

1. FUNDAMENTOS

1.1. Agua residual

El agua residual es aquella de composición variada proveniente de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos incluyendo fraccionamientos y en general cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas (SEMARNAT, 1996).

Si a las aguas residuales se les somete a algún proceso individual o combinado de tipo físico, químico, biológico u otros, con el fin de hacerlas aptas para el reúso en servicios al público o para disminuir la concentración de contaminantes, antes de disponerlas a los cuerpos de agua, se les conoce como aguas residuales tratadas, y en el caso de que no se traten, se le conocen como aguas crudas (SEMARNAT, 1997).

Las aguas residuales urbanas son todas aquellas que tienen como destino final el drenaje público y son consideradas como una mezcla muy compleja que contiene agua en su mayoría junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos, los cuales pueden presentarse suspendidos o disueltos en la mezcla. Estos contaminantes no se encuentran en grandes concentraciones, pero son lo suficientemente grandes como para causar serias enfermedades al ser humano y generar focos de infección para las comunidades.

1.1.1. Historia breve de las aguas residuales

El ser humano hasta hace poco, no había relacionado los peligros de la contaminación del agua con el de las enfermedades que ésta podría traer consigo. Sin embargo, existe evidencia de sistemas de alcantarillado en ciudades prehistóricas de Creta, Asiria y Roma entre otras, pero su función no era precisamente para la recolección y transporte de las aguas residuales. Durante la Edad Media el sistema de alcantarillado fue prácticamente desconocido y continuó así por mucho tiempo mas (Vázquez y Valdez, 2003).

Con la epidemia de cólera en 1854 en la ciudad de Londres Inglaterra, es que se relaciona al agua contaminada con las enfermedades que aparecían a gran velocidad. Por lo que se decide hacer algo respecto con los residuos que generaban las comunidades y así se diseñaron y empezaron a construir sistemas de alcantarillado en Londres y diversas ciudades de Europa. El principal inconveniente que se tenía, era que dichos desechos incluyendo la basura eran transportados por las cloacas. En épocas en las que no se permitía la descarga de desechos en las alcantarillas, la gente depositaba los residuos en cubetas afuera de sus casas, para posteriormente ser transportados y depositados en campos agrícolas (Vázquez y Valdez, 2003).

En la Nueva España durante el virreinato con las Ordenanzas de Felipe II, se establece la protección de cuerpos de agua así como el establecimiento de normas de higiene ante la contaminación de las poblaciones recién trazadas. Se emitieron decretos y edictos para controlar las descargas de

contaminantes. En 1618, el doctor Cisneros se preocupaba de ver el agua de Santa Fe perder todas sus cualidades al llegar a la ciudad de México (Musset, 1992):

“Y siendo como es la excelencia suya como se ha dicho, apenas la conocerá el que la hubiera visto en su nacimiento y hecho en él, las elecciones con que queda alabada, si la cotejare con la que llega a México, por que llega tan diferente que se puede dudar si es la que nace en Santa Fe (...) Las ovas que cría, el cieno que tiene, las cosas que en ella se lava, hay tanto que decir que solo basta saber que el agua que era clara, pura, resplandeciente, de lindo sabor y gusto, esta turbia, cenagosa y con mil animales que de la misma suciedad que traen se crían (fol.71-71v).”

En 1842 Edwin Chadwick recomendó, que la lluvia debía ser vertida al río y los desechos al suelo, lo cual iba en contra a la invención del retrete, debido a que no se podía manejar el volumen de aguas generado y los desechos debían ser depositados junto con las lluvias a los ríos. A este sistema de drenaje se le denomina mixto y es una de las causas más importantes en la contaminación de los cuerpos de agua y de los problemas de salud pública (Vázquez y Valdez, 2003).

Los problemas de contaminación del agua se intensificaron después de la segunda guerra mundial debido a un crecimiento descontrolado en la densidad poblacional y la industrialización. Esta preocupación llegó a su máximo nivel en los años 70's cuando en Estados Unidos se reconoce públicamente dicho problema y se emite la ley pública 92-500. La situación en Europa y Asia era similar con graves problemas de contaminación en los cuerpos de agua. Así por lo que se puede apreciar, la práctica de recolección, tratamiento y disposición de las aguas residuales es relativamente reciente. El tratamiento de aguas residuales cobra importancia mucho tiempo después de que se desarrollaran los sistemas de recolección, que se consideraron necesarios debido a que la capacidad de auto-purificación de los cuerpos receptores, ya no fue suficiente. A fines del siglo XIX y hasta mediados del XX, el diseño de las plantas de tratamiento de aguas residuales, se hacía de manera empírica y es a partir de 1960 que se formulan y cuantifican los procesos originales (Vázquez y Valdez, 2003; Henry y Heinke, 1999).

1.1.2. El agua alrededor del mundo

El agua dulce es un recurso esencial para la subsistencia del ser humano y desafortunadamente es hasta hace muy pocos años, que se ha percatado del daño causado a lo largo de la historia a los recursos hidráulicos de que dispone. Hoy en día el hombre asigna más de la mitad del agua disponible a nivel superficial; si esto continúa así para el año 2025, se podrían estar utilizando tres cuartas partes del agua disponible del planeta (WWF, 2003). La Figura 1.1 muestra la cantidad disponible de agua dulce a nivel mundial.

Dentro de los problemas a que se enfrentará la humanidad en el siglo XXI, uno de los más serios es el control de calidad del agua a nivel mundial. A pesar de que en los últimos años se ha logrado avanzar considerablemente en el manejo del agua, cerca de 6,000 personas en gran parte niños menores a cinco años, mueren diariamente por enfermedades relacionadas con el agua. Aún cuando existe la cantidad de recursos hidráulicos suficiente para cumplir con las necesidades de las

poblaciones, la mayoría de los cuerpos de agua alrededor del mundo, están más contaminados día con día. Cerca de 2 toneladas diarias de residuos de procedencia humana son vertidos a los ríos, lagos, acuíferos y océanos en el planeta. El peor escenario se encuentra en los países en desarrollo, donde la infraestructura para el manejo, tratamiento y disposición de residuos tanto municipales como industriales, es realmente pobre (UNESCO, 2003).

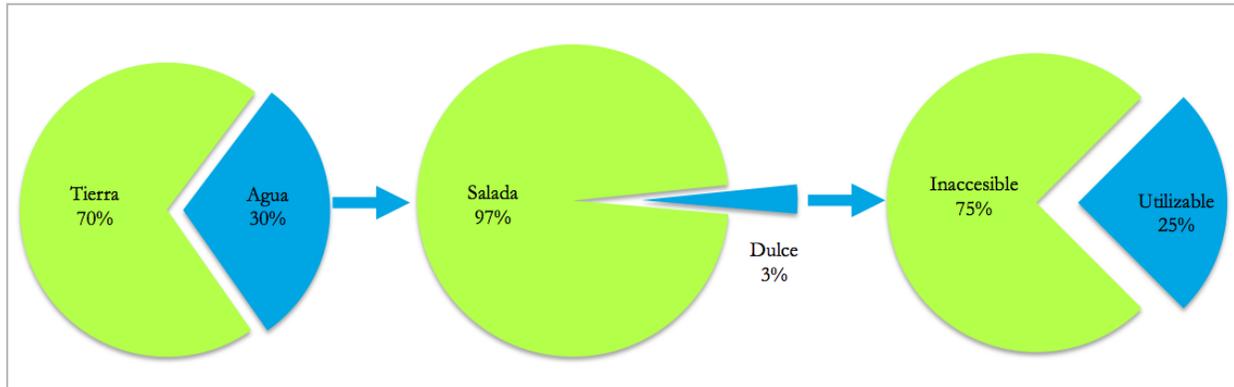


Fig. 1.1 Porcentajes de agua mundial (Realizadas a partir de CEA, 2009)

1.1.3. Contaminación de agua a nivel mundial

Actualmente el volumen de agua contaminada en el planeta aproximadamente es de 12,000 km³, si se continúa a este ritmo, se estima que para el año 2050 el volumen aumente a 18,000 km³. En países en desarrollo, cerca del 90% de las aguas residuales son vertidas a ríos y corrientes sin tratamiento alguno (WWF, 2003). Las Naciones Unidas estiman que anualmente se producen cerca de 1,500 km³ de aguas residuales, seis veces el agua existente en todos los ríos del mundo (UNEP, 2010).

1.1.4. Contaminación del agua en México

En México los residuos domésticos e industriales por lo general, son vertidos sin previo tratamiento en aguas superficiales, con el riesgo indiscutible en contra de la salud de la población y el medio ambiente. Ésto se debe en gran parte al crecimiento de la población en el país, que fue de 34 millones en 1960 a 106 millones para el año del 2008 y 112 para el año 2011. Ésto ha creado un gran impacto sobre la infraestructura existente, la cual evidentemente no ha crecido paralelamente y al mismo ritmo; por lo que actualmente es insuficiente en el tratamiento del agua residual generada.

En las Figuras 1.2, 1.3 y 1.4 se muestra la situación actual en la calidad del agua del país mediante los parámetros de medición de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), la demanda química de oxígeno (DQO) y la concentración de sólidos suspendidos totales (SST) respectivamente. La Figura 1.5 representa el crecimiento anual del caudal de aguas residuales en México, así como su gasto acumulado en cada año.

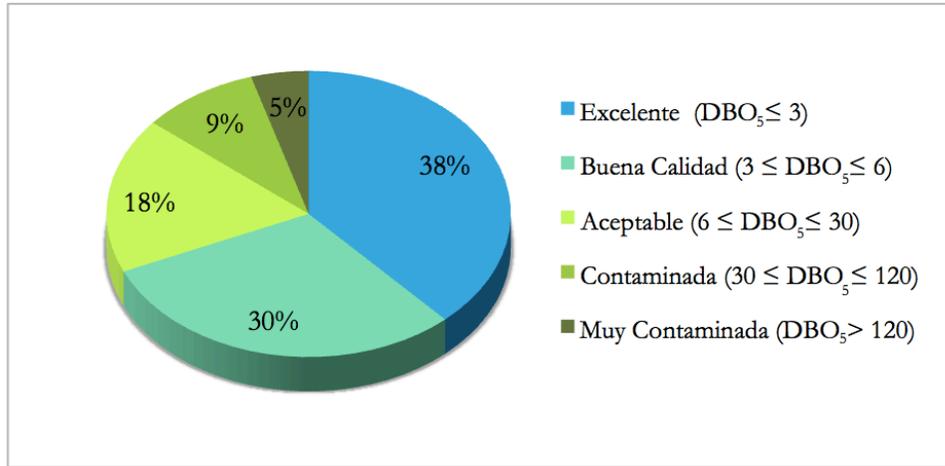


Fig. 1.2 Calidad Superficial del agua, conforme a la DBO_5 en mg/l (Modificada de CNA, 2009a)

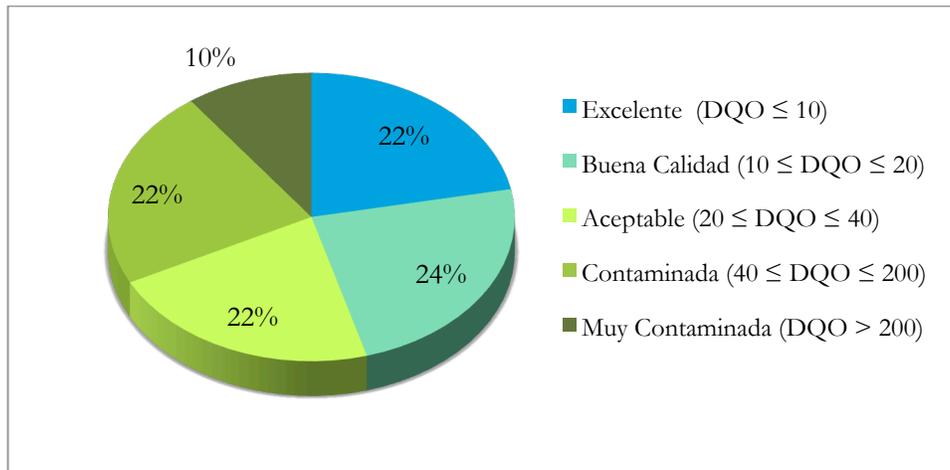


Fig. 1.3 Calidad Superficial del agua, conforme a la DQO en mg/l (Modificada de CNA, 2009a)

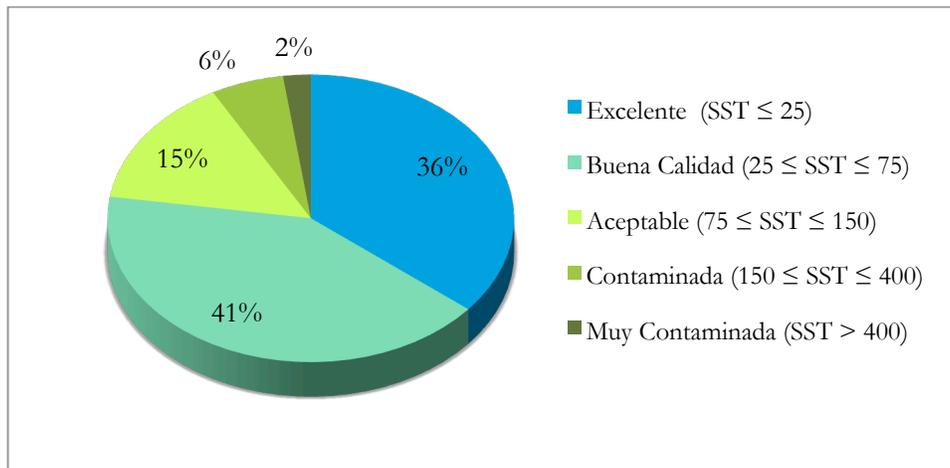


Fig. 1.4 Calidad Superficial del agua, conforme a los SST en mg/l (Modificada de CNA, 2009a)

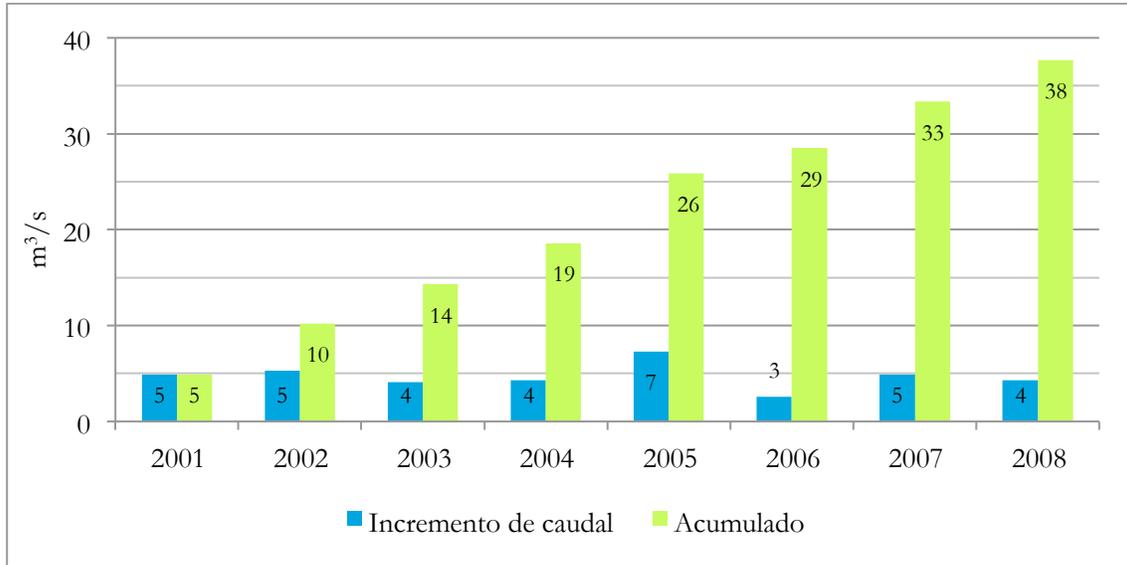


Fig. 1.5 Registro anual de la generación de aguas residuales en México (Realizado a partir de CNA, 2009_b)

1.1.5. Tratamiento de aguas residuales en México y en el mundo

El agua residual sin tratamiento causa grandes daños al medio ambiente y a la salud del ser humano. Por ello el agua residual debe ser tratada, con el fin de reducir las enfermedades transmitidas a través de ella, así como la disminución de la contaminación de cuerpos de agua y el consecuente daño de la vida acuática (Mara, 2003). Como se comentó anteriormente, el tratamiento de aguas residuales no tiene mucho tiempo de ser practicado, por lo que los países que llevan a cabo algún tipo de proceso, son muy pocos. La Figura 1.6 representa el porcentaje medio de aguas tratadas efectivamente a nivel mundial.

La situación en México no es diferente, para el año 2008 sólo existían 1,833 plantas de tratamiento con una capacidad instalada de 113 m³/s (CNA, 2009_b). Sin embargo, en una evaluación realizada a las plantas de tratamiento de aguas residuales, se determinó que únicamente el 5% de las plantas existentes están siendo operadas de manera satisfactoria (Reynolds, 2002). La cantidad de aguas residuales tratadas comparadas con las generadas es considerablemente baja, como se puede apreciar en la Figura 1.7. A partir del año 2006, el gobierno mexicano ha manifestado intenciones de aumentar la cobertura de tratamiento para el futuro. En la Figura 1.8 se muestra la meta que se desea cubrir para el año 2012 en cuanto a cobertura de tratamiento de aguas residuales.

Tomando en cuenta la información antes presentada, en el año 2007 se trataba el 38% de las aguas residuales generadas, pero sí solo el 5% de las plantas operan satisfactoriamente, únicamente se trata de manera eficiente el 2% de las aguas residuales generadas en el país.

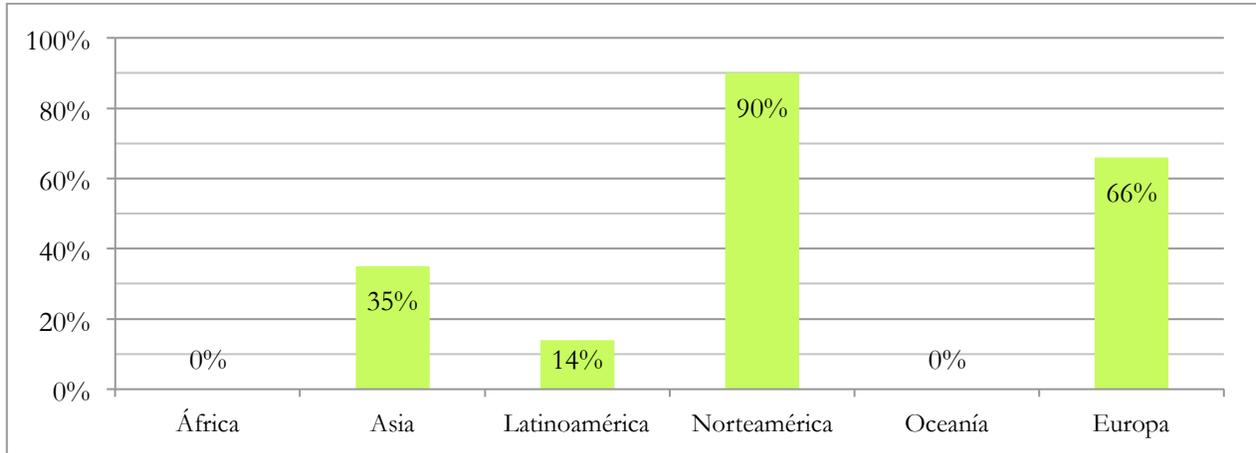


Fig. 1.6 Porcentaje medio de aguas tratadas efectivamente (WHO, 2000)

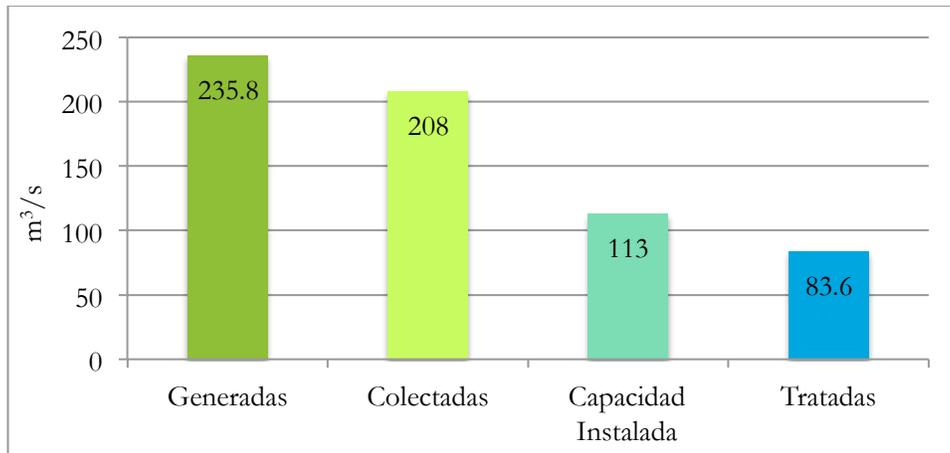


Fig. 1.7 Generación, colección y tratamiento de las aguas residuales en México en el año 2007 (Realizado a partir de CNA, 2009_b)

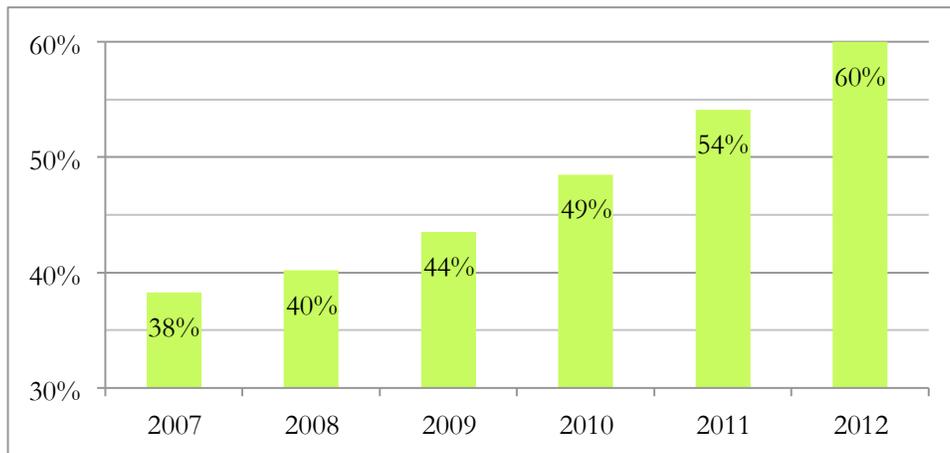


Fig. 1.8 Meta de cobertura de tratamiento para el año 2012 (Realizado a partir de CNA, 2009_b)

1.2. Clasificación de las aguas residuales

Las aguas residuales se clasifican por su procedencia, según se presentan en la Tabla 1.1 y se recolecta en tres diferentes tipos de drenaje, como se muestra en la Tabla 1.2.

Tabla 1.1 Clasificación de las aguas residuales por su procedencia (Realizada a partir de Metcalf y Eddy, 1991)

Agua Residual	Características
Doméstica	Es el agua residual procedente de residencias instalaciones comerciales, públicas y similares.
Industrial	Agua residual en la cual predominan residuos industriales.
Pluvial	Agua resultante de la escorrentía (escurrimiento) superficial.
Infiltraciones y conexiones incontroladas	Agua que penetra de manera no controlada en la red de alcantarillado, procedente del subsuelo por distintos medios y agua pluvial que es descargada a la red a partir de fuentes tales como bajantes de edificios, drenes de cimentaciones y alcantarillas pluviales.

Tabla 1.2 Clasificación del drenaje (Realizada a partir de Metcalf y Eddy, 1991)

Drenaje	Tipo de agua residual que recolecta
Sanitario	Doméstica + Industrial + Infiltraciones y conexiones incontroladas
Pluvial	Pluvial
Mixto	Doméstica + Industrial + Infiltraciones y conexiones incontrolada+ Pluvial

A partir de este punto al mencionar aguas residuales, se estará haciendo referencia a las domésticas o municipales, ya que el caudal del caso en estudio, tiene estas características, como se mostrará en el Capítulo 2. Ampliando el concepto, las aguas residuales de carácter doméstico provienen principalmente de centros urbanos así como de zonas comerciales, escuelas, hospitales y otros tipos de instituciones públicas (Sans y Ribas, 2004).

1.3. Caracterización de las aguas residuales

Comprender la naturaleza del agua residual es fundamental para el diseño y operación de la recolección, tratamiento y disposición de las mismas. El gasto y la composición de las aguas tienden a variar dependiendo de las actividades socioeconómicas de la población que las genera, las estaciones del año lo que provoca variaciones diarias. Por lo tanto es necesario realizar una caracterización de aguas residuales para estudiar a fondo cuales son los componentes presentes en ella y lo que se desea depurar o remover, así como conocer el comportamiento hidrológico del caudal que se presenta. Para hacer una caracterización correcta es necesario realizar el aforo y muestreo del caudal, los cuales deberán ser: Representativos, reproducibles, validables y útiles (Metcalf y Eddy, 2004).

A continuación se hace una descripción de los componentes y características de las aguas residuales

1.3.1. Características físicas

Una de las características físicas del agua residual es el contenido de sólidos totales. Sin embargo, existen otras características no menos importantes que ayudan a determinar distintas condiciones del caudal, como son el color, olor y temperatura.

1.3.1.1. Sólidos totales

Los sólidos totales están compuestos de materia flotante, sedimentable, coloidal, y en disolución, cuya descripción detallada se muestra en la Tabla 1.3. A su vez todas las clasificaciones anteriores de los sólidos pueden catalogarse como sólidos volátiles o como sólidos fijos, haciendo referencia a la fracción orgánica e inorgánica respectivamente (Metcalf y Eddy, 2004). En la Tabla 1.4 se describe la diferencia entre los sólidos volátiles y fijos.

Tabla 1.3 Resumen de la clasificación de los sólidos totales (Realizada a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

Sólidos totales (ST)			
Toda materia restante a una evaporación entre los 103°C y los 105°C. La materia que tenga presión de vapor significativa a dicha temperatura se elimina durante la evaporación y no se define como sólido.			
Sólidos suspendidos (SST)		Sólidos filtrados (SFT)	
Todos aquellos sólidos que no pasan a través de un filtro y el diámetro específico de poro, medidos después de ser secados a una temperatura de 105°C.		Todos aquellos sólidos que logran pasar a través de un filtro cuyo diámetro máximo de la partícula sea de un micrómetro.	
Sedimentables (SSS)	No sedimentables (SSNS)	Coloidales (SFC)	Disueltos (SFD)
Se sedimentan en el fondo en un cono Imhof en un periodo de 60 min. Son una medida aproximada de la cantidad de lodo que se eliminará durante la sedimentación.	No se sedimentan en el fondo en un cono Imhof en un periodo de 60 min.	Consistente en partículas cuyo diámetro oscila entre 10 ⁻³ micrómetros y un micrómetro. No pueden eliminarse por sedimentación.	Moléculas orgánicas e inorgánicas presentes en la solución verdadera del agua

Tabla 1.4 Clasificación de los sólidos volátiles y fijos (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

Volátiles	Fijos
A 500 ± 50°C la fracción orgánica se oxida y se expulsa como gas a dicha temperatura.	A 550 ± 50 °C la fracción inorgánica permanece en forma de ceniza.

1.3.1.2. Olor

El olor indica el nivel de descomposición de la materia y representa el principal problema del rechazo público. El agua residual fresca, doméstica y aerobia huele a keroseno o tierra volteada recientemente. El agua séptica tiene un olor mucho peor al agua reciente debido a los sulfuros de hidrógeno que se generan (Davis y Cornwell, 1998; Metcalf y Eddy, 1991).

1.3.1.3. Color

La edad de un agua residual se puede determinar con base al color. El agua residual joven o reciente tiene un color café grisáceo. Sin embargo mientras el agua es transportada a través del sistema de drenaje esta va adquiriendo un color gris oscuro hasta negro debido a que experimenta condiciones anaerobias, es decir que su nivel de oxígeno disuelto es casi nulo. A este tipo de agua residual se le conoce como agua residual séptica (Metcalf y Eddy, 2004).

1.3.1.4. Temperatura

La temperatura es un factor muy importante en el tratamiento de las aguas residuales, debido a que la vida acuática, la velocidad de las reacciones químicas y la transferencia de gases (factor importante para la autodepuración de las aguas residuales) dependen directamente de ella.

La temperatura del agua residual es mayor que la temperatura del agua de suministro para el consumo humano, debido a la adición de agua caliente procedente de actividades domésticas, municipales e industriales y ésta varía entre los 10 y 20°C. La temperatura óptima para la actividad bacteriana en los procesos biológicos, es de 25 a 35°C, la degradación aerobia y la nitrificación se detiene a los 50°C. Aunado a esto, muchas condiciones de diseño, como velocidades de sedimentación, reacciones químicas entre otros, dependen directamente de la temperatura. Lo cual, hace que ésta comprenda uno de los parámetros más importantes durante el diseño de los sistemas

de tratamiento de aguas residuales (Metcalf y Eddy, 2004; Davis y Cornwell, 1998).

1.3.2. Características químicas orgánicas

La materia orgánica del agua residual por lo general corresponde al 75% de lo sólidos suspendidos y al 40% de los sólidos filtrables. Toda la materia orgánica procede de los reinos animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionada con la síntesis de compuestos orgánicos (Metcalf y Eddy, 1991).

Los compuestos orgánicos generalmente están formados por carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Los principales grupos de materia orgánica presentes en el agua residual son:

- Proteínas 40%-60%
- Carbohidratos 25%-50%
- Grasas y aceites 10%

Un compuesto muy importante de la materia orgánica presente en las aguas residuales es la urea de la orina, cuya velocidad de descomposición es muy rápida. Aunado a los componentes mencionadas anteriormente, el agua residual contiene moléculas orgánicas sintéticas en muy pequeñas cantidades cuya estructura puede variar de ser muy simple, a sumamente compleja, como lo son los agentes

tensoactivos, los fenoles y los pesticidas. La presencia de estas sustancias aumenta año con año, lo cual ha complicado significativamente el tratamiento de las aguas residuales, ya que muchas de estas no se pueden descomponer fácilmente mediante un proceso biológico tradicional (Metcalf y Eddy, 1991).

Hoy en día los métodos de laboratorio más empleados para determinar la presencia de materia orgánica en el agua residual son la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y la demanda química de oxígeno (DQO).

1.3.2.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

La DBO es la cantidad de oxígeno consumido por las bacterias en la degradación de materia orgánica presente en el agua en condiciones aerobias. El oxígeno consumido es proporcional a la cantidad de materia orgánica existente en el agua. Normalmente la DBO se determina a los 5 días del muestreo y a una temperatura de incubación de 20°C y se le denomina DBO_5 , la cual representa las 2 terceras partes de la demanda que sería ejercida si se oxidara toda la materia orgánica por vía biológica (Vázquez y Valdez, 1994).

Si el periodo de 5 días inicial se lleva a uno mayor, aproximadamente de veinte días, la oxidación de la materia orgánica se encuentra completada entre un 95 y 99% y se le denomina DBO última (DBO_u ó L) (Metcalf y Eddy, 2004). En la Figura 1.9 se representa el comportamiento de la DBO conforme al transcurso del tiempo donde se aprecia cuando la DBO ejercida llega a su límite, es decir a la DBO_u .

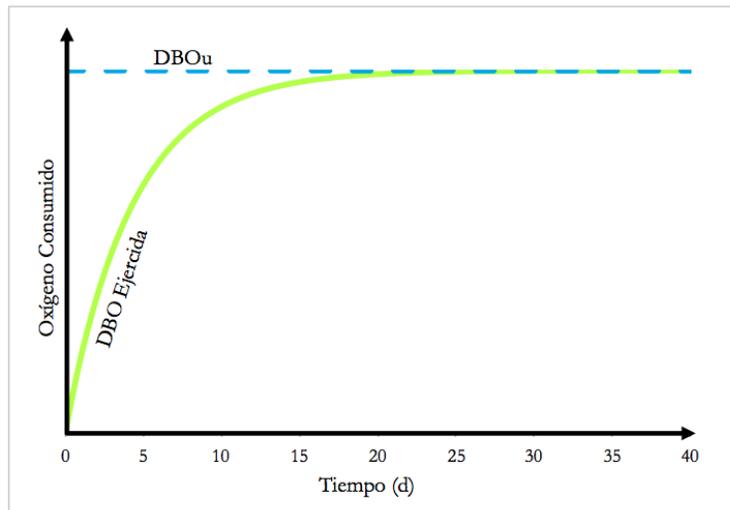


Fig. 1.9 Comportamiento de la DBO con respecto al tiempo (Realizado a partir de Vázquez y Valdez, 2003)

Hoy en día, la DBO es un método de medición del contenido orgánico muy utilizado, debido a que permite determinar de forma aproximada, la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar la materia orgánica presente. También permite dimensionar las instalaciones de tratamiento durante la etapa de

diseño, para medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento y determinar si el efluente cumple con la norma establecida (Metcalf y Eddy, 2004).

1.3.2.2. Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO es un parámetro que mide la cantidad de sustancias que pueden llegar a oxidarse utilizando un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido como lo sería el dicromato de potasio. Aunque se esperaría que el valor de la DQO fuera igual al de la DBO₅, se presentan a continuación las razones por la cual la DQO siempre es mayor (Metcalf y Eddy, 2004):

- Muchas sustancias son muy difíciles de oxidar biológicamente por lo tanto en la DQO, éstas sustancias si se oxidan.
- Algunas sustancias oxidadas por el dicromato de potasio alteran el contenido orgánico aparente de la muestra.
- Algunas de las sustancias orgánicas pueden ser tóxicas para los microorganismos utilizados en la prueba de la DBO.
- Se pueden presentar valores muy altos de la DQO debido a la presencia de sustancias inorgánicas que pueden reaccionar con el dicromato de potasio como sulfuros, sulfitos yoduros, entre otros.

La DQO es la medida del contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como el de las residuales. En muchos tipos de agua residual se puede correlacionar la DQO con la DBO₅, con la ventaja que la DQO se puede obtener en 3 horas comparado con los 5 días de la DBO₅. Con el desarrollo de nuevos métodos de tratamiento biológico, hoy en día tiene mucha importancia fraccionar la DQO para conocer cada parte de ella. Las fracciones más importantes se representan en las Ecuaciones 1.1 y 1.2 (Mara, 2003).

$$DQO = DQO_s + DQO_p \quad (1.1)$$

Donde:

DQO=Demanda Química de Oxígeno

DQOs= Demanda Química de Oxígeno soluble

DQOp= Demanda Química de Oxígeno particular

$$DQO = DQO_b + DQO_{nb} \quad (1.2)$$

Donde:

DQO=Demanda Química de Oxígeno

DQOb= Demanda Química de Oxígeno biodegradable

DQOnb= Demanda Química de Oxígeno no biodegradable

Según Mara (2003), la DQO_b es por definición igual a la DBO_u . Haciendo una sustitución en la ecuación 1.2, la DQO puede quedar fraccionada como se muestra en la Ecuación 1.3

$$DQO = DBO_u + DQO_{nb} \quad (1.3)$$

Donde:

DQO=Demanda Química de Oxígeno

DBOu= Demanda Bioquímica de Oxígeno Última

DQOnb= Demanda Química de Oxígeno no biodegradable

1.3.3. Características químicas inorgánicas

Para establecer un control en la calidad del agua, es necesario conocer los diversos componentes inorgánicos de las aguas residuales y naturales. La concentración de sustancia inorgánicas en el agua dependen directamente de las formaciones geológicas con las que ha estado en contacto tanto el agua natural como las aguas tratadas vertidas en el cuerpo.

A excepción de algunos residuos industriales que si es necesario retirar, es muy poco común tratar el agua residual para eliminar la materia inorgánica presente en ella. Dado que las concentraciones de algunos componentes inorgánicos en el agua pueden ser nocivos para los distintos usos del agua, es conveniente examinar los parámetros establecidos en la Tabla 1.5, los cuales ayudan a determinar la presencia de materia inorgánica (Metcalf y Eddy, 1991).

1.3.4. Características biológicas

Las componentes biológicas del agua residual son de gran importancia en el control de enfermedades causadas por organismos patógenos de origen humano. También por el importante papel que juegan las bacterias y microorganismos en la descomposición y estabilización de la materia orgánica en auto purificación del agua y en el tratamiento de esta.

Las aguas residuales contienen una gran variedad de microorganismos que incluyen bacterias, hongos, algas, protozoarios, plantas, animales, rotíferos y virus (Metcalf y Eddy, 2004). En la Tabla 1.6 se presentan las características biológicas más importantes que se deben determinar en el agua residual.

1.4. Tratamiento

El tratamiento de las aguas residuales es un proceso compuesto por diversas fases de tratamiento de carácter físico, químico y biológico, con el fin de eliminar aquellos contaminantes en el agua procedente de las actividades humanas tanto para poderlas reutilizar como para poderlas disponer de una manera adecuada al medio ambiente y reducir el impacto sobre éste.

Dependiendo de la finalidad del efluente de la planta de tratamiento, existen distintas normas regulatorias sobre la calidad del efluente. La norma que aplica al caso en estudio es la NOM-03-SEMARNAT-1997, la cual establece los límites máximos permisibles para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

Tabla 1.5 Parámetros para la determinación de materia inorgánica (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 1991)

Parámetro	Características
pH	El pH es un parámetro importante dado que el intervalo de concentración idóneo para la existencia de la mayoría de la vida biológica es muy estrecho y muy crítico.
Cloruros	Proceden de la disolución de suelos y rocas así como de la descarga de aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas.
Alcalinidad	Se debe a la presencia de hidróxidos, carbonatos, y bicarbonatos de elementos como calcio, magnesio, sodio, potasio o amoníaco. Esta es muy importante cuando deba realizarse un tratamiento químico.
Nitrógeno	Esencial para el crecimiento de protistas y plantas, es por esto que se les conoce como nutrientes o bio-estimulantes. Tiene gran importancia si el uso del agua tratada es destinada para riego. La eliminación o reducción de este elemento es primordial para el control del crecimiento de algas en el agua receptora. También es un elemento básico para la síntesis de las proteínas.
Fósforo	Esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. La eliminación o reducción de este elemento es primordial para el control del crecimiento de algas en el agua receptora.
Azufre	Es requerido en la síntesis de las proteínas y es liberado en su degradación.
Compuestos tóxicos	Compuestos como el cobre, plomo, plata, cromo, boro y arsénico son tóxicos en distintos grados para los microorganismos. Por lo tanto la concentración de éstos, es un parámetro esencial en la proyección de una planta de tratamiento.
Metales pesados	La presencia de metales pesados en cantidades excesivas compromete el uso del agua debido a su alta toxicidad.

Tabla 1.6 Características biológicas de las aguas residuales (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

Característica	Utilidad
Determinación de la cantidad de organismos coliformes	Permite asesorar la presencia de bacterias patógenas así como para evaluar la efectividad del proceso de desinfección.
Determinación de la presencia de microorganismos específicos	Ayuda durante la operación de la planta y para el reuso del agua tratada, conociendo la cantidad de microorganismos como bacterias, protozoarios, helminto y virus.
Toxicidad	Ayuda durante la operación de la planta.

En la Tabla 1.7 se muestran los límites máximos permisibles y para lograr esta calidad de efluente, se requiere diseñar un sistema de tratamiento, cuyos procesos y operaciones unitarias se desarrollan a lo largo de este trabajo.

Tabla 1.7 Límites máximos permisibles de contaminantes (NOM-003-SEMARNAT-1997)

Tipo de reúso	Promedio mensual				
	Coliformes fecales	Huevos de Helminto	Grasas y aceites	DBO ₅	SST
	NMP/100 ml	h/l	mg/l	mg/l	mg/l
Servicios al público con contacto directo	240	≤ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto	1000	≤ 5	15	30	30

*NMP: Número más probable

1.4.1. Niveles de tratamiento

El proceso de depuración de las aguas residuales consiste inicialmente en un tratamiento primario, que consiste de diversas operaciones físicas unitarias. A continuación se requiere de un tratamiento secundario que se compone tanto por procesos biológicos como por procesos físico-químicos, cuyo principal objetivo es eliminar toda materia orgánica biodegradable.

Dado que la inversión inicial y los costos de operación de las operaciones físico-químicas son de gran magnitud, prácticamente todos los sistemas de tratamiento secundarios utilizan operaciones unitarias biológicas. Por último, dependiendo de las características de la disposición final, puede o no requerirse de un tratamiento terciario el cual es una combinación entre los tratamientos físicos, biológicos, químicos y otros (Sans y Ribas, 2004; Vázquez y Valdez, 2003). En la Tabla 1.8 se muestran los distintos niveles de tratamiento y su respectiva función.

1.4.2. Pre-tratamiento y tratamiento primario

El pre-tratamiento y tratamiento primario consisten principalmente en operaciones unitarias de carácter físico. A continuación se hace una breve descripción de los distintas operaciones unitarias que se pueden llevar a cabo durante el pre-tratamiento y tratamiento primario.

1.4.2.1. Desbaste

La principal función del desbaste es la eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por retención en las superficies, con el objetivo de proteger las bombas y equipos electromecánicos así como la prevención del atascamiento de las válvulas. Para lograr este objetivo se utilizan rejillas y tamices.

Las rejillas suelen tener una abertura mayor a los 25 mm y su función es retener sólidos grandes que puedan causar obturación. Los tamices por lo general tienen una abertura menor a los 6 mm y se utilizan tanto en el tratamiento primario como en el secundario para la eliminación de sólidos

suspendidos. La limpieza de estas instalaciones se puede llevar a cabo de forma manual o mecánica (Sans y Ribas, 2004; Vázquez y Valdez, 2003).

Tabla 1.8 Niveles de tratamiento (Metcalf y Eddy, 2004)

Nivel	Función
Pre-tratamiento	Remoción de componentes del agua residual tales como trapos, ramas, objetos flotantes, arena y grasa los cuales podrían causar problemas de operación y mantenimiento a lo largo del proceso de tratamiento.
Primario	Remoción de una porción de sólidos en suspensión y materia orgánica del agua residual.
Primario Avanzado	Remoción avanzada de sólidos en suspensión y materia orgánica del agua residual. Generalmente se logra aplicando una filtración o por adición química.
Secundario	Remoción de materia orgánica biodegradable (disuelta o en suspensión) y de sólidos en suspensión. La desinfección se puede incluir en la definición del tratamiento secundario convencional. Por lo general se lleva a cabo utilizando procesos biológicos o fisicoquímicos.
Secundario con remoción de nutrientes	Remoción de materia orgánica biodegradable (disuelta o en suspensión) y de sólidos en suspensión, así como de nutrientes tales como el nitrógeno, fósforo o ambos.
Terciario	Remoción de sólidos en suspensión (después del tratamiento secundario) generalmente filtración o micropantallas. La desinfección también puede formar parte del tratamiento terciario, así como la remoción de nutrientes.
Avanzado	Remoción de materiales disueltos o suspendidos que permanecen en el agua después de un tratamiento biológico, cuando se piensa en reutilizar el agua.

1.4.2.2. Dilaceración

La dilaceración o trituración tiene como función disgregar sólidos gruesos en tamaños menores y mas homogéneos para mejorar los procesos posteriores (Sans y Ribas, 2004).

1.4.2.3. Remoción de arena

La remoción de arenas es una actividad de suma importancia ya que ayuda a prevenir abrasiones y desgaste de los equipos electromecánicos. Sin desarenadores, la arena seria removida durante la sedimentación primaria, los tanques de aireación o inclusive en los sedimentadores secundarios afectando severamente el tratamiento de los lodos producto del proceso de tratamiento de agua residual. Por esto, hoy en día es una práctica común utilizar este proceso como un pre-tratamiento.

Los sistemas de remoción de arena más comunes se pueden clasificar en: Cámaras desarenadoras aireadas, tipo vórtice, flujo horizontal (Tabla 1.9)(Metcalf y Eddy, 2004; WEF, 1992).

Tabla 1.9 Sistemas de remoción de arenas (Realizado a partir de WEF, 1992)

Proceso	Descripción
Aireado	Se introduce aire por un costado de la cámara, el cual hace girar un barril perpendicular al sentido del flujo de agua residual en el tanque. Las partículas más pesadas, con una velocidad de sedimentación mayor, son depositadas en el fondo de la cámara, mientras que el barril suspende a las partículas más livianas las cuales son extraídas posteriormente del tanque. El consumo energético de este sistema es mayor a todos los demás y corre el riesgo de generar grandes cantidades de materia orgánica volátil dañina así como malos olores.
Vórtice	Los desarenadores de vórtice dependen de un vórtice inducido mecánicamente para capturar los sólidos al centro de un tanque circular. Mientras estos sólidos se depositan en el centro, unas palas rotatorias aumentan la velocidad lo suficiente como para elevar las partículas orgánicas más ligeras y regresarlas al flujo que pasa a través del tanque. Estos sistemas son muy efectivos, requieren un espacio mínimo y son energéticamente muy eficientes. Una gran desventaja es que el diseño de estos sistemas es de propietario.
Flujo horizontal	También conocidos como sistemas de velocidad controlada, usan vertedores proporcionales o secciones rectangulares controladas para llevar la velocidad horizontal de flujo en línea recta a 0.3 m/s, a la cual se ha demostrado que se logran sedimentar las partículas más pesadas. Estos sistemas son muy flexibles, sin embargo existe una gran dificultad para mantener la velocidad de 0.3 m/s todo el tiempo y pueden llegar a requerir mucho espacio.

1.4.2.4. Tanques de homogeneización de caudales

Los tanques de homogeneización o igualación de caudales se utilizan para regular los caudales y las concentraciones de las aguas residuales para que siempre sea el mismo tratamiento o lo más constante posible.

Esta operación tiene como consecuencia procesos de tratamiento mucho más efectivos y eficientes (Sans y Ribas, 2004). Vázquez y Valdez (2003) comentan que “la igualación del gasto no es un proceso de tratamiento *per se*, pero puede mejorar significativamente el funcionamiento de una planta existente e incrementar su capacidad útil. En el proyecto de plantas nuevas, la igualación del gasto puede reducir el tamaño y costo de las unidades de tratamiento.”

Existen dos tipos de tanques de igualación: aquellos integrados directamente en el tren de tratamiento y que están activos las 24 hrs. día y aquellos aislados del tren de tratamiento y únicamente entran en operación cuando se presenta un gasto extraordinario y el caudal supera la capacidad de la planta. (Metcalf y Eddy, 2004).

1.4.2.5. Mezclado

El mezclado se emplea cuando se requiere que una sustancia determinada, se homogenice totalmente en el seno de otra. Esta operación se encuentra a lo largo de todo el proceso de tratamiento como por ejemplo (Sans y Ribas, 2004):

- Precipitación química
- Procesos biológicos donde el aire se debe mezclar con los lodos activados
- Desinfección donde las aguas al final del tratamiento deben mezclarse con el cloro o el hipoclorito de sodio.

Se puede realizar en:

- Tanques con ayuda de elementos mecánicos
- Resaltes hidráulicos en canales
- Bombas
- Conducciones
- Tubos Venturi.

1.4.2.6. Floculación

La floculación es la operación mediante la cual las partículas en suspensión aumentan su superficie de contacto mediante productos químicos durante el proceso de precipitación química. Debido a la floculación las partículas se coagulan formando partículas mayores, cuya masa aumenta lo suficiente como para sedimentarse (Sans y Ribas, 2004).

1.4.2.7. Sedimentación

La sedimentación consiste en remover del agua residual materiales suspendidos y coloidales mediante una separación gravitacional, es decir que se separan las partículas cuyo peso es mayor al del agua y por esta razón se depositan en el fondo. El principal objetivo de la sedimentación es separar el agua residual en 2 fases(Sans y Ribas, 2004):

- Fase sólida.- Lodos formados por sólidos suspendidos con mayor peso que el agua y por gravedad son depositados en el fondo.
- Fase líquida.- Está compuesta por aguas y compuestos en disolución.

La sedimentación es una de la operaciones físicas más utilizadas y se puede emplear en las siguientes operaciones unitarias (Sans y Ribas, 2004):

- Desarenador
- Tanque de sedimentación primaria
- Después del proceso biológico
- Después del tratamiento químico de precipitación con coagulantes
- Concentración de sólidos en los espesadores de lodos.

El tipo de sedimentador depende directamente del proceso predecesor a éste y de la concentración de partículas en el agua residual. Existen 4 tipos de sedimentación, su descripción y aplicación se muestra en la Tabla 1.10.

Tabla 1.10 Tipos de sedimentación que se presentan en el tratamiento de aguas residuales (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

Tipo	Descripción	Aplicación
Discreta	No hay contacto directo entre las partículas. Por lo general son sólidos suspendidos con masa relativamente grande.	Se presenta generalmente en los desarenadores y parcialmente en los tanques de decantación primaria.
Floculante	Los sólidos en suspensión floculan, produciendo una unión entre las partículas, adquiriendo la masa suficiente como para sedimentar. Por lo general son partículas muy pequeñas.	Generalmente se presenta en los tanques de decantación primaria, en las zonas superiores de los decantadores secundarios y en los tanques de sedimentación química.
Zonal	Las partículas que se sedimentan sufren interacción entre ellas de tal forma que la posición de una partícula con respecto a otra es constante, sedimentando las partículas por zona o unidad.	Se presenta en los tanques de sedimentación secundaria, posterior al tratamiento biológico, así como en los tanques de sedimentación de la precipitación química.
Compresión	Se presenta la formación de una estructura de partículas sedimentadas, debido al peso de las partículas que se van sedimentando, desde la superficie hasta el fondo de los lodos.	Se presenta poco en los tanques de tratamiento primario y generalmente se presenta en los tanques de sedimentación de la precipitación química.

1.4.2.8. Flotación

La flotación se utiliza para separar las partículas líquidas y sólidas del agua residual en donde los líquidos y sólidos con una densidad menor a la del agua flotan y pueden ser removidos fácilmente. Algunas veces se introducen burbujas de aire, las cuales se adhieren a los sólidos y los llevan a hasta

la superficie. También se puede aplicar a líquidos con densidad menor que el agua. Los métodos más utilizados son (Sans y Ribas, 2004):

- Aire Disuelto
- Aireación a presión atmosférica
- Flotación por vacío.

Los tanques de flotación recogen sustancias como grasas, jabón, espumas, madera corcho, residuos vegetales y partículas en suspensión pequeñas.

1.4.2.9. Filtración

Esta operación permite eliminar los sólidos en suspensión procedentes de las aguas después del tratamiento biológico y de la sedimentación, así como de la precipitación química. Consta de diversos lechos filtrantes de material granular con o sin adición de productos químicos e incluso se pueden utilizar micro tamices. La filtración en medios granulares se realiza a través de varios mecanismos de eliminación tales como el tamizado, intercepción, impacto, sedimentación y adsorción. Esta operación unitaria afecta directamente la eficiencia de todo el proceso de tratamiento cuando la concentración de sólidos es mayor a la establecida de diseño o cuando los filtros están saturados y deben ser lavados (Sans y Ribas, 2004).

1.4.3. Tratamiento secundario

El tratamiento secundario se puede llevar a cabo mediante operaciones de carácter biológico o fisicoquímico. Sin embargo, el tratamiento secundario mediante operaciones fisicoquímicas no son muy empleadas en sistemas municipales de tratamiento de agua. Actualmente la inversión inicial y los costos operativos de estas opciones son de gran magnitud, por esta razón no se usan comúnmente, comentan Vázquez y Valdez (2003). Debido a lo comentado anteriormente el sistema de tratamiento secundario propuesto en este trabajo será de carácter biológico, por lo que no se abordará el tema del tratamiento secundario con métodos fisicoquímicos.

Los procesos biológicos tienen como objetivo principal coagular y eliminar todos aquellos sólidos coloidales que no lograron sedimentarse durante la decantación primaria así como en la estabilización de la materia orgánica. Ésto se logra utilizando microorganismos principalmente bacterias las cuales transforman los nutrientes en tejido celular y diversos gases, es decir que toman como fuente de alimento los componentes orgánicos presentes en el agua (sustrato) y los transforman en células biológicas mejor conocidas como biomasa.

Debido a la gran variedad de compuestos orgánicos que están presentes en el agua, es necesario utilizar diferentes tipos de microorganismos, para generar un cultivo mezclado en donde el objetivo es que cada tipo de microorganismo utilice la fuente de alimento más adecuada para él y de esta manera transformar todos los tipos de nutrientes en biomasa. Dentro de los cultivos mezclados se encuentran los depredadores que tienen como función eliminar las diferentes especies existentes para mantener el equilibrio. La biomasa generada se tiene que retirar para completar el proceso.

El proceso biológico se puede aplicar a todo tipo de aguas y por lo general es un tratamiento secundario (Sans y Ribas, 2004; Vázquez y Valdez, 2003). El crecimiento de la biomasa y el consumo de sustrato tienen 4 fases de crecimiento o consumo respectivamente (Figura 1.10).

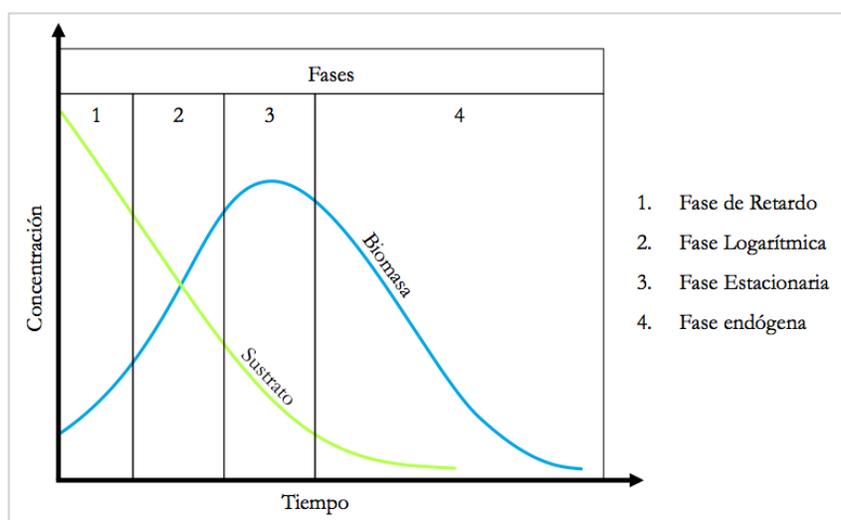


Fig. 1.10 Crecimiento de biomasa y consumo de sustrato (Vázquez y Valdez, 2003)

Los microorganismos utilizados en estos procesos son los mismos que se presentan en un ecosistema, simplemente se controla mediante el empleo de reactores cuidadosamente diseñados para optimizar la rapidez y terminación de la remoción de compuestos orgánicos. Para el caso particular del agua residual doméstica, el objetivo primordial es la eliminación de la materia orgánica así como nutrientes tales como el nitrógeno y el fósforo. El proceso de tratamiento biológico depende del tipo de microorganismo que se utiliza y se clasifica en cuatro grupos de tratamiento diferentes: Procesos aerobios, anaerobios, anóxicos y una combinación de procesos aerobios con anaerobios o con anóxicos, descritos a detalle más adelante. En cuanto a como funcionan los microorganismos que se utilizan en estos procesos se pueden clasificar en procesos de cultivos en suspensión, procesos de cultivo fijo e incluso una combinación de estos (Sans y Ribas, 2004).

En un proceso con cultivo suspendido los microorganismos responsables de los procesos de conversión, de la materia orgánica y otros constituyentes del agua residual en gases y en tejido celular, se mantienen en suspensión con los compuestos en disolución que contienen las aguas residuales a tratar. Una de las características más importantes del cultivo en suspensión, es que durante el proceso se generan flóculos lo suficientemente grandes para que se sedimenten por gravedad. El crecimiento suspendido acelera el proceso de descomposición de materia orgánica que llevan a cabo las bacterias aerobias y otros microorganismos, debido a que se crea un ambiente adecuado donde estos microorganismos pueden trabajar eficientemente (Metcalf y Eddy, 2004; EPA, 2004).

En un proceso de cultivo fijo los microorganismos responsables de los procesos de conversión, de la materia orgánica y otros constituyentes del agua residual en gases y en tejido celular, se mantienen fijos en lechos formados por materiales muy permeables, es decir, los microorganismos se pueden inmovilizar en la superficie de medios inertes como pueden ser rocas, escoria o incluso en piezas especialmente diseñadas en materiales plásticos o cerámicos. Estos procesos son muy efectivos en la remoción de materia biodegradable orgánica (EPA 2004; Metcalf y Eddy, 2004).

1.4.3.1. Procesos de tratamiento aerobio

Según la EPA (2000b) el proceso básico de tratamiento aerobio consiste en proporcionar un medio de alto contenido de oxígeno para que los organismos puedan degradar la porción orgánica de los desechos a dióxido de carbono y agua en presencia del oxígeno. En otras palabras, este proceso se lleva a cabo solamente en presencia de oxígeno. Las bacterias involucradas en este proceso se les conoce como aerobias obligadas (Sans y Ribas, 2004). En la Tabla 1.11 se resumen las ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento aerobios.

Tabla 1.11 Ventajas y desventajas del proceso de tratamiento aerobio (Realizado a partir de EPA, 2000b)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Pueden proporcionar un mejor nivel de tratamiento que los sistemas sépticos. - Ayudan a proteger valiosos recursos de agua en zonas en donde existen sistemas sépticos en mal estado de funcionamiento. - Son una alternativa para sitios en donde los sistemas sépticos no son adecuados. - Pueden extender la vida útil del campo de drenaje. - Pueden permitir la reducción en el tamaño del campo de drenaje. - Reducen la descarga de amoníaco a las aguas receptoras. 	<ul style="list-style-type: none"> - Son más costosos de operar que los sistemas anaerobios. - Requieren electricidad. - Incluyen partes mecánicas que se pueden descomponer. - Requieren un mayor mantenimiento rutinario que los tanques anaerobios. - Están sujetos a trastornos de operación. - Alta generación de lodos.

1.4.3.1.1. Procesos aerobios de cultivo en suspensión

Algunos de los procesos aerobios de cultivo en suspensión más utilizados en el tratamiento de aguas residuales municipales y los cuales se desarrollaran a continuación son:

- Procesos de lodos activados y sus variantes
- Reactor Secuencial Batch (RSB)
- Estanques y lagunas

1.4.3.1.1.1. Proceso de lodos activados

En este tratamiento las aguas a tratar se introducen en un reactor en donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. En el reactor se lleva a cabo una transformación de nutrientes en tejido celular y gases. La demanda de oxígeno se satisface por medio de aireadores o difusores, que, a la vez, producen una mezcla homogénea de microorganismos y aguas residuales. Junto con la degradación es necesario sedimentar los flocúlos del agua y recircular los lodos en el sistema para que la concentración de microorganismos se mantenga elevada. Aunado a esto, es necesario hacer una purga equivalente a la cantidad de organismos que crecieron en el proceso. Las bacterias son los microorganismos más importantes en el proceso ya que son los que llevan a cabo la descomposición de la materia orgánica (Rodríguez y col., 2006). Existen dos tipos convencionales de sistema de tratamiento secundario mediante lodos activados: Los lodos activados completamente mezclados y en flujo pistón.

En los lodos activados completamente mezclados el volumen descargado en el reactor se diluye totalmente en todo el volumen del tanque del reactor, es decir la mezcla es absolutamente homogénea por lo tanto la necesidad de oxígeno para llevarse a cabo la reacción es la misma en todos los puntos del reactor. Ésto se logra mediante sistemas de mezclado o agitación. En la Figura 1.11 se muestra el proceso de lodos activados completamente mezclados.

En el caso de los lodos activados en flujo pistón, el influente y el gasto de recirculación entran al frente del tanque de aireación y es mezclado por difusores de aire o aireación mecánica. Asumiendo mezclado completo en el plano transversal pero no en el sentido longitudinal. Ésto tiene como consecuencia que la demanda de oxígeno sea mayor al inicio del tanque que al final. Por lo que a lo largo de muchos años se han desarrollado distintas variaciones en el proceso de lodos activados tanto en el abastecimiento de agua residual al reactor como de oxígeno, con el objetivo de optimizar el consumo de oxígeno en todos los puntos del reactor. En la Figura 1.12 se muestra el proceso de lodos activados en flujo pistón.

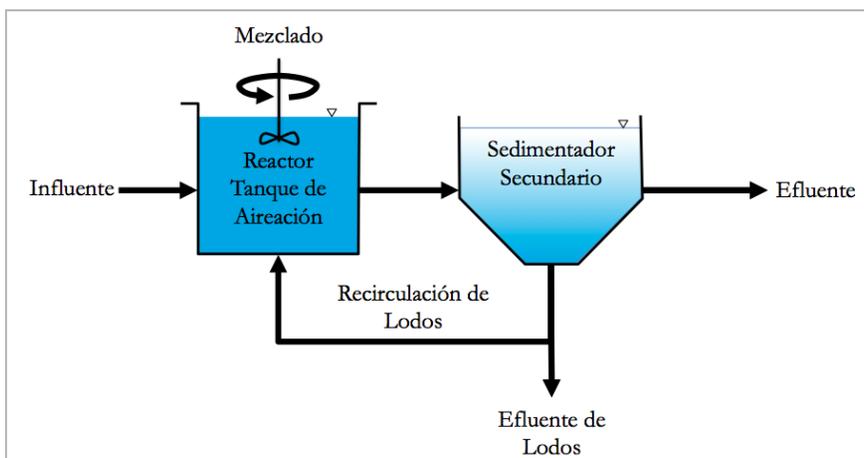


Fig. 1.11 Lodos activados completamente mezclados (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

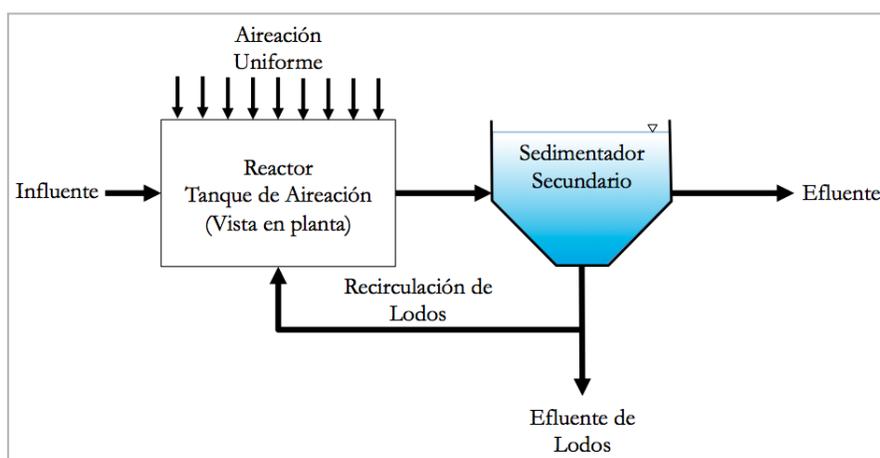


Fig. 1.12 Lodos activados en flujo pistón (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

Hoy en día existen muchas diversificaciones del sistema de lodos activados, en donde se juega con las cargas orgánicas, cargas hidráulicas y el suministro de aire para tener distintos resultados en el tratamiento. En la Tabla 1.12 se resumen las principales características de las algas de las variaciones más comunes de los sistemas de lodos activados.

Algunos de los problemas de funcionamiento más frecuentes en los lodos activados son: 1) La presencia de lodos voluminosos que casi no sedimentan y tienen muy poca compactación durante el tratamiento de lodos; 2) Lodos ascendentes que flotan debido a la desnitrificación; 3) La nocardia, generación de una espuma viscosa en el tanque de aireación (Nodal, 2001).

Tabla 1.12 Variaciones del sistema de lodos activados

Proceso	Descripción	Referencia
Alta tasa	Se proporciona un tiempo de retención corto y una relación alta de sustrato/biomasa en el aireador, para mantener el cultivo en la fase logarítmica.	Vázquez y Valdez, 2003
Alimentación por pasos	Se introduce el material orgánico en el tanque en incrementos o pasos, en lugar de hacerlo en la cabecera. La adición del influente en esta forma propicia una remoción uniforme de la DBO a través del tanque.	Vázquez y Valdez, 2003
Aireación piramidal	El suministro de aire se reduce progresivamente a lo largo del tanque de modo que, no obstante que se usa el mismo volumen total de aire que en el sistema convencional en flujo pistón, se concentra más aire en la entrada del tanque para hacer frente a la alta demanda que ahí se presenta, agregando aire en proporción a la DBO ejercida.	Vázquez y Valdez, 2003
Contacto estabilización	La degradación se realiza en un reactor de aireación aislado dentro de la corriente de recirculación de lodos, donde la concentración de lodos es mucho más elevada que en el primer reactor. Se reduce el tiempo de residencia con el fin de que se lleve a cabo únicamente la adsorción de la materia orgánica en los flóculos. Es una muy buena alternativa cuando buena parte de la materia orgánica a degradar se encuentra como materia en suspensión.	Rodríguez y col., 2006
Oxígeno puro	En lugar de usar aire se inyecta oxígeno puro, lo cual aumenta la capacidad de tratamiento en el licor mezclado de forma considerable.	Vázquez y Valdez, 2003
Aireación extendida	Funciona muy similar al flujo pistón con la diferencia que opera constantemente en la fase endógena, para lo cual requiere una carga orgánica muy baja una aireación muy prolongada, es decir tiempos de retención muy altos.	Metcalf y Eddy 2004; Vázquez, 2010
Zanja de oxidación	Se utiliza un tiempo extenso de retención de sólidos para la remoción de materia orgánica biodegradable. Las zanjas de oxidación funcionan normalmente como sistemas de mezcla completa, pero pueden ser modificados para simular las condiciones de flujo en pistón. El tiempo amplio de retención de sólidos permite que se presente la nitrificación.	EPA, 1999 _a

1.4.3.1.1.2. Reactor secuencial Batch (RSB)

El reactor secuencial Batch es un proceso de tratamiento en donde se aplican ciclos de llenado y descarga de agua residual dentro de un reactor único. Tanto la homogenización de caudales, la aireación y la sedimentación se llevan a cabo en este reactor. Por lo general para aumentar la eficiencia en estos sistemas, se utilizan dos o más reactores en una secuencia de operación determinada.

Todos los procesos RSB tienen 5 pasos en común, los cuales se llevan a cabo en la siguiente secuencia: Primero se llena el reactor con las aguas a tratar, una vez lleno, se suministra la aireación. El tercer paso consiste en suspender la aireación y mezcla ya que las reacciones biológicas se llevaron a cabo y se somete la mezcla a sedimentación y clarificación. Posteriormente se remueve el sobrenadante por medio de una decantación y por último se da un tiempo al primer reactor para que complete su ciclo y se arranca el ciclo en el segundo reactor y por último la purga se hace en cualquier punto del ciclo. En la Tabla 1.13 se muestran las ventajas y desventajas de este proceso y en la Figura 1.13 se muestran las distintas etapas del reactor RSB (Buchanan y Seabloom, 2004; EPA, 1999b).

Tabla 1.13 Ventajas y desventajas del sistema RSB

Ventajas	Desventajas	Referencia
<ul style="list-style-type: none"> - Simplificación del proceso. - Operación flexible, la remoción de nutrientes se puede llevar a cabo con un cambio operacional. - Aplicable en gran variedad de tamaño de plantas. - La sedimentación permite la separación de sólidos con éxito y reduce el nivel de sólidos suspendidos en el efluente. - Se puede operar para que sea un proceso de disminución de lodos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Control del proceso muy complicado - Gastos picos muy altos pueden afectar al sistema , si no esta contemplado en el diseño - La descarga del sistema Batch puede necesitar una estabilización antes de la filtración y desinfección - Se requiere gran habilidad de mantenimiento con los instrumentos, válvulas automatizadas, y dispositivos de monitoreo. 	<p>Metcalf y Eddy, 2004</p>
<ul style="list-style-type: none"> - La homogenización de caudales, la sedimentación primaria, el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria pueden lograrse en un tanque reactor único. - Área superficial requerida mínima. - Ahorro potencial de inversión de capital por la eliminación de sedimentadores y otros equipos. - Eficiencia de remoción de DBO generalmente es del 85 al 95% 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta sofisticación en la programación temporal y controles para sistemas de mayor tamaño. - Alto mantenimiento debido a la sofisticación controles, interruptores automáticos y válvulas automáticas. - Descarga potencial de lodos flotantes o sedimentados durante la descarga o decantación. - Taponamiento potencial de los dispositivos de aireación dependiendo del sistema de aireación. 	<p>EPA, 1999b</p>

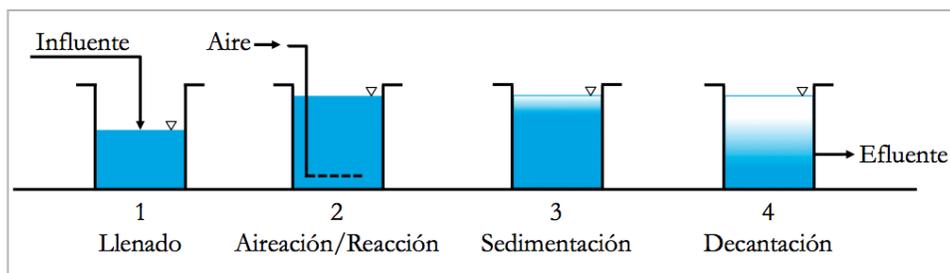


Fig. 1.13 Etapas del reactor RSB (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

1.4.3.1.1.3. Estanques y lagunas

El proceso es muy similar al proceso de lodos activados ya que es un proceso aerobio de cultivo suspendido. La gran diferencia es que el reactor en donde se lleva a cabo el proceso está excavado directamente en el terreno y la aireación se suministra a través de aireadores de superficie o de forma natural.

La gran diferencia entre las lagunas y los estanques es que en las primeras, el oxígeno se suministra mediante aireación artificial, mientras que en los segundos el oxígeno se transfiere por difusión desde la atmósfera y durante la fotosíntesis (Vázquez y Valdez, 2003). En la Tabla 1.14 se muestra la clasificación de estanque y lagunas.

Tabla 1.14 Clasificación de estanques y lagunas (Realizado a partir de Vázquez y Valdez, 2003)

Sistema	Descripción
Estanques aerobios	Son estanques poco profundos (<1m) en donde el oxígeno presente en la atmósfera se puede disolver en toda la profundidad. Suelen usarse como tratamiento final para mejorar la calidad del efluente.
Estanques anaerobios	Son estanques de gran profundidad en donde el oxígeno disuelto únicamente se encuentra en la capa superficial. Estos permiten tratar aguas residuales con concentraciones orgánicas muy fuertes, pero es necesario que a continuación se tenga un tratamiento aerobio para tener una calidad de efluente aceptable.
Estanque facultativos	Son estanques de profundidad intermedia (1-2.5m) en donde se presentan tanto condiciones aerobias en la superficie como anaerobias en el fondo. Ésto permite que se pueda utilizar como sistema único de tratamiento para aguas residuales municipales.
Lagunas aerobias	Se suministra suficiente energía para mantener mezclado y aireado todo el contenido, incluyendo los sólidos. Después de la laguna aerobios es necesario remover de alguna forma los sólidos suspendidos para tener una calidad de efluente aceptable.
Lagunas facultativas	Se suministra únicamente la energía necesaria para mantener mezclada y aireada la parte líquida de la laguna. Es exactamente lo mismo que un estanque facultativo, con la diferencia del suministro de oxígeno.

En las lagunas y estanque muchas veces es posible llevar a cabo el proceso de nitrificación el cual depende del diseño y funcionamiento del sistema así como de la temperatura del agua (Nodal, 2001). Sin embargo, las lagunas aireadas no son muy efectivas en la remoción de bacterias fecales, las reducciones alcanzan hasta un 95% lo cual conlleva a tratamientos posteriores (Mara, 2003).

Por lo general, en este proceso no se recirculan los lodos, lo cual disminuye la cantidad de sólidos en suspensión así como el control del proceso, lo cual reduce considerablemente la eficiencia de este proceso (Droste, 1997).

Estos sistemas son muy económicos debido a la baja inversión inicial, poco mantenimiento y prácticamente nula operación. Aunque una gran desventaja son las grandes extensiones territoriales requeridas por el proceso de tratamiento. Aunado a esto, existen algunos problemas operativos muy frecuentes como la acumulación de materias flotantes, aparición de malos olores, desarrollo de coloraciones rosa o rojo, anomalías de flujo, crecimiento de malas hierbas y plantas acuáticas y desarrollo de mosquitos y otros insectos (Rolim-Mendonça, 1999).

1.4.3.1.2. Procesos de tratamiento aerobio de cultivos fijos

Estos procesos consisten en microorganismos que forman una película biológica sobre una superficie de soporte y cuando el flujo de agua residual pasa a través de estas superficies los microorganismos van degradando la materia orgánica. Este tipo de proceso ayuda a disminuir los problemas en la sedimentación y recirculación de lodos, sin embargo un factor muy importante sigue siendo el suministro de oxígeno en el proceso (Rodríguez y col., 2006). Los procesos aerobios de cultivos fijos que se desarrollarán a continuación son:

- Filtros percoladores
- Reactor de disco biológicos (RDB)
- Reactor biológico de membrana (RBM)
- Reactor biológico de lecho móvil (RBLM)

1.4.3.1.2.1. Filtros percoladores

Este proceso consiste en un lecho filtrante formado por un medio sumamente permeable el cual se compone de pequeñas piezas de roca, plástico o cerámica con formas especiales al cual se adhieren microorganismos formando una película biológica. Una vez que el agua residual se hace pasar a través de este filtro la materia orgánica es degradada por los microorganismos adheridos en la superficie de contacto. Debido al crecimiento de la biomasa en esta superficie parte de la materia

orgánica se desprende, por lo tanto es necesaria una sedimentación posterior en el proceso. (Rodríguez y col., 2006; EPA, 2000a).

En la Tabla 1.15 se muestran las ventajas y desventajas del tratamiento por medio de filtros percoladores.

Tabla 1.15 Ventajas y desventajas del tratamiento por medio de filtros percoladores

Ventajas	Referencia
<ul style="list-style-type: none"> - Es un proceso biológico simple y confiable - Excelente alternativa cuando se dispone de poco espacio - Efectivo en el tratamiento de altas concentraciones de materia orgánica (depende del tipo de medio utilizado) - Apropiado para comunidades pequeñas y medianas - Demanda de energía eléctrica muy baja - Nivel moderado de habilidad y experiencia técnica necesario para la operación y mantenimiento del proceso. 	EPA, 2000 _a
Desventajas	
<ul style="list-style-type: none"> - Dificultad para determinar la máxima cantidad de materia orgánica que puede aplicarse al filtro antes de que el oxígeno se convierta en una variable limitante y se trabaje en condiciones anaerobias - Producción de olores y mala calidad del efluente - Alta producción de fauna nociva (caracoles) - Se puede requerir tratamientos adicionales para cumplir normas muy estrictas de descarga - Se puede presentar una acumulación excesiva de biomasa, la cual podría impedir que se tuviera una condición aerobia - Atención regular de operación - El control y la flexibilidad del proceso es muy limitada comparada con el proceso de lodos activados. 	<p>Metcalf y Eddy, 2004</p> <p>EPA, 2000_a</p>

1.4.3.1.2.2. Reactor de discos biológicos (RDB)

El proceso de disco biológicos consiste en una serie de discos circulares, por lo general de poliestireno o cloruro de polivinilo, que se encuentran soportados en un eje y parcialmente sumergidos (40%) en el agua residual. Sobre la superficie de los discos crece una película biológica. La rotación del disco permite a la biomasa estar en contacto alternativo con las aguas residuales y con el oxígeno atmosférico, por lo que mantiene el proceso en condiciones aerobias. y como consecuencia se lleva a cabo la degradación de la materia orgánica (Rodríguez y col., 2006).

En la Tabla 1.16 se muestran algunas ventajas y desventajas de los sistemas de tratamiento mediante discos biológicos.

Ventajas	Referencia
<ul style="list-style-type: none"> - Simplicidad y atención mínima en la operación - Costos energéticos y de inversión inicial bajos - Rápida recuperación a las fluctuaciones hidráulicas y orgánicas. 	WEF, 2010
<ul style="list-style-type: none"> - Resultan más fiables que otros procesos de cultivo fijo por la gran cantidad de masa biológica presente - Gran resistencia a las sobrecargas hidráulicas y orgánicas - La disposición en serie elimina los cortocircuitos y amortigua las sobrecargas. 	Metcalf y Eddy, 1991
<ul style="list-style-type: none"> - Tiene la virtud de poder hacer arreglos en serie, los cuales logran altos grados de nitrificación. - Las características de la DBO del efluente se pueden comparar a las de un sistema de lodos activados bien operado. 	Raynolds, 1982
Desventajas	
<ul style="list-style-type: none"> - Fallas estructurales muy comunes en los ejes o de la superficie de soporte - Desarrollo de organismos nocivos - Desarrollo desigual de la biomasa en el medio de soporte 	WEF, 2010
<ul style="list-style-type: none"> - Mantenimiento complejo debido a las partes mecánicas. - Si no hay el mantenimiento adecuado se puede presentar una falla prematura de la sub-superficie o incluso no tener la calidad de efluente esperada. - Vulnerable a las condiciones climáticas 	EPA, 2008

1.4.3.1.2.3. Reactor biológico de membrana (RBM)

Un RBM es un sistema biológico de tratamiento en donde se utilizan membranas para separar los sólidos y los líquidos, haciendo la misma función que un sedimentador. La membrana es el límite físico que separa la zona donde se produce la degradación biológica de los contaminantes y la zona del agua tratada, libre de contaminantes y microorganismos. El agua filtrada a través de la membrana sale como efluente y los sólidos se quedan en el reactor antes de la membrana. Un sistema RBM está compuesto por dos partes principales (Jáuregui y col., 2007; Rodríguez y col., 2006; CCA, 2003):

- Reactor biológico.- Responsable de la degradación de los compuestos presentes en el agua residual.

- Modulo de membrana.- Aquí se lleva a cabo la separación física del licor mezclado.

Con base en la configuración de la membrana se pueden clasificar en dos tipos (Rodríguez y col., 2006; CCA, 2003):

- Membrana sumergida o integrada.- La unidad de membrana que realiza la separación se encuentra inmersa en el reactor biológico. El efluente del reactor es el agua depurada.
- Membrana externa o con recirculación al reactor biológico. El efluente del reactor (mezcla reaccionante) se hace circular hasta una unidad de microfiltración/ultrafiltración con el fin de separar el agua depurada del concentrado, recirculando éste al reactor biológico.

Según Jáuregui y col. (2007) un RBM se puede utilizar cuando se tienen las siguientes necesidades:

- Disminuir la producción de lodos biológicos (hasta un 80%).
- Un grado de depuración elevado: Descarga a cauce público, zonas sensibles o pago de un impuesto de descarga elevada.
- La reutilización puede venir impuesta por la escasez de agua de la zona o puede suponer un valor añadido importante a considerar.
- Poco espacio disponible o en alguna ampliación de la capacidad de tratamiento de plantas convencionales ya existentes.

En la Tabla 1.17 se resumen las ventajas y desventajas de los reactores biológico de membrana.

1.4.3.1.2.4. Reactor biológico de lecho móvil (RBLM)

A lo largo de los últimos años se han desarrollado diversas tecnologías en el área del tratamiento biológico de aguas residuales, dentro de las de las cuales se encuentran los procesos de biomasa adherida a soporte móvil. Esta tecnología se desarrolló en Noruega en los años 1990s y cuyo éxito hoy se encuentra cubierto por una gran cantidad de patentes. El principio básico de los reactores RBLM es que la biomasa crece en forma de película biológica alrededor de soportes plásticos con formas muy especiales que aportan áreas específicas para albergar película biológica muy grandes, reduciendo los volúmenes de los reactores considerablemente (Rusten y col, 2005)

El objetivo de estos sistemas es ofrecerle al proceso de lodos activados una mayor concentración de biomasa utilizando soportes de diversos materiales que se mueven en el reactor biológico gracias a la agitación generada por el sistema de aireación en el caso de un reactor aerobio o por un sistema mecánico en el caso de uno anaerobio o anóxicos.

Tabla 1.17 Ventajas y desventajas los reactores biológico de membrana (RBM)

Ventajas	Referencia
<ul style="list-style-type: none"> - Calidad de agua tratada para reutilización. - Mínima producción de lodos, similares a sistemas anaerobios. - Calidad del permeado estable con independencia de picos de carga. - Sistemas fácilmente ampliables sin necesidad de reformas ni ampliación de reactor biológico. - Efluente desinfectado después de atravesar una membrana de ultrafiltración. - Mínimo requerimiento de espacio. - Sistemas muy automatizados, mantenimiento mínimo. 	Jáuregui y col., 2007
<ul style="list-style-type: none"> - Altas tasas de carga volumétrica, lo cual significa menores tiempos de residencia en el reactor. - Baja producción de lodos - Puede operar con baja demanda de oxígeno y se puede llegar a realizar nitrificación-desnitrificación simultánea. - Efluente de alta calidad en términos de baja turbiedad, bacterias, sólidos suspendidos totales y DBO 	Metcalf y Eddy, 2004
<ul style="list-style-type: none"> - Eficaz retención de sólidos suspendidos y de los compuestos más solubles dentro del reactor biológico. Como consecuencia un efluente de excelente calidad que puede cumplir casi cualquier norma de vertido. - Si se utiliza ultrafiltración se obtiene un efluente estéril. - La ausencia del sedimentador permite el desarrollo de bacterias de crecimiento lento. - La membrana además de retener toda la biomasa, retienen enzimas exocelulares y de oxidantes solubles que crean un licor de mezcla capaz de degradar mas compuestos. 	CCA, 2003
Desventajas	
<ul style="list-style-type: none"> - Altos costos de capital inicial, de mantenimiento y de operación. - Alto consumo energético - Necesidad de limpieza frecuente de las membranas a causa del proceso de colmatación 	Jáuregui y col., 2007
<ul style="list-style-type: none"> - Inversión inicial considerable - Gasto energético importante - Polarización y taponamiento de la membranas limitan su uso - Se pueden presentar problemas de sedimentación - La posible acumulación de metales pesados pueden ser dañinos para comunidad bacteriana y para la misma membrana. 	CCA, 2003

Debido a la complejidad del proceso y de la dificultad para comprender el comportamiento del área de película biológica en actividad, el diseño de estos procesos se hace empíricamente o con base en resultados de plantas piloto (Metcalf y Eddy, 2004). En la Figura 1.14 se puede apreciar un tipo de

soporte de película biológica empleado en el proceso de RBLM y en la Figura 1.15 se puede apreciar un esquema del proceso de tratamiento mediante RBLM.

A lo largo de los últimos años se han desarrollado numerosos tipos de soporte de película biológica en cuyo caso, cada proveedor tiene la patente y sobre todo el estudio de su correspondiente soporte. Cabe remarcar es que cada producto ofrece distintas características, pero sobre todo ofrecen áreas superficiales de película biológica por cantidad de volumen impresionantes, las cuales van desde $450 \text{ m}^2/\text{m}^3$ hasta $1,200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ (WEF, 2010).



Fig. 1.14 Ejemplo de distintos tipos de soporte de película biológica en el RBLM (Lenntech, 2011)

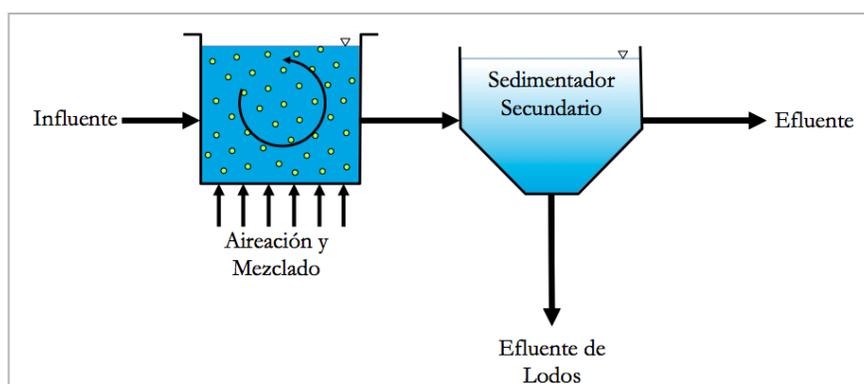


Fig. 1.15 Proceso de tratamiento con RBLM (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

Las aplicaciones principales de este sistema están en el rediseño de plantas ya existentes, aumentando la capacidad de la planta sin necesidad de obra civil, facilitando la operación y obteniendo robustez en el sistema ante la entrada de inhibidores del proceso (Larrea y col., 2004). Por otro lado Ødegaard (2006) menciona, que el reactor RBLM reúne la mayoría de las ventajas de los lodos activados y de los sistemas de cultivo fijo, excluyendo las desventajas de ambos. En la Tabla 1.18 se resumen algunas ventajas y desventajas de este innovador proceso de tratamiento.

Tabla 1.18 Ventajas y desventajas los RBLM

Ventajas	Referencia
<ul style="list-style-type: none"> - A diferencia de los demás reactores de película biológica el RBLM utiliza todo el volumen del reactor. - La biomasa adherida en cada reactor se va especializando cada vez más en la degradación de cierto microorganismo aumentando la eficiencia con el tiempo. - Volúmenes considerablemente pequeños. - No requiere recircular los lodos. 	Ødegaard, 2006
<ul style="list-style-type: none"> - Reducción del reactor biológico debido a que el soporte proporciona una superficie elevada para el crecimiento de la biomasa. - Reducción de tamaño en el sistema de separación de sólidos, debido a una menor concentración de sólidos en suspensión. - Procesos con gran flexibilidad, la eficiencia del proceso está en función del porcentaje de soporte plástico empleado (se puede modificar la superficie en base al porcentaje). - No hay recirculación de lodos al reactor biológico, de esta forma la biomasa no depende de la separación final del lodo. - Operación y control sencillo, evitando atascamientos y periodos de limpieza. - No se requiere un control de purga de lodos debido a que el sistema mantiene la biomasa hasta que se desprende del soporte. - Admite cargas muy altas. - Sistema fácil de implementar en el rediseño de instalaciones ya existentes. - Costo de inversión similar a una planta de lodos activados. - La reducción del volumen del reactor y del decantador secundario equivale a la inversión del soporte plástico. 	Larrea y col., 2004
Desventajas	
<ul style="list-style-type: none"> - Debido a la complejidad que existe para comprender el comportamiento de la película biológica, el proceso de diseño hasta el momento es de carácter empírico y esta basado en observaciones de plantas piloto y resultados a escala real. 	Metcalf y Eddy, 2004

1.4.3.2. Procesos de tratamiento anaerobio

En el tratamiento anaerobio se produce la descomposición de la materia orgánica e inorgánica en ausencia del oxígeno. Es un proceso utilizado cuando se presenta una alta carga orgánica ya que los costos por suministro de oxígeno en un tratamiento aerobio para cargas fuertes son muy elevados. Al igual que el proceso aerobio, en este tipo de tratamientos, las aguas residuales se mezclan con una gran cantidad de microorganismos, pero la gran diferencia reside en que estos microorganismos no dependen de la presencia del oxígeno para desarrollarse. Bajo esta condición de ausencia de oxígeno las bacterias son capaces de convertir el desecho orgánico en metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%). A esta producción de gases se le conoce como biogás. El proceso anaerobio se realiza en

tres etapas: hidrólisis, acidogénesis y metanogénesis (Rodríguez y col., 2006; Sans y Ribas, 2004; McCarty, 1964).

- Hidrólisis.- Ruptura de las moléculas grandes, solubles e insolubles en células de menor tamaño que pueden ser transportadas dentro de las células y metabolizadas.
- Acidogénesis.- Los productos finales de la hidrólisis son transformados en ácidos orgánicos de cadena corta, otros compuestos de bajo peso molecular, hidrógeno y dióxido de carbono.
- Metanogénesis.- La formación de metano siendo éste, el último producto de la degradación anaerobia.

En la Tabla 1.19 se reflejan las ventajas y desventajas de un proceso de tratamiento anaerobio.

Tabla 1.19 Ventajas y desventajas del proceso de tratamiento anaerobio

Ventajas	Referencia
<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficacia de los sistemas, incluso en aguas residuales de alta carga. - Bajo consumo de energía. - Pequeña producción de lodos. - Pequeño requerimiento de nutrientes. - Eficacia ante alteraciones importantes de carga y posibilidad de grandes periodos de parada sin alteración importante en la población bacteriana. 	Rodríguez y col., 2006
<ul style="list-style-type: none"> - Producción de metano, fuente potencial de energía. - Volumen de reactor menor. - Con aclimatación, la mayoría de los compuestos orgánicos pueden ser transformados. - Respuesta rápida a la adición de sustratos después de un largo periodo sin alimentación. 	Metcalf y Eddy, 2004
Desventajas	
<ul style="list-style-type: none"> - Baja efectividad en la eliminación de nutrientes y patógenos. - Generación de malos olores. - Necesidad de un post-tratamiento, generalmente aerobio para alcanzar los niveles de depuración demandados. - Largos periodos de puesta en marcha. - Largos tiempos de residencia, debido a la lentitud del proceso. 	Rodríguez y col., 2006
<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere de tiempos de arranque muy largos para desarrollar la biomasa necesaria en el proceso. - Bajas eficiencias en remoción de materia orgánica. - Probablemente se requiere de un tratamiento aerobio posterior para satisfacer los requerimientos de descarga. - Gran sensibilidad a las temperaturas bajas. - Susceptible a trastornos por la presencia de sustancias tóxicas. - Producción potencial de olores y gases corrosivos. 	Metcalf y Eddy, 2004

Al igual que los tratamientos aerobios, los tratamientos anaerobios se pueden clasificar en procesos con cultivo en suspensión, procesos con cultivo de lecho y en procesos con cultivo fijo. A continuación se desarrollarán los de cultivo suspendido y de lecho por ser los más empleados en tratamiento de aguas residuales, haciendo más énfasis en el tratamiento de lecho de lodos.

1.4.3.2.1. Procesos de tratamiento anaerobio de cultivos en suspensión

Existen tres tipos de procesos de tratamiento anaerobios de cultivo en suspensión: degradación anaerobia de mezcla completa, proceso de contacto anaerobio y el reactor secuencial Batch anaerobio. Dado que el reactor anaerobio de mezcla completa por lo general se utiliza para tratar concentraciones de desecho muy altas como los lodos primarios y secundarios, no se describirá este proceso a continuación (Metcalf y Eddy, 2004; McCarty, 1964).

1.4.3.2.1.1. Proceso de contacto anaerobio

El proceso de contacto anaerobio es muy parecido al de lodos activados aerobio, el cual consiste en un reactor cerrado con una entrada para el influente y dos salidas, una para el biogás y la otra para el efluente (Figura 1.16). Este efluente pasa a un sedimentador de donde se recircula la biomasa de nuevo al reactor y así evitar la pérdida de la misma. El principal problema de este sistema es la necesidad de recircular los lodos y de sedimentar la biomasa (Rodríguez y col., 2006).

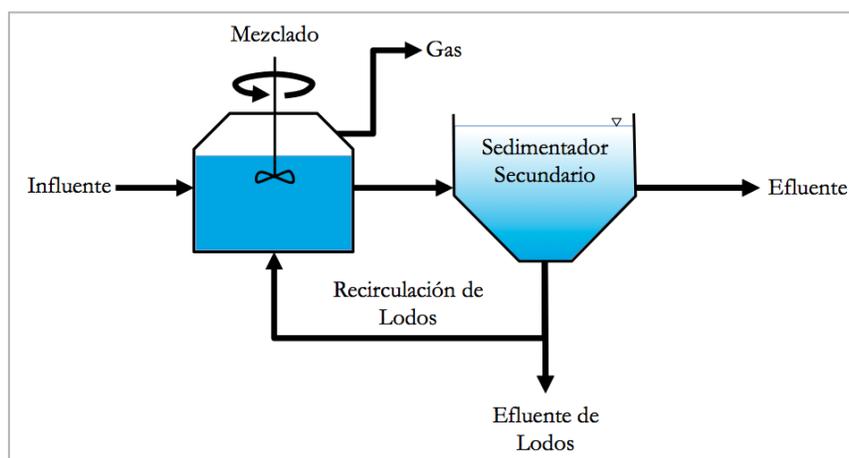


Fig. 1.16 Proceso de contacto anaerobio (Realizado a partir de Rodríguez y col., 2006)

1.4.3.2.1.2. Reactor secuencial Batch anaerobio

El reactor secuencial Batch anaerobio funciona exactamente igual que la versión aerobia, con dos grandes diferencias: Es un reactor cerrado y no hay aireación, únicamente mezclado. Las etapas que se llevan a cabo en este reactor son 4: Llenado, reacción, sedimentación y decantación. Al igual que

en el RSB aerobio en la versión anaerobia no existe recirculación de lodos. En la Figura 1.17 se esquematiza el proceso de RSB anaerobio.

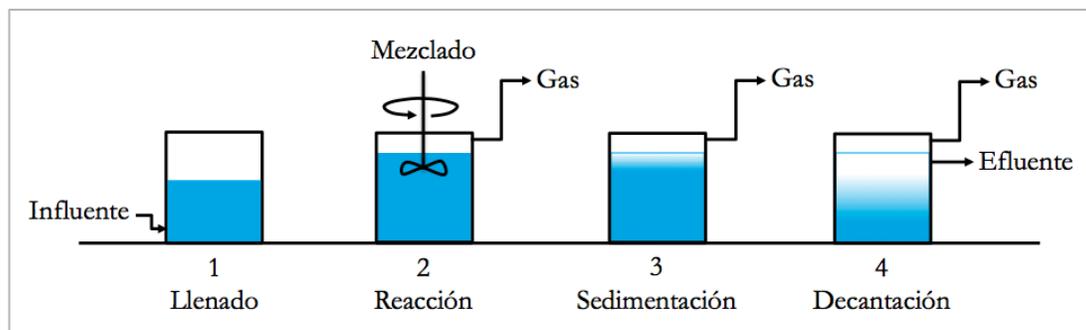


Fig. 1.17 Reactor secuencial Batch anaerobio (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

1.4.3.2.2. Proceso anaerobio de lecho de lodos

Hoy en día existen tres procesos anaerobios de lecho de lodos: El reactor de lecho de lodos y flujo ascendente (RALLFA), Reactor anaerobio con baffles (ABR), Reactor anaerobio de lecho migratorio (AMBR). Sin embargo únicamente se desarrollará el tratamiento mediante RALLFA por su amplia utilización y buenos resultados en tratamiento de aguas residuales municipales.

1.4.3.2.2.1. Reactor de lecho de lodos y flujo ascendente (RALLFA)

En el reactor de lecho de lodos con flujo ascendente el influente entra por la parte inferior del tanque y debe pasar a través de un lecho de lodos muy denso en donde se encuentran las bacterias que degradarán la materia orgánica. La clave de este reactor es que permite cargas volumétricas de DQO muy altas. Este reactor resuelve el problema de la recirculación de lodos, aumentando la concentración de biomasa y manteniéndola en su interior. El éxito de un reactor RALLFA consiste en el lecho de lodos de gran densidad que se depositan en el fondo y en donde se lleva a cabo todo el proceso biológico. Este lecho está compuesto de la acumulación de sólidos suspendidos y de el crecimiento de bacterias. (Rodríguez y col., 2006; Seghezzi y col., 2004).

Dado que el efluente de un sistema de tratamiento RALLFA simple tiene ciertas limitaciones en la eficiencia del tratamiento, se recomienda un pos-tratamiento que consiste en agregar un filtro de goteo, un filtro sumergido aireado o un estanque de estabilización, los cuales tienen como resultado un efluente de muy buena calidad (Jordão y Além, 2004).

En la Tabla 1.20 se reflejan las ventajas y desventajas de este sistema de tratamiento.

Tabla 1.20 Ventajas y desventajas de un sistema RALLFA

Ventajas	Referencia
<ul style="list-style-type: none"> - Sistema compacto, requiere un superficie muy pequeña. - Buena concentración del lodo en exceso (5-6 %) y buenas características de secado. - No se requiere calefacción en climas cálidos. 	Jordão y Além, 2004
<ul style="list-style-type: none"> - Alta eficiencia con altas cargas volumétricas. - Simplicidad y flexibilidad de operación. - Bajo requerimiento energético y de espacio. - Baja producción de lodos. 	Seghezzo y col., 2004
<ul style="list-style-type: none"> - Niveles de síntesis reducida. - Bajos requerimientos de nutrientes. - Ahorro eléctrico (no hay suministro de oxígeno). - Beneficio del metano como producto del proceso. 	Bermúdez y col., 2003
Desventajas	
<ul style="list-style-type: none"> - Posibilidad de malos olores. - Baja capacidad para recibir cargas tóxicas (por lo general no es el caso de las aguas de carácter doméstico). - El arranque requiere inoculación. - Eficiencia limitada final limitada sin pos-tratamiento. - Por lo general el efluente no cumple con las normas. 	Jordão y Além, 2004
<ul style="list-style-type: none"> - Requiere pos-tratamiento. - Generación de olores. - Arranque muy lento. 	Seghezzo y col., 2004

1.4.4. Tratamiento avanzado

El tratamiento avanzado o también conocido como tratamiento terciario está definido como un tratamiento adicional necesario para remover componentes suspendidos, coloidales o disueltos remanentes de un tratamiento secundario convencional. Por otro lado, alrededor del mundo la conciencia por el tratamiento de las aguas residuales está creciendo y con esta cada vez aumenta la exigencia de las regulaciones de descarga y reúso del agua tratada.

Hoy en día existen muchas tecnologías para satisfacer estas necesidades. Metcalf y Eddy (2004) establecen que la necesidad de aplicar un tratamiento avanzado se basa en los siguientes factores:

- Remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos más allá de lo que se puede alcanzar mediante un sistema de tratamiento secundario convencional, con el fin de cumplir con normas de descarga y reúso más exigentes.
- Remover sólidos suspendidos residuales con el objetivo de acondicionar el agua residual para una desinfección más eficiente.
- Eliminar algunos nutrientes para evitar la eutrofización en los cuerpos de agua.

Existen muchos procesos de tratamiento avanzado que se han desarrollado exitosamente en los últimos años, sin embargo si el objetivo es remover los coloides orgánicos e inorgánicos y remover los sólidos en suspensión, los procesos más comunes son los de filtración (Metcalf y Eddy, 2004).

1.4.4.1. Procesos avanzados de filtración

Los procesos de filtración se pueden clasificar en: Filtración profunda, filtración superficial y filtración por membrana. La filtración profunda y superficial no tienen la capacidad de remover bacterias, ventaja que si posee la filtración mediante membranas, por lo que se profundizará más en estos procesos de tratamiento avanzado.

1.4.4.1.1. Filtración por membrana

A su vez, la filtración por membrana se puede clasificar en 4 tipos de procesos: Microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa. En la Tabla 1.21 se refleja cuales son los componentes que logra remover cada una de estas tecnologías.

Tabla 1.21 Aplicación de las tecnologías de filtración por membrana (Metcalf y Eddy, 2004)

Componente	Microfiltración	Ultrafiltración	Nanofiltración	Ósmosis Inversa
Organismos Biodegradables		✓	✓	✓
Dureza			✓	✓
Metales pesados			✓	✓
Nitratos			✓	✓
Contaminantes orgánicos de prioridad			✓	✓
Componentes orgánicos sintetizados			✓	✓
Sólidos disueltos totales			✓	✓
Sólidos suspendidos totales	✓	✓		
Bacterias	✓	✓	✓	✓
Protozoarios, huevos de helminto	✓	✓	✓	✓
Virus			✓	✓

1.4.5. Desinfección

A lo largo de los procesos de tratamiento, la concentración de contaminantes disminuye significativamente, sin embargo existen algunos organismos patógenos para el ser humano que no se eliminan a lo largo del tratamiento tradicional. Para poder eliminar estos organismos se aplica un último proceso de tratamiento llamado desinfección. En éste se aplican mecanismos y procedimientos para la desactivación o destrucción de los organismos infecciosos para prevenir la dispersión de enfermedades transmitidas a través del agua tanto a los usuarios que estarán en contacto con ella como al ambiente.

Hoy en día, existen muchos procesos de desinfección para el tratamiento de aguas residuales en donde se puede aplicar agentes químicos para la eliminación organismos patógenos o mediante la aplicación de medios físicos. Los procesos de desinfección más importantes, al día de hoy, son mediante la aplicación de: Cloro, ozono, luz ultravioleta y dióxido de cloro (Metcalf y Eddy, 2004).

Según la EPA (1999c) la selección de un desinfectante adecuado para una instalación de tratamiento depende de los siguientes criterios:

- La capacidad de penetrar y destruir los gérmenes infecciosos en condiciones normales de operación.
- La facilidad y seguridad en el manejo, el almacenamiento y el transporte.
- La ausencia de residuos tóxicos y de compuestos mutagénicos o carcinógenos.
- Costos razonables de inversión de capital y de operación y mantenimiento.

Los desinfectantes empleados en el tratamiento de aguas residuales deben de ser tóxicos para los microorganismos que se desean eliminar pero totalmente inofensivos para el ser humano y los animales. Por otro lado deben de ser lo suficientemente rápidos pero su efecto debe persistir un periodo suficiente para evitar la reproducción de los organismos patógenos (Vázquez y Valdez, 2003).

1.4.5.1.1. Cloro

El cloro es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual porque destruye los organismos mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser suministrado en muchas formas que incluyen el gas de cloro, las soluciones de hipoclorito y otros compuestos del cloro en forma sólida o líquida. Sin embargo tiene ciertos limitantes en términos de salubridad y seguridad (EPA, 1999c). En la Tabla 1.22 se muestran las ventajas y desventajas de este proceso de desinfección.

Tabla 1.22 Ventajas y desventajas de la cloración (Realizado a partir de EPA, 1999c)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Es una tecnología bien establecida. - Desinfección efectiva. - El cloro residual prolonga el efecto de desinfección - Fácil monitoreo. - Alta confiabilidad en la eliminación de un amplio espectro de organismos patógenos. - El cloro es efectivo en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos. - La cloración permite un control flexible de la dosificación. - El cloro puede eliminar ciertos olores molestos durante la desinfección. 	<ul style="list-style-type: none"> - El cloro residual, aún a bajas concentraciones, es tóxico a los organismos acuáticos. - Todas las formas de cloro son muy corrosivas y tóxicas, por lo tanto se considera de alto riesgo. - Tiempo de contacto relativamente largo. - El nivel total de sólidos disueltos se incrementa en el agua efluente. - Algunas especies de parásitos y huevos de gusanos, han mostrado resistencia a dosis bajas de cloro. - Se desconocen los efectos a largo plazo de la descarga.

1.4.5.1.2. Luz ultravioleta (UV)

La desinfección mediante un sistema de luz ultravioleta consiste en la transferencia de energía electromagnética, generada con una lámpara de vapor de mercurio, al material genético del organismo. La desinfección con luz UV puede ser utilizada en plantas de diversos tamaños que cuenten con niveles de tratamiento secundario o avanzado y las ventajas y desventajas de este proceso se reflejan en la Tabla 1.24 (EPA, 1999e).

Tabla 1.23 Ventajas y desventajas de la UV (Realizado a partir de EPA, 1999e)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Eficaz para la desactivación de la mayoría de los virus, esporas y quistes. - Se considera un proceso, lo cual elimina la necesidad de generar, manejar, transportar, o almacenar productos químicos tóxicos, peligrosos o corrosivos. - No existe ningún efecto residual. - Operación sencilla. - Tiempo de contacto corto. - El equipo de desinfección con luz UV requiere menos espacio que otros métodos. 	<ul style="list-style-type: none"> - La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas y quistes. - Algunas veces los organismos pueden reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un “mecanismo de reparación”, también conocido como fotoreactivación o en ausencia de radiación, como “reparación en oscuro”. - Se requiere de un programa de mantenimiento preventivo es necesario para controlar la acumulación de sólidos en la parte externa de los tubos de luz. - La turbidez y SST en el agua residual hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz. - La desinfección con luz UV no es tan económica como la desinfección con cloro.

1.4.5.1.3. Ozono

El ozono utilizado para la desinfección en aguas tratadas se produce disociando moléculas de oxígeno utilizando una fuente de energía. De esta forma se producen átomos de oxígeno separados los cuales al chocar con una molécula de oxígeno forman un gas inestable, el cual se conoce como ozono, el cual es un oxidante y agente germicida de virus muy fuerte. Una vez que se genera este gas se incorpora a un reactor de contacto en donde, éste se disuelve en el agua y comienza su función desinfectante. El ozono es generado en la planta debido a que el gas es inestable y se descompone en oxígeno elemental en un período corto de tiempo luego de su generación (EPA, 1999d). Algunas ventajas y desventajas de este sistema se resumen en la Tabla 1.23.

Tabla 1.24 Ventajas y desventajas de la ozono (Realizado a partir de EPA, 1999d)

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Desinfección efectiva. - Tiempo de contacto corto. - No existen residuos peligrosos. - Después del proceso de ozonización, los microorganismos no crecen nuevamente, a excepción de aquellos que están protegidos por las partículas en la corriente de agua residual. - El ozono es generado dentro de la planta, disminuyendo los problemas de seguridad industrial asociados con el envío y el transporte. - El proceso de ozonización eleva la concentración de oxígeno disuelto (O.D.) del efluente. El incremento O.D. puede eliminar la necesidad de reaeración y también puede incrementar el nivel de O.D. en la corriente de agua receptora. 	<ul style="list-style-type: none"> - La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas o quistes. - Se requieren equipos complicados y sistemas de contacto eficientes. - El ozono es muy reactivo y corrosivo, requiriendo así de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable. - El proceso de ozonización no es económico para las aguas residuales con altas SS, DBO, DQO, o carbono orgánico total. - El ozono es muy irritante y posiblemente tóxico, así que los gases de escape que salen de la cámara de contacto deben ser destruidos. - Costos elevados de inversión inicial y de operación.

La desinfección con ozono se utiliza generalmente en plantas de tamaño mediano o grande una vez que el agua residual haya recibido por lo menos tratamiento secundario. Además de la desinfección, otro uso común del ozono en el tratamiento del agua residual es el control de malos olores.

1.4.5.1.4. Dióxido de cloro

El dióxido de cloro (ClO_2) es un desinfectante cuya eficiencia sobrepasa a la del cloro y sus derivados. Debido a sus cualidades oxidantes selectivas, su aplicación es una alternativa a ser considerada donde además de la desinfección se requiere mejorar la calidad organoléptica del agua.

El dióxido de cloro no se vende como un producto listo para su uso, por lo que debe generarse in situ. Además, sólo se utiliza como desinfectante primario y su producción y manejo entrañan complejidad y riesgos. Por ello, no se recomienda para comunidades pequeñas con poca capacidad técnica; de allí su escasa popularidad en los países en desarrollo y su limitada aplicación en sistemas de mediano a gran porte en los países desarrollados (Metcalf y Eddy, 2004).

En la Tabla 1.25 se muestran las ventajas y desventajas de este sistema de desinfección.

Tabla 1.25 Ventajas y desventajas del dióxido de cloro (Realizado a partir de Metcalf y Eddy, 2004)

Ventajas	Desventajas
- Desinfección efectiva.	- Muy inestable
- Más efectivo en la eliminación de virus y esporas que el cloro	- Se debe producir en el sitio
- El proceso no se ve influenciado por el PH	- Descomposición con la luz solar
- Muy inestable	- Puede participar en la generación de olores
	- Costos de operación muy altos.

1.5. Sostenibilidad en el tratamiento de aguas residuales

La gran mayoría de la ciudades del mundo deben su crecimiento, al círculo vicioso generado por el aumento de población y a su vez que éste favorece el flujo de personas que buscan un desarrollo económico. Como consecuencia de esto, la demanda de agua potable aumenta considerablemente y por lo tanto la aportación de aguas residuales de la población también. Aunado a esto, en los países en vías de desarrollo esta necesidad no se ha visto satisfecha y la infraestructura existente ya es obsoleta o queda muy por debajo de los estándares de calidad. Por lo tanto, el desarrollo, explotación y tratamiento de los recursos hidráulicos deben de ser sostenibles en todos los sentidos: Económica, social y ambientalmente hablando (Mara, 2003).

Tanto las redes de alcantarillado como el tratamiento de aguas residuales tienen como objetivo proteger la salud humana y ambiental. Los beneficios son bien conocidos, sin embargo los aspectos negativos no son tan obvios y por lo tanto resultan menos reconocidos y por consecuencia tienen cierto impacto en la sociedad y en el medio ambiente. Un aspecto positivo de la recolección y transporte de las aguas residuales a un tratamiento apropiado, es la remoción de materia orgánica, patógenos y componentes químicos, antes de ser vertidas de nuevo a un cuerpo de agua. Sin embargo, este aspecto positivo tiene como consecuencia una serie de aspectos negativos como el posible desbalance del ciclo hidrológico y ambiental sobre todo el alto consumo de energía durante su construcción y sobre todo durante su vida operacional, contribuyendo a la emisión de dióxido de carbono a la atmosfera (Muga y Mihelcic, 2008).

Hoy en día, es necesario desarrollar tecnologías en el tratamiento de aguas residuales cuyo desempeño se encuentre en un balance ambiental, económico y social. Para evaluar la sostenibilidad

de un sistema de tratamiento de aguas residuales se puede recurrir a elaborar un análisis energético, un análisis económico y una evaluación de ciclo de vida. La selección de la tecnología de tratamiento de aguas residuales no puede basarse desde un punto de vista tecnológico (técnico), es necesario considerar las actividades humanas y ambientales involucradas en el entorno de este proceso (Muga y Mihelcic, 2008).

En la Tabla 1.26 se hace un resumen de los criterios de diseño más importantes para lograr la sostenibilidad en los proyectos de tratamiento de aguas residuales y en general de cualquier proyecto.

Tabla 1.26 Criterios para el diseño de un tratamiento sostenible de aguas residuales

Criterios	Referencia
<ul style="list-style-type: none"> - Evitar la dilución de altas concentraciones de desechos en el agua limpia - Máxima recuperación y reúso del agua tratada; utilización de los productos generados en el proceso - Aplicar un sistema de tratamiento eficiente, robusto y confiable - Bajo costo - Larga vida útil - Operación y mantenimiento estable - Aplicable a cualquier escala - Tendencia a ser auto suficientes en todos los aspectos - Aceptable para la población local 	Volkman, 2003
<ul style="list-style-type: none"> - Bajos costos de inversión, operación y mantenimiento - Baja o nula utilización de energía eléctrica (costos de operación) - Baja o nula utilización de químicos dañinos para el medio ambiente como el cloro y otros desinfectantes. - Producir un efluente de alta calidad - Baja producción de lodos. 	Mara, 2004

Esta página se dejó intencionalmente en blanco