

Universidad de los Andes  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Civil y  
Ambiental

Centro de Investigaciones en  
Acueductos y Alcantarillados  
**CIACUA**



Universidad  
de los Andes

**PAVCO S.A.**  
*Una empresa AMANCO*



## **CÁTEDRA PAVCO**

**La Aireación en Sistemas de Alcantarillado: Parte  
Integral de los Futuros Sistemas de Tratamiento de  
las Aguas Residuales**

**Tesis desarrollada por: María Fernanda González Candia  
(Pregrado en Ingeniería Civil)**

**Bogotá, Mayo de 2004**

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	OBJETIVOS .....	3
2.1	Objetivo Principal.....	3
2.2	Objetivos Secundarios .....	3
3	ALCANTARILLADOS .....	4
3.1	Aguas Residuales .....	4
3.2	Función de los Alcantarillados .....	5
3.3	Procesos en los Alcantarillados.....	5
3.3.1	Condiciones Anaeróbicas .....	8
3.3.2	Condiciones Aeróbicas .....	10
3.3.3	Condiciones Anóxicas.....	11
3.3.4	Sedimentación .....	11
3.3.5	Biopelículas .....	12
3.4	Septicidad en los Alcantarillados .....	12
3.4.1	Consecuencias de la septicidad .....	13
3.4.2	Prevención de la septicidad .....	15
4	AIREACIÓN .....	17
4.1	Descripción del proceso de aireación .....	17
4.1.1	Tipos de aireadores en aguas residuales .....	18
4.2	Transferencia de Oxígeno .....	19
4.2.1	Transferencia de oxígeno en alcantarillados .....	19
5	MÉTODOS PARA AIREAR EL FLUJO EN ALCANTARILLADOS .....	24
5.1	Mangueras Perforadas: Método DRAUSY.....	24
5.1.1	Tratamiento de las aguas residuales en la tubería de alcantarillado .....	26
5.1.2	Aplicación del método DRAUSY en sistemas de alcantarillado local .....	27
5.1.3	Análisis de reducción de costos en el tratamiento haciendo uso de la manguera DRAUSY.....	28
5.2	Transferencia de oxígeno a través de pequeñas caídas.....	29
5.2.1	Mecanismos de transferencia de masa en estructuras de caída .....	30
5.2.2	Teoría de transferencia de masa GAS-LÍQUIDO .....	31
5.2.3	Factores que afectan la eficiencia de la aireación.....	33
5.2.4	Caídas libres .....	35
5.2.5	Vertederos de cresta delgada.....	37
5.3	Aireación por medio de Resaltos Hidráulicos.....	42
5.3.1	Resaltos hidráulicos en tuberías circulares.....	44
6	POSIBLES ESTRUCTURAS A IMPLEMENTAR EN LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO PARA AIREAR EL FLUJO .....	50
6.1	Ventajas y Desventajas de airear el flujo en alcantarillados.....	50
6.2	Estructuras a Implementar en los Alcantarillados .....	52
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	55

8	BIBLIOGRAFÍA .....	58
---	--------------------	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3-1	Subsistemas que componen el alcantarillado (Hvitved-Jacobsen, 2002)	6
Figura 3-2	Transferencia de masa entre los subsistemas que conforman el alcantarillado durante las transformaciones microbiológicas (Hvitved-Jacobsen, 2002)	7
Figura 3-3	Ciclo del azufre en un sistema de alcantarillado (Hvitved – Jacobsen, T., 2002)	9
Figura 4-1.	Balance de masa en un alcantarillado de gravedad	22
Figura 5-1	Cambio en el tamaño de los agujeros dependiendo de la presión aplicada (izq: no presurizada, der: presurizada) (Tjandraatmadja, G.F. 2002)	25
Figura 5-2	Mecanismos de transferencia de masa	31
Figura 5-3	Tipos de caída típicas en alcantarillados (Almeida, 1999)	36
Figura 5-4	Instalación típica de las estructuras hidráulicas (Almeida, 1999)	36
Figura 5-5	Secciones transversales de vertederos (Emiroglu, 2003)	39
	El flujo que está sobre el embalse, antes de desintegrarse en burbujas es considerado como flujo libre. En la Figura 5-6 se puede ver una representación del flujo cayendo sobre el vertedero y golpeando subsecuentemente en la superficie aguas abajo.	39
Figura 5-7	Napa libre sobre el vertedero	40
Figura 5-8	Mecanismos de entrada de aire: Chorro Uniforme (Emiroglu, 2003)	41
Figura 5-9	Mecanismos de entrada de aire: Chorro no uniforme (Emiroglu, 2003)	41
Figura 5-10	Mecanismos de entrada de aire: Chorro oscilatorio (Emiroglu, 2003)	42
Figura 5-11	Mecanismos de entrada de aire. Chorro desintegrado (Emiroglu, 2003)	42
Figura 5-12.	Esquema de Ecuación de Momentum	44
Figura 5-13	Resalto hidráulico en una tubería circular (Stahi y Hager, 1999)	45
Figura 5-14	Relación de la profundidad secuente $Y$ ( $F_1$ ) (Stahi y Hager, 1999)	46
Figura 5-15	Vista lateral de resaltos hidráulicos con números de Froude $F_1=1.1$ (a), 2.3 (b), 4.1 (c), y 6.5 (d). (Stahi y Hager, 1999)	47
Figura 5-16	Resaltos hidráulicos con números de Froude $F_1=2.3$ (a), 4.1 (b), y 6.5 (c)	48
Figura 6-1	Estructuras Hidráulicas tipo Backdrop	53
Figura 6-2	Mangueras Perforadas para airear el flujo	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Receptores de electrones correspondiente a la condición bajo la cual se desarrollan los procesos de un alcantarillado.....	5
Tabla 4-1 Ecuaciones para determinar el coeficiente de re-aireación (Jensen, 1995).....	20
Tabla 5-1. Características del sistema DRAUSY según tipo de agente (Tomado de: www.drausy.de) .....	25
Tabla 5-2 Comparación de costos, para impedir el desarrollo de H <sub>2</sub> S en un alcantarillado en Hamburg (24.650 m <sup>3</sup> /d) . Comparación entre tratamiento en un solo punto y tratamiento en línea. ( En EUROS). (Tomado de: www.drausy.de) .....	28
Tabla 6-1 Ventajas – Desventajas de condiciones aeróbicas y anaeróbicas en los sistemas de alcantarillado .....	51
Tabla 6-2 Ventajas – Desventajas de los diferentes métodos para airear el flujo en alcantarillados.....	51

# 1 INTRODUCCIÓN

---

El concepto de los sistemas de alcantarillado se basa en la recolección y conducción de las aguas residuales de una población para luego ser vertidas en sistemas de tratamiento donde se remueven las impurezas que las aguas llevan consigo.

A lo largo del tiempo, estos dos sistemas se han tratado de manera independiente sin tener en cuenta que ambos hacen parte de un sistema integrado y que los cambios que se generen en uno afectan al otro de manera directa. El diseño de cada uno de estos sistemas en la mayoría de países del mundo, ha sido desarrollado como entidades separadas, en donde el tratamiento y mejoramiento de las aguas residuales antes de ser vertidas a los ríos surge dentro de las plantas sin darle un mejoramiento previo dentro de las tuberías de alcantarillado.

La industria de las aguas residuales no es una industria que presente altos beneficios económicos, pues la infraestructura que se requiere para darle un tratamiento óptimo al agua y la infraestructura de los alcantarillados en sí, es muy costosa y requiere de inversiones grandes de capital financiero. Es por esto que resulta importante maximizar los beneficios mediante el alargamiento de la vida útil de las tuberías que conforman el sistema de alcantarillado y en los subsistemas que conforman las plantas de tratamiento. Por otro lado, la rehabilitación de tuberías en mal estado involucra procesos complicados que requieren de tiempo, espacio y capital financiero.

Durante la recolección y conducción de las aguas residuales dentro de los sistemas de alcantarillado surgen diferentes procesos químicos, físicos y biológicos que cambian la composición del agua y sus características físicas y químicas. Estos cambios afectan además la calidad del agua que entra a la planta aguas abajo y por tanto tiene gran impacto sobre la operación de los procesos de tratamiento requeridos, sobre los costos asociados a este y sobre la vida útil de los subsistemas que conforman la planta.

Las aguas residuales que componen los sistemas de alcantarillado se caracterizan por tener altos contenidos de sustancias perjudiciales para el mismo sistema y para la vida humana. Normalmente se constituyen por altos contenidos de H<sub>2</sub>S (ácido sulfhídrico) y bajo nivel de PH. El ácido sulfhídrico es el causante de la mayoría de los problemas que surgen dentro de los sistemas de alcantarillado, este causa condiciones de septicidad y a partir de ellas se desarrolla la corrosión en las tuberías e incluso en planta, y la toxicidad en el agua.

El  $H_2S$  se forma bajo condiciones anaeróbicas, en donde la cantidad de OD contenida en el agua se ve reducida durante el transporte del agua dentro de la tubería hasta que se genera total ausencia de este compuesto y por lo tanto se producen cambios en los mecanismos de descomposición.

Todos los problemas asociados a los cambios en la composición del agua residual durante su transporte, se pueden reducir si se impide la formación de  $H_2S$  mediante la adición de químicos, inyección de agentes oxidantes o diseños especiales en las tuberías para mejorar la aireación del agua, que a su vez mejora la calidad, y reduce costos de tratamiento y de construcción en las plantas de tratamiento.

El tratamiento en línea que se le puede dar a las aguas residuales desde las tuberías de alcantarillado, tiene grandes efectos positivos en las plantas a donde llegan las aguas. Si la calidad del agua mejora, se reduce la cantidad de materia orgánica y los procesos en los sistemas de tratamiento pueden ser simplificados, se pueden hacer reducciones de infraestructura y además se puede llegar a disminuir el tiempo de residencia del agua durante su tratamiento.

A pesar de las muchas ventajas que se generan al airear el flujo, en ocasiones generar condiciones aeróbicas se convierte en un problema; pues ante altos contenidos de oxígeno en el agua, se forman lodos de mayor tamaño y además se forma dióxido de carbono en la atmósfera del alcantarillado. Estos dos últimos pueden llegar a ser perjudiciales en el funcionamiento de los sistemas de recolección de las aguas residuales. Por esto, es importante generar en el agua, condiciones con niveles óptimos de oxígeno que garanticen la funcionalidad del sistema, mejora en la calidad del agua durante su transporte, y prevención en la formación de  $H_2S$  y exceso de dióxido de carbono.

## **2 OBJETIVOS**

---

### **2.1 Objetivo Principal**

Reunir y ordenar información mediante un estado del arte del conocimiento, referente a los diferentes métodos de aireación de flujo en alcantarillados que existen en el mundo entero con el fin de prevenir la septicidad.

Los métodos que se investigaron son: mangueras perforadas, que es un nuevo método estudiado en Alemania y que promete ser uno de los más eficientes y económicos del mercado; estructuras hidráulicas y resaltos hidráulicos dentro de los sistemas de alcantarillado, los cuales has sido probados y utilizados en diferentes partes del mundo arrojando resultados favorables en cuanto a la inyección de oxígeno al agua residual.

### **2.2 Objetivos Secundarios**

Determinar los parámetros más relevantes en la transferencia óptima de oxígeno en sistemas de alcantarillado. Con estos parámetros, estimar como varía la tasa de transferencia de oxígeno para proponer nuevas posibilidades de diseño en donde se pueda airear el flujo en el alcantarillado mediante la implementación de sistemas sencillos, eficientes y económicamente factibles.

Proponer un tratamiento en línea del agua residual, que garantice una mejora en la calidad del agua antes de ser vertida a las plantas de tratamiento. Esto, con el fin de obtener beneficios económicos en la construcción y operación de las plantas de tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Analizar la viabilidad de cada método, tanto a nivel hidráulico, como económico y ambiental. Destacar las ventajas y desventajas de cada método frente a los diferentes procesos que surgen en los sistemas de alcantarillado y según la tasa de transferencia de oxígeno que se puede obtener en cada uno de ellos.

Investigar sobre nuevas metodologías, tales como el método DRAUSY, donde se propone airear el flujo mediante el uso de mangueras perforadas dentro de los sistemas de alcantarillado.

Hacer un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de airear el flujo mediante los métodos descritos en el trabajo. Encontrar limitaciones y beneficios de las nuevas alternativas.

## 3 ALCANTARILLADOS

---

Los sistemas de alcantarillado son un conjunto de tuberías que recolectan y transportan el agua residual de las ciudades para luego verterlas en sistemas de tratamiento. En el siguiente capítulo se resume de manera clara y concisa como se conforman las aguas residuales, las principales funciones, procesos y problemas que se desarrollan dentro de los sistemas de alcantarillado.

### 3.1 Aguas Residuales

Las aguas residuales, son aquellas de composición variada que provienen de la descarga de usos municipales, industriales, de servicios, agrícolas, pecuarias y en general de cualquier otra fuente, así como la mezcla de ellas (SEMARNAP, 1997).

Las aguas residuales pueden ser originadas por<sup>1</sup>:

- **Deshechos humanos y animales:** Son las excreciones corporales que llegan a formar las aguas residuales, mediante el uso de sistemas hidráulicos sanitarios.
- **Deshechos industriales:** Son los productos originados en procesos industriales. Tienen diversos contenidos de sustancias químicas, las cuales alteran la calidad del agua y el funcionamiento de los alcantarillados.
- **Desperdicios caseros:** Son aquellos procedentes de las manipulaciones domésticas de lavado, baño, desperdicios de cocina y limpieza (detergentes y sustancias químicas).
- **Corrientes pluviales:** Gran cantidad de las corrientes pluviales lavan la superficie de la tierra y al escurrir arrastran consigo hojas, arena, polvo y otros residuos, los cuales en algunas ocasiones van a parar en los sistemas de alcantarillado.
- **Infiltraciones de aguas subterráneas:** En las tuberías de alcantarillado, existe siempre la posibilidad de infiltraciones subterráneas.

En términos generales, en las aguas residuales flotan cantidades variables de diferentes residuos tales como sustancias fecales, basura, residuos de alimentos, sustancias químicas, etc.

En cuanto a la composición biológica de las aguas residuales, que es la parte viva natural de la materia orgánica, contiene un gran número de organismos como

---

<sup>1</sup> Página de Internet: [www.tapic.org/chiapas/documentos/Franco.PDF](http://www.tapic.org/chiapas/documentos/Franco.PDF)



bacterias y otros microorganismos vivos más complejos, cuyas actividades causan los diferentes procesos que surgen dentro de los alcantarillados.

### 3.2 *Función de los Alcantarillados*

Los sistemas de alcantarillado son un conjunto de ductos y equipos por los cuales fluyen las aguas negras, el agua pluvial y otros desechos. Tienen como función la recolección y conducción de las aguas residuales de una población, así como su vertimiento de manera eficiente y adecuada en las plantas de tratamiento de agua residual (PTARs).

Para la recolección de las aguas residuales y pluviales se han dispuesto dos tipos de sistemas: sistema combinado y sistema separado.

Las redes combinadas se usan para recoger las aguas pluviales y las aguas residuales en una sola red de tuberías, mientras que en los sistemas separados existen dos tipos de redes de tubería, una para desalojar las aguas residuales y otra para desalojar las aguas pluviales.

### 3.3 *Procesos en los Alcantarillados*

Diversos procesos físicos, químicos y biológicos ocurren en los alcantarillados durante el transporte del agua, como consecuencia del desarrollo de condiciones anaeróbicas, aeróbicas y anóxicas dentro de las tuberías. Dependiendo de las condiciones bajo las cuales se desarrollan los procesos, los receptores de electrones.

En la Tabla 3-1 se puede ver los receptores de electrones correspondientes a las condiciones donde los microorganismos desarrollan los procesos de reducción – oxidación en las redes de alcantarillado.

Condición del proceso	Receptores de electrones	Características del sistema de alcantarillado típico
Aeróbica	+ oxígeno	Alcantarillados de gravedad parcialmente llenos
Anóxica	- oxígeno +nitrato	Alcantarillados presurizados aireados Alcantarillados presurizados con adición de nitrato
	- oxígeno - nitrato + sulfato (+ CO <sub>2</sub> )	Alcantarillados presurizados Alcantarillados de gravedad a flujo lleno Alcantarillados de gravedad con baja pendiente
Anaeróbica		

**Tabla 3-1 Receptores de electrones correspondiente a la condición bajo la cual se desarrollan los procesos de un alcantarillado**

Los alcantarillados se constituyen por subsistemas en los cuales se desarrollan los diversos procesos antes descritos (Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, Jes, 2002). Estos subsistemas son:

- Subsistema acuoso (procesos en suspensión)
- Formación de sedimentos
- Formación de biopelículas
- Atmósfera

En la Figura 3-1, se pueden ver los subsistemas que componen un alcantarillado y los procesos que en ellos se desarrollan.

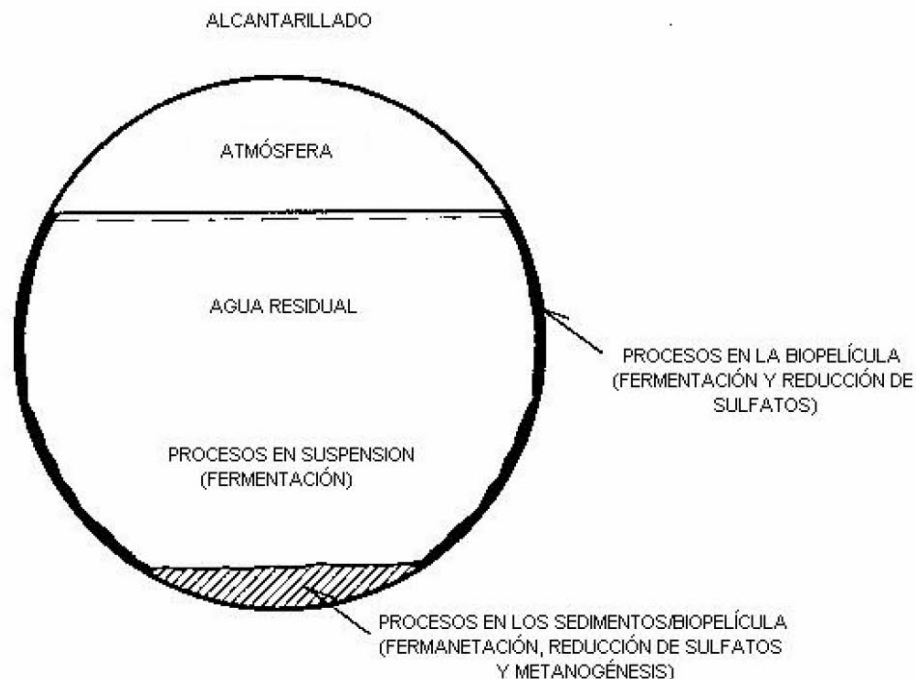
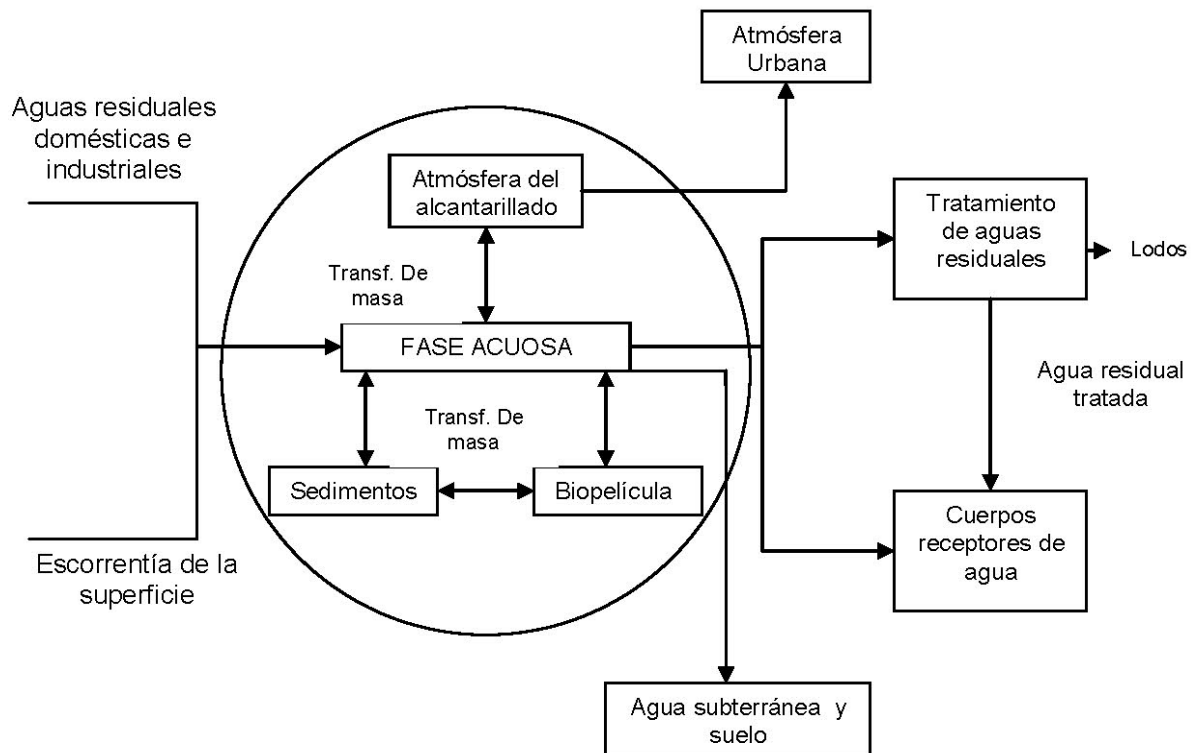


Figura 3-1 Subsistemas que componen el alcantarillado (Hvitved-Jacobsen, 2002)

Las diferentes transformaciones que se generan en los alcantarillados ocurren principalmente en la fase acuosa del sistema, en la biopelícula que se establece en las paredes de la tubería y en las partículas que se sedimentan en el alcantarillado. En general los procesos que se desarrolla durante el transporte del agua, se deben al crecimiento de microorganismos en suspensión.

En la Figura 3-2 se puede ver el proceso de transferencia de masa entre los subsistemas que componen el alcantarillado durante las transformaciones microbiológicas que desarrollan diferentes microorganismos.

## ALCANTARILLADO



**Figura 3-2 Transferencia de masa entre los subsistemas que conforman el alcantarillado durante las transformaciones microbiológicas (Hvitved-Jacobsen, 2002)**

Los procesos anaeróbicos favorecen el crecimiento de bacterias, las cuales contribuyen a la formación del ácido sulfhídrico y a los malos olores en el sistema.

El  $H_2S$  es el responsable de generar corrosión en las tuberías y toxicidad en las aguas. Este problema se puede prevenir mediante la reducción del contenido orgánico de azufre en el sistema por medio de la oxidación de sulfatos que están presentes en las aguas residuales, garantizando de esta manera condiciones aeróbicas en la red que mejoren la calidad del agua mediante la oxidación de la materia orgánica y prolonguen la vida útil de las tuberías de alcantarillado.

Los sólidos que son transportados en las redes de alcantarillado y los diferentes procesos bioquímicos que tienen lugar en estos sistemas, afectan las tuberías reduciendo su capacidad hidráulica, produciendo sedimentación, incrementando el nivel de turbiedad del agua y taponando el sistema.

### 3.3.1 Condiciones Anaeróbicas

Las condiciones anaeróbicas son aquellas que se desarrollan ante la ausencia de oxígeno; por lo general ocurren en secciones que trabajan a flujo lleno. En estas condiciones ocurren diversos procesos tales como la desnitrificación, reducción de sulfatos, hidrólisis y fermentación de bacterias.

La actividad bacteriana permite la formación de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), el cual es el causante de la mayoría de los problemas que se presentan en los sistemas de alcantarillado.

El proceso de formación de  $H_2S$  consiste en la fermentación de sustrato orgánico convirtiéndolo en materia orgánica de menor peso, la cual en presencia de sustrato fermentable es tomado por las bacterias sulfato-reductoras y convertido en ácido sulfhídrico. De esta manera, materia orgánica biodegradable, especialmente ácidos grasos volátiles, es producida bajo condiciones anaeróbicas.

Los procesos de reducción de sulfato ocurren principalmente en la biopelícula y los sedimentos presentes en el agua.

La digestión anaeróbica es un proceso complejo desde el punto de vista microbiológico, ya que en ausencia de oxígeno transforma la sustancia orgánica en biomasa y compuestos inorgánicos en su mayoría volátiles:  $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $H_2S$ ,  $N_2$  y  $CH_4$ . Estos compuestos volátiles se caracterizan por generar numerosos problemas tales como: malos olores, toxicidad en el agua y corrosión en las tuberías.

#### 3.3.1.1 Formación del ácido sulfhídrico ( $H_2S$ )

La formación del ácido sulfhídrico dentro de los alcantarillados surge ante la presencia de bacterias, materia orgánica y sulfatos en el agua. Esta formación se da bajo condiciones anaeróbicas y es la responsable de los malos olores que surgen en el sistema y del nivel de toxicidad que puede llegar a tener el agua. De igual manera, este ácido es el causante de la corrosión y deterioro en las tuberías.

El  $H_2S$  es un gas venenoso e inflamable el cual produce un olor fuerte y desagradable en el ambiente. El olor se produce incluso en concentraciones muy bajas, entre 1 – 10 mg/L.

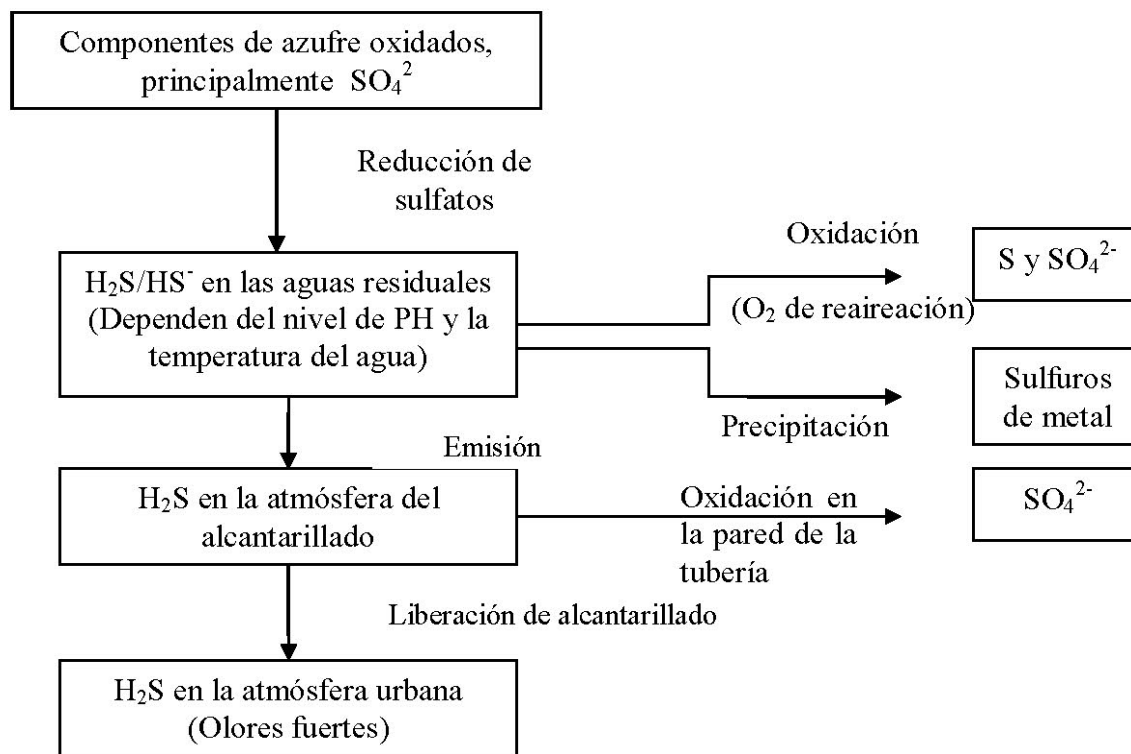
El compuesto es altamente peligroso, la concentración del olor decrece a medida que el nivel de concentración del  $H_2S$  aumenta y por tanto es más difícil ser detectado. Este pierde sus características de olor en concentraciones aproximadas a 50 ppm, en donde resulta difícil ser perceptible por el olfato humano. Para aproximadamente 300 ppm por volumen de aire, puede causar

pérdida de conocimiento e inclusive la muerte en los seres humanos (Boon, A., 1995).

Este gas puede ser transferido desde el alcantarillado a la atmósfera en los lugares del sistema en donde se presenta alta turbulencia, por ejemplo en las estaciones de bombeo, puntos de inspección, etc. (Boon, A., 1995).

El proceso de formación de este compuesto se debe a la acción de bacterias sulfato-reductoras, las cuales producen el  $H_2S$  a partir de su actividad biológica. La presencia de sulfuro en las aguas residuales se origina ante la ausencia de oxígeno disuelto en el agua, el contenido de sulfuro de la materia orgánica, los sulfatos derivados de detergentes y el sulfato presente en el agua subterránea, la cual normalmente se infiltra al sistema de alcantarillado.

En la Figura 3-3 se puede ver como se desarrolla el ciclo del azufre en un sistema de alcantarillado.



**Figura 3-3 Ciclo del azufre en un sistema de alcantarillado (Hvitved – Jacobsen, T., 2002)**

La concentración de  $H_2S$  en el agua, se ha convertido en un inhibidor de los procesos de nitrificación. Pequeñas concentraciones de sulfato (1 – 10 mg/L) en el agua pueden causar efectos adversos sobre esta. Adicionalmente, la presencia de materia orgánica promueve el crecimiento de microorganismos heterótrofos,

limitando la disponibilidad del oxígeno en el alcantarillado (Tjandraatmadja, G.F. 2002).

La formación de sulfato se origina cuando el oxígeno y nitratos no están disponibles a lo largo del alcantarillado. Bajo condiciones anaeróbicas, los factores más importantes que limitan la concentración de sulfato son (Hvitved-Jacobsen, T., 2002):

- Presencia de sulfato
- Cantidad y calidad de materia orgánica biodegradable
- Temperatura del agua
- Nivel de PH
- Relación área-volumen
- Velocidad de flujo
- Tiempo de residencia anaeróbico

La reducción del sulfato y formación del ácido sulfhídrico toman lugar en la biopelícula formada en la pared de la tubería y en los sedimentos que se establecen en el sistema durante el proceso de transporte del agua.

Otro efecto negativo que genera el ácido sulfhídrico, es la capacidad corrosiva que posee sobre diversos elementos. El  $H_2S$  corroe concreto, cobre, hierro, acero y metales negros. Esta corrosión causa a su vez toxicidad en el agua y además se convierte en uno de los principales factores causantes del colapso de las tuberías de alcantarillado.

Para prevenir la formación de sulfuro en las aguas residuales, es necesario inhibir el crecimiento de las bacterias responsables de su producción y tratar de mantener condiciones aeróbicas en el sistema.

### **3.3.2 Condiciones Aeróbicas**

Las condiciones aeróbicas son aquellas que se desarrollan en presencia del oxígeno. Típicamente las condiciones aeróbicas se generan en tuberías de alcantarillado que fluyen parcialmente llenas, o en tuberías presurizadas que son constantemente aireadas.

Bajo condiciones aeróbicas, la materia orgánica biodegradable es removida y la biomasa es producida. Las transformaciones que surgen en el agua bajo condiciones aeróbicas son causadas principalmente por la masa heterótrofa. Los microorganismos heterótrofos usan el oxígeno como receptor de electrones y de esta manera el proceso que se genera en el agua es aerobio.

Durante los procesos de respiración aeróbica, las bacterias heterotróficas liberan energía a partir de las moléculas orgánicas. La energía liberada es usada por las bacterias para su crecimiento y el desarrollo de sus actividades.

Las condiciones aeróbicas mejoran las características del sedimento producido durante el transporte de las aguas residuales en el alcantarillado, además se evitan problemas de concentración de malos olores ya que el sulfuro no se produce en las aguas donde hay oxígeno disuelto, y la demanda biológica se hace menor en la fase acuosa del alcantarillado.

### 3.3.3 Condiciones Anóxicas

Estas condiciones se desarrollan bajo altas concentraciones de nitrato en el agua. Bajo estas condiciones, los microorganismos usan el nitrato como receptor de electrones, el sustrato biodegradable es removido y la formación de ácido sulfhídrico es suprimida.

### 3.3.4 Sedimentación

El proceso de sedimentación ocurre generalmente en condiciones de caudal bajo, cuando la velocidad del agua es mínima. De igual manera ocurre sedimentación, cuando las partículas con cohesión que se encuentran suspendidas en el agua se ven afectadas por la turbulencia del flujo.

Las partículas que se sedimentan en los alcantarillados son tanto de origen orgánico como inorgánico. Este proceso ocurre dependiendo de la velocidad de flujo, de la naturaleza de las partículas y de la concentración de las partículas en suspensión y cerca del lecho<sup>2</sup>.

Los factores más importantes en el proceso de sedimentación son:

- Geometría del alcantarillado
- Condiciones topográficas de la red de alcantarillado
- Condiciones ambientales (invierno, verano)
- Naturaleza del flujo
- Naturaleza de los sólidos (partículas orgánicas)

El efecto que la sedimentación genera sobre el alcantarillado es muy importante, ya que este proceso puede cambiar las condiciones dentro del sistema al variar la velocidad del flujo, la rugosidad y la capacidad hidráulica de la tubería.

---

<sup>2</sup> Ricaurte, José Luis., Estudio de un sistema alternativo de alcantarillado como mecanismo para el tratamiento de aguas residuales, Universidad de los Andes, 2000.

### 3.3.5 Biopelículas

Las biopelículas son comunidades de microbios que secretan una baba que los rodea. Se forman cuando las células bacterianas, capaces de formar grandes sustancias pegajosas y lamosas, se pegan a una superficie. La capa lamosa que crean sostiene a las células en la superficie en la que se han establecido y captura otras bacterias que viven y crecen en los productos de desecho generados por las primeras bacterias. Las capas siguen formándose hasta crear una comunidad compleja.

Por lo general, las biopelículas se desarrollan en superficies que se encuentran en contacto con el agua. La mayoría de las bacterias presentes en el alcantarillado viven y se desarrollan en las biopelículas, las cuales se crean en las paredes de la tubería.

## 3.4 *Septicidad en los Alcantarillados*

La septicidad en un sistema de alcantarillado, ocurre cuando los microorganismos presentes en las aguas residuales y en los desechos sumergidos que se adhieren a las paredes de la tubería han utilizado todo el oxígeno disuelto y los nitratos presentes en el sistema (Boon, A., 1995).

Cuando las condiciones anaeróbicas han sido desarrolladas, las bacterias contenidas en el agua reducen los compuestos orgánicos con contenidos de azufre a sulfatos para formar sulfuros y otros compuestos que generan malos olores. Los procesos de reducción de sulfatos y fermentación toman lugar causando corrosión en las tuberías y emitiendo olores desagradables a la atmósfera del alcantarillado y urbana.

La corrosión y la toxicidad, los cuales son problemas causados por la septicidad, se desarrollan normalmente bajo las siguientes condiciones<sup>3</sup>:

- Después del transporte en conductos presurizados: Cuando el agua residual es transportada en conductos presurizados, se desarrollan condiciones anaeróbicas rápidamente. Incluso a bajas temperaturas, cantidades significativas de componentes volátiles como el H<sub>2</sub>S, malos olores y concentraciones de COD son producidas durante el transporte del agua. La corrosión y la emisión de olores fuertes ocurren aguas abajo del conducto presurizado, sobre todo en lugares donde se presenta alta turbulencia que contribuye en el proceso de emisión de olores desagradables al ambiente.

---

<sup>3</sup> Página de Internet: <http://www.sewer.dk/TransformationsInSewers.htm>



- En alcantarillados de gravedad: Corrosión y emisión de olores son desarrollados en este tipo de alcantarillados. Las condiciones que permiten el desarrollo de estos problemas son: Altas temperaturas, baja velocidad del flujo, profundidades grandes del flujo, cantidad considerable de biopelícula (en relación al volumen de agua), altas concentraciones de COD, y depósitos de sedimentos. Adicionalmente, si hay mucha turbulencia en el flujo, cantidades de gases como  $H_2S$  y otros componentes de azufre toman lugar en la tubería, generando corrosión y emitiendo malos olores al ambiente.

Este fenómeno tiende a desarrollarse en lugares donde no hay ventilación adecuada ni procesos de re-aireación que prevengan el desarrollo de condiciones anaeróbicas en el sistema. Usualmente, los problemas asociados a la corrosión y la concentración de malos olores causados por la septicidad ocurren en zonas donde la temperatura de las aguas es elevada.

El problema de septicidad depende directamente de la cantidad de  $H_2S$  presente en los alcantarillados que logra escaparse a la atmósfera, y este a su vez depende del nivel de PH en el agua.

### **3.4.1 Consecuencias de la septicidad**

Los problemas asociados con el problema de septicidad son la corrosión y la toxicidad. Cada uno de ellos es importante dentro de las funciones que tiene un alcantarillado, ya que afectan de manera directa el estado del sistema y por tanto la capacidad de transportar el agua residual hasta las plantas de tratamiento. Además son factores importantes a considerar, ya que afectan la salud pública al emitir sustancias fuertes que pueden ocasionar incluso la muerte.

#### **3.4.1.1 Corrosión**

La corrosión generada por la septicidad se presenta en la tubería y en las demás estructuras que conforman el sistema de alcantarillado. Puede ocasionar el colapso total del sistema y afectar los equipos eléctricos que son instalados en puntos tales como las estaciones de bombeo.

Los factores que motivan la corrosión son diversos; entre ellos están: las condiciones del flujo, la composición de los ductos y las características biológicas y fisicoquímicas del agua. La presencia en el agua de determinadas floras bacterianas (bacterias sulfato-reductoras y ferrobacterias) incide directamente en el aumento de la corrosión del sistema. Las características químicas del agua

pueden favorecer más la presencia de esta flora bacteriana que acelerará el fenómeno<sup>4</sup>.

El desempeño que cumplen las bacterias sulfato-reductoras en el proceso de corrosión es muy importante. Estos microorganismos descomponen la materia orgánica y los minerales presentes en el agua residual, formando numerosos productos a través de los procesos biológicos que desarrollan. La corrosión microbiana puede definirse como un proceso metabólico bacteriano que origina o acelera la destrucción de los metales. Los microorganismos influyen sobre los procesos de corrosión a través de mecanismos que les permiten adquirir la energía necesaria para las actividades vitales. Generalmente, la corrosión de los metales se debe a las bacterias anaerobias, es por esto que resulta tan importante mantener condiciones aeróbicas en el sistema.

En cuanto a las características fisicoquímicas del agua que influyen en el proceso de corrosión, se encuentran: temperatura, PH, sales disueltas, oxígeno y bióxido de carbono disueltos, y prácticamente todos los cationes y aniones que intervienen en la composición mineralógica normal del agua: cloruros, bicarbonatos, carbonatos, sulfatos, sodio, calcio, magnesio, etcétera.

La corrosión es creada por el efecto que tiene el H<sub>2</sub>S en las tuberías. El nivel de PH del agua tiene gran influencia sobre este proceso, de esta manera para valores de PH entre 6 y 7, la oxidación química de las aguas residuales produce compuestos simples de azufre, mientras que para niveles de mayores de PH (entre 7 y 9), la oxidación química produce sulfatos que son convertidos en sulfuros.

El ácido sulfhídrico presente en el agua, puede corroer materiales tales como: bronce, concreto, cobre, hierro y acero, ocasionando inclusive el daño total en la tubería de alcantarillado.

### **3.4.1.2 Toxicidad y malos olores**

El H<sub>2</sub>S formado de la actividad bacteriana, tiene un olor característico a huevo podrido. Este gas es altamente peligroso tanto para la vida útil de las tuberías, como para la vida de los seres humanos. Es emitido a la atmósfera con olores fuertes que pueden producir inconciencia en el ser humano e incluso la muerte. Este es transferido a la atmósfera en lugares de la tubería en donde el flujo presenta turbulencia, tales como en alcantarillados de gravedad, puntos de inspección, etc.

---

<sup>4</sup> Página de Internet:

[http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec\\_7.htm](http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_7.htm)

El nivel de la toxicidad en el agua varía dependiendo del tiempo de retención del agua en el alcantarillado, de la temperatura, el nivel de PH y la cantidad de ácido sulfhídrico producido.

### **3.4.1.3 Efectos sobre los sólidos suspendidos totales**

Los sólidos suspendidos totales son los materiales suspendidos o disueltos en las aguas residuales. El oxígeno disuelto juega un papel importante en la solubilización de iones que cambian fácilmente de valencia y en la actividad de diferentes microorganismos que viven en las aguas residuales. El oxígeno disuelto se consume con facilidad si en el agua se presentan sustancias oxidables tales como la materia orgánica, el hierro, amonio, etc., los cuales se presentan constantemente como resultado de la acción biológica que surge en las aguas residuales.

El oxígeno disuelto se asocia con la corrosividad, toxicidad y septicidad. Grandes cantidades de sólidos suspendidos en el agua, aumentan el déficit de oxígeno y hacen que las concentraciones de olores desagradables se aumenten considerablemente.

Los sólidos suspendidos totales afectan el estado del sistema y la capacidad hidráulica de los sistemas de alcantarillado.

### **3.4.2 Prevención de la septicidad**

Para prevenir la formación de  $H_2S$  en el agua, y por lo tanto evitar la septicidad es necesario inhibir el crecimiento de los microorganismos responsables de este proceso y mantener condiciones aeróbicas en la red.

La corrosión y los problemas de toxicidad se pueden minimizar de la siguiente manera (Boon, A., 1995):

- Oxidar el  $H_2S$  antes que sea emitido a la atmósfera
- Convertir el  $H_2S$  en  $HS^-$  y  $S^{2-}$
- Evitar los flujos turbulentos en los sistemas de alcantarillado para prevenir el contacto del  $H_2S$  con la atmósfera
- Usar materiales resistente a la corrosión
- Limpiar los alcantarillados para prevenir la concentración de sedimentos en la tubería

Algunos métodos de prevención son:

*Inhibición:* Consiste en inhibir el crecimiento de las bacterias responsables de la formación de sulfuro por medio de adición de químicos bactericidas.

*Mantener condiciones aeróbicas:* El sulfuro no se forma en aguas residuales donde hay presencia de oxígeno disuelto. De esta manera, para los sistemas de alcantarillado en donde el agua fluye a flujo lleno, es conveniente inyectar oxígeno para minimizar el período durante el cual condiciones anaeróbicas pueden desarrollarse y así minimizar la producción de  $H_2S$ .

*Mantener condiciones anóxicas:* Las condiciones bajo las cuales el nitrato es el electrón receptor, se conocen como condiciones anóxicas. El uso de químicos que contienen nitratos, previenen la formación del sulfuro en los alcantarillados. La adición de nitratos al agua, cumple con funciones de regulación de septicidad, sin embargo es necesario ser cuidadoso con la cantidad de nitrato que se añade, ya que si el nitrato es usado completamente por los microorganismos no se está previniendo la septicidad, sino por el contrario se contribuye a generar corrosión y toxicidad. La cantidad de nitrato que se debe adicionar al agua depende de la demanda de oxígeno del agua, la temperatura, período de retención y la tasa de flujo.

*Adición de químicos para reducir el  $H_2S$ :* Este método pretende adicionar químicos al agua que incrementen el nivel de PH, reduciendo la proporción de compuestos de azufre presentes y por tanto inhibiendo la actividad bacteriana.

*Limpieza de los alcantarillados:* Limpiar los alcantarillados es otro método que ayuda a prevenir la septicidad ya que previene la acumulación de sedimentos en las tuberías. Un método alternativo a este, es mantener velocidades adecuadas en el flujo que permitan el transporte de sedimentos.

*Reducción de la turbulencia:* Cuando la formación de sulfuros no se puede prevenir, la reducción de la turbulencia contribuye a la disminución de la emisión de  $H_2S$  a la atmósfera.

*Ventilación de los alcantarillados:* Una adecuada ventilación en los sistemas de alcantarillado, contribuye a la reducción de concentraciones de ácido sulfhídrico en la atmósfera y previene concentraciones letales de malos olores en la red.

## **4 AIREACIÓN**

---

### **4.1 Descripción del proceso de aireación**

La aireación es un proceso que consiste en la mezcla del agua con el aire, con el fin de variar las concentraciones de sustancias volátiles contenidas en el líquido e incrementar la concentración del oxígeno disuelto.

Tiene como fin el mejoramiento de las características químicas y físicas del agua para su consumo, para su uso en la industria piscícola o en el tratamiento de aguas residuales.

En el tratamiento de aguas para consumo humano este proceso tiene como objeto la remoción de olores y gases disueltos. La aireación cumple los objetivos de purificación mediante el barrido o arrastre de ciertas sustancias y por el proceso de oxidación de los metales y gases contenidos en el agua. Su función principal es la de propiciar y acelerar la oxidación del hierro y el manganeso.

En la piscicultura, el agua, tanto su disponibilidad como sus condiciones, (pureza, nivel de  $O_2$ ,  $T^\circ$ , etc.) es el elemento primordial que determina las características del cultivo de peces. Es esencial que el líquido esté suficientemente oxigenado en todo momento y bajo cualquier condición, garantizando que se cumplan los requerimientos de oxígeno para cada especie.

En los procesos de tratamiento de aguas residuales, el propósito más importante que cumplen los sistemas de aireación, es el de incrementar la concentración de oxígeno a ciertas tasas requeridas (con un mínimo necesario de 1 mg/L) con el fin de garantizar que el oxígeno no limite la metabolización de la materia orgánica presente y las diversas funciones metabólicas de los microorganismos.

Básicamente con la aireación se consigue incrementar los niveles de oxígeno disuelto, disminuir la concentración de sulfuro de hidrógeno, de metano y otros gases indeseables que puedan estar presentes; adicionalmente, promover y acelerar la oxidación y precipitación del hierro y manganeso y corregir las características de olor y sabor ocasionadas por la presencia en el agua de sustancias orgánicas volátiles.

Los principales factores que influyen en el proceso de aireación del agua son la temperatura, la presión y la superficie de contacto. En el proceso de aireación, los sistemas más comúnmente empleados suelen ser, aireación en cascada, aireación por inyección, aireación por surtidor y aireación por contacto. En aguas residuales se utilizan aireadores mecánicos superficiales o sumergidos y aireadores difusores.

## **4.1.1 Tipos de aireadores en aguas residuales**

A través de los años, se han implementado diferentes métodos para airear el flujo en alcantarillados con el fin de prevenir la concentración de malos olores en la atmósfera del alcantarillado, algunos de los más comunes son los aireadores por gravedad, aireadores de superficie y aireadores difusores.

### **4.1.1.1 Aireadores por gravedad**

Este tipo de aireadores utiliza la energía potencial que se libera cuando el agua cae, ya que se rompe en gotas y logra aumentar el área superficial de contacto aire-agua y por lo tanto incrementa la concentración de oxígeno en el líquido. Su principio de funcionamiento general consiste en distribuir el agua lo más uniforme posible y hacerla fluir sobre superficies que aumenten la turbulencia y cambien las superficies de contacto con el aire.

### **4.1.1.2 Aireadores de superficie**

Este tipo de aireadores agitan la superficie del agua logrando que el área de transferencia entre los dos medios cambie constantemente. Consisten básicamente de un rotor unido a unas paletas que al rotar a altas velocidades generan gran turbulencia. La transferencia de oxígeno depende de la profundidad de sumersión, la velocidad del rotor, su diámetro y las características del agua que esta siendo aireada.

En este tipo se puede incluir los aireadores tipo spray, los cuales consisten en un montaje que fuerza el paso del agua por medio de unas boquillas. El tiempo de contacto entre las gotas de agua y el aire depende de la velocidad con que el líquido sale de los orificios.

### **4.1.1.3 Aireadores difusores**

Estos aireadores inyectan aire u oxígeno al agua en forma de burbujas. Debido a que las burbujas se desplazan en ascenso, existe un movimiento relativo entre éstas y el agua. Esto hace que se haga mayor la superficie de contacto con el aire y por lo tanto se incremente la transferencia de oxígeno por la difusión de las burbujas.

El principio de funcionamiento de este tipo de aireadores se basa en un difusor sumergido a cierta profundidad en el volumen de agua por el cual se inyecta aire. La transferencia de oxígeno se logra a partir de las fuerzas boyantes, las cuales hacen que las burbujas asciendan y renueven el líquido moviéndolo hacia la superficie.

## 4.2 *Transferencia de Oxígeno*

La transferencia de oxígeno en el agua en un proceso de aireación puede ser considerada en tres etapas<sup>5</sup>:

1. Transferencia de oxígeno en la interfase gas a la interfase gas-líquido mediante un proceso acelerado en el que se combina la convección y la difusión del gas.
2. Transferencia a través de la interfase gas-líquido en un proceso lento que se da exclusivamente por difusión.
3. Transferencia de oxígeno que se encuentra lejos de la interfase hacia el líquido en un proceso rápido por convección.

Cualquier soluto tiende a difundirse en la solución hasta que la mezcla se vuelve homogénea, condición que se ve afectada por diversos factores tales como la presión atmosférica, la concentración inicial, la salinidad, el contenido de materia orgánica, la vegetación acuática sumergida, etc. Sin embargo, el factor determinante para el contenido de oxígeno en el agua es la temperatura.

La temperatura afecta la viscosidad del líquido, su densidad, la velocidad de las reacciones químicas y bioquímicas, y la solubilidad de los gases. Entre más elevada es la temperatura, menos oxígeno disuelto se encuentra en el agua.

### 4.2.1 **Transferencia de oxígeno en alcantarillados**

El oxígeno disuelto presente en los alcantarillados es uno de los parámetros más importantes para los procesos que se llevan a cabo dentro de estos sistemas. El nivel de oxígeno en el agua residual no sólo reduce notoriamente la cantidad de H<sub>2</sub>S, sino que además influyen en las tasas de transformación de la materia orgánica presente en el alcantarillado.

Los procesos que se generan en los alcantarillados, tienen grandes efectos sobre la composición del agua (calidad y cantidad) que llega a las plantas de tratamiento; es por esto que es importante remover partículas antes que esta agua sea vertida al sistema de tratamiento para que los procesos en las últimas requieran de menor tiempo y por tanto se puedan reducir costos en construcción y ejecución de procesos.

---

<sup>5</sup> Romero, Jairo. Acupurificación. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 1994.

Las principales fuentes de oxígeno en los alcantarillados provienen del OD contenido en el agua residual que compone el sistema, el OD proveniente de la infiltración y por procesos de aireación. La transferencia de oxígeno entre la atmósfera del alcantarillado y el agua residual es uno de los procesos más importantes que desarrollan dentro del sistema, para lograr esta transferencia de manera eficiente y satisfactoria es fundamental prevenir la formación de H<sub>2</sub>S en el agua para garantizar así que el flujo sea gobernado bajo condiciones aeróbicas.

#### 4.2.1.1 Coeficiente de re-aireación

La transferencia de oxígeno en superficies de agua, se describe por la teoría de las dos películas planteado por Lewis y Whitman en 1924. Esta teoría sugiere que existen dos películas laminares de gas y líquido en la interfase que existe entre dos fases, además supone la mezcla uniforme de las dos fases. La transferencia del gas surge por difusión molecular a través de la película líquida y se distribuye por difusión turbulenta a través del líquido. Este modelo describe la tasa de transferencia de oxígeno de la siguiente manera:

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C)$$

donde,

$K_L a$ : Coeficiente de re-aireación ( $h^{-1}$ )

$C$ : Concentración de oxígeno disuelto en el agua (mg/L)

$C_s$ : Concentración de equilibrio de OD que se logra cuando el tiempo se acerca al infinito ( $g/m^3$ )

La determinación del coeficiente de re-aireación ha resultado de diferentes estudios empíricos. Algunas de las ecuaciones desarrolladas son:

Autor	Año	Ecuación
Krenkel y Orlob	1962	$K_L a = 7.235 (u \cdot s)^{0.408} d_m^{-0.66}$
Owens	1964	$K_L a = 0.222 u^{0.67} d_m^{-1.85}$
Parkhurst y Pomeroy	1972	$K_L a = 0.96 (1 + 0.17 F^2) (u \cdot s)^{3/8} d_m^{-1}$
Tsvoglou y Neal	1976	$K_L a = B \cdot u \cdot s$
Taghizadeh-Nasser	1986	$K_L a = 0.4 \cdot u \cdot (d_m / R)^{0.613} d_m^{-1}$

Tabla 4-1 Ecuaciones para determinar el coeficiente de re-aireación (Jensen, 1995)



donde,

$K_L$ : Coeficiente de transferencia de oxígeno a 20°C (1/h)

$u$ : Velocidad media del flujo (m/s)

$s$ : Pendiente (m/m)

$d_m$ : Profundidad hidráulica media (m)

$R$ : Radio hidráulico (m)

$F$ : Número de Froude.  $F = \frac{u}{\sqrt{gd_m}}$

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $m^2/s$ )

$B$ : Coeficiente, dado en función de la calidad del agua y de la intensidad de la mezcla.

La ecuación más acertada para predecir el coeficiente de re-aireación, es la formulada por Parkhurst y Pomeroy en 1972.

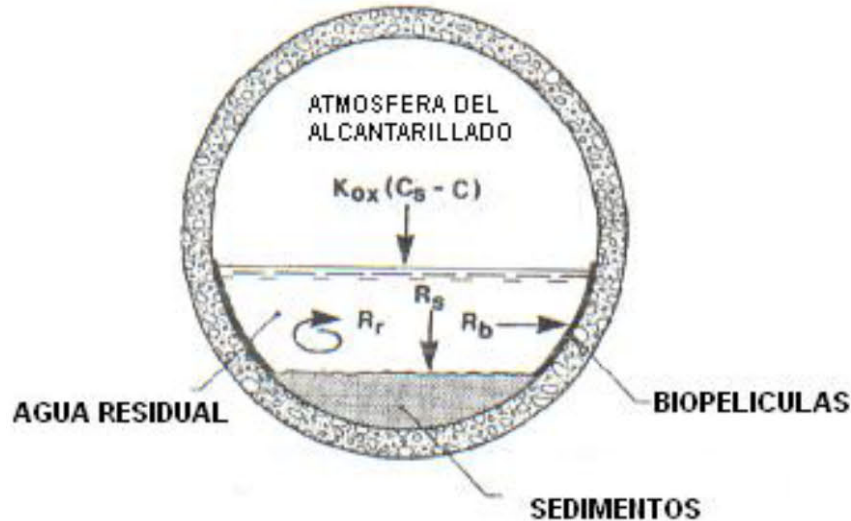
La tasa de re-aireación depende de la concentración de saturación del OD en el agua, la cual depende a su vez de la presión parcial del oxígeno en la atmósfera del alcantarillado. Debido a que los sistemas de alcantarillado son poco ventilados, la presión parcial tiende a ser menor que el nivel normal para el aire atmosférico. Esta teoría se basa en la ley de Henry, según la cual bajo una presión parcial baja de oxígeno se reduce la solubilidad de OD en el agua.

El OD contenido en el agua de los alcantarillados, disminuye durante su transporte a lo largo de la tubería. Las formas como el OD se consume en este proceso son (Jensen and Jacobsen, 2001):

Consumo de OD por los procesos que surgen en el agua (degradación microbológica aeróbica)

Consumo de OD en las paredes y fondo de la tubería (por parte de las biopelículas y los sedimentos)

En la Figura 4-1 se puede ver el balance de masa del oxígeno por unidad de volumen, en un alcantarillado de gravedad:



**Figura 4-1. Balance de masa en un alcantarillado de gravedad**

Este balance se ve representado de la siguiente manera:

$$\frac{dC}{dt} = \text{input} - \text{output} + K_L a \cdot (C_s - C) - (R_w + R_s + R_b),$$

$$\text{Para } \frac{dx}{dt} = u$$

donde,

- t: Tiempo (h)
- $R_w$ : Consumo de OD en el agua residual ( $\text{g/m}^3\text{h}$ )
- $R_s$ : Consumo de OD en los sedimentos ( $\text{g/m}^3\text{h}$ )
- $R_b$ : Consumo de OD en las biopelículas ( $\text{g/m}^3\text{h}$ )
- x: Coordenadas (m)
- u: Velocidad media del flujo (m/h)

Los términos input y output describen la manera como contribuyen al balance las variaciones en el nivel de OD por la entrada y salida de agua (infiltración y exfiltración del agua residual).

Los sedimentos en los alcantarillados contienen mayor cantidad de biomasa activa que las otras fases del sistema, es por esto, que en esta fase hay mayor consumo del OD que se transporta por las aguas.

#### 4.2.1.2 Velocidad en la transferencia de gases

El proceso de transferencia de gases puede ser controlado por la fase líquida o por la fase sólida descrita en la teoría de Lewis y Whitman, según la velocidad de la transferencia. Recordando la ecuación que describe el flujo de un gas en la interfase gas-líquido y conociendo que esta se deriva según la ley de Henry, se tiene que el parámetro  $C_s$  está relacionado con la presión parcial del gas en la atmósfera de la siguiente manera:

$$p = H_c \cdot C_s$$

donde,

p: es la presión parcial del gas en la atmósfera (atm)  
Hc: Constante de la ley de Henry (atm\*m<sup>3</sup>/g)

De acuerdo con la teoría de las dos películas, la velocidad de la transferencia total se puede expresar como la velocidad de la transferencia en cada una de las películas (Jensen, 1995):

$$\frac{1}{K_L} = \frac{1}{k_L} + \frac{1}{(H_c \cdot K_g)}$$

donde,

k<sub>L</sub>: Velocidad de la transferencia de un gas en la fase líquida (m/h)  
k<sub>g</sub>: Velocidad de la transferencia de un gas en la fase gaseosa (g/atm\*m<sup>2</sup>\*h)

Si la relación  $\frac{K_L}{(H_c \cdot K_g)}$  es significativamente menor que uno, los procesos son gobernados por la fase líquida y la velocidad de la transferencia total se hace semejante a la velocidad en la película líquida; mientras que si la relación se hace mayor que uno, los procesos son gobernados por la fase gaseosa.

La transferencia de oxígeno es gobernada por la fase líquida, y por lo tanto según la teoría de las dos películas, la velocidad de este proceso se puede expresar como:

$$K_L = \frac{D}{L}$$

donde,

D: Coeficiente de difusión molecular en el agua (m<sup>2</sup>/h)  
L: Espesor de la película líquida (m)

## **5 MÉTODOS PARA AIREAR EL FLUJO EN ALCANTARILLADOS**

---

La aireación es un proceso mediante el cual se adiciona oxígeno al agua. La aireación en los alcantarillados tiene como objetivo principal la reducción de los malos olores que se producen debido a diferentes procesos. Sin embargo, la aireación de las aguas residuales dentro de los alcantarillados puede servir como un tratamiento previo al agua antes que sea vertida a la planta de tratamiento.

Las aguas residuales se caracterizan por tener altos contenidos de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) debido a la presencia de materia orgánica, bacterias y sulfatos, bajo nivel de PH, alto potencial de corrosión y toxicidad. A lo largo de todo el sistema de alcantarillado se producen diferentes procesos biológicos que transforman las aguas residuales y afectan la calidad del agua y por tanto tienen efecto en la operación de las plantas de tratamiento aguas abajo.

Con la inyección de oxígeno se busca evitar todos estos problemas y lograr una mejor calidad en las aguas que llegan a las plantas. La mejora en la calidad de las aguas residuales antes de ser vertidas al lugar de tratamiento, crea un efecto positivo en el diseño y en el costo asociado a la construcción de las PTAR, ya que se puede llegar a reducir el tamaño de las tuberías y sistemas que conforman la planta.

Diferentes métodos han sido empleados para adicionar agentes oxidantes al agua en los alcantarillados, siendo unos más eficientes que otros pero todos con el mismo objetivo: crear condiciones aeróbicas que permitan reducir el contenido de  $H_2S$  en el agua.

### **5.1 Mangueras Perforadas: Método DRAUSY**

DRAUSY es un nuevo método para controlar la septicidad y eliminar los malos olores que se producen dentro de los alcantarillados a través de la incorporación continua y uniforme de sustancias líquidas o gaseosas a lo largo de toda la tubería de alcantarillado.

La incorporación de estas sustancias se hace mediante el uso de una manguera perforada cuyo diámetro interno varía entre 12 y 18 mm. Esta manguera permite dar un tratamiento en línea a las aguas residuales dentro de los alcantarillados por medio de la inyección de oxígeno ó agentes líquidos (cloruro o peróxido de hidrógeno disueltos en agua) a la tubería a través de largas distancias:

- Longitudes superiores a 10 Km. en el caso de inyección de líquidos
- Longitudes hasta 1Km. en el caso de inyección de aire

La manguera que conforma el sistema DRAUSY, es hecha de poliuretano termoplástico. Este material es altamente resistente a los procesos que surgen en el agua residual, la corrosión, el desgaste, el impacto, la temperatura, el clima y la abrasión. Esta se instala en las tuberías de alcantarillado por medio de un sistema de amarre en los puntos inicial y final del tramo de la tubería en el que se quiere instalar.

La presión con la que se transporta cada agente, la cantidad de transferencia requerida y la longitud que se puede llegar a servir por medio de este sistema dependen del tipo de sustancia que se inyecta; es decir estos criterios varían si se inyecta oxígeno o si se inyecta alguna sustancia disuelta en agua. Estas variaciones se pueden observar en la Tabla 5-1.

Agente	Transferencia	Presión	Longitud
		(bar)	(m)
Líquidos	50 a 2500 cm <sup>3</sup> /h/agujero	1 - 3	10000
Gases	20 a 200 cm <sup>3</sup> /min/agujero	1 - 4	1000

**Tabla 5-1. Características del sistema DRAUSY según tipo de agente (Tomado de: [www.drausy.de](http://www.drausy.de))**

Esta manguera cuenta con agujeros a lo largo de toda su longitud, los cuales son uniformes en su estado inicial, pero pueden llegar a variar en tamaño dependiendo de la presión aplicada para transportar y adicionar la sustancia requerida permitiendo regular, controlar y garantizar la distribución uniforme de oxígeno a lo largo de toda la tubería. De esta manera, cuando los agujeros se encuentran sometidos a altas presiones, sus aperturas se hacen más pequeñas, mientras que cuando se ven sometidos a bajas presiones ocurre lo contrario y se hacen más grandes.



**Figura 5-1 Cambio en el tamaño de los agujeros dependiendo de la presión aplicada (izq: no presurizada, der: presurizada) (Tjandraatmadja, G.F. 2002)**

El tamaño y el número de aperturas a lo largo de la manguera, depende de la cantidad de oxígeno por unidad de longitud que se quiere inyectar. La dosis volumétrica que cada agujero inyecta al sistema de alcantarillado es igual a lo largo de toda la manguera y el diámetro de las aperturas puede variar entre 0.05 y 0.4 mm.

El sistema DRAUSY es usado principalmente como un método para controlar la septicidad que se produce en los alcantarillados; sin embargo, esta nueva tecnología puede llegar a tener más potencial. Controlando la distribución uniforme del oxígeno se puede lograr ambientes aeróbicos en las aguas residuales logrando darle un tratamiento previo a estas. De esta manera se previene la producción de  $H_2S$ , se logra obtener un nivel más neutral de PH y además ciertas bacterias pueden cumplir con los procesos de digestión de materia orgánica presente en el alcantarillado.

### **5.1.1 Tratamiento de las aguas residuales en la tubería de alcantarillado**

El problema de la septicidad en los alcantarillados puede ser controlado mediante el tratamiento del agua dentro de las tuberías. Este proceso puede llegar a ser muy efectivo haciendo uso del método DRAUSY por medio de la inyección de agentes oxidantes al agua, con el que al dar un tratamiento aeróbico se puede remover la cantidad de DBO disuelto en el agua.

Al dar un tratamiento en línea a las aguas residuales, se pueden generar beneficios económicos sobre la construcción de las plantas de tratamiento; este tratamiento previo al agua genera simplificaciones en el diseño de las PTAR y por lo tanto se reducen costos en la construcción de estas.

Al inyectar oxígeno al agua se logra disminuir la corrosión, eliminar los malos olores y además mejorar la calidad de las aguas transportadas en las redes de alcantarillado evitando la toxicidad.

A pesar de los muchos beneficios que se logran con el tratamiento en línea, se presentan algunos obstáculos dentro de los alcantarillados tales como:

- Poca disponibilidad de materia biológica
- Control de la temperatura
- Díficil control de los procesos de remoción de nitrógeno
- Remoción pobre de nutrientes

### 5.1.2 Aplicación del método DRAUSY en sistemas de alcantarillado local

El método DRAUSY ha sido probado en diversas redes de alcantarillados locales, obteniendo buenos resultados y generando una muestra efectiva de los beneficios que genera esta nueva tecnología.

El experimento que se muestra a continuación es un ensayo del sistema DRAUSY en una tubería en un municipio de Alemania, donde los malos olores que se producen en los alcantarillados, se generan como resultado de la ausencia de oxígeno en las aguas residuales.

El experimento se lleva a cabo en un tramo de una red de alcantarillado real y es dirigido por la Universidad de Karlsruhe. El objetivo es aumentar el contenido de oxígeno en las aguas residuales por medio de la adición de aire usando mangueras perforadas.

El tramo en el que se instaló el sistema tiene las siguientes características:

- Longitud: 211 m.
- Pendiente: 11%
- Aguas residuales domésticas e industriales
- Alta variabilidad del flujo

Las características de la manguera instalada, son las siguientes:

- Diámetro de los agujeros: 40 $\mu$ m
- Espacio entre agujeros: 40 cm.
- Número de agujeros: 525 en cada lado de la manguera
- Objetivo: Dispersión de 125 cm<sup>3</sup> x min<sup>-1</sup> x m<sup>-1</sup> de aire

El aire se introdujo a la manguera por medio de un compresor V12YR. La presión con la que se transportó el aire fue 0.3 bar; sin embargo, la presión estable que se consiguió fue mayor a 0.5 bar y corresponde a una transferencia de aire de 30cm<sup>3</sup>/min/agujero.

Para evaluar el resultado de la inyección de aire se instaló a lo largo del tramo un sensor de oxígeno, obteniendo como resultado una distribución uniforme y constante de aire en la tubería además de un incremento en la cantidad de oxígeno presente en el alcantarillado (hasta un 80% más de oxígeno). En cuanto a la evaluación de la resistencia, se comprobó que la manguera es altamente resistente a los aceites, grasas, solventes, ácidos, soluciones cáusticas y a todas las condiciones presentes dentro de un alcantarillado.

### 5.1.3 Análisis de reducción de costos en el tratamiento haciendo uso de la manguera DRAUSY.

Las mangueras DRAUSY, son una alternativa económica para transferir al flujo, agentes oxidantes que contribuyan con el mejoramiento de la calidad del agua residual. Este nuevo método requiere de una instalación sencilla y además garantiza dar un tratamiento en línea al agua, pues distribuye de manera uniforme el agente inyectado en el tramo de la tubería en donde es instalado.

En la Tabla 5-2 se puede ver un ejemplo de comparación de costos de inyección de agentes oxidantes al agua residual. Los métodos de inyección son: el convencional, donde se inyecta el agente en un solo punto de la tubería; y la inyección por medio de la manguera DRAUSY, en la que la dosis es lineal.

ITEM	Costo Efectivo (Tratamiento tradicional. Dosis de NUTRIOX en un solo punto)	Costo calculado por dosis lineal de agentes por mangueras DRAUSY	
		NUTRIOX	Aire
Inversión	100000	120000	150000
Depreciación	8000 12,5 años	24000 5 años	30000 5 años
Intereses (6%)	6000	7200	9000
Mantenimiento (1,5%)	1500	1800	2250
Costo de Energía	125	125	500
Localización de regulador	1350	1350	0
Costo de Personal	5700	5700	5700
Costo por año	22675	40175	47450
	137350	176350	214900
Costo por día	62	110	130
Costo químico por día	800	250	0
Costo total diario	862	360	130
Costo diario por m3	0,03497	0,01460	0,00527

**Tabla 5-2 Comparación de costos, para impedir el desarrollo de H<sub>2</sub>S en un alcantarillado en Hamburg (24.650 m<sup>3</sup>/d) . Comparación entre tratamiento en un solo punto y tratamiento en línea. ( En EUROS). (Tomado de: [www.drausy.de](http://www.drausy.de))**

El costo del tratamiento para grandes cantidades de agua residual es considerablemente menor comparado con los costos asociados al tratamiento con tecnologías convencionales. El tratamiento en línea no sólo es una alternativa económicamente viable, sino que además es una alternativa de solución al problema de septicidad tanto efectiva como eficientemente.



En la Tabla 5-2 se puede ver que el costo total diario asociado al tratamiento en línea es menor al tratamiento convencional. Además se puede ver que inyectar aire resulta bastante económico, pues no hay costos asociados al uso de químicos.

DRAUSY es un nuevo método que ha sido probado en sistemas de alcantarillados reales, arrojando como resultado, altas transferencias de oxígeno, resistencia al ambiente del alcantarillado y viabilidad económica. Este último factor no sólo se ve asociado a la reducción en los costos al transferir los agentes, sino que se ve reflejado en la posible simplificación de operación, construcción y tiempos de retención del agua residual en las plantas de tratamiento.

## **5.2 Transferencia de oxígeno a través de pequeñas caídas.**

El oxígeno disuelto contenido en el agua, es usado como indicador de la calidad del agua para su uso en la industria, en el consumo humano y en la vida acuática; es por esto muy importante mantener concentraciones adecuadas de OD con el fin de generar condiciones óptimas del fluido.

Diversas estructuras hidráulicas han sido usadas en diferentes sistemas con el fin de transferir oxígeno al agua. Las estructuras hidráulicas logran incrementar la cantidad de oxígeno disuelto, aún cuando el agua está en contacto con la estructura durante un período corto de tiempo. Esto se debe, a que el aire entra al flujo en forma de muchas burbujas, las cuales golpean fuertemente la superficie aguas abajo de la estructura e incrementan la superficie de área disponible para la transferencia de masa.

Según la ley de Henry, en la cual la cantidad de gas que se disuelve en una cantidad determinada de líquido es proporcional a la presión parcial del gas en el líquido, a temperatura constante; el incremento en la fracción de un mol de oxígeno en el aire causa un incremento en la concentración de saturación de OD en el agua, que corresponde a un aumento en la presión parcial de oxígeno en el aire. Este es el concepto con el que se da la transferencia de oxígeno a través de estructuras hidráulicas.

En los alcantarillados, estas estructuras se pueden ver representadas en pequeñas caídas (escalones) o vertederos de cresta delgada. El objetivo principal de implementar estas nuevas estructuras en los diseños de alcantarillados es incrementar la turbulencia en el agua para transferir oxígeno y mantener condiciones aeróbicas en el sistema que favorezcan la calidad del agua,

prevengan la emisión de olores desagradables a la superficie y la corrosión en las tuberías. Este tipo de estructuras busca ser implementadas en lugares donde no se puede evitar la significativa generación de sulfuros provenientes de procesos químicos, físicos y biológicos emitidos por los microorganismos que habitan en las aguas residuales.

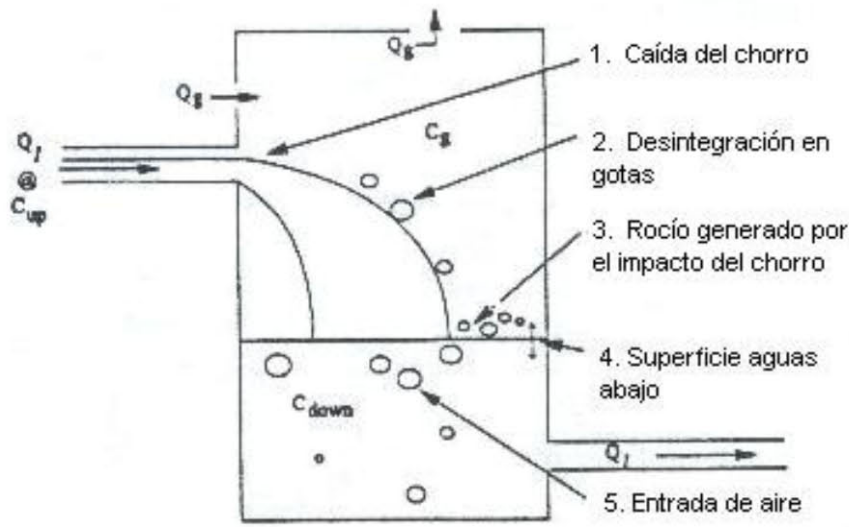
Los dos tipos de estructuras hidráulicas usadas en los sistemas de alcantarillado, consisten en pequeños descensos de diversas formas, que permiten el rompimiento del flujo y por lo tanto, la generación de burbujas de aire aguas abajo de la estructura.

El uso o no de estructuras de caída en los alcantarillados, depende principalmente de las concentraciones de OD aguas abajo de las estructuras y la presencia de sulfuros disueltos en el agua. En lugares del alcantarillado donde las condiciones favorecen la presencia de sulfuros, la turbulencia aumenta la transferencia de  $H_2S$  a la superficie. Estos puntos de turbulencia inducida por uniones, cambios bruscos de pendientes y de dirección, puntos de inspección, etc.; que pueden ser perjudiciales y promover la formación de la septicidad, a su vez pueden ser convertidos en puntos benéficos para transferir oxígeno mediante la implementación de un diseño apropiado de las estructuras hidráulicas.

### **5.2.1 Mecanismos de transferencia de masa en estructuras de caída**

Existen diversos mecanismos de transferencia de masa que son responsables de la volatilización de compuestos orgánicos volátiles ( $VOC_s$ ) en las estructuras de caída.

En la Figura 5-2 se puede ver los mecanismos de transferencia de masa en estructuras de caída.



**Figura 5-2 Mecanismos de transferencia de masa**

Estos mecanismos incluyen:

1. Chorro de superficie en caída libre
2. Gotas como consecuencia de la desintegración del chorro de agua
3. Rocío generado por el impacto del chorro con la superficie del flujo aguas abajo.
4. Superficie agitada aguas abajo
5. Entrada de burbujas de aire aguas abajo

Los procedimientos que involucran los diferentes mecanismos de transferencia de masa, varían en las estructuras hidráulicas dependiendo de la geometría del sistema y de la tasa de flujo del líquido. Para caudales muy pequeños, por ejemplo, se reduce el chorro de caída y por tanto se elimina la transferencia de oxígeno.

Los 5 procedimientos que se llevan a cabo en los mecanismos de transferencia de masa, muestran el paso consecutivo del agua a burbujas de aire impactando en la superficie y creando turbulencia suficiente para incrementar las concentraciones de OD aguas abajo de las estructuras.

## 5.2.2 Teoría de transferencia de masa GAS-LÍQUIDO

Esta teoría se basa en la suposición que la tasa de transferencia de masa agua – aire es controlada por un estado uniforme de difusión molecular a través de dos

películas delgadas, una gaseosa y otra líquida, separadas por una interfase gas-líquido<sup>6</sup>.

La tasa de transferencia de masa a través de la interfase gas-líquido se expresa de la siguiente manera:

$$R_v = K \left( C - \frac{C_g}{H_c} \right) A$$

Donde,

$R_v$  = Tasa de transferencia de masa en la interfase [M/T]

$K$  = Coeficiente de transferencia de masa [L/T]

$C$  = Concentración de masa disuelta en la fase líquida [M/L<sup>3</sup>]

$C_g$  = Concentración de masa en la fase gaseosa [M/L<sup>3</sup>]

$H_c$  = Coeficiente de la ley de Henry [L<sup>3</sup> LIQUIDO/L<sup>3</sup> GAS]

$A$  = Área de la superficie de la interfase gas-líquido [L<sup>2</sup>]

La cantidad total de oxígeno transferido por estructuras hidráulicas, como los son las caídas, se puede representar en la siguiente ecuación, que muestra la relación de déficit de oxígeno (Kim, 2001):

$$r = \frac{C_s - C_u}{C_s - C_d}$$

donde,

$C_s$  = Concentración de OD a la saturación

$C_d$  = Concentración de OD aguas arriba

$C_u$  = Concentración de OD aguas abajo

La relación del déficit varía de uno a infinito, siendo uno el valor para el cual no se logra transferir oxígeno, e infinito el valor para el cual la transferencia es completa. La ecuación que define el déficit, se relaciona con una eficiencia en la transferencia de oxígeno dada por:

$$E = \frac{C_d - C_u}{C_s - C_u} = 1 - \frac{1}{r}$$

Si durante la caída, no ocurre transferencia de oxígeno, el valor de la eficiencia será cero, mientras que si se logra una transferencia completa el valor de la eficiencia será uno.

Los valores de  $r$  y  $E$  dan una medida comparativa para la transferencia de oxígeno en diferentes estructuras. Tanto la eficiencia como el déficit dependen de cualidades del agua y de la geometría de la estructura.

<sup>6</sup> Rahmé, Z. G., "Predicting Oxygen uptake and VOC emissions at enclosed drop structures", Journal of Environmental Engineering, Vol. 123, N° 1, January, 1997.

### 5.2.3 Factores que afectan la eficiencia de la aireación

La transferencia de oxígeno que ocurre en las estructuras hidráulicas, depende de algunos parámetros químicos y físicos del agua, características de las estructuras y condiciones del flujo. Estos parámetros son: temperatura del agua, calidad del agua, profundidad aguas abajo de la estructura, altura de la caída y el flujo de descarga (Baylar, 2000).

#### 1. Temperatura

La eficiencia de la transferencia de oxígeno, es afectada por la temperatura del agua. Diversas investigaciones han demostrado la necesidad de usar un factor de corrección por temperatura en las ecuaciones que involucran la tasa de transferencia de oxígeno en estructuras hidráulicas. La ecuación usada, fue desarrollada por Gulliver (1990):

$$1 - E_{20} = (1 - E)^{1/f}$$

donde,

E = Eficiencia de la transferencia a la temperatura del agua medida

$E_{20}$  = Eficiencia de la transferencia a 20°C. (Temperatura estándar)

f = Exponente descrito por:

$$f = 1.0 + 0.02103 (T - 20) + 8.261 \times 10^{-5} (T - 20)^2$$

#### 2. Calidad del agua

La presencia de agentes activos en la superficie, sustancias orgánicas y los sólidos suspendidos en el agua, son responsables de afectar el proceso de aireación.

Los agentes activos presentes en la superficie, particularmente aparecen para modificar el proceso por medio de la formación de películas inhibitoras para los procesos de difusión en la interfase agua – aire y además, afectan las características hidrodinámicas del flujo.

De igual manera, las concentraciones variables de nitratos y sodios en el agua, afecta la relación del déficit de aireación y la eficiencia de la tasa. El efecto de la calidad del agua, se tiene en cuenta usando un factor de corrección por calidad en las ecuaciones que involucran la tasa de transferencia.

#### 3. Profundidad aguas abajo de la estructura

El tiempo de residencia de las burbujas de aire que entran al cuerpo de agua, afecta directamente el proceso de transferencia de masa. El tiempo de residencia está relacionado con la trayectoria del flujo que alcanzan las burbujas de aire y con la altura de la caída de la estructura, de esta manera las burbujas penetran

profundidades mayores o menores afectando directamente la eficiencia de la aireación. La eficiencia, generalmente se incrementa ante un aumento en la profundidad del flujo aguas abajo de la estructura.

Para cada combinación de caudal y altura de caída, existe una aproximación de la profundidad máxima aguas abajo, para la cual las burbujas de aire penetran en el flujo obteniendo una eficiencia máxima de transferencia de oxígeno. Avery y Novak (1978) encontraron que la profundidad óptima para garantizar la eficiencia máxima es aproximadamente 0.6 veces la altura de la caída de la estructura.

#### 4. Altura de la Caída

La transferencia de oxígeno en estructuras, depende directamente de la altura de la caída. Inicialmente, la superficie de agua aguas arriba de la estructura es muy suave y la entrada de burbujas de aire, toma lugar sólo en la superficie. A medida que la altura de la caída se incrementa, el flujo se vuelve menos suave y comienza a oscilar durante la caída permitiendo transferir más aire entrando al volumen de agua aguas abajo. Con el incremento de altura, la napa de agua se rompe en forma de burbujas de aire que penetran en el flujo e incrementan la superficie de contacto agua – aire.

#### 5. Caudal de descarga

La eficiencia de la aireación, varía según el caudal de descarga del fluido. Para caudales muy grandes, la eficiencia tiende a disminuir y de igual manera ocurre lo contrario. Para caudales muy bajos, se observa un rompimiento de la napa a medida que la altura de la caída se incrementa. Esto reduce la profundidad de penetración y el tiempo de contacto de las burbujas aguas abajo, reduciendo a su vez la eficiencia de la aireación.

#### 6. Déficit de Oxígeno

La disponibilidad de OD en el agua es uno de los factores más relevantes en los procesos de transformación que se desarrollan en las aguas residuales. Diferentes investigaciones han demostrado que la tasa de remoción de materia orgánica es mayor bajo condiciones aeróbicas que bajo condiciones anóxicas o anaeróbicas.

Como conclusión de los parámetros más importantes que afectan la eficiencia en la transferencia de oxígeno por medio de estructuras hidráulicas, se tiene que la altura de la caída es el factor más relevante que influencia la eficiencia de la aireación; una altura mayor de caída, permite mayor penetración de las burbujas de aire en el flujo aguas abajo y además permite mayor tiempo de contacto. Estos dos factores causan un incremento significativo en la eficiencia. De igual manera,

la profundidad aguas abajo se ve relacionado con la altura de la caída, donde la profundidad óptima para garantizar una eficiencia máxima es aproximadamente 0.6 veces la altura de la caída de la estructura.

## 5.2.4 Caídas libres

Las caídas libres se implementan en los alcantarillados por medio de pequeños escalones que logren dividir el flujo y aumentar la turbulencia logrando transferir oxígeno aguas abajo.

Diversos investigadores han desarrollado ecuaciones que relacionan el déficit de oxígeno con la altura de las caídas. Es así como, Pomeroy y Lafy (1977), obtuvieron la siguiente relación:

$$r = e^{K_H H}$$

donde,

$K_H$  = Coeficiente de aireación de la caída [0.41 m<sup>-1</sup>, Pomeroy, 1977]

H = Pérdida de cabeza en la caída [m]

Matos (1991), determinó la siguiente relación para alcantarillados con diámetros pequeños (diámetros de 0.2 m y alturas de caída entre 0.10 y 1.75 m):

$$r = \frac{1}{e^{(0.125 H^2 - 0.45 H)}}$$

La selección de un valor para el coeficiente de aireación es complicado, ya que es influenciado por varios factores tales como, la altura de la caída, temperatura del agua, calidad del agua, déficit de oxígeno aguas abajo de la caída, tasa de flujo, régimen del flujo, configuración geométrica de la estructura y profundidad del flujo aguas abajo.

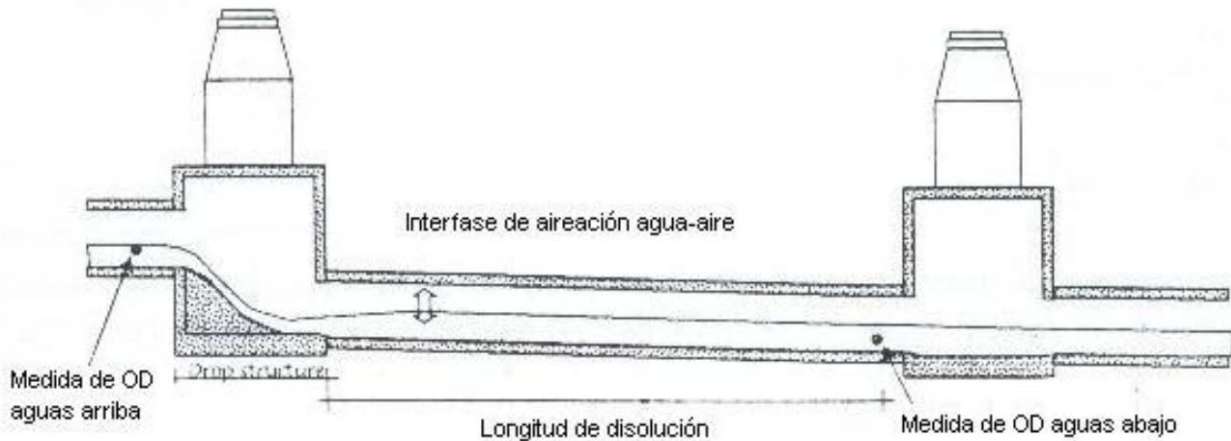
Se han desarrollado diferentes tipos de caídas que pueden ser instaladas dentro de los alcantarillados. Las tres más comunes son conocidas como: caídas libres verticales, rampas en pendiente y backdrops.

En la Figura 5-3 se puede ver los tres tipos de caídas.



**Figura 5-3 Tipos de caída típicas en alcantarillados (Almeida, 1999)**

Es usual instalar estas estructuras en lugares que tengan fácil acceso dentro los alcantarillados, por ejemplo, en cámaras de inspección. Inclinaciones más o menos pronunciadas, son asociadas a las caídas. Por lo general después de la caída, se instalan tuberías con alguna pendiente, con el fin de incrementar la turbulencia y por tanto cumplir con los objetivos de aireación del flujo. El efecto que estas estructuras tienen aguas abajo es generar un resalto hidráulico como resultado de un cambio en el régimen de flujo.



**Figura 5-4 Instalación típica de las estructuras hidráulicas (Almeida, 1999)**

Este tipo de estructuras, deben disponerse en el alcantarillado a distancias que garanticen la mezcla efectiva del agua con el aire, es decir que permita desarrollar el resalto hidráulico completamente.

La implementación de estructuras hidráulicas en los alcantarillados resulta ser un método económico de airear el flujo, comparado con otras metodologías, ya que



las caídas no requieren más energía que las que ellas mismas generan en el sistema.

El régimen de flujo y la turbulencia generada, varía dependiendo del tipo de caídas, esto se debe a que la configuración estructural es el factor más determinante de aireación que tiene una estructura hidráulica.

Las estructuras más efectivas para transferir aire al flujo son las caídas libres verticales, han demostrado ser las estructuras que más turbulencia generan, transfiriendo mayor cantidad de oxígeno y por lo tanto manteniendo condiciones aeróbicas en el agua. Esto se debe a que el chorro que golpea la superficie del flujo aguas abajo es más fuerte por la velocidad que alcanza en la caída libre y esto hace que la penetración de las burbujas de airea sea mayor.

### 5.2.5 Vertederos de cresta delgada

Los vertederos de cresta delgada, son otras estructuras eficientes para transferir oxígeno al agua a partir de la generación de turbulencia en el flujo.

La ecuación que define la eficiencia de la aireación en este tipo de estructuras se representa de la siguiente manera:

$$E_{20} = 1 - \left[ \frac{1}{1 + 0.32 * 10^{-5} Fr^{2.08} R^{0.63} \left( 1 - 0.6 \exp \left( -0.37 \frac{H}{h} \right) \right)} \right]^{1.115}$$

donde,

R = Número de Reynolds en la napa:

$$R = \frac{q}{\nu}$$

q = Caudal por unidad de ancho

$\nu$  = Viscosidad cinemática

Fr = Número de Froude en la napa:

$$Fr = \left( \frac{8gh^3}{q^2} \right)^{0.25}$$

g = Aceleración de la gravedad

h = Pérdida de cabeza en la estructura

H = Profundidad del flujo aguas abajo de la estructura

$E_{20}$  = Eficiencia de la transferencia a 20°C. (Temperatura estándar)

Los factores más importantes que afectan la aireación en este tipo de estructuras son la altura de la caída, la profundidad aguas abajo y la descarga por unidad de ancho. La eficiencia de la aireación es inversamente proporcional a la altura de la caída y al caudal de descarga.

El tiempo de residencia de la entrada de las burbujas de aire en el agua afecta directamente la transferencia de masa de oxígeno y esta relacionado con el flujo de las burbujas y con la profundidad de penetración en el agua que las recibe aguas abajo. Si la profundidad del flujo aguas abajo es menor a la profundidad de penetración de las burbujas, estas últimas cambian su flujo normal y de esta manera se limita la eficiencia en la aireación.

De igual manera, la sección transversal del vertedero tiene gran influencia sobre la transferencia de oxígeno, ya que la geometría del vertedero determina el comportamiento del chorro de agua. Además, altera la cantidad de aire que entra al flujo y el tiempo de contacto de las burbujas con la napa y con el flujo aguas abajo (Baylar, 2000).

Se han determinado relaciones empíricas para estimar la profundidad máxima de penetración de las burbujas y la cantidad de aire que se puede transferir según el tipo de vertedero. Para el caso de vertederos de cresta delgada (90°), las relaciones están dadas de la siguiente forma:

$$Dp = \exp\left(-0.011Q^{-0.800}H^{0.815}Je^{0.269}\right)$$

*Coef. correlación = 0.96*

donde,

Dp: Es la profundidad de penetración (m)

H: Altura de caída (m)

Je: Expansión del chorro de agua en el punto de impacto (m)

Q: Caudal de descarga (m<sup>3</sup>/s)

$$Q_A = 0.352Q^{0.774}H^{1.235}$$

*Coef. correlación = 0.99*

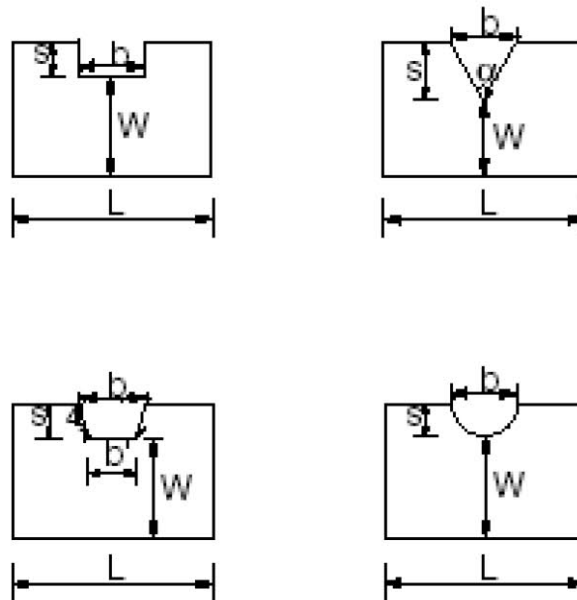
donde,

Q<sub>A</sub>: Tasa de entrada de aire (m<sup>3</sup>/s)

H: Altura de caída (m)

Q: Caudal de descarga (m<sup>3</sup>/s)

En la Figura 5-5 se pueden ver las diferentes secciones transversales que han sido investigadas en los vertederos para transferir oxígeno al flujo.

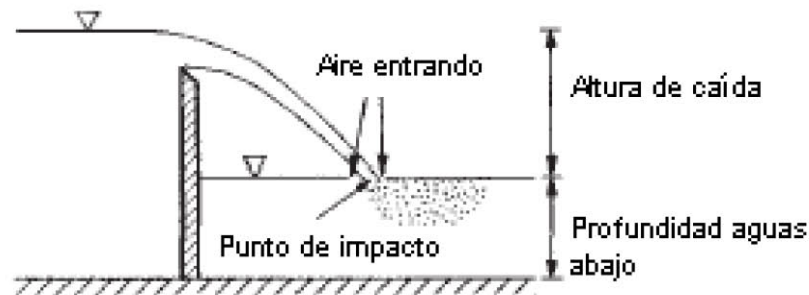


**Figura 5-5 Secciones transversales de vertederos (Emiroglu, 2003)**

La forma del vertedero determina el nivel de transferencia de aire; vertederos rectangulares tienen eficiencias bajas, vertederos trapezoidales y semicirculares tienen comportamientos similares y vertederos de sección transversal triangular tienen eficiencias altas de transferencia de oxígeno, esto por la forma que desarrolla la napa por la geometría del vertedero. La sección triangular permite que se genere mayor mezcla entre el aire que entra y la turbulencia contribuyendo con un mayor intercambio de oxígeno.

La forma de la napa es única para cada tipo de vertedero ya que es función de la geometría; esta es muy importante en el intercambio de oxígeno pues este proceso depende fuertemente de la forma de la napa.

El flujo que está sobre el embalse, antes de desintegrarse en burbujas es considerado como flujo libre. En la Figura 5-6 se puede ver una representación del flujo cayendo sobre el vertedero y golpeando subsecuentemente en la superficie aguas abajo.



**Figura 5-7 Napa libre sobre el vertedero**

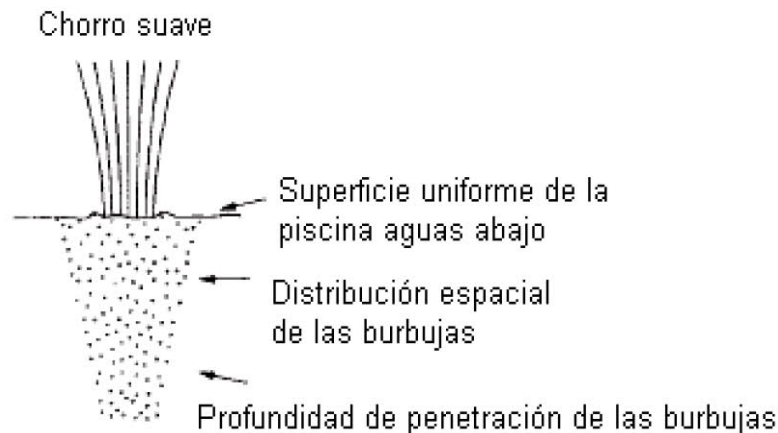
Normalmente, la mayor cantidad de oxígeno transferido se da durante el rompimiento del flujo y en la colisión subsecuente con la superficie de agua aguas abajo. El aire que entra al flujo durante el impacto y la turbulencia generada contribuyen al intercambio de oxígeno. Adicionalmente, la profundidad del flujo aguas abajo es relevante en el proceso de turbulencia, niveles de presión y tiempo de residencia de las burbujas.

### **5.2.5.1 Mecanismos de entrada de aire**

El chorro de agua que se sumerge en la piscina de agua aguas abajo del vertedero, causa la entrada de burbujas de aire. Si la velocidad de impacto del chorro es superior a cierto valor crítico, ocurre aireación en el flujo. El valor crítico de la velocidad ha sido observado en diferentes estudios y se ha determinado que debe ser alrededor de 1 m/s.

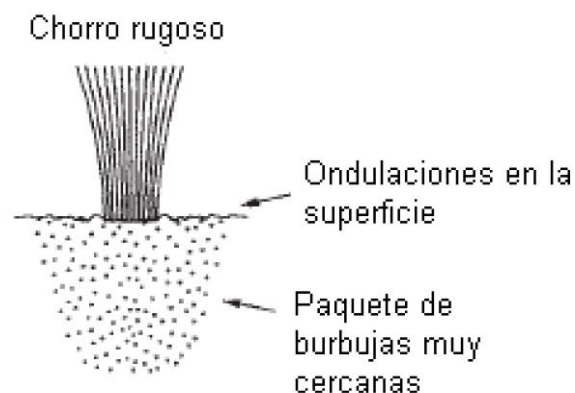
El proceso de entrada de aire al flujo, se puede dividir en 4 mecanismos básicos. Estos son:

1. Suave (Uniforme), chorros sólidos: El suministro de aire ocurre como una capa delgada que rodea el chorro y lo lleva hasta el agua antes del impacto, de esta manera la capacidad de la entrada de aire es limitada. El flujo en la piscina que recibe el impacto es tranquilo y no se presenta mayor turbulencia.



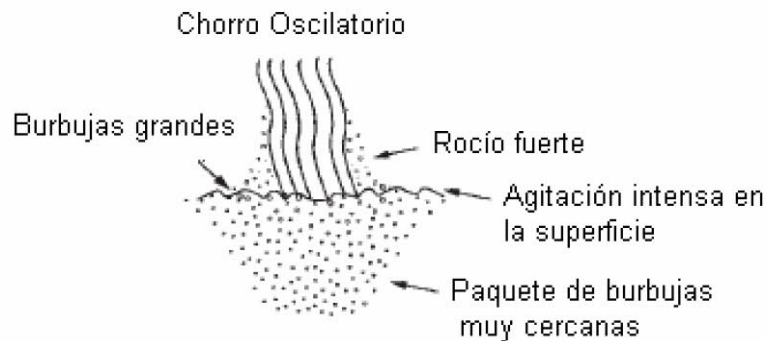
**Figura 5-8 Mecanismos de entrada de aire: Chorro Uniforme (Emiroglu, 2003)**

2. Rugoso (no uniforme), chorros sólidos: El suministro de aire surge como paquetes pequeños de aire atrapados entre la superficie rugosa del chorro y la superficie de la piscina que recibe el impacto. En el momento del impacto, el chorro produce ondulaciones en la superficie de la piscina. Comparado con el mecanismo anterior, en este las burbujas de aire tienen menos profundidad de penetración pero incrementan la tasa de entrada de aire ya que las burbujas se hacen más densas.



**Figura 5-9 Mecanismos de entrada de aire: Chorro no uniforme (Emiroglu, 2003)**

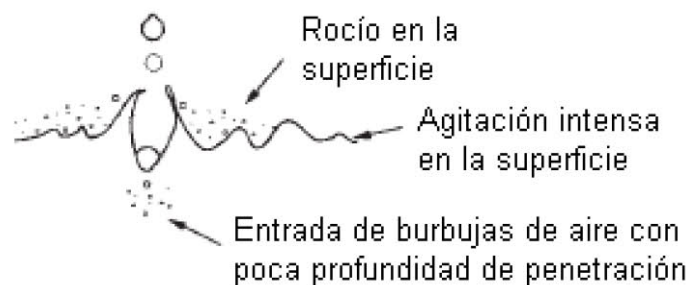
3. Oscilatorio: El suministro de aire se da por paquetes de aire atrapados entre el chorro ondulatorio y la superficie de la piscina. La superficie de la piscina es agitada considerablemente y el aire entra en forma de rocío y de roller en el flujo aguas abajo. Grandes paquetes de aire son transportados desde la superficie dentro del agua hasta que se rompen causando turbulencia.



**Figura 5-10 Mecanismos de entrada de aire: Chorro oscilatorio (Emiroglu, 2003)**

4. Desintegrado: La superficie de la piscina es intensamente agitada y la entrada de aire se genera por la formación de rollers en la superficie y por la sumersión de las bolsas de aire (fragmentos del chorro golpeando la superficie). Las burbujas que se forman son más grandes y alcanzan profundidades menores, casi superficiales. La tasa de transferencia de aire y la profundidad de penetración de las burbujas en este mecanismo se reducen por la pérdida de energía que se genera durante la caída.

Gotas discontinuas de agua



**Figura 5-11 Mecanismos de entrada de aire. Chorro desintegrado (Emiroglu, 2003)**

### **5.3 Aireación por medio de Resaltos Hidráulicos**

Otro método por el cual se puede transferir oxígeno a los alcantarillados son los resaltos hidráulicos.

El resalto hidráulico es un fenómeno que se caracteriza por generar un ascenso brusco del nivel de agua en un canal abierto o un conducto cerrado, el cual se

genera por un cambio en el régimen del flujo en donde pasa de un estado supercrítico a un estado subcrítico.

Este fenómeno físico, genera grandes velocidades y presiones en el flujo. Logra transferir oxígeno al agua ya que permite el rompimiento de la superficie libre del flujo y forma un roller con atrapamiento de burbujas de aire.

El resalto hidráulico se presenta en compañía de alta turbulencia y energía de disipación. Las características más comunes en un resalto hidráulico son:

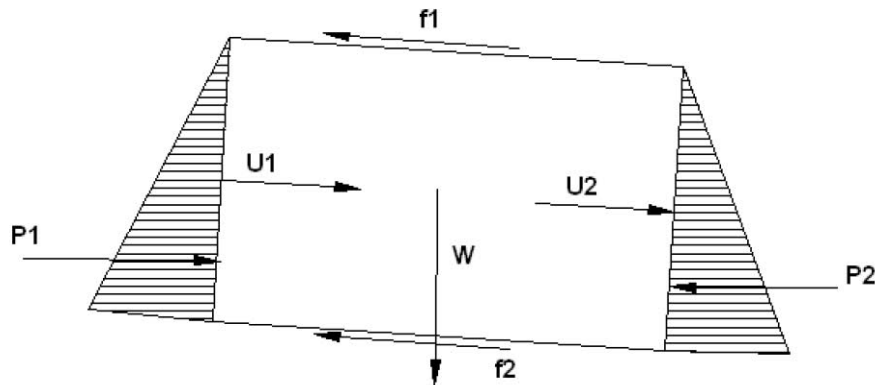
- Flujo altamente turbulento
- Generación de ondas aguas abajo del resalto
- Transferencia de oxígeno
- Disipación de energía ocasionada por la alta turbulencia
- Potencial erosivo
- Generación de spray y sonido
- Variación del régimen de flujo en distancias cortas
- Distribución no hidrostática de presiones

Algunas de las aplicaciones del resalto hidráulico son las siguientes:

- Disipar energía en el flujo sobre embalses, y otras estructuras hidráulicas con el fin de prevenir la socavación aguas debajo de estas estructuras.
- Mantener altos niveles aguas abajo en los canales para propósitos de distribución de agua.
- Mezclar efectivamente los químicos adicionados al agua para tratar las aguas residuales.
- Airear flujos y eliminar el cloro de las aguas residuales.

La ecuación que rige el comportamiento físico del fenómeno conocido como resalto hidráulico, es la ecuación de conservación del momentum. En este análisis se supone que la pendiente del canal o el conducto es cero, además se desprecia la fricción entre el volumen de control con el fondo y la superficie del conducto.

De esta manera se tiene:



**Figura 5-12. Esquema de Ecuación de Momentum**

Donde la ecuación de momentum queda de la siguiente forma:

$$P_1 - P_2 = \beta \rho Q (U_2 - U_1) \quad \text{Ecuación de Momentum}$$

En el resalto hidráulico, la profundidad aguas arriba  $h_1$ , es conocida como la profundidad inicial. La profundidad aguas abajo del resalto  $h_2$ , es conocida como la profundidad subsecuente del resalto.

Los diferentes tipos de resaltos que ocurren en la naturaleza, dependen del número de Froude y de la geometría del conducto en la que se transporta el agua.

### 5.3.1 Resaltos hidráulicos en tuberías circulares

Este tipo de resaltos se presenta comúnmente en tuberías de alcantarillado, aliviaderos en túnel, y sistemas de drenaje. Estos resaltos presentan diferencias con los resaltos clásicos en canales abiertos, en términos de los efectos que se generan debido a la forma de los conductos y a la interrupción de flujo de aire asociado a las presiones internas de la tubería.

En secciones circulares, el resalto depende del diámetro del conducto y del número de Froude que gobierna el flujo (Gargajo y Hager, 2002).

Al igual que en los resaltos hidráulicos clásicos, la ecuación de conservación de momentum es la que permite la definición de la profundidad secuente en secciones no rectangulares. Las posibles complicaciones que se pueden tener con la geometría en los conductos circulares, son eliminadas aproximando el área de la sección transversal  $A$  y la fuerza de presión hidrostática  $P$  de la siguiente manera (Stahi y Hager, 1999):



$$\frac{A}{D^2} = y^{1.5} \quad [1]$$

$$\frac{P}{\rho g D^3} = \frac{1}{2} y^{2.5} \quad [2]$$

donde,

$y = h/D$  es la relación de llenado ( $0 < y < 1$ )

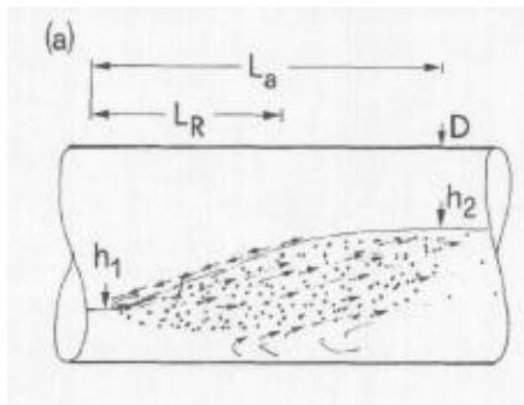
$h$  = Profundidad de flujo

$D$  = Diámetro de la tubería

$\rho$  = Densidad del fluido

$g$  = Fuerza gravitacional

En la Figura 5-13 se puede ver la formación de un resalto hidráulico dentro de una tubería circular.  $L_R$  es la longitud del resalto,  $L_a$  es la longitud de aireación,  $D$  es el diámetro del conducto,  $h_1$  es la profundidad inicial y  $h_2$  es la profundidad seciente.



**Figura 5-13 Resalto hidráulico en una tubería circular (Stahi y Hager, 1999)**

En 1999, Helmut Stahi y Willi Hager realizaron experimentos en tuberías circulares con el fin de determinar las principales características del flujo en los resaltos hidráulicos que se presentan en este tipo de conductos.

Con estos ensayos se encontró que para valores de  $y$  comprendidos entre 0.20 y 0.90, las ecuaciones 1 y 2 presentan errores mínimos. Sin embargo, para obtener resultados sencillos a partir del experimento y poder generar conclusiones concisas, este error fue aceptado. De esta manera, la ecuación de conservación de momentum para las secciones aguas arriba y aguas abajo del resalto es la siguiente:

$$\frac{1}{2} y_1^{2.5} + \frac{Q^2}{g D^5 y_1^{1.5}} = \frac{1}{2} y_2^{2.5} + \frac{Q^2}{g D^5 y_2^{1.5}} \quad [3] \quad \text{Donde } Q \text{ es el caudal de descarga}$$

El número de Froude definido para secciones circulares es el siguiente:

$$F_1 = \frac{Q}{\sqrt{gDh_1^4}} \quad [4]$$

Tomando la ecuación 3 y 4, y  $Y = h_2/h_1$  como la relación de las profundidades inicial y secuente, se obtiene:

$$1 + 2F_1^2 = y^{2.5} + 2F_1y^{-1.5} \quad [5]$$

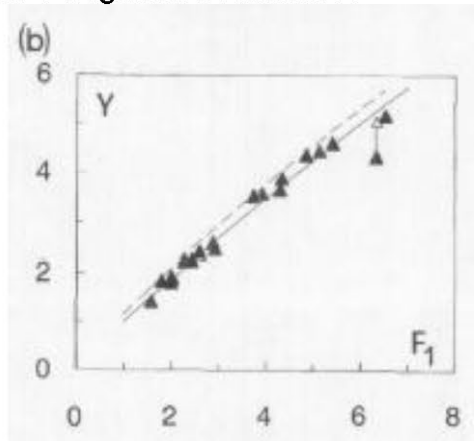
Para números de Froude  $F_1 > 2$ :

$$y = 1.16 F_1^{0.85} \quad [6]$$

Teniendo en cuenta los efectos de la viscosidad sobre la relación de la profundidad secuente se obtiene:

$$y = 1.00 F_1^{0.90} \quad [7]$$

En la Figura 5-14 se puede ver la relación de la profundidad secuente  $Y$  ( $F_1$ ). La línea punteada representa la variación de  $Y$  según la ecuación 6, y la línea sólida representa la variación de  $Y$  según la ecuación 7.



**Figura 5-14 Relación de la profundidad secuente  $Y$  ( $F_1$ ) (Stahi y Hager, 1999)**

En la Figura 5-15 se puede ver la cantidad de aire que logra transferirse con la generación de resaltos hidráulicos dentro de tuberías circulares, dependiendo del número de Froude. En las figuras *b-d* se puede observar la longitud de aireación que alcanza a inducir el resalto hidráulico.

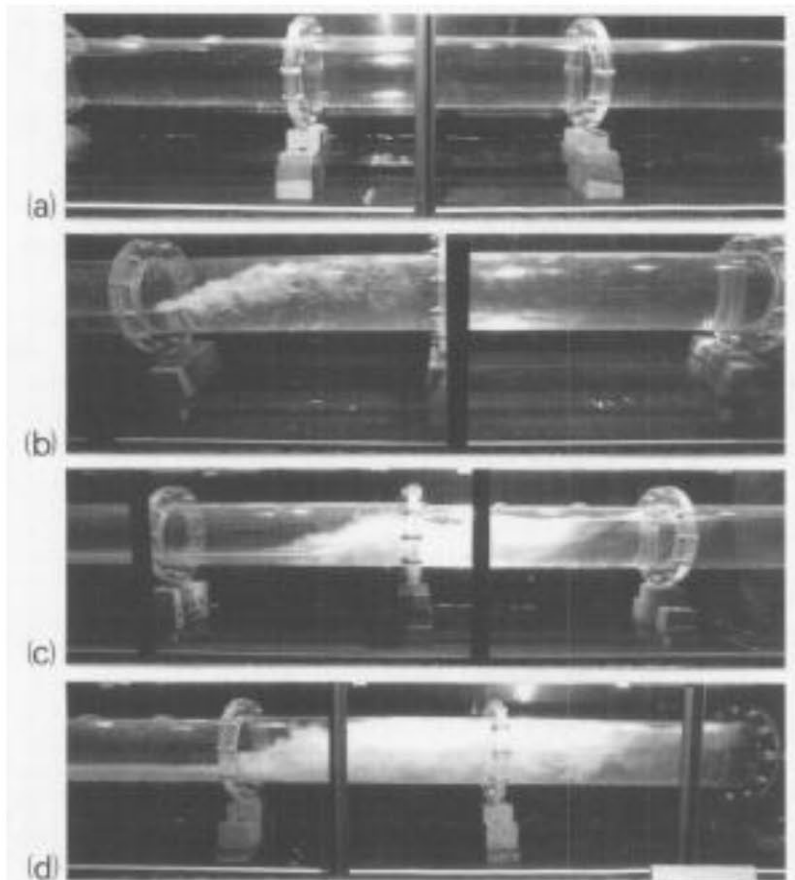
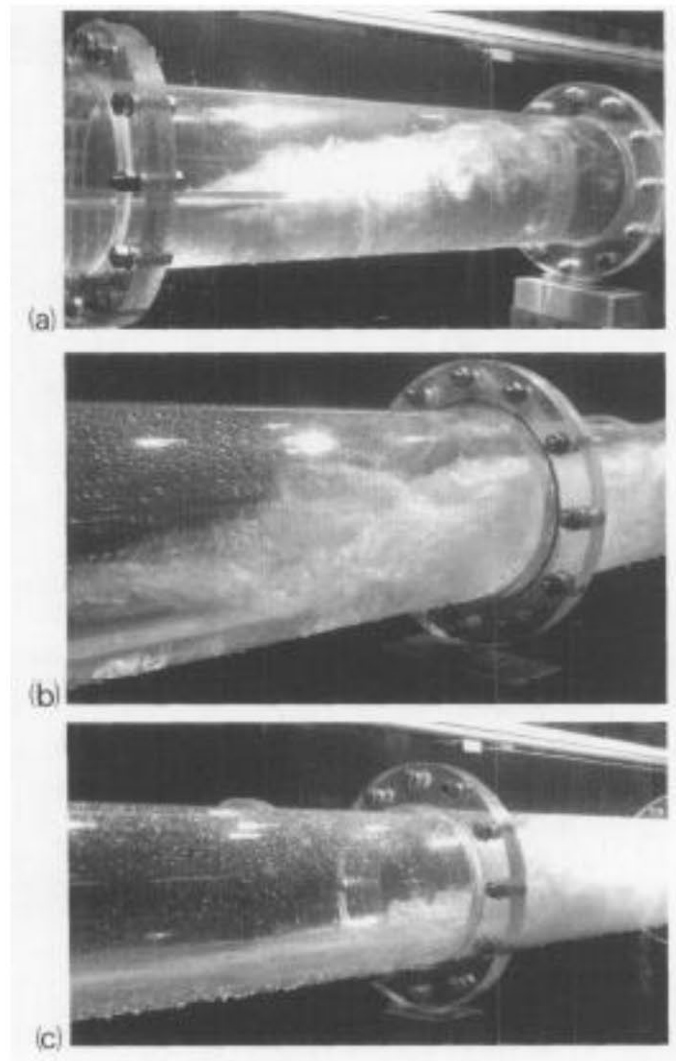


Figura 5-15 Vista lateral de resaltos hidráulicos con números de Froude  $F_1=1.1$  (a), 2.3 (b), 4.1 (c), y 6.5 (d). (Stahi y Hager, 1999)

En la Figura 5-16 se puede ver la longitud de aireación que alcanza a tener un resalto en tuberías circulares para números de Froude 2.3, 4.1 y 6.5. La longitud de aireación se define como la distancia comprendida entre el final del extremo aguas arriba del resalto y el punto aguas abajo donde las burbujas formadas durante el fenómeno, dejan el flujo. Durante esta longitud se logra transferir oxígeno al agua en distancias cortas.

La cantidad de aire que se puede transferir al agua depende de las burbujas de aire producidas en el resalto, las cuales a su vez dependen de la turbulencia que se genera durante el fenómeno. Para los resaltos de la Figura 5-16, los números de Froude son altos y por tanto el resalto que se genera es oscilante, es decir, se crean ondas en la superficie que oscilan sin periodicidad. Los resaltos oscilantes alcanzan a transferir gran cantidad de oxígeno al flujo.



**Figura 5-16 Resaltos hidráulicos con números de Froude  $F_1=2.3$  (a), 4.1 (b), y 6.5 (c)**

### 5.3.1.1 Tipos de resalto

La forma de los resaltos varía según el número de Froude. En el experimento presentado por Stahi y Hager, la apariencia observada de los resaltos fue la siguiente:

$F_1 \geq 1.5$  Re salto ondular (resalto suave)

$1.5 \leq F_1 \leq 2$  Las ondulacion es se rompen aguas arriba

$F_1 > 2$  Las ondulacion es desaparece n y ocurriendo tipos de resaltos :

- Para relaciones de llenado  $h_1/D < 1.3$ , el ancho a lo largo del resalto disminuye y se forman alas laterales al final del salto. Se inducen zonas laterales de recirculación.
- Para relaciones de llenado  $h_1/D > 1.3$ , el ancho a lo largo del resalto es constante, y el tipo de salto es similar a un resalto hidráulico clásico.

## **6 POSIBLES ESTRUCTURAS A IMPLEMENTAR EN LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO PARA AIREAR EL FLUJO**

Ante los muchos problemas que se generan en las tuberías de alcantarillado generados por los diferentes procesos que en ellos surgen, se necesario plantear soluciones alternativas que contribuyan con una mejora en la calidad del agua y que alarguen la vida útil de los sistemas de alcantarillado y de las plantas de tratamiento.

Estas nuevas alternativas deben tener en cuenta diferentes parámetros que afectan el diseño y la operación de los sistemas. Algunos de estos parámetros son: régimen de flujo (determinado por la pendiente y el diámetro de las tuberías que conforman el sistema), relación profundidad/diámetro, tiempo de residencia, velocidad del flujo, contenido de OD, temperatura del agua y nivel de PH.

De igual manera, es importante predecir los lugares dentro de las tuberías donde se presentan condiciones anaeróbicas, la calidad de las aguas residuales y el volumen que normalmente se transporta por las tuberías.

### **6.1 Ventajas y Desventajas de airear el flujo en alcantarillados**

Como se ha explicado a lo largo del documento, en los sistemas de alcantarillado se pueden presentar condiciones aeróbicas o anaeróbicas dependiendo de cómo se desarrollan los diferentes procesos que tienen lugar en estos sistemas y de la conformación de las aguas residuales.

Ambas condiciones presentan ventajas y desventajas frente a la operación y diseño de los sistemas de alcantarillado.

En la Tabla 6-1 se puede ver un cuadro comparativo entre las dos condiciones, en cada una de ellas se destacan las ventajas y desventajas que se generan en el sistema por el desarrollo de estas condiciones.

TIPO DE CONDICION EN EL SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Aeróbicas</b>	Reducción de Olores	Exceso de OD genera dióxido de carbono en la atmósfera del alcantarillado
	Reducción de Sabores	
	Prevención de Septicidad	
	Bajos niveles de DBO	Ante grandes cantidades de OD, se forman lodos de mayor tamaño que se hacen más difíciles de remover
	Mejor Calidad del agua	
	Menos Toxicidad	
Menor formación de agentes corrosivos		

<b>Anaeróbicas</b>	Favorecen el crecimiento de biopelículas, la cuales afectan el proceso de degradación de la materia orgánica	Emisión de sustancias volátiles a la superficie
		Formación de H <sub>2</sub> S
		Corrosión en las redes del alcantarillado
		Generación de olores fuertes que pueden ser letales

**Tabla 6-1 Ventajas – Desventajas de condiciones aeróbicas y anaeróbicas en los sistemas de alcantarillado**

De igual manera, cada uno de los métodos descritos en el documento, presentan desventajas y ventajas. Unos son efectivos en distancias cortas, otros a lo largo de toda la tubería, algunos son costosos, otros son difíciles de lograr, etc.

En la Tabla 6-2 se puede ver un cuadro comparativo entre los diferentes métodos para airear el flujo en alcantarillados con el fin de prevenir la septicidad y de mejorar la calidad del agua en estos sistemas. En este cuadro se observa las limitaciones y beneficios de cada método.

MÉTODO PARA AIREAR EL FLUJO	VENTAJAS	DESVENTAJAS	Altos contenidos de OD forman lodos de tamaño considerable	Es recomendable mantener niveles de oxígeno cercanos a 1 mg/l, el cual garantiza prevención en la corrosión de las tuberías
<b>Mangueras Perforadas. Método DRAUSY</b>	Inyectan agentes de manera continua y uniforme a lo largo de toda la manguera Da un tratamiento en línea al agua residual Costos moderados Altamente efectivo Han sido probadas en alcantarillados reales	El costo del material es alto, pero comparado con el efecto que las mangueras tienen sobre el agua, no es muy significativo El uso de químicos puede tener efectos negativos sobre los procesos en las plantas de tratamiento (tratamiento de lodos)		
<b>Estructuras Hidráulicas</b>	Transfiere oxígeno generando turbulencia en la superficie aguas abajo Altamente efectivo Genera resaltos hidráulicos Aumentan la eficiencia de la aireación Efectivo en distancias cortas	No es útil en tuberías fluyendo totalmente llenas (presurizadas) Se limita al tamaño de las tuberías (diámetro) Airear el flujo sólo en el punto donde se disponen las estructuras		
<b>Resaltos Hidráulicos</b>	Genera turbulencia por medio de la adición de burbujas de aire Varía el régimen del flujo en distancias cortas Altamente efectivo Bajos costos	Se ve limitado por el tamaño (diámetro) y longitud de las tuberías que conforman el sistema de alcantarillado Depende de características variables del flujo		

**Tabla 6-2 Ventajas – Desventajas de los diferentes métodos para airear el flujo en alcantarillados**

Sin duda alguna, la mayor ventaja de airear el flujo en alcantarillados, es el efecto que se genera sobre la calidad del agua que finalmente llega a las plantas de tratamiento y que a su vez afecta de manera directa la construcción y operación de las últimas. Mediante el tratamiento previo al agua, se puede llegar a reducir de manera significativa la infraestructura de las plantas de tratamiento.

Otra ventaja de la aireación en alcantarillados es la posible reutilización que se le puede dar al agua residual (por ejemplo, en sistemas de riego). Además de los beneficios ya nombrados, al airear el flujo durante su transporte en sistemas de alcantarillado, se evita la producción de olores desagradables que son emitidos al ambiente.

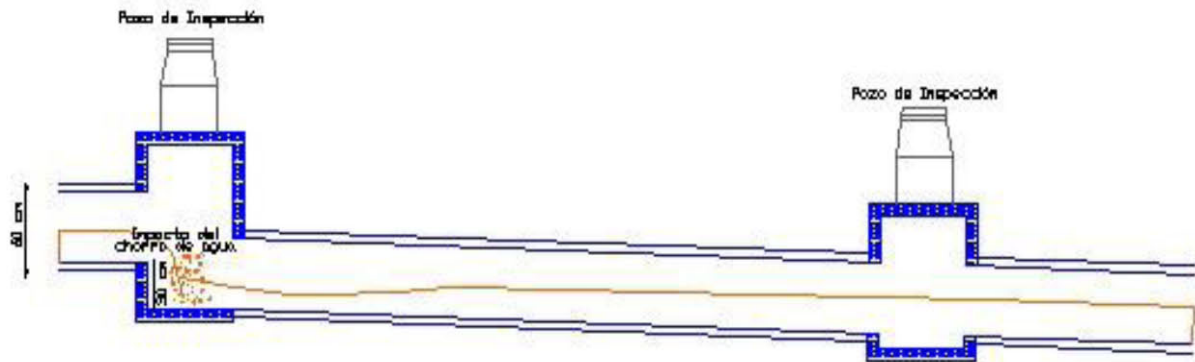
## **6.2 Estructuras a Implementar en los Alcantarillados**

Ante los diferentes problemas que se presentan en los alcantarillados, como consecuencia de condiciones anaeróbicas desarrolladas dentro de estos sistemas; surge la necesidad de presentar nuevas alternativas de diseño que aireen el flujo para mejorar la calidad del agua y los problemas asociados a la producción de ácido sulfhídrico en la atmósfera del alcantarillado.

Algunas soluciones de diseño, son el uso de estructuras dentro de los sistemas de alcantarillado ó el uso de mangueras perforadas. Con las últimas se puede inyectar oxígeno al flujo mediante un compresor que puede ser instalado en las cámaras de inspección.

En las siguientes figuras se muestra de manera esquemática posibles nuevos diseños. Las tuberías para las cuales se instalan las estructuras son tuberías con un diámetro mínimo de 600 mm. En los primeros dos tipos de caída, la altura de descenso es inferior al diámetro dispuesto, mientras que para la última es mayor. En cuanto al esquema de diseño haciendo uso de las mangueras perforadas, la longitud de la manguera, tamaño de los huecos y presión de aplicación depende del agente que se desee inyectar según se vio en la Tabla 5-1.

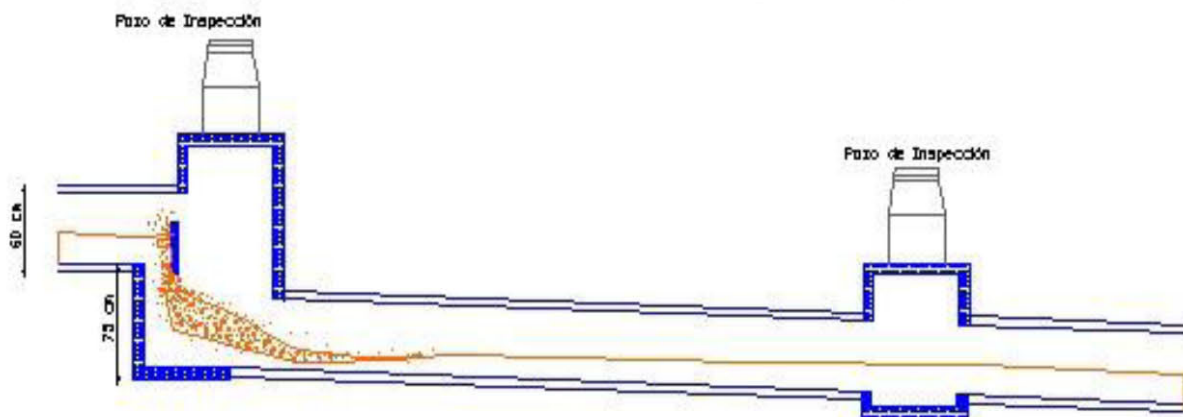




Estructura Hidráulica. Tipo Caída Libre

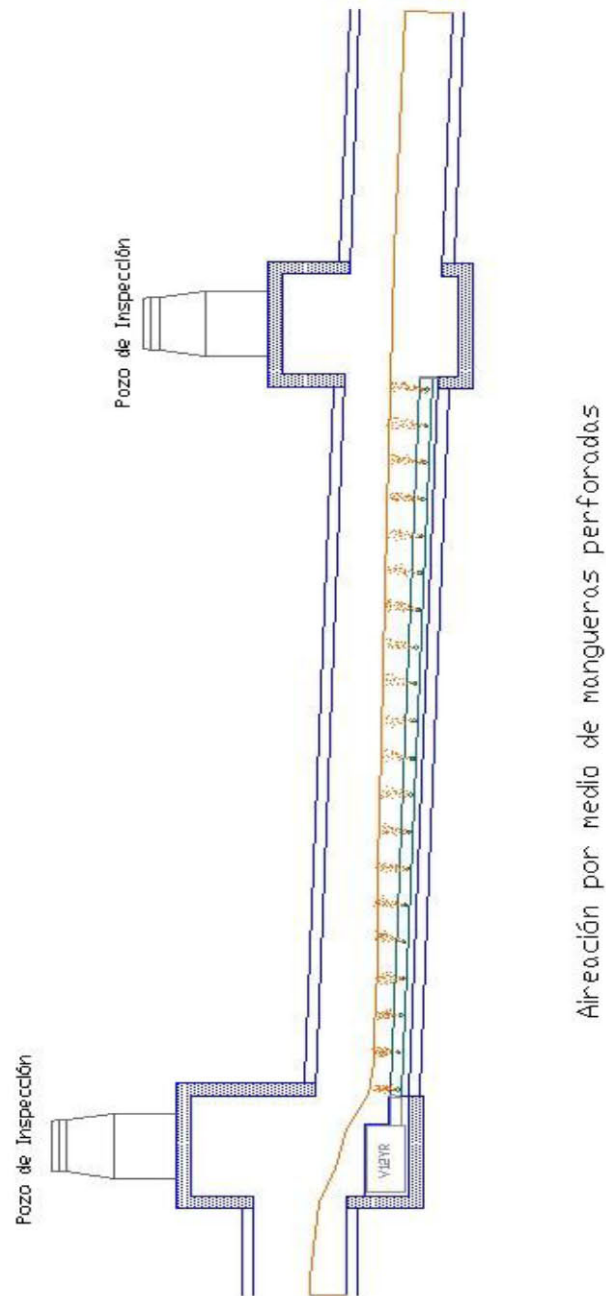


Estructura Hidráulica. Tipo Rampa



Estructura Hidráulica. Tipo Backdrop

**Figura 6-1 Estructuras Hidráulicas tipo Backdrop**



**Figura 6-2 Mangueras Perforadas para airear el flujo**

## **7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

- 1) Aprovechar los sistemas de alcantarillado como sistemas para dar un tratamiento previo al agua mediante la generación de condiciones aeróbicas presenta varias ventajas entre las que se destaca una reducción de costos de construcción y operación de las plantas de tratamiento.
- 2) Conocer a profundidad los procesos que ocurren dentro de los subsistemas que conforman los sistemas de alcantarillado es una gran ventaja para estimar nuevos parámetros en el diseño, pues mediante el conocimiento adecuado se logra:
  - Predecir la cantidad y calidad de materia orgánica presente en las aguas residuales que llega a las plantas de tratamiento
  - Predecir y controlar la producción de olores, sabores y compuestos corrosivos.
  - Modelar y simular los diferentes procesos con el fin de proponer nuevas alternativas de diseño y operación en los sistemas de alcantarillado y en las plantas de tratamiento dispuestas aguas abajo.
- 3) Las estructuras hidráulicas son sistemas que logran transferir oxígeno a las superficies de agua de manera eficiente y económica, pues estas no requieren más energía que las que ellas mismas producen durante el proceso de transferencia de masa. Los parámetros que más influyen en el proceso de transferencia de oxígeno en estas estructuras son: Temperatura del agua, calidad del agua, profundidad aguas abajo, altura de caída y caudal de descarga.
- 4) El factor más importante que influye en la transferencia de oxígeno en estructuras hidráulicas es la altura de caída. La profundidad aguas abajo también constituye uno de los factores más importantes en este proceso, ya que es el que limita la profundidad de penetración de las burbujas de aire. Se ha encontrado que la altura de la profundidad aguas abajo es aproximadamente 0.6 veces la altura de caída de la estructura.
- 5) A medida que la altura de caída aumenta, la superficie de la napa se hace más rugosa, se vuelve ondulatoria y por lo tanto hay mayor cantidad de aire entrando a la superficie aguas abajo. La eficiencia en la transferencia de oxígeno, aumenta para alturas de caída mayores.
- 6) Los vertederos de cresta delgada son estructuras que pueden ser aprovechadas como sistemas de aireación dentro de los sistemas de alcantarillado debido al amplio conocimiento que se tiene sobre ellos en canales abiertos. Es necesario establecer una adaptación óptima de este

tipo de estructuras dentro de las tuberías de alcantarillado para proponer nuevos diseños.

- 7) La forma geométrica del vertedero tiene gran efecto sobre la cantidad de aire que se puede transferir a la superficie de agua en la zona aguas abajo. Los vertederos de sección transversal triangular han demostrado ser los más eficientes en el proceso de transferencia de oxígeno.
- 8) La transferencia de oxígeno mediante el uso de caídas libres ha demostrado ser bastante eficiente. Mediante los tres métodos descritos en este documento, se logra transferir gran cantidad de oxígeno por la turbulencia que generan aguas abajo de las estructuras. Además del régimen de flujo y de la turbulencia asociada a este, la configuración estructural es el factor más determinante de aireación en las estructuras de caída.
- 9) El uso de estructuras hidráulicas dentro de los alcantarillados, se limita al tamaño de las tuberías. En tramos de la tubería donde el agua se mueve a flujo lleno, no se pueden usar; es necesario airear el flujo mediante aireadores mecánicos.
- 10) Generar resaltos hidráulicos en el sistema, es una manera óptima de transferir oxígeno, eliminar cloro de las aguas residuales y conseguir variar el régimen del flujo en longitudes cortas. Es necesario tener en cuenta la geometría del conducto para aproximar factores como el área y el perímetro de manera adecuada.
- 11) Los resaltos hidráulicos en conductos circulares están gobernados por el efecto de la forma de la sección transversal.
- 12) Nuevos métodos han aparecido con el fin de prevenir la septicidad. DRAUSY es uno de los más novedosos y económicos en el mercado. Este método garantiza una distribución uniforme de oxígeno a lo largo del tramo de la tubería de alcantarillado donde es instalado.
- 13) La longitud, presión de aplicación y capacidad de transferencia de las mangueras DRAUSY varían dependiendo del tipo de agente que se inyecte al agua.
- 14) El método DRAUSY garantiza una distribución uniforme de oxígeno a lo largo del tramo de la tubería de alcantarillado donde es instalado.
- 15) A pesar de los beneficios que se obtienen manteniendo condiciones aeróbicas, es necesario mantener un nivel óptimo de oxígeno dentro de los

sistemas de alcantarillado, ya que niveles excesivos de OD en el agua residual, puede traer como consecuencia la formación de mayor cantidad tanto de lodos como de dióxido de carbono, con sus correspondientes efectos negativos.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

---

**Abdul-Talib S., Hvitved-Jacobsen T., Vollersten J., Ujang Z.** “Anoxic Transformation of Wastewater Organic Matter in Sewers – Process Kinetics, Model Concept and Wastewater Treatment Potential.” *Wat. Sci. Tech.*, Vol.45, N°.3, pp. 53-60, 2002.

**Abdul-Talib S., Ujang Zaini., Vollertsen Jes, Hvitved-Jacobsen, T.** “Sewer Network as Bio-reactors- Extending the Transport Function of Sewers”., Faculty of Civil Engineering, University Teknologi MARA, Selangor, Malaysia, 2002.

**AEsøy Anette., Ødegaard Hallvard., Hægh M., Rislå F.** “Upgrading Wastewater Treatment Plants by the Use of Biofilm Carriers, Oxygen Addition and Pre-Treatment in the Sewer Network.” *Wat. Sci. Tech.*, Vol.37, N°.9, pp. 159-166, 1998.

**Alibhai K., Boon A.** “Increasing Sewer longevity by septicity control.”, 21<sup>st</sup> WEDC Conference, Sustainability of water and sanitation systems, Kampala, Uganda, 1995.

**Almeida M.C., Bulter D., Matos J.S.** “Reaeration by Sewer Drops.” Imperial college, department of civil and environmental engineering, Imperial College Road, London SW7 2BU, Uk. Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Civil, Av. Rovisco Pais, 1096 – Lisbon, Portugal, 1999.

**Almeida M.C., Bulter D., Davies J.W.** “Modelling in Sewer Changes in Wastewater Quality Under Aerobic Conditions.” *Wat. Sci. Tech.*, Vol.39, N°.9, pp. 63-71, 1999.

**Baylar A., Bagatur T.** “Aeration performance of Weirs.” Firat University, Civil Engineering Department, Elazig-Turkey, 2000.

**Boon A.G.** “Septicity in Sewers: Causes, Consequences and Containment.” *Water Science & Technology*, Vol.31, N°7, pp.237-253, 1995.

**Boon A.G., Lister A. R.** “Formation of sulphide in rising main sewers and its prevention by injection of oxygen.” *Program in water technology*, Vol. 7, N°2, pp. 289-300, 1975.

**Balmér P., Tagizadeh-Nasser.** “Oxygen Transfer in Gravity Flow Sewers.”, *Water Science & Technology*, Vol. 31, N°.7, pp. 127 – 135, 1995.

**Chen G., Leung D.** “Utilization of Oxygen in a Sanitary Gravity Sewer.”, *Water Research*, Vol. 34, N°.15, pp. 3813 – 3821, 2000.

**Emiroglu M.E., Baylar A.** "Experimental Study of the Influence of Different Weir Types on the Rate of Air Entrainment"., Water Quality Research. J. Canada, Vol.38, N°.4, pp. 769-783, 2003.

**Emiroglu M. E., Baylar A.** "The Effect of Broad-Crested Weir Shape on Air Entrainment"., Journal of Hydraulic Engineering and Research, Vol.00, N°.0, pp. 1-7, 2003.

**Gargano R., Hager W. H.** "Undular Hydraulic Jumps in Circular Conduit.", J. Hydr., Vol. 128, N°.11, November 1, 2002.

**Gulliver J.S., Wilhelms S.C.** Parkhill, K "Predictive Capabilities in Oxygen Transfer at Hydraulic Structures." J. Hydr, Vol 124, N° 7, July, 1998.

**Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen J., Yongsiri C., Nielsen A.H., AbduTalib S.** "Sewer Microbial Processes, Emissions and Impacts.", Sewer processes and networks, Paris, France, 2002.

**Jensen Niels A.** "Empirical Modeling of air-to-water Oxygen transfer in Gravity Sewers.", Water Environment Research, Vol. 67, N°.6, Sept/Oct, 1995.

**Jensen N., Hvitved-Jacobsen T.** "Method for Measurement or Reaeration in Gravity Sewers using Radiotracers.", Research Journal WPCF, Vol. 63, N°.5, Jul/Agos, 1991.

**Jensen N., Hvitven-Jacobsen T.** "Tracer Measurements of Reaeration in Gravity Sewers." Water Science & Technology, Vol. 22, N°.10/11, pp. 279-282, 1990.

**Kim Jeongkong., Walters R. W.** "Oxygen transfer at low drop weirs." J.Envir, Vol 127, N°7, July, 2001.

**Nielsen P.H., Raunkjaer K., Norsker N.H., Jensen N.A., Hvitved-Jacobsen T.** "Transformation of Wastewater in Sewer Systems – A Review." Wat. Sci. Tech., Vol.25, N°.6, pp. 17-31, 1992.

**Rahmé Z. G., Zytner R. G., Corsi R. L., Madani-Isafahani M.** "Predicting oxygen uptake and VOC emissions at enclosed drop structures." J.Envir, Vol 123, N° 1, January, 1997.

**Ricaurte Ortega, José Luis.** "Estudio de un sistema Alternativo de Alcantarillado como mecanismo para el Tratamiento de las Aguas Residuales.", Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Bogotá, 2000.

**Rojas Alvarez, Nadezha Konstantinova.** "Tratamiento de Aguas Residuales dentro de un Alcantarillado.", Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Bogotá, 2001.

**Romero, Jairo.** "Acupurificación", Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 1994.

**Sousa C., Lopes R., Matos J., Almeida M.** "Reaeration by vertical Free-Fall Drops in Circular Channels. A Model Study." Technical University of Lisbon, IST, DEcivil, Av. Rovisco Pais.

**Stahi H., Hager W.H.** "Hydraulic Jump in Circular Pipes.", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.26, N°3, pp. 368-373, June, 1999.

**Tanaka N., Hvitved-Jacobsen T., Ochi T., Sato N.** "Aerobic – Anaerobic Microbial Wastewater Transformations and Re-aeration in an Air-Injected Pressure Sewer." Wat. Env. Res., Vol.72, N°6, pp. 665-674, Noviembre/Diciembre, 2002.

**Tjandraatmadja G.F., Burn L.S., Eiswirth M., Held I.** "In line pre-treatment of sewage through a new green and economical technique: The DRAUSY Method.", IWA 3. World Water Congress 2002, Melbourne, Australia.

**Vargas Abello, Juan Pablo.** "Estado del Arte en Metodologías Hidráulicas para Airear el Flujo con el fin de Prevenir la Septicidad.", Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Bogotá, 2003.

**Watson Chester C., Walters R.W., Hogan Scott A.** "Aeration Performance of Low Drop Weirs." J.Hydr., ASCE, Vol 124, N° 1, January, 1998.

#### **Páginas de Internet:**

1. Página de Internet: [www.drausy.de](http://www.drausy.de), "Prevention of Odor Formation and Corrosion in Sewers through Precise Linear Treatment of Waste Water with the DRAUSY Hose System", March, 2001.
2. Página de Internet: [www.drausy.de](http://www.drausy.de), "Results of Linear and Fine-Bubble aeration of a Pressure Pipeline for the avoidance of Odour Emissions and Corrosion."
3. Página de Internet: [www.tapic.org/chiapas/documentos/Franco.PDF](http://www.tapic.org/chiapas/documentos/Franco.PDF)
4. Página de Internet: [http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec\\_7.htm](http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/121/htm/sec_7.htm)