. y MARSHALL, Kevin C. Biofilms. 1990. Jhon Wiley & Sons, Inc., New York.

BIBLIOGRAFÍA

12. COSTERTON, J. Willian y STEWART, Philp S. Películas bacterianas. En: Investigación y ciencia. N° 300, septiembre 2001. p. 55-61.
13. COSTERTON, J. Willian y LEWENDOWSKI, Zbignieas. Microbial biofilms. Annual Review of Microbiology. 711 p. 1995
14. DEININGER, Rolf A. OZONO. Facultad de Salud Pública Universidad de Michigan Ann Arbor, Michigan, EUA.
15. DONLAN, Rodney MM.; y PIPES, Wesley O. Selected drinking water characteristics and attached microbial population density. Journal of American Works Water Association. Vol.80. N°11. Noviembre, 1998.
16. DREESZEN, P.H., Biofilms: Key to understanding and controlling bacterial growth in Automated Drinking Water Systems, Edstrom Industries Inc. Technical Report (January 1997)
www.edstrom.com
17. EFFECTS OF POLYURETHANE SPONGE CLEANING ON CARRYING CAPACITY OF POTABLE WATER MAINS. Department of the Army U.S. Army Center for Public Works. Boletín técnico No. 420-46-1. Mayo 1, 1996.
18. ELIA T., Ben-Ari. No just slime. En: BioScience, 1999. Vol 49. No. 9 pag. 689.
19. EM, Lars J. y SKJEVRAK, Ingun. Potential water quality deterioration of drinking water caused by leakage of organic compounds from materials in contact with the water.
20. Flemming, H. C; Percival, S. L; y Walker, J.T. Contamination potential of biofilms in water distribution systems. Water Science and Technology: - IWA Publishing.
21. GARCIA, Ramon. Pequeño Larousse ilustrado. Ediciones Larousse. 1993.
22. GIRARD INDUSTRIES. The art of pigging.
www.girardind.com-esp/girard.htm
23. Health Risks from Microbial Growth and Biofilms in Drinking Water Distribution Systems.
www.epa.gov/ogwdw000/tcr/pdf/biofilms.pdf
24. HERSON, Diane S.; MARSHALL, Dana R.; BAKER, Katherine H.; y VICTOREEN, Hugo T. Association of microorganisms with surfaces in distribution systems. Journal del AWWA (American Works Water Association). Vol.83. N°7. Julio, 1991.

BIBLIOGRAFÍA

25. HUNTER, Paul R.; COLFORD, Jack M.; LECHEVALLIER, Mark W.; BINDER, Sue y BERGER, Paul S. Waterborne Diseases. *Conference Panel Summaries*
26. KIRMEYER, Gregory J.; FRIEDMAN, Melinda. Guidance manual form maintaining distribution system water quality. AWWA Research Foundation. ISBN 1-58321-074-1
27. KNOBELSDORF, Juliana y MUJERIEGO, Rafael. Crecimiento bacteriano en las redes de distribución de agua potable: una revisión bibliográfica. En: Ingeniería del agua, Junio 1997. vol. 4 No.2, p. 17-28. ISBN 1134-2196
28. LeCHEVALLIER, Mark W.; LOWRY, Cheryl D.; y LEE, Ramon G. Disinfecting biofilm in a model distribution system. Journal of American Works Water Association. Vol.82. N°7. Julio, 1990.
29. LEGIS. Agua potable. Normas técnicas de calidad. Decreto 475 de 1998. Abril 15 de 1998. N° 1092 (1998)
30. MECKES, Marc. U.S. EPA. U.S. Environmental Protection Agency. 1992b. Capitulo 13: Biofilms in drinking water distribution system. EPA/600/R-01/110. Washington, DC. Diciembre 2001.
31. NB Momba, R Kfir, SN Venter y TE Cloete. An overview of biofilm formation in distribution systems and its impact on the deterioration of water quality. Water SA Vol. 26 No. 1 enero 2000. ISSN 0378-4738.
www.wrc.org.za
32. O'CONNOR, John T.; HASH, Les; y EDWARDS, Allan B. Deterioration of water quality in distributions systems. Journal of American Works Water Association. Vol.67. N°3. Marzo, 1975.
33. O'TOOLE, George; KAPLAN, Heidi B. y KOLTER, Roberto. Biofilm formation as microbial development. En: Annual. Review of Microbiology. 2000. Vol54. Pag. :49-79
34. PEREZ P., Jorge Alberto. Manual de potabilización del agua. 3 ed. Medellín: Facultad de Minas. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Nacional, 1997.
35. PELCZAR, Michael Jr.; REID, Roger D.; CHAN, E.C.S. Microbiología. 2° ed. México: McGraw Hill, 1991. ISBN 968-6046-65-8
36. ROMERO, Jairo Alberto. Acuiquímica. 1 ed. Santa fe de Bogotá: ECUDEO, 1996 295 p. ISBN 958-95742-5-4
37. STELL, Ernest W. y McGHEE, Terence J. Abastecimiento de agua y alcantarillado. 5 ed. Barcelona: Gustavo Gili S.A, 1981. 636 p. ISBN 84-252-0094-6.

BIBLIOGRAFÍA

38. U.S. EPA. U.S. Environmental Protection Agency. 1999. Characterizing the effect of chlorine and chloramines on the formation of biofilm in a simulated drinking water distribution system. EPA/600/R-01/024. Washington, DC.
39. U.S. EPA. U.S. Environmental Protection Agency. 1992b. Control of biofilm growth in drinking water distribution systems. EPA/625/R-92/001. Washington, DC.
40. VEHMAS, T Ali; TSITKO, I.; VUORIRANTA, P.; KOSTYAL, E.; AHLGREN, J. y SALONEN, M. Salkinoja. Identification and reduction of undesirable microbial growth in water distribution systems.
41. VENTOSA U., Antonio. Diversidad y actividad bacteriana en biofilms de los sistemas de distribución de agua potable. En: Correo tecnológico, Julio-Agosto 2001.
www.otri.us.es
42. VIRESI. El Ozono en el Tratamiento del Agua.
www.viresi.com-index.html



APÉNDICE A

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Ácaros:** Arácnido traqueal, microscópico. (puede transmitir al hombre, por picadura, el virus de ciertas enfermedades).
- **Ácido Nucleico:** Clase de moléculas compuestas de complejos nucleótidos unidos.
- **Agua Cruda:** Es aquella agua que no ha sido sometida a proceso de potabilización.
- **Agua Potable:** Es aquella que por reunir los requisitos organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a su salud
- **Agregación:** Acumulación de bacterias.
- **Amiba:** Ameba. Protozoo provisto de seudópodos que le sirven para moverse.
- **Aminoácido:** Sustancia orgánica que tiene una función básica y otra amina.
- **Análisis microbiológico del agua:** Son aquellas pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra para determinar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos.
- **Análisis organoléptico:** Se refiere a olor, sabor y percepción visual de sustancias y materiales flotantes y/o suspendidos en el agua.
- **Análisis físico-químico del agua:** Son aquellas pruebas de laboratorio que se efectúan a una muestra, para determinar sus características físicas, químicas o ambas.
- **Antibiótico:** Sustancia de origen microbiano que, en cantidades muy pequeñas, tiene actividad anti-microbiana.
- **Bacterias:** Nombre general dado a los microbios unicelulares de forma alargada (bacilos) o esférica (cocos).

- **Bacterias Coliformes:** Son un grupo de microorganismos, caracterizados por su forma de barra y la fermentación de lactosa. Estas bacterias son comúnmente encontradas en los intestinos de los mamíferos.
- **Bacterias Heterotróficas:** Bacterias que requieren de una fuente de energía como el carbón. La mayoría de bacterias patógenas son heterotróficas.
- **Biopelícula:** Superficie orgánica compuesta de microorganismos, productos microbianos y detritos, adheridos a una superficie en contacto con agua.
- **Calidad del agua:** Es el conjunto de características organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas propias del agua.
- **Carbón orgánico asimilable, COA:** Parte del carbón orgánico disuelto (COD) que es fácilmente usado por los microorganismos como fuente de carbón.
- **Carbón orgánico biodegradable, COBD:** Es la parte del carbón orgánico total disuelto (COT) que es fácilmente utilizada por los microorganismos. Sirve como fuente de alimento a las bacterias presentes en el agua y en las biopelículas en los sistemas de distribución, permitiendo su proliferación.
- **Carbón orgánico disuelto, COD:** La fracción del carbón orgánico total (COT) disuelto en una muestra de agua.
- **Carbón orgánico total, COT:** Es la cantidad total de componentes orgánicos, solubles e insolubles, presentes en el agua.
- **Coliformes Totales:** El grupo Coliforme es usado para determinar la eficiencia del tratamiento, la integridad de los sistemas de distribución de agua, y como indicio de una contaminación fecal.
- **Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA):** Es la encargada de señalar las políticas generales de administración y control de eficiencia de los servicios públicos domiciliarios.
- **Contaminación del agua:** Es la alteración de sus características organolépticas, físicas, químicas, radiactivas y microbiológicas, como resultado de las actividades humanas o procesos naturales, que producen o pueden producir rechazo, enfermedad o muerte al consumidor.
- **Conteo heterotrófico de placa:** Método para enumerar las bacterias heterotróficas de una muestra de agua.
- **Control de la calidad del agua potable:** Son los análisis organolépticos, físicos, químicos y microbiológicos realizados al agua en cualquier punto de la red de

distribución con el objeto de garantizar el cumplimiento de las disposiciones establecidas en la norma técnica de calidad del agua potable establecidas en cada país.

-
- **Demanda bioquímica de oxígeno, DBO:** Cantidad de oxígeno consumido en un proceso biológico que desintegra la materia orgánica en el agua; una medida de la cantidad de contaminación orgánica.
- **Desagregación:** Separar las partes de un todo.
- **Desinfectantes:** Agente que elimina la infección por matar a las células vegetativas de los microorganismos.
- **Detritus:** Residuo de la desagregación de un cuerpo.
- **Encapsulación:** Producción de una cápsula extracelular que da protección contra la desinfección cuando las células están creciendo en condiciones con bajo nivel de nutrientes.
- **Escherichia Coli, (E-coli):** Bacilo aerobio gram-negativo que no produce esporas. Es un organismo patógeno que reside en la materia fecal humana y puede causar enfermedades en los consumidores de agua contaminada con esta bacteria.
- **Estéril:** Que no tiene organismos vivos.
- **Fase Lag:** La longitud de tiempo desde la entrada de microorganismos al sistema hasta el comienzo de la división de células.
- **Filtro de membrana:** Filtro hecho de materiales poliméricos como celulosa o polietileno.
- **Glucoproteínas:** Las utilizan muchos microorganismos como fuente de energía.
- **Heterótrofo:** Microorganismo incapaz de usar dióxido de carbono como única fuente de carbono y que por lo tanto requiere uno o más compuestos orgánicos.
- **Hongos:** Organismos que carecen de clorofila y son de estructura filamentosa; mohos.
- **Índice Coliforme:** Es la cantidad estimada de microorganismos de grupo coliforme presente en 100 centímetros cúbicos de agua, cuyo resultado se expresa en términos de número más probable (NMP) por el método de los tubos múltiples y por el número de microorganismos en el método del filtro por membrana
- **Incubación:** Mantenimiento de cultivos de microorganismos en condiciones favorables de temperatura para su desarrollo.

- **Inhibición:** Prevención del desarrollo o multiplicación de microorganismos.
- **Inoculación:** Introducción artificial de microorganismos o sustancias en el cuerpo o en un medio de cultivo.
- **Inóculo:** El material que se inocula.
- **Levadura:** Hongo unicelular.
- **Lixiviación:** Disolver en agua una sustancia alcalina.
- **Mesófilo:** Bacteria que se desarrolla mejor entre 25 y 40 °C.
- **Microbio:** Organismo microscópico.
- **Micro colonias:** Colonias de bacterias microscópicas.
- **Moho:** Hongo característico por su estructura filamentosa.
- **Monosacárido:** Azúcar simple de cinco o seis carbonos.
- **Nemátodo:** Gusanos redondos, muchos de los cuales son patógenos para las plantas, algunos para los animales y otros son saprófitos.
- **Nitrificación:** Oxidación del nitrógeno por parte de los microorganismos para formar nitritos y nitratos.
- **NMP:** Número más probable. Expresión estadística de estimar el número de células en un cultivo.
- **Norma de calidad del agua potable:** Son los valores de referencia admisibles para algunas características presentes en el agua potable, que proporcionan una base para estimar su calidad.
- **Patógenos Oportunistas:** Microorganismos que pueden causar enfermedad.
- **Pits:** Liberación de iones ferrosos.
- **Polisacáridos:** Carbohidratos formados por la combinación de muchas moléculas de monosacáridos; ejemplo: almidón, celulosa.
- **Polución del agua:** Es la alteración de las características organolépticas, físicas, químicas o microbiológicas del agua como resultado de las actividades humanas o procesos naturales.

- **Protozoos:** Microorganismo eucariótico con afinidad animal.
- **Sistema de suministro de agua potable:** Es el conjunto de obras, equipos y materiales utilizados para la captación, aducción, conducción, potabilización, almacenamiento y distribución del agua potable para consumo humano.
- **Sustancias poliméricas extracelulares:** Material celular que segregan las bacterias y que forma la matriz que las fija a las superficies en contacto con el agua. Llamado *glycocalyx*.
- **Unidades Formadoras De Colonia, UFC:** Cuando en cualquier medio se cultivan bacterias, éstas se dividirán para formar una colonia. Estas colonias son contadas y este conteo determina el número de bacterias que se presentan en las muestra de agua.

