

ISBN: 978-9942-13-872-9

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES:

Técnicas convencionales

Segunda Edición

MSc. Martha Mirella Bermeo Garay



MSc. Martha Mirella Bermeo Garay

ESTUDIOS

Ingeniera Química de la Universidad de Guayaquil.

Magister en Ingeniería Ambiental. Universidad de Guayaquil

Diplomado en Docencia Superior de la Universidad de Cuba -UG

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES:
Técnicas Convencionales

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES:
Técnicas Convencionales

MSc. Martha Mirella Bermeo Garay

Tratamiento de aguas residuales: Técnicas convencionales
Segunda Edición Mejorada y Actualizada: Junio 2016

Autor: MSc. Martha Mirella Bermeo Garay

Diagramación: Ing. Arnaldo Rodriguez Mateo

Colaboradores: MSc. Luis Bonilla Abarca, MSc. Judith Chalen, MSc. Stefanie Bonilla

Fotos, Imágenes: EMSABA EP.

Email: mbermeog@yahoo.com, martha.bermeog@ug.edu.ec

Teléfonos: 0994010440

ISBN: 978-9942-13-872-9

Queda rigorosamente prohibidos, bajo las sanciones de las leyes; la reproducción, almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios tanto electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

Guayaquil - Ecuador
2016

PENSAMIENTO

“Debemos dejar de hipotecar el futuro al presente. Debemos detener la destrucción del aire que respiramos, del agua que bebemos, de la comida que ingerimos y de los bosques que inspiran temor reverencial en nuestro corazón. Necesitamos impedir la contaminación en la fuente, no tratar de limpiarla después. Es tiempo de recordar que la conservación es la forma de energía menos costosa y menos contaminante ..Necesitamos reunirnos y elegir una nueva dirección. Necesitamos transformar nuestra sociedad en una en que la gente viva en verdadera armonía entre las naciones, entre las razas humanas y con la naturaleza. Debemos reducir, reutilizar, reciclar y restaurar o pereceremos.

(REV. JESSE JACKSON)

CONTENIDO

1. INGENIERÍA DE AGUAS RESIDUALES	17
1.1. AGUAS RESIDUALES	17
1.2. ETAPAS CONSIDERADAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA	17
1.3. TIPOS DE CAUDALES QUE APORTAN A LAS AGUAS RESIDUALES	18
1.3.1. Caudales de aguas residuales industriales	18
1.3.2. Caudales de aguas domésticas	18
1.3.3. Caudales de aguas pluviales	18
1.4. MEDICIONES DE CAUDALES EN DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES.	18
1.4.1. Vertederos	19
1.5. Aplicación práctica.	22
2. MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES	31
2.1. EL DISEÑO DE UN PROGRAMA DE MUESTREO Y MEDICIÓN	31
2.1.1. Objetivos del muestreo	31
2.1.2. Determinación de los principales parámetros a medir	31
2.1.3. Sitios donde se tomarían las muestras	34
2.1.4. Muestreo	34
2.1.4.1. Muestras simples	35
2.1.4.2. Muestras compuestas	35
2.1.4.3. Preparación de muestra compuesta	35
2.1.4.4. Aplicación práctica.	36
2.1.5. Preservación	36
2.1.5.1. Resumen de las Condiciones Especiales de Muestreo y Manipulación	37
2.1.6. Métodos de análisis	39
2.1.7. Procesamiento de datos	39
2.1.8. Construir un modelo que corresponda a los objetivos	39
2.2. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	39
2.3. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES	39
2.4. CÁLCULO DE CARGA CONTAMINANTE	41
2.4.1. Aplicación práctica.	42

3.SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 47

3.1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	47
3.2. TRATAMIENTO SEGÚN BIODEGRADABILIDAD	48
3.3. ORÍGENES DE LAS AGUAS RESIDUALES	50
3.4. TIPOS DE PRETRAMIENTO Y TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES	50
3.5. OBJETIVOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	51
3.6. FACTORES QUE INFLUEYEN EN LA SELECCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES	52
3.7. REQUISITOS DE LOS TRATAMIENTOS	52

4.PRETRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES 57

4.1. PRETRATAMIENTO	57
4.1.1. Pozo de gruesos	57
4.2. OPERACIONES APLICADAS EN PRETRATAMIENTO	59
4.2.1. Desbaste	59
4.2.1.1. Tipos de rejillas de desbaste	60
4.2.1.2. Diseño de rejillas de desbaste	60
4.2.1.3. Aplicación práctica.	61
4.2.2. Desarenado	62
4.2.2.1. Tipos de desarenadores	63
4.2.2.2. Desarenadores de flujo horizontal	63
4.2.2.3. Desarenador de flujo vertical.	64
4.2.2.4. Desarenadores de flujo inducido	65
4.2.2.5. Aplicación práctica.	65
4.2.3. Desengrasado	66
4.2.4. Dilaceración	67

5.TRATAMIENTO PRIMARIO 71

5.1. TRATAMIENTO PRIMARIO	71
5.2. PROCESOS CONSIDERADOS EN TRATAMIENTO PRIMARIO	71
5.2.1. Neutralización	71
5.2.1.1. Neutralización de las aguas ácidas	74
5.2.1.2. Neutralización de las aguas alcalinas	74
5.2.2. Métodos para neutralizar residuos líquidos industriales	75
5.2.3. Reactivos utilizados en la neutralización	76
5.2.4. Diseño experimental de un lecho de flujo ascensional de caliza para neutralización de residuos ácidos.	76
5.2.5. Variables de diseño	77

5.2.6. Diagrama del equipo	78
5.2.6.1. Manual de operación de la columna de neutralización	79
5.2.7. Pruebas experimentales con piedra caliza en proceso discontinuo, a nivel de laboratorio.	79
5.2.7.1. Aplicación práctica.	80
5.3. COAGULACIÓN FLOCULACIÓN	84
5.3.1. Reactivos a utilizar para la prueba de Jarras	85
5.3.2. Procedimiento de la prueba de Jarras	85
5.3.3. Prueba para determinar el pH óptimo	86
5.3.4. Pruebas en Jarras utilizando coagulantes más coadyudantes de coagulación	86
5.3.4.1. Aplicación práctica.	87
5.4. SEDIMENTACIÓN	89
5.4.1. Sedimentación floculenta	89
5.4.2. Sedimentación Zonal	89
5.4.3. Sedimentación por compresión	90
5.4.4. Sedimentación o Decantación primaria	91
5.4.5. Aplicación práctica.	93
5.5. FLOTACIÓN	100
5.5.1. Sistema de tratamiento de flotación con aire disuelto (fad)	100
5.5.2. Tipos de procesos aplicables	101
5.5.3. Ventajas	101
5.5.4. Desventajas	102
5.5.5. Variables de diseño	103
5.5.6. Flotación por aire disuelto (FAD).	103
5.5.7. Aplicación práctica.	108

6. TRATAMIENTO SECUNDARIO 113

6.1. OBJETIVO	113
6.2. DEPURACIÓN BIOLÓGICA	113
6.3. TRATAMIENTO AEROBIO	115
6.3.1. Lodos Activados	115
6.3.2. Aplicación práctica.	116
6.4. TRATAMIENTO ANAEROBIO	119
6.4.1. Ventajas	120
6.4.2. Desventajas	121

7. TRATAMIENTO TERCIARIO O AVANZADO 125

7.1. TRATAMIENTO TERCIARIA	125
7.2. TRATAMIENTOS TERCIARIOS QUE SE PUEDEN APLICAR	125
7.2.1. Desinfección	125
7.2.1.1. Acción del cloro	126
7.2.2. Nitrificación y desnitrificación	126
7.2.2.1. Nitrificación biológica	126
7.2.2.2. Desnitrificación biológica	127
7.2.3. Adsorción con carbón activado	128
7.2.4. Las membranas en el tratamiento de aguas residuales	129
7.2.4.1. Osmosis inversa	130
7.2.5. Tratamiento con tecnología electroquímica	132
7.2.5.1. e	132

8. NOMENCLATURA 137

9. BIBLIOGRAFÍA 140

INTRODUCCIÓN

Este libro se lo ha elaborado como un texto complementario, dirigido para catedráticos, estudiantes de pregrado, o toda persona que requiera información sobre tratamiento de aguas residuales. La mayoría de los ejemplares de aguas residuales se enfocan en operaciones en plantas de tratamiento. Este volumen es el resultado de muchos años de experimentaciones a nivel de planta piloto y laboratorio de aguas residuales.

En general con el contenido de este texto se quiere dar nociones de todo lo que implica los tratamientos de agua desde la etapa preliminar, los tratamientos primarios, los secundarios y los avanzados

En el primer capítulo se hace un breve diseño de programa de muestreo y medición de caudales que constituye la base para el diseño de los tratamientos de aguas residuales. Se hace una aplicación de toma de flujos con la incorporación de cálculos estadísticos.

Como parte del capítulo II trata de muestreo con la elaboración de una muestra compuesta de aguas residuales industriales. Se aborda además la caracterización físico químico y biológico de efluentes industriales, que son un apoyo definitivo para el diseño y control de sistemas de tratamiento

En los capítulos III y IV se hace un breve estudio del pre tratamiento, el porqué de su aplicación en determinados casos y la continuación de las operaciones a tratamiento primario, con experimentación en planta piloto, que sirven diseñar equipos.

Los capítulos V, VI y VII, involucran tratamientos secundarios y terciarios o avanzados, con la integración de pruebas experimentales a nivel de planta piloto. Es necesario indicar que la caracterización del agua al inicio del proceso es la que va a dar la pauta para la aplicación del tratamiento más conveniente.

CAPÍTULO I

INGENIERÍA DE AGUAS

1. INGENIERÍA DE AGUAS RESIDUALES

1.1. AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales son aquellas que tiene composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, que hayan sufrido degradación en su calidad original . (Ambiente, 2012)



Figura 1. Descarga de aguas residuales tratadas de una industria a un cuerpo hídrico
Fuente: Elaboración propia

1.2. ETAPAS CONSIDERADAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUA

Para solucionar un problema de calidad de aguas residuales se aplican, generalmente, cinco etapas:

- Determinación de caudales.
- Caracterización del agua residual cruda, aplicación de la norma técnica ambiental y determinación de la carga contaminante.
- Selección de los procesos de cada sistema, los parámetros de diseño y comparación de las alternativas propuestas.
- Diseño y construcción.
- Operación y mantenimiento del sistema construido.

1.3. TIPOS DE CAUDALES QUE APORTAN A LAS AGUAS RESIDUALES

Los caudales medios de las agua residuales sean estas domesticas o industriales, fluviales, así como los derivados de las infiltraciones y las aportaciones incontroladas, constituyen una información muy importante antes de proyectar una red de alcantarillado y las plantas de tratamiento. (Metcalf & Eddy, 1995)

1.3.1. Caudales de aguas residuales industriales

Los caudales de aguas industriales generadas en las diferentes industrias dependen del tipo y tamaño del centro industrial, el grado de reutilización del agua y el pre tratamiento que se dé al agua utilizada en el caso de que exista alguno son factores de los cuales depende un caudal. (Metcalf & Eddy, 1995)

1.3.2. Caudales de aguas domésticas

Aguas residuales domesticas constituyen los líquidos provenientes de las viviendas, edificios de zonas comerciales.

1.3.3. Caudales de aguas pluviales

Son aguas resultantes de la escorrentía superficial.

1.4. MEDICIONES DE CAUDALES EN DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES.

Las mediciones de caudales en descargas de aguas residuales se realizan de la siguiente manera:

- Mediante instalación de vertederos o canales Parshall. Mediciones en canales abiertos o en alcantarillas parcialmente llenas.
- Medición de llenado de recipiente con respecto al tiempo
- Estimación de caudales de bombeo y duración de los mismos.
- Cronometrando el desplazamiento de un objeto flotante entre dos puntos fijos a lo largo de su recorrido.
- Con examen del registro de uso de agua de la planta. Considerando las pérdidas debido a evaporación, utilizado para evaluaciones aproximadas.
- Cronometrando los cambios de niveles en tanques, reactores o depósitos que se utilicen en las operaciones con descargas sobre todo discontinuas. (Ramalho, 2000)

1.4.1. Vertederos

Los vertederos pueden ser definidos como simples aberturas, sobre los cuales un líquido fluye. El término se aplica también a obstáculos en el paso de la corriente y a las excedencias de los embalses, ver figura 2.

Los vertederos son por así decirlo orificios sin el borde superior y ofrecen las siguientes ventajas en la medición del agua:

- Se logra con ellos precisión en los aforos
- La construcción de la estructura es sencilla
- No son obstruidos por materiales que flotan en el agua
- La duración del dispositivo es relativamente larga

Los vertederos son utilizados, intensiva y satisfactoriamente en la medición del caudal de pequeños cursos de agua y conductos libres, así como en el control del flujo en galerías y canales, razón por la cual su estudio es de gran importancia.



Figura 2. Vertedero Río Segura Murcia España
Fuente: www.neetescuela.com/vertederos-hidraulicos

A continuación la terminología que se utiliza en los vertederos:

- CRESTA (L) Se denomina al borde horizontal, también llamado umbral.
- CONTRACCIÓN Lo constituyen los bordes o caras verticales.
- CARGA (H) Es la altura alcanzada por el agua a partir de la cresta del vertedero. Debido a la depresión de la lámina vertiente junto al vertedero, la carga H debe ser medida aguas arriba, a una distancia aproximadamente igual o superior a 4H.
- ANCHO (B) Ancho del canal de acceso al vertedero.

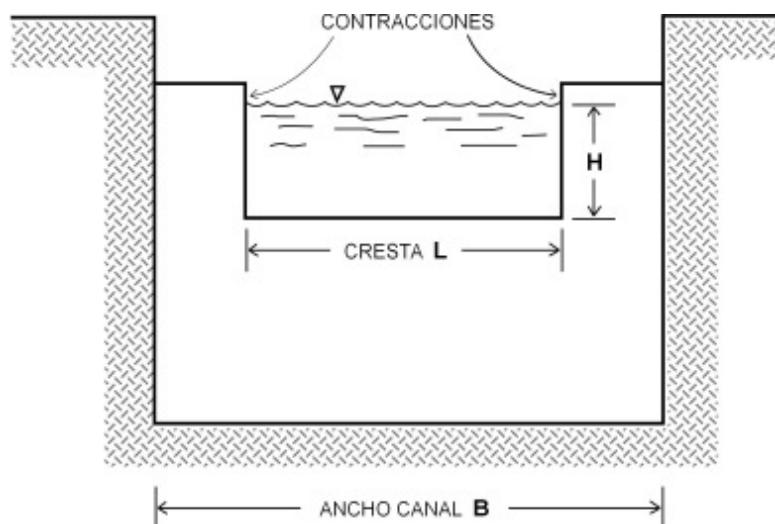


Figura 3. Partes del vertedero
Fuente: MONROY, 2010

En los vertederos rectangulares se puede calcular el caudal de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Q = 1.84 L H^{3/2} \quad Q = \text{m}^3/\text{s}, \quad L, H (\text{m})$$

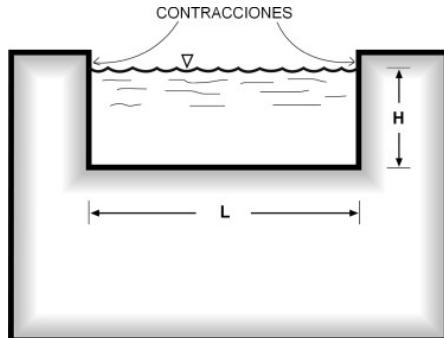
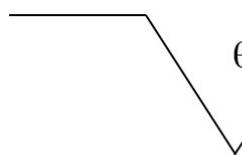


Figura 4. Vertedero rectangular
Fuente: MONROY, 2010

Para vertederos triangulares se emplean las siguientes fórmulas de acuerdo al ángulo *:

L ancho de la cresta



$$\begin{aligned} Q &= 0.775 H^{2.47} & \theta &= 60^\circ \\ Q &= 1.4 H^{5/2} & \theta &= 90^\circ \\ Q &= m^3/seg & H &= m \text{ altura del tirante} \end{aligned}$$

$$Q = 0.01378 \times H^{2.5} \text{ l/s}$$

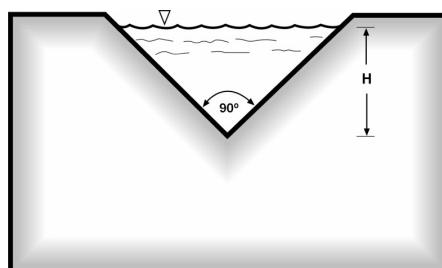


Figura 5. Vertedero triangular

Fuente: MONROY, 2010

Para vertederos trapezoidales de la forma:

h altura del tirante

$$Q = 1.85 \alpha L H^{3/2}$$

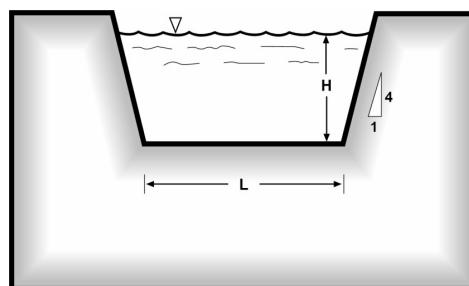
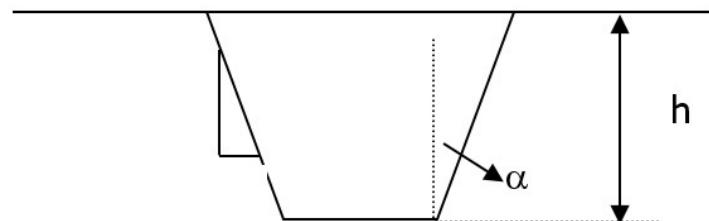


Figura 6. Vertedero trapezoidal

Fuente: MONROY, 2010

Para el vertedero circular su utilización es menos común que los anteriores, presentando como ventajas: la facilidad en su construcción, así como no requerir el nivelamiento de su cresta debido a su forma geométrica.

Caudales en m³/s.

$$Q = 1.518 D^{0.693} H^{1.807}$$

Caudales en l/s.

$$Q = 0.01518 D^{0.693} H^{1.807}$$

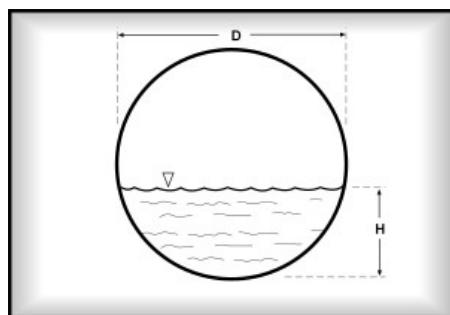


Figura 7. Vertedero circular

Fuente: MONROY, 2010

1.5. Aplicación práctica.

Una aplicación práctica de la determinación de caudales en aguas residuales es utilización de vertederos triangulares de 90°, para caudales 60 L/s y para caudales menores de 1m³/s los vertederos rectangulares.

Ejercicio 1.1

Por medio de un vertedero triangular, determinar el caudal promedio, mínimo, máximo, volumen parcial y acumulado. A partir de los datos experimentales de la medición de la altura de cresta de la Tabla 1, aplicando la formula respectiva.

A continuación los cálculos que se llevaron a cabo para llenar la Tabla 1.

$$Q = 0.01378 H^{5/2} \quad \text{l/s.}$$

Tabla 1. Determinación de volumen parcial y volumen acumulado en el afluente industrial.

Nombre: Industria Alimenticia C. Ltda. Corriente: Afluente del sistema de tratamiento. Tipo de Muestra: Compuesta Horas de muestreo: 08H30 - 20H30					
Nº de mediciones	Tiempo horas	altura (cm)	Caudal (l/s)	Volumen parcial (L)	Volumen acumulado (L)
1	08h30	1.50	0.038	0.000	0.000
2	09h00	2.50	0.136	68.352	68.352
3	09h30	2.00	0.078	245.116	313.468
4	10h00	2.50	0.136	140.313	453.780
5	10h30	2.00	0.078	245.116	698.896
6	11h00	3.00	0.215	140.313	839.209
7	11h30	4.50	0.592	386.656	1225.865
8	12h00	1.00	0.014	1065.499	2291.364
9	12h30	4.50	0.592	24.804	2316.168
10	13h00	2.50	0.136	1065.499	3381.667
11	13h30	3.00	0.215	245.116	3626.783
12	14h00	4.00	0.441	386.656	4013.439
13	14h30	2.50	0.136	793.728	4807.167
14	15h00	2.00	0.078	245.116	5052.283
15	15h30	4.00	0.441	140.313	5192.596
16	16h00	3.50	0.316	793.728	5986.324
17	16h30	4.00	0.441	568.449	6554.773
18	17h00	3.50	0.316	793.728	7348.501
19	17h30	6.00	1.215	568.449	7916.951
20	18h00	4.00	0.441	2187.257	10104.208
21	18h30	4.00	0.441	793.728	10897.936
22	19h00	3.50	0.316	793.728	11691.664
23	19h30	2.50	0.136	568.449	12260.113
24	20h00	5.50	0.978	245.116	12505.229
25	20h30	1.80	0.060	1759.659	14264.888

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Datos estadísticos de la Tabla 1

Caudal	Valor
Caudal Mínima	0.014
Caudal Maximo	1.215
Caudal Promedio	0.319
Caudal Mediana	0.316

Fuente: Elaboración propia

Caudal Vs Tiempo

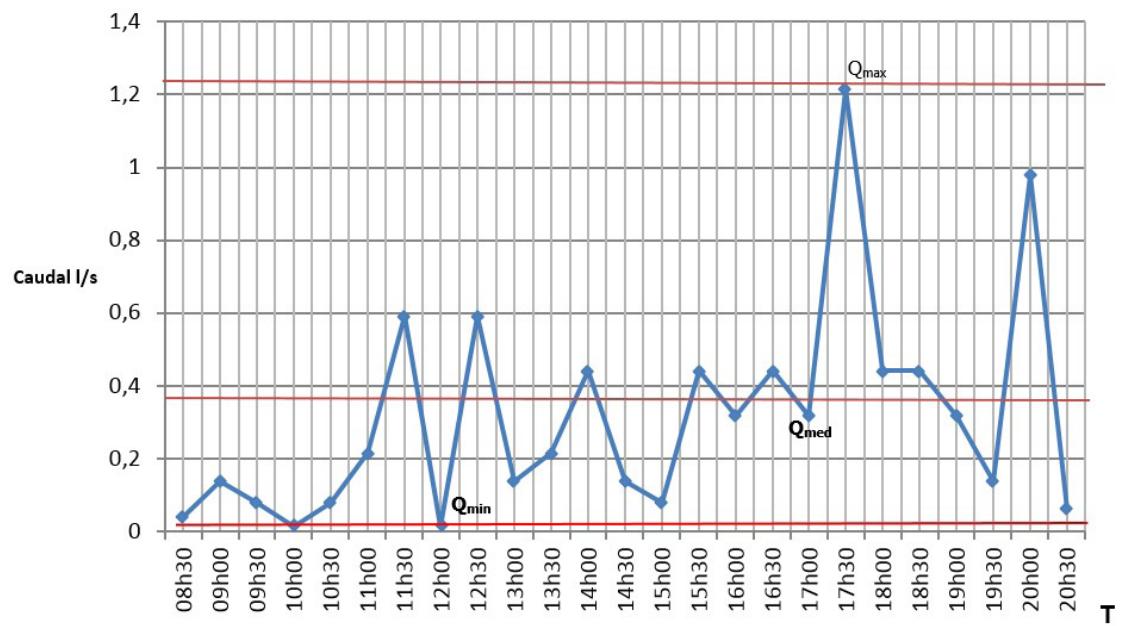


Figura 8. Caudal VS tiempo del afluente industrial Tabla 1

Fuente: Elaboración propia

Cálculos del caudal en un vertedero triangular

$$Q = 0.01378(H^{2.5})$$

$$Q = 0.01378(1.5^{2.5}) = 0.038 \text{ l/s}$$

Volumen parcial:

$$\left(\frac{0.038 \text{ l}}{\text{s}}\right)(30 \text{ min})\left(\frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}\right) = 68.35 \text{ l}$$

Volumen acumulado:

$$0.0 + 68.352 = 68.352$$
$$68.352 + 245.116 = 313.468$$

Ejercicio 1.2

Determinación de datos estadísticos: probabilidad, media, mediana, moda desviación típica, coeficiente de asimetría y curtosis.

Tabla 3. Caudal VS Probabilidad

Nº orden	CAUDAL (m^3 /semana)	PROBABILIDAD
1	3.38	11.1
2	7.26	22.2
3	12.70	33.3
4	22.38	44.4
5	30.84	55.5
6	35.68	66.6
7	41.12	77.7
8	47.17	88.8

Fuente: Elaboración propia

Probabilidad:

$$P = \left[\frac{m}{(n + 1)} \right] * 100$$

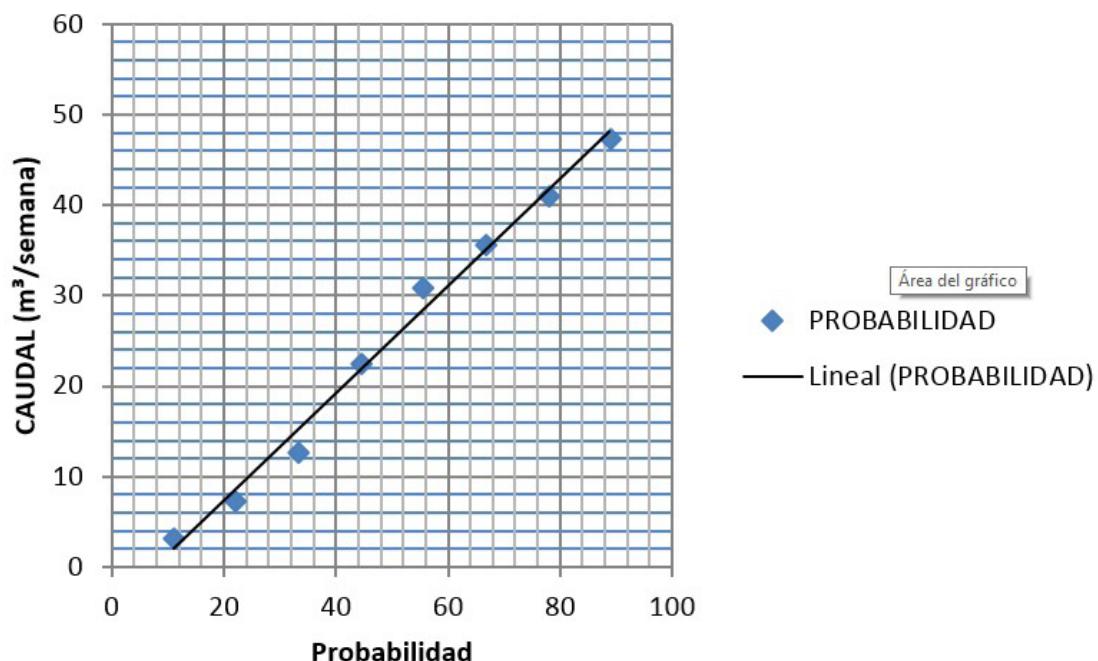


Figura 9. Caudal VS tiempo de Tabla 3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Parámetros estadísticos.

No. De Orden	Caudal	$(x - \bar{X})$	$(x - \bar{X})^2$	$(x - \bar{X})^3 * 10^3$	$(x - \bar{X})^4 * 10^4$
1	3.38	-21.68	470.02	-10.2	22.1
2	7.26	-17.8	316.84	-5.64	10
3	12.70	-12.36	152.78	-1.89	2.33
4	22.38	-2.68	7.18	-0.0192	0.005
5	30.84	5.78	33.41	0.193	0.12
6	35.68	10.62	112.78	1.20	1.27
7	41.12	16.06	257.92	4.14	6.65
8	47.17	22.12	489.21	10.8	23.9
	$\Sigma x = 200.73$	$\Sigma x = 0.06$	$\Sigma x = 1840.14$	$\Sigma x = 1.4162$	$\Sigma x = 66.3750$

Fuente: Elaboración propia

Cálculos:

Media \bar{X} :

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

$$\bar{X} = 200.53/8$$

$$\bar{X} = 25.0$$

Mediana

Localizador de la mediana:

$$L = \frac{n + 1}{2}$$

$$\begin{aligned} L &= (8+1)/2 \\ L &= 4.5 \end{aligned}$$

(El valor de la Mediana está localizado entre los valores en el puesto 4 y 5)

$$\begin{aligned} \text{Mediana} &= (22.38 + 30.84) / 2 \\ \text{Mediana} &= 26.61 \end{aligned}$$

Moda

$$\begin{aligned} \text{Moda} &= 3(\text{Mediana}) - 2(\bar{X}) \\ Mo &= 3(26.61) - 2(25.06) \\ Mo &= 29.71 \end{aligned}$$

Desviación típica

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{X})^2}{n}}$$

$$S = 15.16$$

Coeficiente de apuntamiento

$$\begin{aligned} CV &= 100S / X \\ CV &= 100(15.16) / 25.06 \\ CV &= 60.49 \end{aligned}$$

Coeficiente de asimetría

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= (1416.2 / (8-1)) / 15.16^3 \\ \alpha_3 &= 0.058 \end{aligned}$$

Coeficiente de Curtosis

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= (663750 / (8-1)) / 15.16^4 \\ \alpha_4 &= 1.795 \end{aligned}$$

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE CAUDALES DE AGUAS RESIDUALES DEL EJERCICIO 1.2

En la mayoría de los casos prácticos, la determinación del tipo de distribución se lleva a cabo de la siguiente forma: si se trata de una distribución normal, los parámetros que se emplean para caracterizar la serie de datos incluyen, entre otros la media, la mediana, la moda, la desviación típica, el coeficiente de asimetría y el coeficiente de curtosis, si se trata de una distribución sesgada, resulta relevantes tanto la media geométrica como la desviación típica. (Metcalf & Eddy, 1995)

Los resultados obtenidos de las gráficas permiten determinar si la distribución de los datos es normal o sesgada. En la experimentación 1 se ajustan a una recta. La obtención de una recta indica que la distribución no es sesgada y que se puede aplicar los datos estadísticos, para una distribución normal. (Metcalf & Eddy, 1995)

CAPÍTULO II

MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN
DE AGUAS RESIDUALES

2. MUESTREO Y CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

2.1. EL DISEÑO DE UN PROGRAMA DE MUESTREO Y MEDICIÓN

Un programa de muestreo y medición tiene las siguientes puntos:

- Objetivos del estudio
- Determinación de los principales parámetros a medir
- Sitios donde se tomarían las muestras
- Muestreo
- Preservación
- Métodos de análisis a emplear
- Procesamiento de datos
- Construir un modelo que corresponda a los objetivos

2.1.1. Objetivos del muestreo

De acuerdo a Tchobanoglous, 2000, el muestreo puede ser realizado para:

- Obtener datos operacionales del desempeño de la planta
- Documentar el desempeño de un determinado proceso
- Implementar programas nuevos
- Reportar cumplimiento de norma

2.1.2. Determinación de los principales parámetros a medir

Los parámetros a determinar dependen del tipo de descarga, si es industrial o doméstica, se aconseja seguir la guía de monitoreo de aguas industriales, la cual proporciona el CIIU, los parámetros de control de acuerdo a la industria.

GUIA PARA EL MONITOREO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

CIIU	DESCRIPCION	frecuencia muestreo	Tipo de muestra *	PARAMETROS DE ANALISIS														color	etc
				Q m ³ /d	Carga Contaminante kg/d	pH	T °C	AMG mg/l	DBO ₅ mg/l	DQO mg/l	STD mg/l	ST mg/l	SST mg/l	Metano pesado mg/l	Comp. Organoazotados mg/l	Comp. Organosulfurados mg/l	Comp. Fenólicos mg/l	TPH mg/l	P total mg/l
29	Extracción de minerales	mensual	compuesta																
31	Productos alimenticios, bebidas y tabaco	mensual	compuesta																
3111	Matanza de ganado, preparación y conservación de carne	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	color
3112	Fabricación de productos lácteos	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	
3113	Envasado y conservación de frutas y legumbres	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓						
3114	Procesamiento de recursos pesqueros	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	color
3115	Elaboración de aceites y grasas vegetales y animales	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						
3116	Industria molinera	mensual	compuesta																
3117	Industria Panadera	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						
3119	Elaboración de productos de cacao y artículos de confitería	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						color
3121	Elaboración de productos alimenticios diversos	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓						
3122	Elaboración de alimentos preparados para animales	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	color
3133	Bebidas producto de malta	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	✓	color
3134	Industria de bebidas no alcohólicas y aguas gaseosas	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓						color
32	Textiles, prendas de vestir e industrias de cuero	mensual	compuesta																
3211	Hilado, tejido y acabado de textiles	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓				✓		color
3214	Fabricación de tapices y alfombras	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓				✓		color
33	Industria de la madera y productos de la madera	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓				✓	✓	color
34	Fabricación de papel, productos de papel, Imprentas y editoriales	mensual	compuesta																
3412	Fabricación de envases y cajas de papel y cartón	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓		color
35	Fabricación de sustancias químicas y derivados de petróleo, caucho y plástico	mensual	compuesta																
3511	Fabricación de sustancias químicas industriales básicas excepto abono	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓		color
3512	Abonos y Plaguicidas	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	color
3513	Fabricación de resinas sintéticas, materias plásticas y fibras artificiales	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	color
3521	Fabricación de pinturas, barnices y lacas	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	color
3522	Fabricación de productos farmacéuticos y medicinales	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			color

Figura 10. Guia para el monitoreo de aguas residuales (1/3)

Fuente: Dirección de Medio Ambiente de la M.I. Municipalidad de Guayaquil

GUIA PARA EL MONITOREO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

CIIU	DESCRIPCION	frecuencia muestreo	Tipo de muestra *	PARAMETROS DE ANALISIS															otro	
				Q m ^{3/d}	Carga Contaminante kg/d (d)	pH	T °C	A&G mg/l	DBO _x mg/l	DQO mg/l	STD mg/l	ST mg/l	SST mg/l	Metano pesado (1) mg/l	Comp. Orgánicosredes mg/l	Comp. Fétidos mg/l	Comp. Organohalogenados mg/l	TPH mg/l	P total mg/l	N total mg/l
3523	Fabricación de jabones, perfumes y otros productos de tocador y limpieza	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			color
3529	Fabricación de productos químicos n.e.p.	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓		color
3540	Fabricación de Productos diversos derivados del Petróleo	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓		
3560	Fabricación de productos de plásticos n.e.p.	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			
36	Fabricación de productos minerales no metálicos	mensual	compuesta																	color
3620	Fabricación de vidrio y productos de vidrio	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			
3691	Fabricación de productos de acero para construcción	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			
3692	Fabricación de cemento, cal y yeso	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			
3699	Fabricación de productos minerales no metálicos n.e.p.	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			
37	Industrias metálicas básicas	mensual	compuesta																	color
3710	Industrias básicas de hierro y acero	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			color
3720	Industrias básicas de metales no ferrosos	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓			color
38	Fabricación de productos metálicos, maquinaria y equipo	mensual	compuesta																	color
3811	Fabricación de cuchillería, herramientas manuales y artículos generales de ferretería	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	color
3819	Fabricación de productos metálicos, n.e.p., exceptuando máquinas y equipos	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	color
3833	Construcción de aparatos y accesorios eléctricos de uso doméstico	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	color
3839	Construcción de aparatos y suministros eléctricos	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	color
41	producción y distribución de Energía	mensual	compuesta																	
4101	Luz y fuerza eléctrica	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓										✓	✓		
4102	Producción y distribución de gas	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓		
62	Comercio al por Menor	mensual	compuesta																	
62541	Establecimientos de servicios/gasolineras	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓		
95	Servicios Personales y de los hogares	mensual	compuesta														✓			color
9519	Otros servicios de reparación de maquinaria y equipo	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	color

Figura 11. Guía para el monitoreo de aguas residuales (2/3)

Fuente: Dirección de Medio Ambiente de la M.I. Municipalidad de Guayaquil

GUIA PARA EL MONITOREO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

CIIU	DESCRIPCION	frecuencia muestreo	Tipo de muestra *	PARAMETROS DE ANALISIS															otro	
				Q m ^{3/d}	Carga Contaminante kg/d (d)	pH	T °C	A&G mg/l	DBO _x mg/l	DQO mg/l	STD mg/l	ST mg/l	SST mg/l	Metano pesado (1) mg/l	Comp. Orgánicosredes mg/l	Comp. Fétidos mg/l	Comp. Organohalogenados mg/l	TPH mg/l	P total mg/l	N total mg/l
9520	Lavanderías y Servicios de Lavanderías, establecimientos de limpieza y teñido	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓		✓		color
3420	Imprentas, editoriales e industrias conexas	mensual	compuesta	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	

(1) De acuerdo a la materia prima, materiales e insumos del proceso industrial.

(2) 40 CFR 268.40 (Code of Federal Regulations).

* Monitoreo continuo de acuerdo al proceso y/o jornada laboral.

✓ Parámetros principales a monitorearse.

** Parámetros principales a monitorearse según requerimiento de la Dirección de Medio Ambiente.

SÍMBOLOGIA

Q Caudal
pH potencial de Hidrógeno
T Temperatura
A&G Aceites y grasas
DQO Demanda química de Oxígeno
DBO_x Demanda biológica de Oxígeno
TPH Hidrocarburos totales de petróleo
SST Sólidos suspendidos totales
STD Sólidos totales disueltos
ST Sólidos totales

Nota: se entregaran los reportes bimestrales de los monitoreos realizados con frecuencia mensual

Figura 12. Guía para el monitoreo de aguas residuales (3/3)

Fuente: Dirección de Medio Ambiente de la M.I. Municipalidad de Guayaquil

2.1.3. Sitios donde se tomarían las muestras

En el plan de muestreo se determinan el número de puntos de muestreo, el número y clase de muestras. Para que la muestra sea representativa se prefieren sitios con flujo muy turbulento donde el agua residual esté bien mezclada, sin embargo, el sitio de muestreo debe seleccionarse de acuerdo con cada problema individual de estudio. (Rojas, 2001).

2.1.4. Muestreo

Los muestreos deben alcanzar las metas del programa para lo cual los datos recolectados deben ser (Tchobanoglous, 2000, pág. 25):

- **Representativos:** los datos deben representar el agua residual o el ambiente muestreado.
- **Reproducibles:** los datos obtenidos pueden ser reproducidos por otros siguiendo el mismo procedimiento de muestreo y protocolos analíticos.
- **Sustentados:** la documentación debe estar disponible para validar el plan de muestreo, con un grado conocido de exactitud y precisión.

Dependiendo el tipo de industria y la investigación a realizar se realiza el muestreo, se puede tomar muestras simples o instantáneas y muestras compuestas.



Figura 13. Tubo para muestreo

Fuente: EMSABA EP.

2.1.4.1. Muestras simples

Es la que se realiza una toma de muestra durante un determinado tiempo y se toma un volumen aproximado de 1 a 2 litros dependiendo los análisis que se realicen.

2.1.4.2. Muestras compuestas

Es la que se realiza durante 8 hrs de trabajo y se toma aproximadamente 2 litros por cada hora dependiendo los análisis que se requieran.

En una toma de muestras compuestas hay que realizar un registro de todas las muestras e identificar cada envase con etiqueta con los datos como fecha, hora, temperatura, pH, STD y el nombre del muestreador.

Objetivos de la preparación de una muestra compuesta:

- Realizar las caracterizaciones dependiendo de la actividad industrial.
- Diseñar un tratamiento al efluente industrial Observaciones.

Consideraciones:

- a) Para análisis se prepara 1 galón
- b) Para realizar estudio de tratabilidad test de jarrar se prepara una caneca de 20 litros.

2.1.4.3. Preparación de muestra compuesta

Fórmula aplicada:

$$V = \frac{V}{n Q_p} Q_{1,2,3,etc}$$

EQUIVALENCIA DE FÓRMULAS	
<i>v</i>	Volumen a preparar de la muestra compuesta
<i>m</i>	# de muestras
<i>Q_p</i>	Caudal promedio
<i>Q_{1,2,3,4}</i>	Para diferente caudales
<i>V</i>	Alícuota a medir

Fórmula del Caudal:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{l}{s}$$

2.1.4.4. Aplicación práctica.

Ejercicio 2.1

Preparar la muestra compuesta de 1000 cc de aguas residuales de una pesquera, calcular el caudal y aplicar la fórmula para la medición de la alícuota.

Tabla 5. *Ejemplo de preparación de una muestra compuesta de 1000cc.
En base a propuesta de Ramalho.*

Nº	Caudal m ³ /h	Alícuota cc
1	1.1	101.85
2	1.5	138.88
3	1.3	120.36
4	1.2	101.1
5	1.6	148.14
6	1.7	157.4
7	1.8	166.66
8	1.6	148.14
Q _p = 1.35		Σ = 1082.53

Fuente: Elaboración propia

Fórmulas aplicadas:

$$Q_p = \frac{\sum Q}{n}$$

$$V_n = \frac{\text{Volumen de muestra a preparar}}{n \text{ de muestras} * Q_p} Q_n$$

2.1.5. Preservación

Algunos cationes se pierden por absorción en las paredes de los envases de vidrio o por intercambio iónico entre estos cationes se encuentran el aluminio, cadmio, cromo, cobre hierro, plomo, manganeso, plata, zinc, cuando se va analizar estos metales pesados hay que acidificar la muestra con ácido nítrico hasta un pH de 2. Las muestras simples y compuestas deben ser refrigeradas, dependiendo el análisis que se realice esta deben tener su método de preservación.(Leonore Clescire 1992).

Para una mejor precisión en la preservación de muestras se puede consultar el Standard Methods for the Examination of Water and wastewater, edición 22. La tabla presenta parámetro tipo de recipiente, volumen de muestra, preservación tiempo máximo de almacenamiento recomendado. Y tiempo regular.

2.1.5.1. Resumen de las Condiciones Especiales de Muestreo y Manipulación

1-44

INTRODUCTION (1000)

TABLE 1060:I. SUMMARY OF SPECIAL SAMPLING AND HANDLING REQUIREMENTS*

Determination	Container†	Minimum Sample Size mL	Sample Type‡	Preservation§	Maximum Storage Recommended	Regulatory
Acidity	P, G(B), FP	100	g	Cool, ≤6°C	24 h	14 d
Alkalinity	P, G, FP	200	g	Cool, ≤6°C	24 h	14 d
BOD	P, G, FP	1000	g, c	Cool, ≤6°C	6 h	48 h
Boron	F, P (PTFE) or quartz	1000	g, c	HNO ₃ to pH<2	28 d	6 months
Bromide	P, G, FP	100	g, c	None required	28 d	28 d
Carbon, organic, total	G(B), P, FP	100	g, c	Analyze immediately; or cool ≤6°C, and add HCl, H ₃ PO ₄ , or H ₂ SO ₄ to pH	7 d	28 d
Carbon dioxide	P, G	100	g	Analyze immediately	0.25 h	N.S.
COD	P, G, FP	100	g, c	Analyze as soon as possible, or add H ₂ SO ₄ to pH<2; Cool, ≤6°C	7 d	28 d
Chloride	P, G, FP	50	g, c	None required	N.S.	28 d
Chlorine, total, residual	P, G	500	g	Analyze immediately	0.25 h	0.25 h
Chlorine dioxide	P, G	500	g	Analyze immediately	0.25 h	N.S.
Chlorophyll	P, G	500	g	Unfiltered, dark, 4°C Filtered, dark, -20°C (Do not store in frost-free freezer)	24-48 h 28 d	N.S.
Color	P, G, FP	500	g, c	Cool, ≤6°C	48 h	48 h
Specific conductance	P, G, FP	500	g, c	Cool, ≤6°C	28 d	28 d
Cyanide	Total	P, G, FP	1000	g, c	Analyze within 15 min. Add NaOH to pH>12 if sample is to be stored, Cool, ≤6°C, in dark. Add thiosulfate if residual chlorine present	24 h 14 d; 24 h if sulfide present
Amenable to chlorination						
Fluoride	P	100	g, c	Remove residual chlorine with thiosulfate and cool ≤6 °C	stat	14 d; 24 h if sulfide present
Hardness	P, G, FP	100	g, c	None required	28 d	28 d
Iodine	P, G	500	g	Add HNO ₃ or H ₂ SO ₄ to pH<2	6 months	6 months
Metals	P(A), G(A), FP (A)	1000	g, c	Analyze immediately For dissolved metals filter immediately, add HNO ₃ to pH<2	0.25 h 6 months	N.S. 6 months
Chromium VI	P(A), G(A), FP (A)	250	g	Cool, ≤6°C, pH 9.3-9.7, ammonium sulfate buffer preservative as specified in method 3500-Cr to extend to 28 days HT	28 d	28 d
Copper by colorimetry	—*	—	g, c	—	—	—
Mercury	P(A), G(A), FP(A)	500	g, c	Add HNO ₃ to pH<2, Cool ≤6°C	28 d	28 d
Nitrogen	Ammonia	P, G, FP	500	g, c	Analyze as soon as possible or add H ₂ SO ₄ to pH<2, Cool, ≤6°C	7 d 28 d
Nitrate						
Nitrate + nitrite	P, G, FP	200	g, c	Add H ₂ SO ₄ to pH<2, Cool, ≤6°C	1-2 d	28 d
Nitrite	P, G, FP	100	g, c	Analyze as soon as possible; Cool, ≤6°C	none	48 h
Organic, Kjeldahl	P, G, FP	500	g, c	Cool, ≤6°C, add H ₂ SO ₄ to pH<2	7 d	28 d
Odor	G	500	g	Analyze as soon as possible; Cool ≤6°C	6 h	24 h (EPA Manual drinking water)
Oil and Grease	G, wide-mouth calibrated	1000	g	Add HCl or H ₂ SO ₄ to pH<2, Cool, ≤6°C	28 d	28 d

Figura 14. Condiciones especiales de Muestreo y Manipulación (1/2)

Fuente: Standard Methods for the Examination of water and wastewater, 2012

COLLECTION AND PRESERVATION OF SAMPLES (1060)/Sample Storage and Preservation

1-45

TABLE 1060:I. CONT.

Determination	Container†	Minimum Sample Size mL	Sample Type‡	Preservation§	Maximum Storage Recommended	Regulatory
Organic Compounds						
MBAS Pesticides*	P, G, FP G(S), PTFE-lined cap	250 1000	g, c g, c	Cool ≤6°C Cool, ≤6°C add 1000 mg ascorbic acid/L if residual chlorine present (0.008 % sodium thiosulfate in CFR 136)	48 h 7 d	48 h as per CFR 136 7 d until extraction; 40 d after extraction
Phenols	P, G, PTFE-lined cap	500	g, c	Cool, ≤6°C, add H ₂ SO ₄ to pH<2	*	28 d until extraction, 2 d after extraction
Purgeables* by purge and trap	G, PTFE-lined cap	2×40	g	Cool, ≤6°C; add HCl to pH<2; add 1000 mg ascorbic acid/L if residual chlorine present (0.008% sodium thiosulfate in CFR 136)	7 d	14 d
Base/ neutrals & acids	G(S) amber	1000	g, c	Cool, ≤6°C, 0.008 % sodium thiosulfate in CFR 136 if chlorine is present	7 d	7 d until extraction; 40 d after extraction
Oxygen, dissolved Electrode Winkler	G, BOD bottle	300	g	Analyze immediately Titration may be delayed after acidification	0.25 h 8 h	0.25 h 8 h
Ozone	G	1000	g	Analyze immediately	0.25 h	N.S.
pH	P, G	50	g	Analyze immediately	0.25 h	0.25 h
Phosphate	G(A)	100	g	For dissolved phosphate filter immediately; Cool, ≤6°C	48 h	48 h as per EPA manual for DW.
Phosphorus, total	P, G, FP	100	g, c	Add H ₂ SO ₄ to pH<2 and cool, ≤6°C	28 d	28 d
Salinity	G, wax seal	240	g	Analyze immediately or use wax seal	6 months	N.S.
Silica	F, P (PTFE) or quartz	200	g, c	Cool ≤6°C, do not freeze	28 d	28 d
Sludge digester gas Solids ⁹	G, gas bottle P, G	— 200	g, c	— Cool, ≤6°C	N.S. 7 d	2-7 d; see cited reference
Sulfate Sulfide	P, G, FP P, G, FP	100 100	g, c g, c	Cool, ≤6°C Cool, ≤6°C; add 4 drops 2N zinc acetate/100 mL; add NaOH to pH>9	28 d 28 d	28 d 7 d
Temperature	P, G, FP	—	g	Analyze immediately	0.25 h	0.25 h
Turbidity	P, G, FP	100	g, c	Analyze same day; store in dark up to 24 h, Cool, ≤6°C	24 h	48 h

* For determinations not listed, use glass or plastic containers; preferably refrigerate during storage and analyze as soon as possible.

† P = plastic (polyethylene or equivalent); G = glass; G(A) or P(A) = rinsed with 1 + 1 HNO₃; G(B) = glass, borosilicate; G(S) = glass, rinsed with organic solvents or baked; FP = fluoropolymer (polytetrafluoroethylene (PTFE, Teflon) or other fluoropolymer

‡ g = grab; c = composite.

§ Cool = storage at, >0°C, ≤6°C (above freezing point of water); in the dark; analyze immediately = analyze usually within 15 min of sample collection.

|| See citation¹⁰ for possible differences regarding container and preservation requirements. N.S. = not stated in cited reference; stat = no storage allowed; analyze immediately (within 15 min).

Some drinking water (DW) and treated wastewater (WW) matrices may be subject to positive interference as a result of preservation. If such interference is demonstrable, samples should be analyzed as soon as possible without preservation. Do not hold for more than 15 minutes without demonstrating that cyanide (CN) is stable for longer periods in a specific matrix.

NOTE: This table is intended for guidance only. If there is a discrepancy between this table and the method, the information in the current method takes precedence. If performing the method for compliance purposes, be aware that alternative preservation and holding-time requirements may exist. If so, the regulatory requirements should be used.

Figura 15. Condiciones especiales de Muestreo y Manipulación (2/2)

Fuente: Standard Methods for the Examination of water and wastewater, 2012

Ejemplo: El análisis de aceites y grasas requiere pH ácido, esta muestra tendrá que ser acidiificada a pH de 2 adicionando unas gotas de ácido sulfúrico.

Existen parámetros que deben ser analizados inmediatamente como son oxígeno disuelto, pH, cloro residual, ozono, etc.

2.1.6. Métodos de análisis

Los métodos cuantitativos de análisis son gravimétricos, volumétricos o físico- químicos; en los métodos físico- químicos se miden propiedades diferentes a la masa o al volumen. Los métodos instrumentales de análisis como granulometría, colorimetría, potenciometría de absorción, flurometría, espectroscopía y radiación molecular son análisis físico químico representativo. En lo concerniente a los diversos análisis pueden encontrarse mayores detalles en Standard Methods , la cual es la referencia aceptable para la realización de análisis tanto agua potable, como agua residual.

2.1.7. Procesamiento de datos

Luego de la realización de los análisis se procede a procesar los datos de acuerdo a los requerimientos o se procede a comparar con las normativas vigentes, Texto unificado de la Legislación Ambiental Ecuatoriana. Actualizada al 2013. Y aplicación de métodos estadísticos para lo cual se puede aplicar Excel o programas como Minitab y SPSS.

2.1.8. Construir un modelo que corresponda a los objetivos

Para elaborar un modelo de operación del desempeño de la planta se parte de los datos procesados los cuales nos permiten, construir programas nuevos de monitoreo a fin de elaborar de un modelo de control de una etapa o etapas del proceso.

2.2. COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Por su origen las aguas residuales presentan en su composición diferentes elementos que se pueden resumir como:

- Componentes suspendidos
 - Gruesos (inorgánicos y orgánicos)
 - Finos (inorgánicos y orgánicos)
- Componentes disueltos
 - Inorgánicos
 - Orgánicos

2.3. CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales presentan características físicas, químicas y biológicas, las cuales deben ser determinadas para aplicar un tratamiento específico. Dependiendo el efluente industria se analizan los parámetros correspondientes al efluente generado. A continuación las figuras de las tablas con los análisis más comunes en aguas residuales.

Prueba [†]	Abreviatura / Definición	Uso o significados del resultado	
		Características físicas	
Sólidos totales	ST	Determinar la clase de proceso u operación más apropiada para su tratamiento	
Sólidos volátiles totales	SVT		
Sólidos fijos totales	SFT		
Sólidos suspendidos totales	SST		
Sólidos suspendidos volátiles	SSV		
Sólidos suspendidos fijos	SSF		
Sólidos disueltos totales	SDT (ST-SST)	Estimar la reutilización potencial del agua residual	
Sólidos disueltos volátiles	SDV		
Sólidos disueltos fijos totales	SDF		
Sólidos sedimentables			Determinar aquellos sólidos que se sedimentan por gravedad en un tiempo específico
Distribución de partículas por tamaño	DPT		Evaluar el desempeño de los procesos de tratamiento
Turbiedad	UNT		Evaluar la calidad del agua residual tratada
Color	Café claro, gris, negro		Estimar la condición del agua residual (fresca o séptica)
Transmitancia	%T		Estimar si el efluente tratado es apropiado para desinfección con radiación UV
Olor	NUO		Determinar si el olor puede ser un problema
Temperatura	°C o °F		Importante en el diseño y operación de instalaciones de tratamiento con procesos biológicos
Densidad	ρ		
Conductividad	CE		Estimar si el efluente tratado es apto para su uso agrícola

Figura 16. Análisis comunes usados para estimar los constituyentes encontrados en las aguas residuales

Fuente: Tchobanoglous, 2000, p. 22

Características químicas inorgánicas

Amonio libre	NH_4^+	Usado como medida de nutrientes y para establecer el grado de descomposición del agua residual; las formas oxidadas pueden tomarse como una medida del grado de oxidación. Usado como medida de nutrientes
Nitrógeno orgánico	N – org	
Nitrógeno total Kjeldahl	NTK (N org + NH_4^+)	
Nitritos	NO_2^-	
Nitratos	NO_3^-	
Fósforo inorgánico	P inorg	
Fósforo total	FT	
Fósforo orgánico	P org	
pH	$\text{pH} = \log 1/[\text{H}^+]$	Medida de la acidez o basicidad de una solución acuosa
Alcalinidad	$\Sigma \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-} + \text{OH}^- - \text{H}^+$	Medida de la capacidad amortiguadora del agua residual
Cloruros	Cl ⁻	Estar la posibilidad de ser empleada en el uso agrícola
Sulfatos	SO_4^{2-}	Estimar la formación potencial de olores y de tratamiento apropiado de lodos residuales

Figura 16. Características químicas inorgánicas (1/3)

Fuente: Tchobanoglous, 2000, p. 22

Prueba[†]	Abreviatura / Definición	Uso o significado del resultado
Metales	As, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Pb, Mg, Hg, Mo, Ni, Se, Na, Zn	Estimar la posibilidad de reutilizar el agua residual y los posibles efectos tóxicos en el tratamiento. Las cantidades de metales son importantes en el tratamiento biológico
Compuestos y elementos inorgánicos específicos		Evaluar la presencia o ausencia de un constituyente específico
Gases	O ₂ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S, CH ₄	Presencia o ausencia de un gas específico

Figura 17. Características químicas inorgánicas (2/3)

Fuente: Tchobanoglous, 2000, p. 23

Características químicas orgánicas

Demanda bioquímica carbonácea de oxígeno a cinco días	DBOC ₅	Medida de la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente un residuo
Demanda bioquímica carbonácea de oxígeno última	DBOU (DBO _u , L)	Medida de la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente un residuo
Demanda de oxígeno nitrogenácea	DON	Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidar biológicamente el nitrógeno amoniacal de un agua residual a nitratos
Demanda química de oxígeno	DQO	Usada con frecuencia como sustituto de la prueba de DBO
Carbono orgánico total	COT	Usado con frecuencia como sustituto de la prueba de DBO
Compuestos y clases de compuestos orgánicos específicos		Determinar la presencia de compuestos orgánicos específicos y estimar la necesidad de medidas especiales en el diseño para su remoción

Figura 18. Características químicas inorgánicas (3/3)

Fuente: Tchobanoglous, 2000, p. 23

2.4. CÁLCULO DE CARGA CONTAMINANTE

Para determinar la carga contaminante de una empresa es necesario realizar una caracterización físico-química, tomando en consideración todos los parámetros que puedan aportar ya sea por degradación o descomposición de sus componentes a la contaminación del cuerpo receptor.

2.4.1. Aplicación práctica.

Ejercicio 2.2

Cálculo de la carga contaminante de un efluente tomando en consideración la descarga a un mismo canal, en un día de máxima producción. A continuación los datos obtenidos experimentalmente.

Datos		
Volumen generado/día:	183.56 m ³ /día	(aforado)
Sólidos suspendidos:	520.00 mg/l	(laboratorio)
DQO:	6500 mg/l	(laboratorio)
DBO ₅ :	3100 mg/l	(laboratorio)

Cálculos de carga contaminante:

- Carga de sólidos suspendidos:

$$\left(\frac{183.56 \text{ m}^3}{\text{d}}\right) \left(\frac{520 \text{ mg}}{1}\right) \left(\frac{1000 \text{ l}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{1 \text{ kg}}{10^6 \text{ mg}}\right) = \frac{95.45 \text{ kg SS}}{\text{día}}$$

- Carga de DQO:

$$\left(\frac{183.56 \text{ m}^3}{\text{d}}\right) \left(\frac{6500 \text{ mg}}{1}\right) \left(\frac{1000 \text{ l}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{1 \text{ Kg}}{10^6 \text{ mg}}\right) = \frac{1193.14 \text{ kg DQO}}{\text{día}}$$

- Carga de DBO₅:

$$\left(\frac{183.56 \text{ m}^3}{\text{d}}\right) \left(\frac{3100 \text{ mg}}{1}\right) \left(\frac{1000 \text{ l}}{\text{m}^3}\right) \left(\frac{1 \text{ Kg}}{10^6 \text{ mg}}\right) = \frac{569.04 \text{ kg DBO}_5}{\text{día}}$$

CAPÍTULO III

SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES

3. SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

3.1. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Las aguas generadas de los procesos industriales requieren un tratamiento antes de su descarga. En la etapa inicial por lo general predomina los fenómenos físicos, que corresponden a las operaciones unitarias, luego se utilizan procesos químicos y biológicos, conocidos como procesos unitarios para eliminar los sólidos suspendidos, usualmente se realiza una combinación de procesos y operaciones unitarias. Las aplicaciones de los mismos darán lugar a los tratamientos preliminares, primarios, secundarios y terciarios.

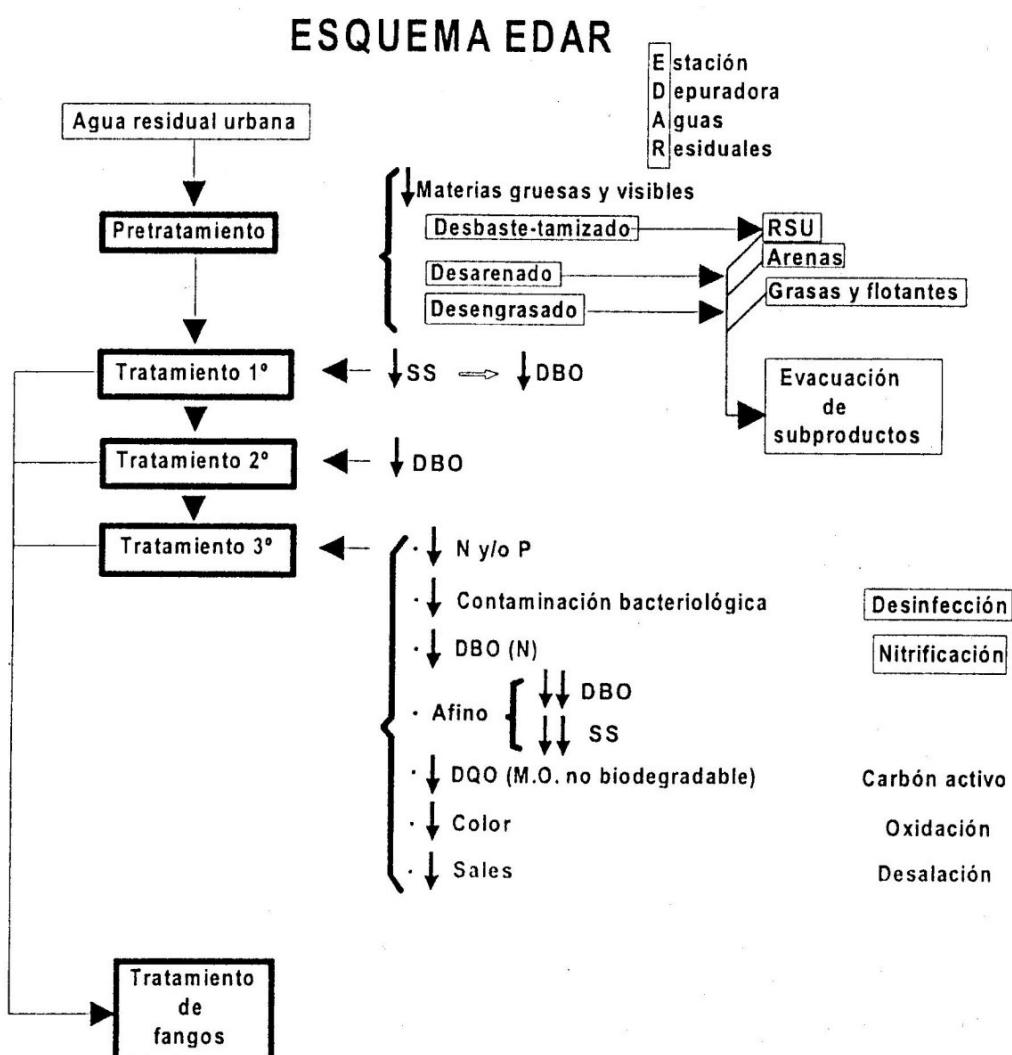


Figura 19. Esquema de una estación depuradora de aguas residuales

ARU.- Aguas Residuales Urbanas

EDAR.- Estación Depuradora de Aguas Residuales

Fuente: Tratamiento de Aguas Residuales J.Tejero/ J. Suarez /A.Jácome /J.Temprado

3.2. TRATAMIENTO SEGÚN BIODEGRADABILIDAD

De acuerdo a Osorio, 2014, los tratamientos según su biodegradabilidad se dividen en 2 grandes grupos: si el agua es biodegradable generalmente se utilizan tratamientos biológicos y si no es biodegradable o parcialmente biodegradable, se utilizan los tratamientos de oxidación avanzado para eliminar los contaminantes. Lo cual se puede ver en la Figura 20.

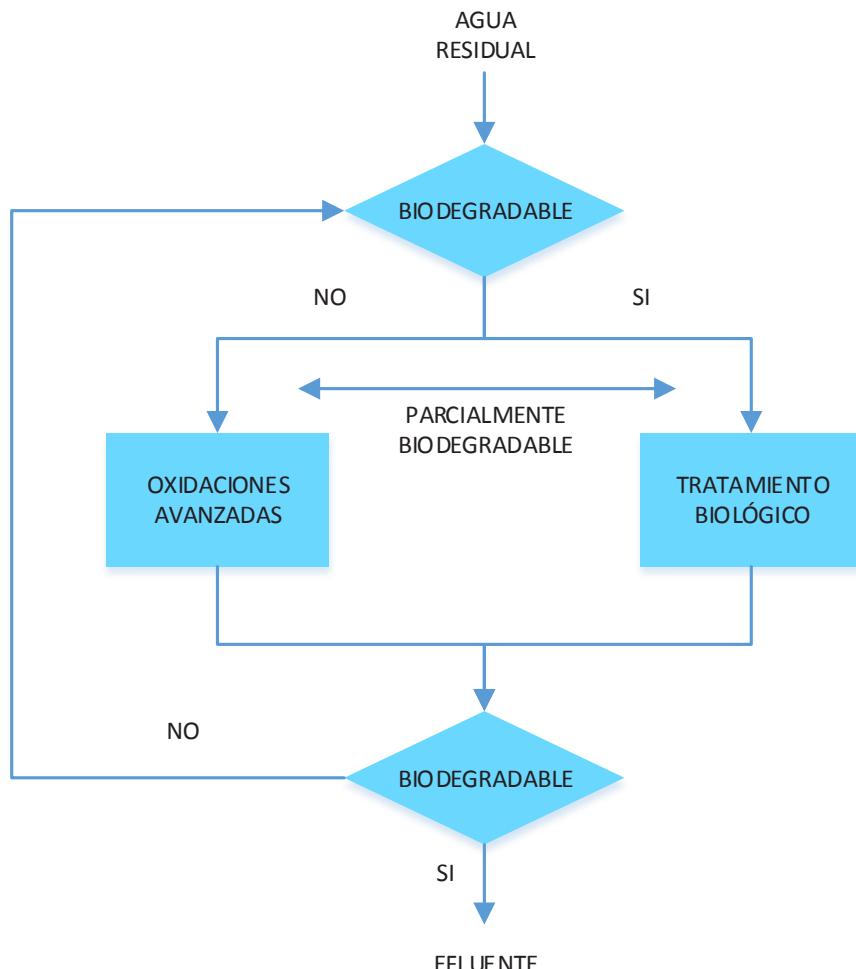


Figura 20. Estrategia aplicadas según la biodegradabilidad del agua residual.

Fuente: Adaptado de Robles, Torres, & Sánchez, 2014, pág. 15.

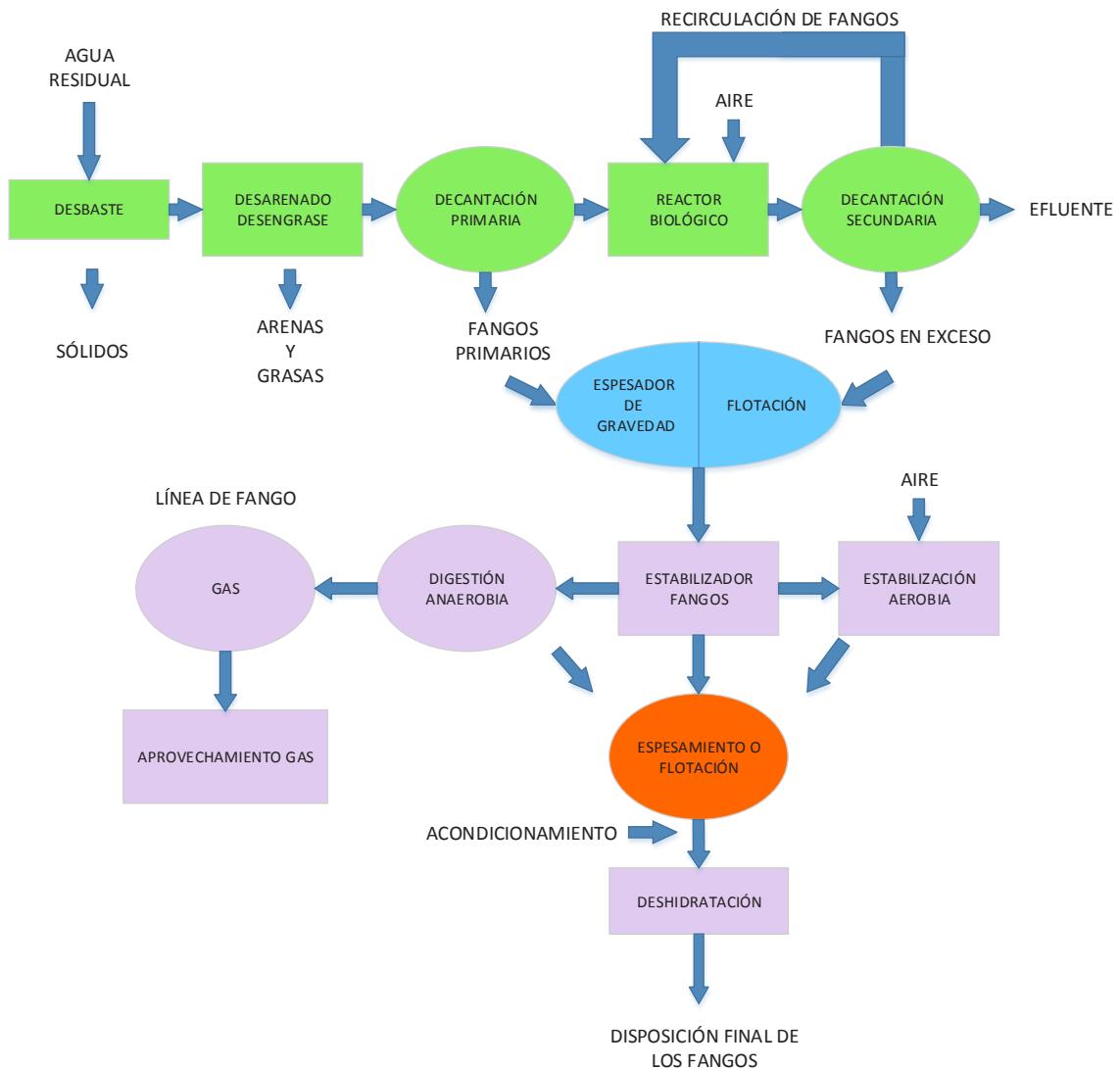


Figura 21. Esquema general de una EDAR
Fuente: Elaboración propia

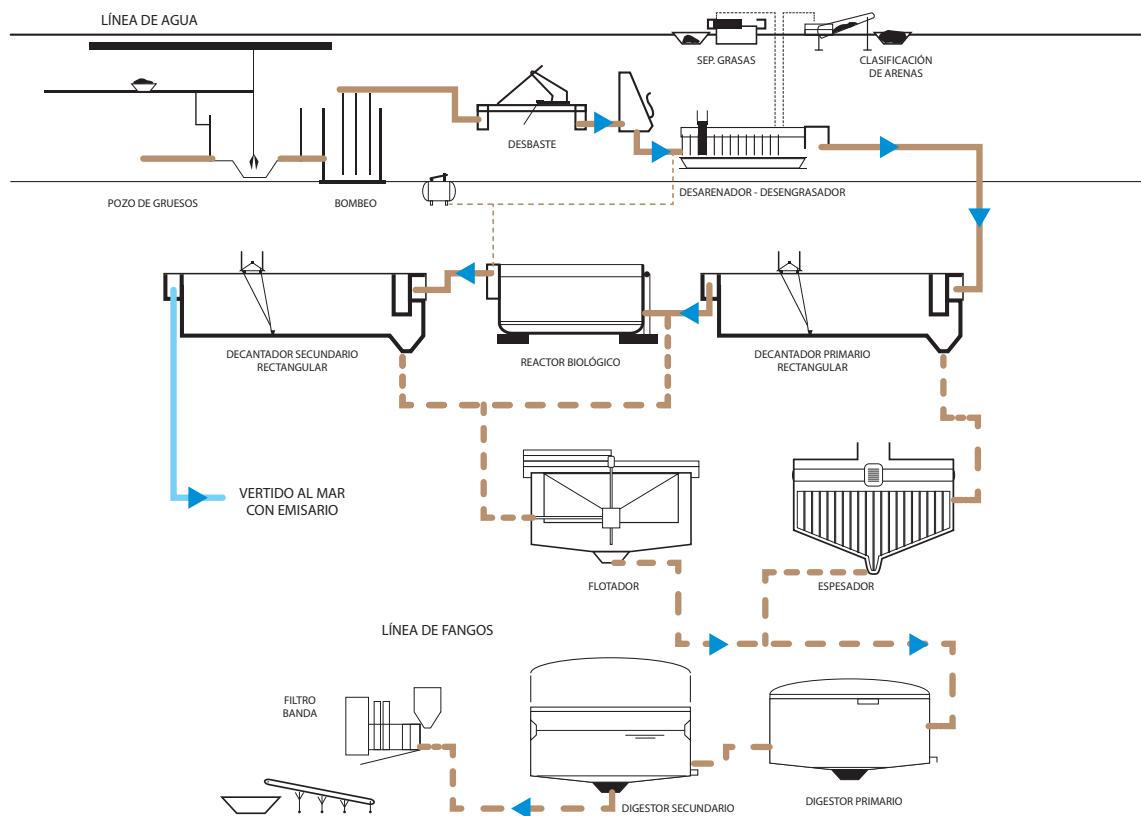


Figura 22. E.D.A.R. Convencional
Fuente: Elaboración propia

3.3. ORÍGENES DE LAS AGUAS RESIDUALES

Se pueden considerar 4 fuentes primordiales de aguas residuales (Ramalho, 2000):

1. Aguas residuales domésticas
2. Aguas residuales industriales
3. Escorrentías de uso agrícola
4. Pluviales

3.4. TIPOS DE PRETRAMIENTO Y TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

Según el siguiente cuadro adaptado de Ramalho, 2000, y de Lazcano Carreño, 2016, vemos lo siguiente:

Tabla 6. *Tipos de Pretratamiento y Tratamiento de Aguas Residuales.*

PRETRATAMIENTO	
Cribado	
Dilaceración	
Desarenado	
Desengrasado	
Homogeneización	
TRATAMIENTO PRIMARIO	
Químico	Físico
Coagulación	Sedimentación
Neutralización	Floculación
	Flotación
	Filtración
TRATAMIENTO SECUNDARIO	
Lodos activados	Estabilización por lagunaje
Aireación prolongada (Proceso de oxidación total)	Filtro biológicos
Estabilización por contacto	Biodiscos
Otras modificaciones de sistema convencional de lodos activados: aireación de fases, mezcla completa, aireación descendente, alta carga, aireación con oxígeno puro.	Tratamientos anaerobios
Lagunaje con aireación	
TRATAMIENTO TERCIARIO O AVANZADO	
Microtaminizado	Osmosis inversa
Filtración (lecho de arena, antracita, diatomeas)	Electrocoagulación
Precipitación y coagulación	Cloración y ozonización
Adsorción (carbón activado)	Proceso de reducción de nutrientes
Intercambio iónico	Otros

Fuente: Elaboración propia.

3.5. OBJETIVOS DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Entre los objetivos del tratamiento de las aguas residuales se tiene los siguientes (Lazcano Carreño, 2016, pág. 262):

1. Reducir la carga orgánica de los efluentes en términos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) o demanda química de oxígeno (DQO).
2. Remover o reducir los nutrientes: N, P, a fin de evitar la infiltración en el suelo que contamine las aguas subterráneas o evitar el crecimiento acelerado de las algas que podrían ocasionar problemas de eutrofización en las aguas receptoras.
3. Remover o inactivar a los organismos patógenos, incluyendo las formas parasitarias (huevos de helmitas, quistes de protozoarios, etc).

4. Cumplir con las normas o reglamentos legales que permiten el uso de las aguas residuales, vertimientos a la red de alcantarillado a las fuentes de agua o aguas marinas.

3.6. FACTORES QUE INFLUEYEN EN LA SELECCIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

Los factores que influyen en la selección son:

- a) Las características físicas, química y biológicas del agua residual.
- b) La calidad del efluente requerido a la salida.
- c) La disponibilidad de terrenos para aplicar ciertos tratamientos biológicos, como lagunas de estabilización.
- d) Prever futuras ampliaciones y de los límites máximos permisibles de descargas según leyes en el futuro.

3.7. REQUISITOS DE LOS TRATAMIENTOS

TIPO DE TRATAMIENTO	DBO ₅ (a)	DQO (a)	SS (a)
T.1º	> 20 %		> 50 %
T.2º (-)	> 40 %		> 70 % < 60 mg/l
T.2º	> 70-90 % < 25 mg/l	> 75 % < 125 mg/l	> 90 % < 35 mg/l
	N (total) (b)	P (total) (b)	
T.3º	10.000-100.000 h-e	> 70-80 % < 15 mg/l	> 80 % < 2 mg/l
	> 100.000 h-e	> 70-80 % < 10 mg/l	> 80 % < 1 mg/l

(a) Límites para valores medios diarios de la carga. (1) Optativo.

(b) Límites para valor medio anual de la carga./ Cumplir % ó mg/l.

Figura 23. Tipos de Tratamiento

Fuente: Tejero S. T., 1992

CAPÍTULO IV

PRETRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES

4. PRETRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

4.1. PRETRATAMIENTO

El pre tratamiento se lo aplica para eliminar todo el material grueso que generalmente está flotando y que da impacto visual negativo. La función es extraer de las aguas brutas la mayor cantidad posible de la materias que arrastran, y que posteriormente ocasionarían problemas en los tratamientos posteriores (tales como obstrucción de tuberías, formación de costras, enarenado de digestores anaerobios, etc).

En ocasiones es necesario aplicar pre cloración, pre aireación, pre decantación antes de operaciones como desbaste, desarenado desengrasado etc. (Tejero S. T., 1992)

Objetivos principales del empleo de pretratamiento:

- Eliminar los sólidos gruesos como basura
- Separar las partículas discretas como arena
- Separar grasas, aceites y espuma

Las operaciones de pre tratamiento que se incorporarán en la cabecera de la línea de agua de la EDAR serán función de:

- La calidad del agua bruta (presencia de mayor o menor cantidad de sólidos, arenas, grasas, etc.)
- El tipo de tratamiento posterior en la línea de agua
- El sistema de tratamiento de fangos empleado
- La importancia de la instalación

4.1.1. Pozo de gruesos

Un pozo de gruesos se construye, si se prevé grandes cantidades de sólidos o arena. Este pozo tiene el fin de concentrar los sólidos y las arenas decantadas en una zona específica de donde se puedan extraer con facilidad a la salida del pozo de gruesos o antes del sistema de elevación de agua se colocan rejillas de desbaste.



Figura 24. Pozo de gruesos

Fuente: Visita industrial FIQ

DESBASTE	Separación entre barrotes	Rejillas de desbaste grueso Rejillas de desbaste fino Tamices	5-10 cm 1.5-2 cm 0.5-1 mm
	Atascamiento máximo en rejillas		< 30 %
	Velocidad de paso máxima		< 1 m/s
	Producción de residuos		0.10-0.15 l/m ³
	Partículas a eliminar		Ø >= 0.2 mm
DESARENADO	DESARENADOR ELEMENTAL	Velocidad ascensional	< 70 m/h
		Velocidad de paso	< 0.3-0.4 m/s
		Relación longitud/calado	20-25
		Velocidad ascensional	< 100 m/h
	DESARENADOR AIREADO	Tiempo de retención hidráulico	2-3 min
		Velocidad de paso	< 0.15 m/s
		Caudal de aire	1-2 m ³ /h.m ³ tanque
		Velocidad tangencial	0.3-0.5 m/s
		Producción de arena	0.3-0.4 l/m ³
		Capacidad de sistemas de extracción de arena	Red separativa 5 l/m ³ Red unitaria 50 l/m ³
DESENGRASADO	Velocidad ascensional		
	Tiempo de retención hidráulico		
	Caudal de aire		

Figura 25. Resumen de parámetros de diseño de operaciones de pretratamiento.

Fuente: Tejero, 2000

4.2. OPERACIONES APLICADAS EN PRETRATAMIENTO

Las operaciones que se pueden incorporar en un pretratamiento luego del pozo de gruesos son las siguientes:

- Desbaste
- Desarenado
- Desengrasado

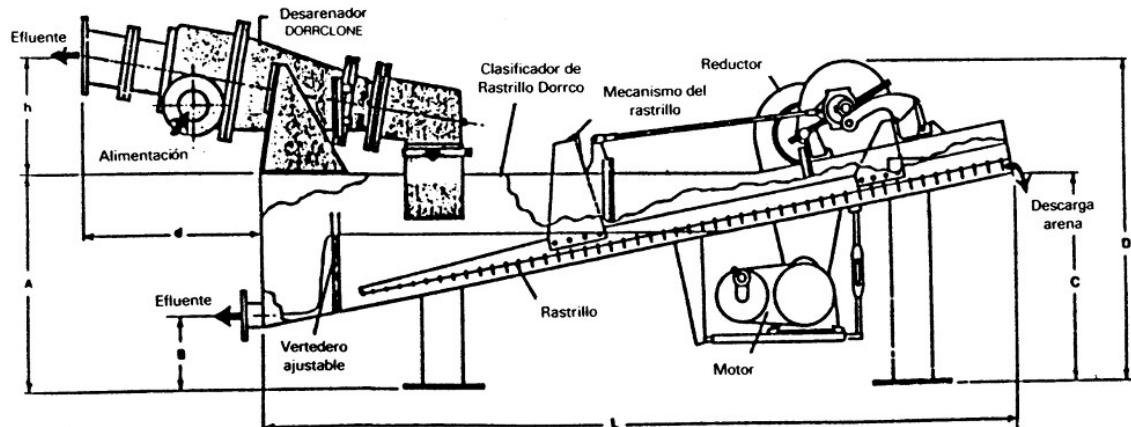


Figura 26. Hidrociclón para separar arena aplicado en un *pretratamiento*

Fuente: (Ramalho, 2000, pag.110)

4.2.1. Desbaste

El objetivo es eliminar los residuos sólidos materias pesadas que sean superiores a 200 micras que arrastra el agua residual, haciendo pasar ésta a través de barrotes verticales o ligeramente inclinados, con una cierta separación entre ellos en función del tamaño del material a retener.

Para el diseño de rejillas de desbaste TeJero S.T, sugiere que se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Tipo de equipo a utilizar
- Dimensiones del canal de la rejilla
- Intervalo de variación del caudal
- Separación entre barras
- Tipo de automatismos de limpieza
- Velocidad de paso
- Pérdida de carga producida por las rejillas.

Comúnmente se adoptan velocidades de paso en la sección libre de la rejilla entre 0.6 y 1.0 m/s a caudal máximo, siempre mayores a 0.4 m/s para evitar que se depositen arenas. También se considera que la rejilla se encuentra atascada en un 30% de su sección libre. El

diseño del desbaste se calculará para las condiciones más desfavorables (Tejero S. T., 1992)

4.2.1.1. Tipos de rejillas de desbaste

- **Rejilla desbaste grueso.**- Cuya separación entre barras está entre 50-100 mm. y grosor de barrotes 12-25 mm.
- **Rejilla desbaste fino.**- Las que tienen espacios entre barras entre 10-25 mm. y grosor de barrotes 6-12 mm. (Tejero S. T., 1992)

4.2.1.2. Diseño de rejillas de desbaste

Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Tipo de equipo a utilizar
- Dimensiones del canal de la rejilla
- Intervalo de variación del caudal
- Separación entre barras
- Tipo de automatismos de limpieza
- Velocidad de paso
- Perdida de carga producida por las rejas (Tejero S. T., 1992)

Comúnmente se adoptan velocidades de paso en la sección libre de la rejilla entre 0.6 y 1.0 m/s a caudal máximo, siempre mayores a 0.4 m/s para evitar que se depositen arenas. También se considera que la rejilla se encuentra atascada en un 30% de su sección libre. El diseño del desbaste se calculará para las condiciones más desfavorables (Tejero S. T., 1992)



Figura 27. Criba equipo de desbaste.
Fuente: EMSABA EP

4.2.1.3. Aplicación práctica.

Ejercicio 4.1

Dadas las siguientes condiciones en un canal con rejillas, determinar el caudal con que atraviesa el agua residual.

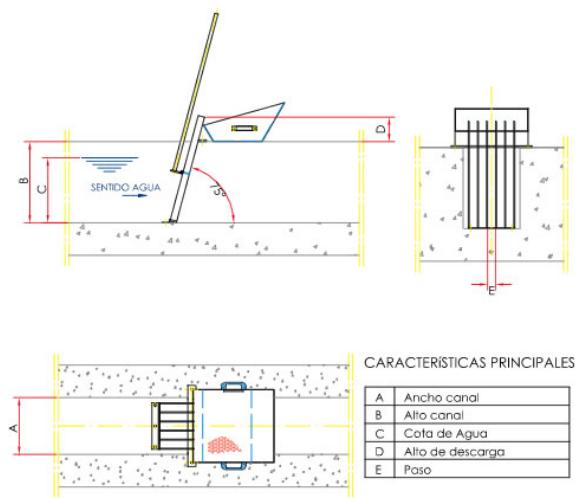


Figura 28. Reja manual.
Fuente: (Estruagua, 2015)

DATOS		
Separación entre barras	(w)	0.015 m
Ancho de cada barra	(b)	0.01 m
Velocidad de paso	(V _p)	1m/s
Numero de rejillas	(N)	40
Altura	(h)	0.45 m
Ancho del canal	(a _c)	?
Determinar el caudal		(Q)

Se parte de la ecuación de caudal:

$$Q = V * A$$

Cálculo del área:

$$A = (\text{altura } h) (\text{Ancho canal } a_c)$$

$$Q_{\text{máx}} = V_p * h * a_c$$

$$\text{Ancho del canal } a_c = (N * b) + (N + 1) w$$

$$\text{Ancho del canal } a_c = (40 * 10 \text{ mm}) + (41) 15 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho del canal } a_c = 1015 \text{ mm} = 1.015 \text{ m}$$

$$A = a_c * h$$

$$A = \text{ancho del canal} * \text{altura}$$

$$A = 1.015 \text{ m} * 0.45 \text{ m}$$

$$A = 0.45675 \text{ m}^2$$

$$Q = V * A$$

$$Q = 1 \text{ m/s} * 0.45675 \text{ m}^2$$

$$Q = 1 \text{ m/s} * (3600 \text{ s / 1 h}) * 0.45675 \text{ m}^2$$

$$Q = 1644.3 \text{ m}^3/\text{h}$$

4.2.2. Desarenado

El desarenado tiene como objetivo eliminar partículas más pesadas que el agua, que no se hayan quedado retenidas en el desbaste, y que tienen un tamaño superior a 200 micras, sobre todo arenas pero también otras sustancias como cáscaras, semillas, etc. Con este proceso se consiguen proteger los equipos de procesos posteriores ante la abrasión, atascos y sobrecargas en los procesos posteriores. (Tejero S. T., 1992), Figura 20.



Figura 29. Desarenador de la Planta de Tratamiento de aguas residuales.
.Fuente: EMSABA EP

4.2.2.1. Tipos de desarenadores

Existen tres tipos de desarenadores fundamentales:

- Desarenadores de flujo horizontal
- Desarenadores de flujo vertical
- Desarenadores de flujo inducido

4.2.2.2. Desarenadores de flujo horizontal

Los Desarenadores de flujo horizontal, Figura 30, son utilizados en instalaciones de pequeñas poblaciones y consisten en un ensanchamiento del canal del pre tratamiento de forma que se reduzca la velocidad de flujo y decanten las partículas. Debe diseñarse con un canal paralelo para proceder a su limpieza que se realiza manualmente. Suelen instalarse con un canal Parshall a la salida que permite al mismo tiempo mantener la velocidad constante y medir el caudal (Sarasquete, 2008, pag. 21).



Figura 30. Desarenador flujo horizontal.

Fuente: <http://www.slideshare.net>.

4.2.2.3. Desarenador de flujo vertical.

La unidad debe tener un volumen que reproduzca el tiempo total de floculación que optimiza el proceso. Debe estar compuesta por varios canales con compartimentos de diferentes anchos que reproduzcan velocidades decrecientes entre el primer y el ultimo canal. El agua circula por los canales en forma vertical. Las pantallas para formar los compartimentos en cada canal, pueden ser tabiques de concreto, placas de asbesto cemento o madera machimbrada. Figura 31.



Figura 31. Desarenador flujo vertical.

Fuente: <http://www.slideshare.net>

4.2.2.4. Desarenadores de flujo inducido

Los desarenadores de flujo inducido son de tipo rectangulares aireados, mediante la colocación de difusores, Figura 32. En estos equipos se inyecta aire por medio de grupos moto soplantes creando una corriente en espiral de manera que permite la decantación de las arenas y genera una corriente de fondo. Además el aire provoca la separación de las materias orgánicas. De esta forma, dado que el depósito está aireado y se favorece la separación de la materia orgánica, se reduce la producción de malos olores. (Ambiente, Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria , 2012)



Figura 32. Difusores instalados en los desarenadores de flujo inducido.
Fuente: <http://www.slideshare.net>

4.2.2.5. Aplicación práctica.

Ejercicio 4.2

Se tiene un desarenador con las siguientes dimensiones: 8 metros de largo por 1.4 metros de ancho y 0.7 metros de calado. Determinar la velocidad ascensional V_{ASC} y el tamaño crítico de la arena cuya densidad es relativa es 2.3 (Tejero S. T., 1992)

Área transversal

$$\begin{aligned} St &= h * w \\ St &= 1.4 * 0.7 \\ St &= 0.98 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Área horizontal

$$\begin{aligned} SH &= L * w \\ SH &= 8 * 1.4 \\ SH &= 11.2 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Ecuaciones de velocidad ascensional y velocidad de paso:

$$V_{ASC} = \frac{Q}{11.2 \text{ m}^2} \quad V_p = \frac{Q}{0.98 \text{ m}^2}$$

Entonces, con la condición de que la velocidad ascensional resultante no pase del valor de 70 m³/h, se asume un valor para V_p de 0.2 y se calcula:

$$Q = 0.2 \text{ m/s} * 0.98 \text{ m}^2 = 0.196 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 705.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$V_{ASC} = 705.6 / 11.2$$

$$V_{ASC} = 63 \text{ m/h}$$

Con lo cual la V_{ASC} = 63m/h es menor a 70 m/h.

Calcula de la velocidad de arrastre:

$$V_c = \frac{Q}{St}$$

$$V_c = \frac{705.6 \text{ m}^3/\text{h}}{0.98 \text{ m}^2} = 720 \text{ m/h}$$

$$V_c = 200 \text{ mm/s} \quad V_c = \sqrt[2]{\frac{8\beta gd(s-1)}{f}}$$

$$f=0.3$$

$$\beta=0.4$$

$$200 = \sqrt[2]{\frac{8*0.4*9800d(2.3-1)}{0.3}}$$

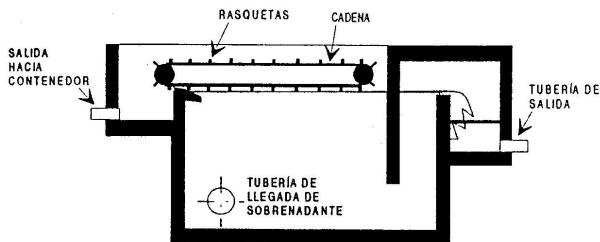
$$d = 0.29 \text{ mm}$$

4.2.3. Desengrasado

El objetivo de esta operación es el de eliminar grasa, aceite y espuma y además materia flotantes provocarían problemas en las siguientes etapas de tratamiento. Cabe indicar que no siempre aparece el desengrasado en los pre tratamientos.

El equipo de desengrasado opera mediante insuflación de aire para desemulsionar las grasas y conseguir una mejor flotación de estas. Cuando no se eliminan las grasas provocan la formación de costras en los digestores por lo que es indispensable su eliminación, además

es obligatoria la eliminación de grasas en los vertidos al mar.



Concentrador de grasas

Figura 33. Desengrasador.

Fuente: Tejero S. T., 1992

4.2.4. Dilaceración

Su objeto es «triturar» las materias sólidas arrastradas por el agua. Estas materias en lugar de separarse del efluente bruto, se pulverizan y continúan en el circuito del agua hacia las siguientes fases del tratamiento. El interés de este proceso consiste en que se suprime la evacuación y la descarga de los residuos de la reja. Sin embargo, en la práctica, presenta varios inconvenientes, en especial, la necesidad de una atención frecuente sobre un material bastante delicado, el peligro de obstrucciones de tuberías y bombas provocadas por la acumulación en masas de las fibras textiles o vegetales unidas a las grasas, y la formación de una costra de fango en los digestores anaerobios. (Dègremont, 1976)

CAPÍTULO V

TRATAMIENTO PRIMARIO

5. TRATAMIENTO PRIMARIO

5.1. TRATAMIENTO PRIMARIO

El tratamiento primario tiene como objetivo la reducción de los sólidos en suspensión del agua residual y como estos están constituidos por materia orgánica, el tratamiento primario va a producir una reducción de la demanda bioquímica de oxígeno, igualmente se consigue una reducción de la contaminación bacteriológica, mediante sedimentación u otro medio, y constituye un método de preparar el agua para el tratamiento secundario. Por lo regular el tratamiento primario remueve alrededor del 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y 35 a 40% de la DBO suspendida. (Tejero S. T., 1992)

Los sólidos en suspensión incluyen:

- Los sólidos sedimentables (que se separan al permanecer el agua residual en reposo durante una hora),
- Los flotables (definibles por contraposición a los sedimentables) y parte de los sólidos coloidales (tamaño entre 10-3 y 10 micras). Los tamaños superiores a 200 micras ya fueron eliminados en el desarenador. (Tejero S. T., 1992)

5.2. PROCESOS CONSIDERADOS EN TRATAMIENTO PRIMARIO

Dentro de los tratamientos primarios que se aplican a las aguas residuales esta la neutralización que asegura mejor operación de la etapa siguiente de tratamiento.

Existen múltiples procesos que se pueden incluir en tratamiento primario como filtración, tamizado, fosas sépticas, tanques imhoff etc. Inclusive se puede utilizar procesos mixtos como sedimentación flotación. (Tejero S. T., 1992)

Los principales procesos y operaciones unitarias aplicadas en tratamiento primario son:

- Neutralización
- Coagulación (proceso físico químico) y Floculación
- Sedimentación o decantación primaria
- Flotación (Tejero S. T., 1992)

5.2.1. Neutralización

Entre los tratamientos primarios está el proceso de neutralización de las aguas residuales. La neutralización o ajuste del pH, para tener un rango cercano a 7, es una de las etapas pioneras dentro del tratamiento de las aguas y aguas residuales que permite proteger las fuentes receptoras de las descargas alcalinas o ácidas fuertes o el post tratamiento de dichos residuos.

En la Figura 34, se presentan los diferentes regímenes de acidez y alcalinidad. Se observa que al aumentar el pH arriba de 9,6, la alcalinidad hidróxilica, se vuelve medible; su concentración puede determinarse mediante un medidor de pH o calcularse la distribución entre el carbonato e hidróxido de la siguiente manera:

$$\text{CO}_3 = 2 (\text{M} - \text{P})$$

$$\text{OH}^- = 2\text{P} - \text{M}$$

$$\text{HCO}_3 = 0$$

M = alcalinidad total, mg/l

P = alcalinidad de la fenolftaleína, mg/l (Nalco Chemical Company, 1995)

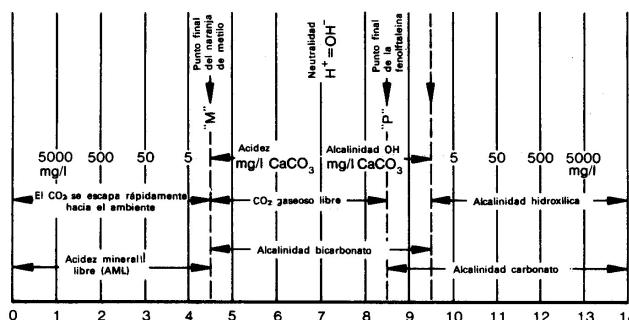


Figura 34. Acidez y diferentes tipos de alcalinidad y sus rangos de pH.

Fuente: Manual del Agua, Nalco Chemical Company. Tomo I.

Editorial Mc. Graw- Hill. 1995 (Nalco Chemical Company, 1995)

Muchas descargas industriales ocurren en condiciones de acidez o alcalinidad que son incompatibles con las normas de descarga, los procesos biológicos o físicos-químicos posteriores. En particular, los sistemas biológicos requieren un pH entre 6,5 y 8,5 y, además, producen CO₂.

En los procesos biológicos por ejemplo, su operación depende de una neutralización adecuada y por lo tanto, la disminución de la DBO está relacionada con el contenido de la alcalinidad o acidez o el consumo de ácido, que es distinto del pH.

Industrias que producen aguas ácidas y alcalinas

A continuación se detalla algunas industrias que generan aguas residuales alcalinas y ácidas.

Tabla 7. *Industrias que generan aguas residuales acidas o alcalinas.*

Industria	Agua residual ácida	Agua residual alcalina
Aluminio	X	
Bebidas carbonatadas		X
Bronce y cobre	X	X
Café	X	
Caucho	X	X
Cervecería y destilería	X	X
Cola	X	X
Curtiembres	X	X
Drenaje minas de carbón	X	
Energía	X	X
Enlatados	X	X
Explosivos	X	
Farmacéuticos	X	X
Fosfatos	X	
Hierro y acero	X	
Lavanderías comerciales		X
Limpieza de metales	X	
Papel	X	X
Pesticidas	X	
Plantas de ablandamiento		X
Plantas químicas	X	X
Refinerías de petróleo	X	X
Textiles	X	X

Fuente: ROJAS, Tratamiento de aguas residuales, 2001

5.2.1.1. Neutralización de las aguas ácidas

La neutralización de las aguas ácidas, se logra comúnmente agregando óxido de calcio, óxido o hidróxido de magnesio e hidróxido de sodio. La cal (óxido de calcio) o su forma hidratada, hidróxido de calcio, es la más usada por su costo bajo.

El hidróxido de sodio, aunque costoso, es una forma química muy conveniente para la neutralización de los residuos ácidos en las plantas pequeñas y para minimizar la cantidad producida de lodo. Se presenta en estado líquido en concentración del 50%-NaOH, la cual inicia su cristalización a 12°C y en concentración del 73%-NaOH, que empieza su cristalización a 73°C; por esto, requiere almacenamiento apropiado y dilución adecuada antes de usarlo. (Rojas, 2001)

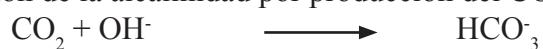
5.2.1.2. Neutralización de las aguas alcalinas

Para la neutralización de las aguas alcalinas, se agregan, comúnmente, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y anhídrido carbónico (en plantas donde hay disponibilidad de dicho compuesto).

El ácido sulfúrico (H_2SO_4) es el más económico y usado; es fuertemente corrosivo, denso, aceitoso, color carmelita claro u oscuro, según su pureza; debe estar libre de metales pesados y se consigue en concentraciones del 60 al 94%- H_2SO_4 ; diluido es extremadamente corrosivo.

Si se disponen gases de combustión como el CO_2 , en el orden del 14%, se lo puede burbujejar en la solución alcalina. El CO_2 establece un equilibrio con el ácido carbónico, HCO_3^- cuya capacidad ácida, se utiliza para neutralizar la carga alcalina. Cuando se ajusta el pH de un residuo, para el tratamiento biológico posterior; la actividad biológica puede introducir cambios de pH en el residuo, por mecanismos diferentes. Por ejemplo, las reacciones siguientes producen disminución de pH: (Rojas, 2001)

- Destrucción de la alcalinidad por producción del CO_2



- Oxidación de compuestos de azufre en ácido sulfúrico:



- Nitrificación:



- Producción de ácidos orgánicos.

La oxidación bioquímica de los ácidos orgánicos y la destrucción de las sales de ácidos orgánicos, aumentan el pH en los reactores biológicos. Además, la adición de cal para la neutralización, como tratamiento, puede incrementar, al combinarse con el CO₂ de la actividad biológica, la dureza en el efluente y formación de precipitados de CaCO₃, si se combina con aguas alcalinas. (Rojas, 2001)

5.2.2. Métodos para neutralizar residuos líquidos industriales

De acuerdo a Ramalho la neutralización puede realizarse mediante los siguientes métodos:

- 1. Homogeneización**, que consiste en mezclar las corrientes ácidas y alcalinas, disponibles en una planta. Se utilizan tanques de homogeneización de nivel constante o variable
- 2. Control directo del pH**, que consiste en la adición de ácidos o bases para neutralizar las corrientes alcalinas o ácidas, respectivamente.

5.2.3. Reactivos utilizados en la neutralización

Existen muchos reactivos de características ácidas y alcalinas; sin embargo, no todos se deben emplear en la neutralización, por lo que, se ha elaborado la tabla 7, tomando información de algunas fuentes bibliográficas.

Tabla 8. *Productos químicos utilizados con frecuencia en la neutralización.*

NOMBRE QUÍMICO	SÍMBOLO QUÍMICO	NOMBRE COMÚN	UTILIZACIÓN
Ácido clorhídrico	HCl	Ácido muriático	Regenerante catiónico, Neutralización
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Aceite de vitriolo, vitriolo, óleo=66°Be	Regenerante catiónico, Neutralización
Carbonato de calcio	CaCO ₃	Calcita, piedra caliza, yeso blanco, mármol triturado.	Neutralización
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	Ceniza de sosa (sal de sosa)	Neutralización
Dióxido de carbono	CO ₂		Estabilización Neutralización
Hidróxido de calico	Ca(OH) ₂	Cal hidratada, cal apagada.	Estabilización Neutralización
Hidróxido de sodio	NaOH	Soda cáustica, lejía, lejía de sosa.	Regeneración de resina aniónica, neutralización
Óxido de calico	CaO	Cal química, cal viva, cal quemada.	Ablandamiento Neutralización
Carbonato de calcio - carbonato de magnesio	CaCO ₃ MgCO ₃		Neutralización
Piedra caliza fina 2-9 mm	CaCO ₃		Construcción, Neutralización
Piedra caliza fina 2-12 mm	CaCO ₃		Construcción, Neutralización
Cal hidratada	Ca(OH) ₂	Hidróxido de calcio	Construcción, Neutralización
Cal viva - óxido de magnesio	CaO-MgO	Dolomita	Construcción, Neutralización

Fuente: Recopilación de datos de diferentes autores como;
Metcalf y Eddy, Jairo Romero, Ramalho, entre otros.

5.2.4. Diseño experimental de un lecho de flujo ascensional de caliza para neutralización de residuos ácidos.

Para diseñar un lecho de flujo ascensional de caliza utilizado en la neutralización de un residuo líquido ácido es necesario realizar una serie de pruebas experimentales, a nivel de laboratorio, en proceso “batch” o discontinuo y continuo, en columnas de laboratorio, bajo

condiciones similares a la operación en escala real, lo cual permitirá determinar la altura más económica del lecho, para un valor específico de pH en el efluente, y conocer los valores óptimos de carga hidráulica, caudal, etc., siguiendo las recomendaciones dadas por los autores, Jairo Romero y Rubens Ramalho.

5.2.5. Variables de diseño

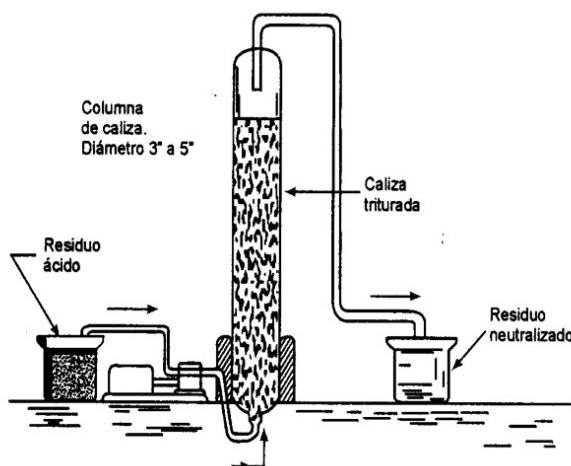


Figura 35. Columna experimental con lechos de caliza.

Fuente: (Romero Rojas, 2001, pág. 337).

Para la neutralización de un efluente ácido, algunos autores han establecido las condiciones y variables de diseño, para columnas a escalas, piloto y de laboratorio; mencionando, a continuación, las más importantes:

En la Figura 35, se ilustra la columna experimental con lechos de caliza a utilizar. Rubens Ramalho Ármalo, en la página 172 de su libro Tratamiento de Aguas Residuales; considera el procedimiento recomendado por Eckenfelder y Ford, para los datos básicos del diseño, siendo los siguientes:

- Alturas del lecho de la caliza
0,30 m ,0,60 m, 0,90 m, 1,20 m Y 1,50 m
- Carga hidráulica superficial
Entre 2 y 40 m³ /m².h (48 y 960 m³/m².d)
- Diámetro de la columna: 15 cm

El flujo ascensional es propuesto por los dos libros, porque minimiza la formación de cañales de flujo, provee mayor eficiencia de la neutralización y permite menores tiempos de retención.

5.2.6. Diagrama del equipo

El equipo consta de 4 columnas con sus respectivos accesorios además de un tanque de alimentación, con una tubería de desviación para recircular y calibrar la carga hidráulica requerida. Consta también, de un rotámetro que controla los flujos en el sistema.

Cada columna tiene válvulas de descarga en la parte inferior, éstas sirven para tomar las muestras; que se observan en la figura 36 y 37.

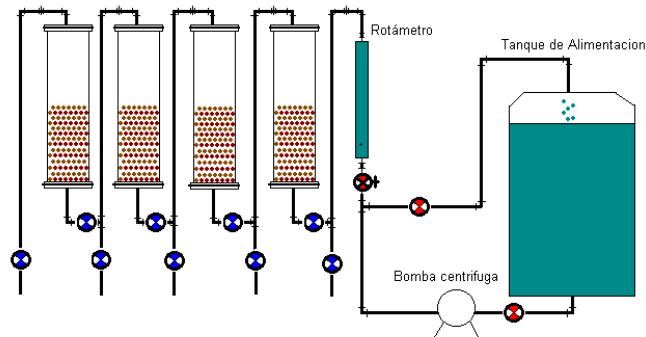


Figura 36. Columnas de Neutralización.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 37. Columnas de Neutralización con lecho de caliza Flujo ascendente.
Fuente: Elaboración propia.

5.2.6.1. Manual de operación de la columna de neutralización

1. Instalar la piedra caliza, en las columnas, hasta la altura seleccionada para las pruebas.
2. Hacer una prueba en blanco, con agua potable, a fin de que todo el equipo y los accesorios funcionen eficientemente.
3. Colocar el agua residual seleccionada en el tanque de alimentación.
4. Prender la bomba y alimentar el agua residual a las columnas, para lo cual se fija en el rotámetro, mediante la válvula de aguja, el flujo preseleccionado.
5. Tomar una muestra de agua residual, a fin de realizar la caracterización inicial respectiva.
6. Colocar al final, de la última columna, un recipiente para recoger el agua tratada.
7. Tomar, cada 5 minutos, una muestra de 250 cc, de cada columna de lecho de caliza para determinar el pH.
8. Terminar la experimentación cuando la piedra caliza se encuentra saturada, para lo cual, se toman muestras que salen de las columnas de caliza, deberá ser comprobado con las pruebas respectivas de laboratorio.
9. Apagar la bomba, desalojar el agua, sacar la piedra caliza usada de las columnas; finalmente, lavar el equipo con agua potable.
10. Realizar una nueva experimentación, empezar la secuencia a partir del numeral 1, pudiendo variar la granulometría de la caliza.

5.2.7. Pruebas experimentales con piedra caliza en proceso discontinuo, a nivel de laboratorio.

Para las pruebas experimentales, en proceso discontinuo a nivel de laboratorio, se utilizó carbonato de calcio en forma de piedra caliza, materia prima sugerida a utilizar, para la neutralización de una solución ácida, por diferentes autores como: Wesley Eckenfelder, en su libro “Tratamiento de Aguas Residuales”, Rubens Ramalho, en su libro “Tratamiento de Aguas Residuales”, Jairo Romero en su libro “Tratamiento de Aguas Residuales”. Se realizaron las pruebas en probetas, llenas con diferentes alturas de lechos de piedra caliza, con diferente granulometría, la cual fue sometida a la acción de una solución ácida sintética utilizando diferente tiempo de contacto, para evaluar el comportamiento de este reactivo con soluciones ácidas y tener datos para la aplicación a nivel de planta piloto para operar a

diferentes caudales, y en proceso continuo.

En primer lugar, se hizo un reconocimiento de la roca caliza, mediante la aplicación de una solución diluida de ácido clorhídrico. Si la piedra efervece, es una roca caliza, es decir, es una roca de carbonato básico, con una reacción alcalina definida. De lo contrario, es una roca de otro material que no sirve para la experimentación.

5.2.7.1. Aplicación práctica.

Ejercicio 5.1

Determinar experimentalmente la carga hidráulica a diferentes profundidades en un lecho de caliza utilizando agua residual de industria cafetera.

Desarrollo

Para estas pruebas, se utiliza el método recomendado por Eckenfelder y Ford, para la obtención de los datos básicos de diseño de un sistema de neutralización de un agua residual industrial.

Las pruebas experimentales del agua residual ácida de la industria del café neutralizada en lechos de caliza en proceso continuo, se realizaron con agua residual con pH 4,8. Las columnas operaron a diferentes profundidades de lecho de caliza variando de 30 hasta 120 cm. Se experimentaron con cargas hidráulicas entre 5,3 y 37 m³/m².h, se midieron los valores de pH en cada columna, para cada carga hasta lograr la estabilización. Después de cada período de funcionamiento, se reemplazó la piedra.

A partir de los valores de pH en función de la carga hidráulica, para cada profundidad de lecho de caliza, obtenidos en las pruebas experimentales de agua residual ácida de una industria del café, se elabora la figura 38.

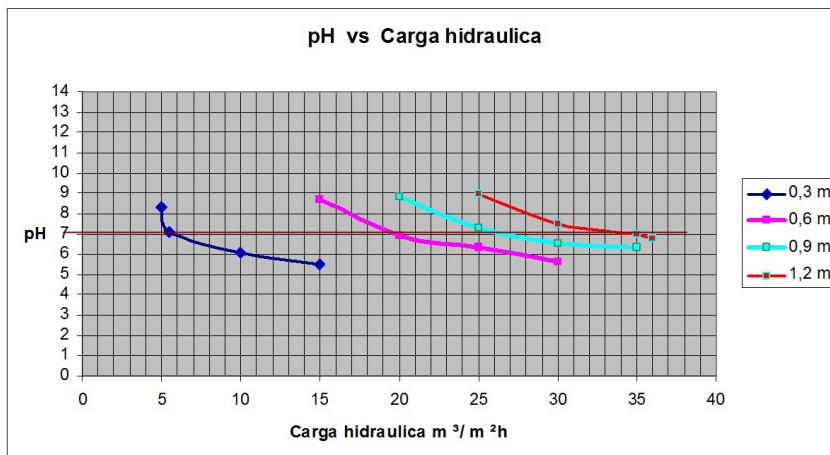


Figura 38. *pH vs carga Hidráulica.*
Fuente: Elaboración propia.

El figura 38, presenta cuatro curvas que corresponden a los resultados obtenidos en las columnas con diferentes alturas de lecho de caliza, observándose que el máximo pH alcanzado fue 9; se partió de un agua residual de pH 4,8. Con esta gráfica, se puede determinar el factor de carga efectivo para el pH neutro que se requiere. Este gráfico constituye el resultado de toda la investigación y guarda similitud con los gráficos típicos de los diferentes autores que han sido la guía de esta investigación: gráficos Nº 3,44 y 3,45 del libro Tratamiento de Aguas Residuales de Ramalho, págs. 173 y 174; gráficos Nº 3,12 y 3,13 del libro Industrial Water Pollution Control de W. Wesley Eckenfelder, Jr. y los gráficos Nº 14,10 y 14,11 del libro Tratamiento de Aguas Residuales, de Jairo Romero Rojas.

PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL DE UN LECHO DE FLUJO ASCENSIONAL DE CALIZA, DE UN RESIDUO LÍQUIDO ÁCIDO DE UNA INDUSTRIA DEL CAFÉ, BASADO EN EXPERIMENTACIONES.

Con base a las pruebas desarrolladas en el proceso continuo, se diseñó un lecho de flujo ascendencial de caliza de un residuo ácido de una industria del café; se sigue el procedimiento descrito por Ramalho en su libro “Tratamiento de Aguas Residuales”, páginas 173 y 174.

Se parte de los datos de los ensayos de laboratorio y se procede de la siguiente manera:

1. Para un pH de 7, se lee en el gráfico de neutralización con caliza para las profundidades de lecho de 30, 60, 90, 120 cm; se determina la carga hidráulica admisible para cada profundidad del lecho de caliza.
2. Se calcula el área de la sección, volumen requerido de caliza y factor de carga detallado en la tabla10.
3. Se calcula el área del lecho de caliza, para cada profundidad, dividiendo el caudal

tratado para la carga hidráulica admisible para cada profundidad.

4. Se calcula el volumen del lecho de caliza, multiplicando el área obtenida en el numeral anterior por la profundidad del lecho.
5. Se calcula la carga hidráulica volumétrica, dividiendo el caudal para el volumen del lecho de caliza, obtenido en el numeral anterior.
6. Se dibuja un gráfico de la carga hidráulica volumétrica contra la profundidad del lecho, como el indicado en el grafico 30; se obtiene la profundidad más económica del lecho de caliza.

Ejercicio 5.2

Diseñar un sistema de neutralización para un caudal de $10\text{m}^3/\text{h}$ de una industria cafetera aplicando la figura 38.

Para esta prueba se utiliza el método recomendado por Eckenfelder y Ford, para la obtención de los datos básicos para el diseño de un sistema de neutralización de un agua residual industrial, para un caudal de $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Dato asumido en base a caudales de descarga de industrias locales de café soluble.

Tabla 9. Diseño de un sistema de neutralización para descarga industria cafetera.

Altura, m	Carga hidráulica, $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$	Área, m^2	Volumen de caliza, m^3	Caudal específico, $\text{m}^3/\text{h.m}^3$
0,3	6,0	1,667	0,500	20,00
0,6	19,0	0,526	0,316	31,64
0,9	26,0	0,385	0,347	28,82
1,2	32,5	0,308	0,369	27,10

Fuente: Elaboración propia

La tabla 11, se elabora a partir de la figura 38 en el cual se determina la carga hidráulica a partir del pH 7 para cada columna de neutralización. Luego, se obtiene el área que corresponde a la división del caudal para la carga hidráulica. Dato, que, multiplicado por la altura, es igual al volumen de la caliza requerida para cada altura; y por último, se divide el caudal para el volumen, obteniéndose el caudal específico.

Con los caudales específicos y las diferentes profundidades del lecho, se traza una curva que indica el lecho más económico que corresponde a un máximo de la curva; con base a

este dato se determina el área de la sección y diámetro.

A partir de los datos de la tabla 11, se elabora la figura 39 que indica el lecho que es más económico.

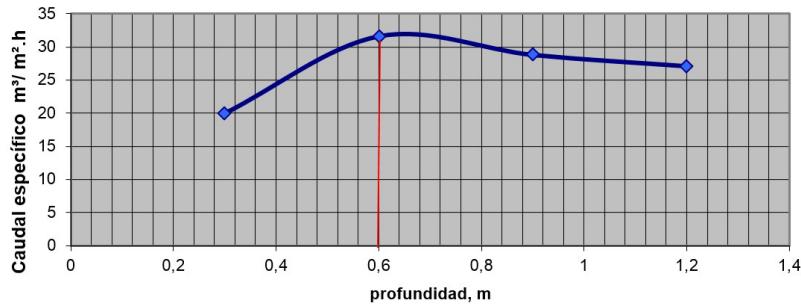


Figura 39. Caudal específico vs profundidad.

Fuente: Elaboración propia.

La figura 39, indica que un lecho de caliza de 0,6 m es el más económico, que corresponde a un máximo de la curva; el área de la sección es, en este caso, de $0,526\text{ m}^2$; de acuerdo a la tabla 11, para esta altura, el diámetro es 0,82 m y el volumen del lecho es $0,316\text{ m}^3$.

En un reactor, el tiempo de reacción hidráulica debe ser entre 2 y 10 min de acuerdo a Jairo Romero, en su libro Tratamiento de Aguas; para mayor precisión, dependiendo de la muestra, se hace un estudio, a nivel de laboratorio, del tiempo de reacción para cada sustancia de neutralización a experimentar. En las pruebas realizadas con hidróxido de calcio e hidróxido de sodio, se determinaron que este último reacciona más rápidamente tardando entre 2 y 3 minutos. El hidróxido de calcio necesita mayor agitación y tiempo para que reaccione; esto es, alrededor de 10 min.

5.3. COAGULACIÓN FLOCULACIÓN

En una planta de tratamiento de aguas se utiliza las pruebas en jarras, para determinar las dosis más convenientes de coagulante para un agua problema, durante el control de la coagulación y floculación, especialmente cuando la calidad del agua fluctúa rápidamente. Figura 40 y 41.



Figura 40. Test de Jarras.

Fuente: Equipo Laboratorio Operaciones Unitarias Fac. Ing. Qca . UG.



Figura 41. Prueba de jarras final.

Fuente: Elaboración propia.

Se puede utilizar también para determinar las velocidades de sedimentación para el diseño de tanques de sedimentación y conocer el potencial del agua cruda para la filtración directa. (Valencia, 2000)

Dosis de reactivos	Sulfato de alúmina	75-250 mg/l
	Cloruro férrico	35-150 mg/l
	Polielectrolito	2-5 mg/l
	Cal	150-500 mg/l
Rendimientos	Sales de Al y Fe	Eliminación de DBO ₅ SS
	Polielectrolito	Eliminación de DBO ₅ SS
	Cal	Eliminación de DBO ₅ SS
		65-75 % 85-90 %
		50-60 % 65-75 %
		65-75 % 85-90 %
Decantación	<u>Velocidad ascensional</u>	Al, Fe Polielectrolito 2 m/h 1.5 m/h

Figura 42. Resumen de parámetros de diseño de tratamiento físico-químico en aguas residuales.

Fuente: Tejero S. T., 1992.

5.3.1. Reactivos a utilizar para la prueba de Jarras

Se deben preparar soluciones madres de los coagulantes, coadyuvantes coagulantes y otros reactivos químicos a concentraciones tales que las cantidades adecuadas para utilizarse en las pruebas de coagulación se puedan medir exacta y convenientemente.

Tabla 10. Reactivos utilizados en test de jarras.

Reactivo químico	Concentración de la solución madre	Vida	1 ml/litro de agua equivalente a
Sulfato de aluminio	1%	1 mes	10 mg/litro
Cloruro férrico	1%	2 meses	10 mg/litro
Cal	1%	1 mes	10 mg/litro
Polielectrolito	0.05%	1 semana	0.5 mg/litro
Ácido sulfúrico	0.1 N	3 meses	4.9 mg/litro

Fuente: (Okun, 1990)

- a Las suspensiones de cal se deben mezclar agitándolas cada vez que se utilicen.
- b Las soluciones de poli electrolito se deben utilizar de acuerdo con las instrucciones de los fabricantes. (Okun, 1990)

5.3.2. Procedimiento de la prueba de Jarras

Las pruebas en jarras con coagulantes requieren un agitador de laboratorio de 6 plazas o aparato para la prueba en jarras, así como también seis vasos de 2 litros. El procedimiento para llevar a cabo la prueba es:

1. Colocar un vaso de 2 litros debajo de cada una de las paletas de agitación.
2. Colocar en cada vaso exactamente 2 litros medidos con una probeta graduada, de una muestra fresca del agua cruda.
3. Anotar en la hoja de datos la cantidad de coagulante que se debe añadir a cada vaso. Esta cantidad variará de vaso a vaso.

4. Con cada pipeta, añadir el coagulante en cantidades crecientes en vasos sucesivos. Por ejemplo: 10 mg./l en el vaso #1, 20 mg/l en el vaso #2, etc.
5. Colocar las paletas de agitación dentro de los vasos, arrancar el agitador y operarlo durante 1 min. a una velocidad de 60 a 80 rpm.
6. Reducir la velocidad al grado seleccionado de agitación (normalmente 30 rpm. Aproximadamente y permitir que la agitación continúe durante unos 15 min. Se debe procurar que el grado y tiempo de agitación igualen las condiciones de operación de la planta de floculación.
7. Anotar cuánto tiempo transcurre antes de que se empiece a formar un floculo.
8. Observar qué tan bien resiste éste, algo de agitación sin fragmentarse.
9. Una vez que transcurre el periodo de agitación, detener el agitador y anotar cuánto tiempo transcurre para que el floculo se sedimente en el fondo del vaso.
10. Después de permitir que el floculo se asiente durante 20 min, determinar el color y la turbiedad del sobrenadante (el líquido por encima de los floculos).
11. En las hojas de registro se deben anotar las dosis, tiempo y velocidad de mezclado, pH, características de crecimiento de los flóculos y análisis del sobrenadante.
12. Después de permitir que el flóculo se asiente en el fondo durante 30 min., filtrar el sobrenadante a través de un papel filtro.
13. Filtrar otros 100 a 150 ml de muestra.
14. Determinar la turbiedad, pH, color y, si es necesario, el aluminio residual en el filtrado.
15. La jarra que proporcione los mejores resultados indica la dosis adecuada de coagulante para la planta en cuestión. (Valencia, 2000)

5.3.3. Prueba para determinar el pH óptimo

La segunda prueba implica la preparación de muestras con el pH ajustado, utilizando, por ejemplo, cal o ácido sulfúrico, de manera que las muestras cubran un intervalo (por ejemplo: pH –5, 6,7 y 8). La dosis de coagulante previamente determinada se añade a cada vaso. A continuación, se examinan las muestras y se determina el pH óptimo. Si es necesario se vuelve a verificar la dosis mínima de coagulante al pH óptimo. (Valencia, 2000) Cuando se aplican los resultados de la prueba en jarras a la planta, a veces se encuentra que la planta opera mejor a una dosis química ligeramente diferente de la indicada por la prueba en jarras. La prueba en jarras es muy eficiente tanto en la agitación como en la sedimentación. Si la planta no es tan eficiente como las pruebas en jarras, es posible que se requiera una mayor dosis de coagulante. La mayor utilidad de la prueba en jarras es determinar en qué momento los cambios en la calidad del agua cruda demandan cambios en las dosis químicas. (Valencia, 2000) (Okun, 1990)

5.3.4. Pruebas en Jarras utilizando coagulantes más coadyudantes de coagulación

- Para determinar si los polielectrólitos pueden ayudar al proceso de coagulación –

floculación – sedimentación, se debe hacer lo siguiente: repetir la prueba en jarras utilizando la mejor dosis de coagulación determinada en el paso 15 anterior (o ligeramente por debajo de esta dosis), y añadir cantidades variables de coadyuvante coagulante como se describe en el paso 4 anterior para la adición del coagulante. Las dosis de poli electrólito raras veces exceden de 1 mg/ l (Valencia, 2000).

- Cuando se determine el uso de coadyuvantes coagulantes, conserve una jarra con sulfato de aluminio únicamente. Compare entonces los resultados (cuando se utiliza sólo sulfato de aluminio) con los resultados obtenidos cuando se añade un coadyuvante de coagulación al sulfato de aluminio.

5.3.4.1. Aplicación práctica.

Ejercicio 5.5

El agua residual generada es proveniente de un camal , la misma que tiene un caudal promedio de 2 m³/h y que atraviesa por las trampas de grasas.

Tabla 11. Caracterización de Muestras Compuestas EI 1.

Parámetros	Expresado como	Efluente Industrial 1	Límite máx. permisible*
pH	pH	7	6 a 9
Temperatura	°C	28	Condición natural +3
Aceites y Grasas	mg/lt	28	30
Color	Pt - Co	3.541	Inapreciable
Turbiedad	NTU	741
STD	mg/lt	853
Sólidos Sedimentables	ml/lt	1
Sólidos Totales	mg/lt	2030	1600
Sólidos Suspensidos	ml/lt	237	130
Demandा Química de Oxígeno	mg/lt	1998	200
Demandा Bioquímica de Oxígeno	mg/lt	1.198	100
Nitrógeno	mg/lt	87	30
Fósforo	mg/lt	159	10
Carga Contaminante	kg/día	95.904	

Fuente: Elaboración propia

*Tabla 9 Límites de Descarga a un cuerpo de agua dulce, Acuerdo Ministerial 097, (Ministerio del Ambiente, 2015)

Experimentación para definir Alternativas de Tratabilidad de Agua Residual Industrial

Se realiza las pruebas de tratabilidad con diferentes coagulantes y floculantes para determinar el más óptimo para el tratamiento y se caracterizó el agua tratada para obtener el porcentaje de remoción del producto químico.

Tabla 12. Caracterización de Muestras Compuestas EI I

Jarra	Afluente General		DOSIFICACIÓN ppm			Observaciones visuales			Agua Sedimentada		Agua Filtrada		
	Color:3.541 Turbiedad:741 DQO: 1998		Volumen de muestra 1000 ml			Tiempo de floculación 10 min. Velocidad: 30 rpm Tiempo de sed:10 min			Marca papel: whatman Número: 40				
	pH	Color	Cal p-24 ppm	Policloruro de aluminio ppm	Floculante Catiónico ppm	Tiempo de formación del floculante	Índice de Wilcomb	pH	Color	Turbiedad	pH	Color	Turbiedad
1	7	3.541	25	25	20	0	2	6	1.924	349			
2	7	3.541	50	50	20	8'2'	4	6	1567	246			
3	7	3.541	100	100	20	7'5'	7	6	840	241			
4	7	3.541	200	200	20	6'	8	6	525	157			
5	7	3.541	300	300	20	5'	10	6	154	27	6	142	16

GRADIENTE DE VELOCIDAD	ÍNDICE DE WILLCOMB
G – SEG – 1 100 rpm – 60 G-SEG-1 30 rpm – 10G-SEG -1	0- Floculación coloidal, Ningún signo de aglutinamiento. 2-Visible. Floculación muy pequeño casi imperceptible para un observador no entrenado. 4-Disperso. Floculación bien formado pero uniforme distribuido (sedimenta muy lentamente o no sedimenta). 6-Claro. Floculación de tamaño relativamente grande pero que precipita con lentitud. 8-Bueno, Floculación que se deposita fácil pero no completamente. 10-Excelente, floculación que se deposita todo dejando el agua cristalina.

Fuente: Elaboración propia

Observación: La prueba demuestra que el efluente no cumple la normativa vigente para descarga.



Figura 43. Muestra industria textil con ligero cambio.

Fuente: Elaboración propia.

5.4. SEDIMENTACIÓN

La sedimentación es la separación de partículas más pesadas en el agua mediante la acción de la gravedad. Es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales.

Existen tres tipos de sedimentación:

- **Sedimentación de partículas floculentas:** Este tipo de sedimentación se presenta cuando las concentraciones son bajas (SS por debajo de 300 – 500 mg/l).
- **Sedimentación zonal:** Se presenta cuando tenemos concentraciones intermedias de sólidos (500 – 5000 mg/l)
- **Sedimentación por compresión o de espesamiento:** Se presenta cuando las concentraciones de sólidos son muy altas (> 5000 – 10000 mg/l). (Tejero S. J., 2000)

5.4.1. Sedimentación floculenta

Esta sedimentación se presenta en aguas con concentraciones relativamente bajas de sólidos en suspensión.

Para entender este proceso se parte del estudio de un tanque de sedimentación ideal, similar al utilizado para el estudio del proceso de decantación libre, las partículas al caer colisionan unas con otras formando agregados, aumentando de tamaño y por consecuencia su velocidad de sedimentación. La velocidad de descenso ya no es constante y las trayectorias ya no son rectilíneas sino que van formando una curva. (Tejero S. T., 1992)

5.4.2. Sedimentación Zonal

En los sistemas que contienen elevados concentraciones de sólidos en suspensión además de la sedimentación libre o discreta y de la sedimentación floculenta también suelen darse otras formas de sedimentación, como la sedimentación zonal (tipo 3) y la sedimentación por compresión (tipo 4). El fenómeno de sedimentación que ocurre cuando se introdu-

ce en un cilindro graduado una suspensión concentrada, con concentración inicialmente uniforme. Debido a la alta concentración de partícula, el líquido tiende a ascender por los intersticios existentes entre aquellas. Como consecuencia de ello las partículas que entran en contacto tienden a sedimentar en zonas o capas manteniendo entre ellas las mismas posiciones relativas. Este fenómeno se conoce como sedimentación retardada. Conforme van sedimentando las partículas, se produce una zona de agua relativamente clara por encima de la región de sedimentación. (Ramalho, 1996)

Las partículas dispersas, relativamente ligeras, que permanecen en esta región sedimentarán como partículas discretas o floculadas, tal como se ha descrito anteriormente. En la mayoría de los casos se presenta una interfase bien diferenciada entre la zona de sedimentación discreta y la zona de sedimentación retardada. La velocidad de sedimentación de la zona de sedimentación retardada es función de la concentración de sólidos y de sus características. Como el método de flujo de sólidos, se emplean datos procedentes de una serie de ensayos de sedimentación realizado con diferentes concentraciones de sólidos. En los apartados siguientes se describen ambos métodos. (Ramalho, 1996)

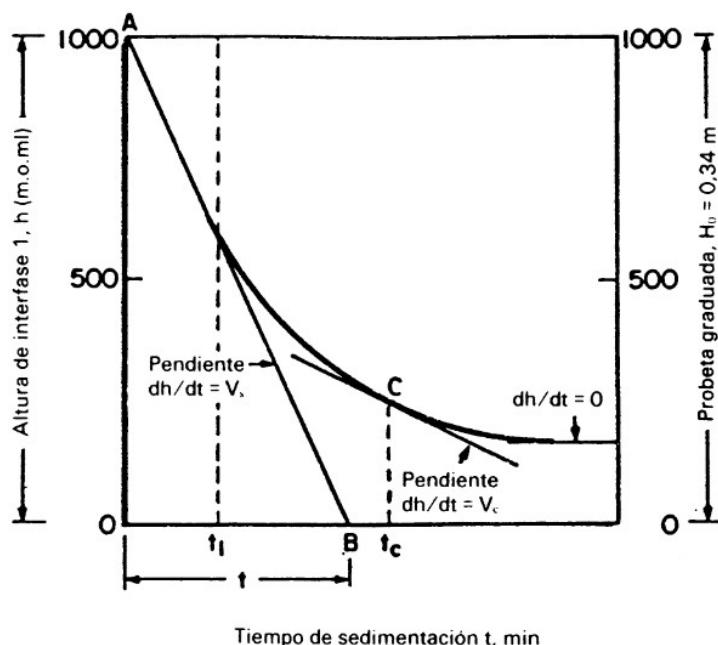


Figura 44. Gráfico de Sedimentación Zonal.

Fuente: (Ramalho, 1996, pag 129).

5.4.3. Sedimentación por compresión

A medida que avanza el proceso de sedimentación, comienza a formarse en el fondo del cilindro una capa de partículas comprendidas, en la zona de sedimentación por compresión. Aparentemente, las partículas de esta región forman una estructura en la que existe contacto

entre ellas. Al formarse la región o capa de compresión, las capas en las que las concentraciones de sólidos son, sucesivamente, menores que en la zona de compresión tienden a ascender por el tubo. Por lo tanto, de hecho, la zona de sedimentación zonal o retardada presenta una graduación de concentraciones de sólidos comprendida entre la zona de compresión y la de sedimentación. Según Dick y Ewing, la fuerzas de interacción física entre las partículas, especialmente intensas en la zona de compresión, disminuyen con la altura pudiendo existir, en alguna medida, en la zona de sedimentación retardada.

Generalmente, debido a la variabilidad de los resultados obtenidos, la determinación de las características de sedimentabilidad de las suspensiones en las que la sedimentación zonal y la sedimentación por compresión desempeñan un papel importante suele realizarse mediante ensayos de sedimentación. Basándose en los datos deducidos a partir de ensayos en columnas de sedimentación, el área necesaria para las instalaciones de sedimentación y espesado de fangos puede determinarse empleando dos técnicas diferentes. En el primer método, se emplean los datos obtenidos en un ensayo de sedimentación simple (batch) mientras que en el segundo, conocido.

Rendimiento eliminación*	SS	60 - 65 %
	DBO ₅	30 - 35 %
Velocidad ascensional	Q _m	< 1.3 m/h
	Q _M (Qmáx)	< 2.5 m/h
Tiempo de retención (vol/Q)	Q _m	> 2 h
	Q _M	> 1 h
Carga sobre vertedero (Q_P)**		< 40 m ³ /h/m
Calado bajo vertedero**		2 - 3.5 m
Velocidad rasquetas (perimetral)***	Dec Ø	< 120 m/h
	Dec •	< 60 m/h
Tiempo de retención fangos en poceta		< 5 h
Concentración de fangos		3 - 5 %
Pendiente solera	Dec Ø (rasq)	5 - 10 %
	Dec • (rasq)	1 - 2 %
Ø: Corona de reparto	Diámetro	0.10 - 0.15 Ø _{dec}
	Altura	0.25 - 0.50 H _T (central)
Ø: Accionamiento puente: Central****		ω > 0.04 rpm
• Dimensiones*****	Relación largo/ancho (1.5-7.5)	3 - 5
	Relación longitud/calado	4 - 35

Figura 45. Resumen de parámetros de diseño de un sedimentador primario.

Fuente: (Tejero S. T., 1992).

5.4.4. Sedimentación o Decantación primaria

En la sedimentación primaria el objetivo es la reducción de los sólidos en suspensión por acción de la gravedad, en consecuencia se eliminan los sólidos sedimentables y las materias flotantes.

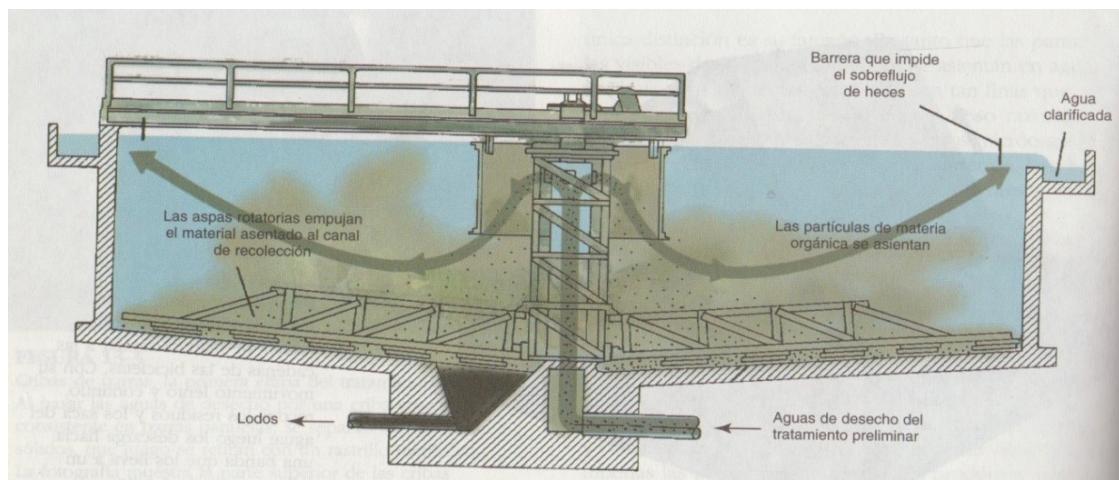


Figura 46. Sección transversal de un Sedimentador primario.

Fuente: (Bernard J. Nebel R. T., 1999).

En la Figura 46 se observa un clarificador para el tratamiento primario. El agua entra a los tanques por el centro y sale por los vertederos del borde. El movimiento lento del flujo permite que las partículas orgánicas se asientan al tiempo que aceites y grasas floten. La materia asentada se bombea del fondo, en tanto que las grasas se desnatan de la superficie, la combinación de los dos materiales forman los lodos en bruto. (Bernard J. Nebel R. T., 1999)

GRÁFICA A ESCALA DE LA UNIDAD

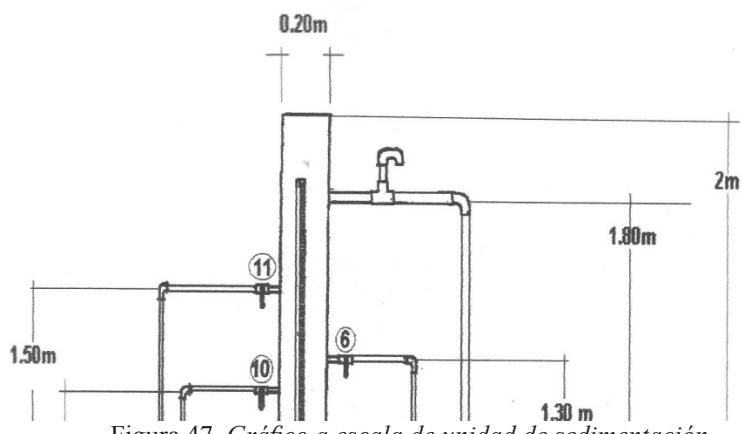


Figura 47. Gráfico a escala de unidad de sedimentación.

Fuente: (L. Galarza, 2002).

Unidad Piloto de sedimentación

Consta de las siguientes partes:

- Mesa de trabajo y soporte de la columna.
- Tanque de alimentación.
- succión y llenado (bomba centrífuga)
- Manguera de rebose
- Columna o cilindro.

Procedimiento experimental

1. Preparación de la muestra a analizar.
2. Codificar botellas para el muestreo.
3. Chequeo del equipo.
4. Cerrar la válvula 1 y llenar tanque de alimentación.
5. Cerrar la válvula 3 y 12 y abrir la 1.
6. Operación de la bomba.
7. Inundar hasta llegar al nivel de trabajo de la columna 1.8 m.
8. Alcanzado el nivel apagar la bomba y cerrar la válvula 2.
9. Toma de muestras, tomadas de las válvulas 7, 8, 9, 10 y 11 (5 puntos de muestreo) y las tomadas de las válvulas 4.5 y 6 (3 puntos de muestreo), tomar aproximadamente 200 ml de muestra.
10. Una vez tomadas las muestras evacuar la unidad de la siguiente manera:
 - Abrir la válvula 3 y permitir que se vacíe la columna dentro del propio tanque de alimentación.
 - Una vez vaciada, evacuar los restos de muestra por medio de la válvula 12.
 - Finalmente evacuar el tanque de alimentación accionando la válvula 1.

5.4.5. Aplicación práctica.

Ejercicio 5.7

Una suspensión que es sometida a ensayo tiene una concentración inicial de 430 miligramos/Lt de sólidos suspendidos. En la tabla 16 se encuentra el resultado de las mediciones en tiempos determinados, en los puntos de muestreo a las profundidades de 0.6 : 1.2 y 1.8 metros.

Utilizar los datos indicados para obtener las siguientes curvas.

- a) Porcentaje de sólidos eliminados para distintos tiempos.
- b) Porcentaje de sólidos suspendidos eliminados con respecto a la carga superficial.
- c) Porcentaje de sólidos suspendidos que permanecen (fracción de las partículas con velocidad inferior a la estable) con respecto a la velocidad de sedimentación m/h para un tiempo de permanencia de 14,5 min.

Problema adaptado de (Ramalho, 1996)

Tabla 13. Sólidos suspendidos en función del tiempo.

Tiempo (min)	Sólidos en suspensión (mg/l)		
	0.6 m	1.2 m	1.8 m
5	356,9	387	395,6
10	309,6	346,2	365,5
20	251,6	298,9	316,1
30	197,8	253,7	288,1
40	163,4	230,1	251,6
50	144,1	195,7	232,2
60	116,1	178,5	204,3
75	107,5	143,2	180,6

Fuente: (Ramalho, 1996)

Tabla 14. Cálculo de las fracciones de sólidos que quedan y separados para una profundidad de 0,6 m.

Tiempo (min)	SS que quedan (mg/l)	% SS quedan $Y = (SS/SS_0) * 100$	% SS remov. $X = 100 - Y$
0	0	0	0
5	356,9	83	17
10	309,6	72	28
20	251,6	58,51	41,49
30	197,8	46	54
40	163,4	37,91	62,09
50	144,1	33,51	66,49
60	116,1	26,97	73,03
75	107,5	25	75

Fuente: Adaptado de (Ramalho, 1996)

Tabla 15. Cálculo de las fracciones de sólidos que quedan y separados para una profundidad de 1,2 m.

Tiempo (min)	SS que quedan (mg/l)	% SS quedan $Y = (SS/SS_0) * 100$	% SS remov. $X = 100 - Y$
0	0	0	0
5	387	90	10
10	296,2	80,5	19,5
20	298,9	69,5	30,5
30	253,7	59	41
40	230,1	54	46
50	195,7	45,5	54,4
60	178,5	41,5	58,5
75	143,2	33,3	66,7

Fuente: Adaptado de (Ramalho, 1996)

Tabla 16. Cálculo de las fracciones de sólidos que quedan y separados para una profundidad de 1,8 m.

Tiempo (min)	SS que quedan (mg/l)	% SS quedan $Y = (SS/SS_0) * 100$	% SS remov. $X = 100 - Y$
0	0	0	0
5	395,6	92	8
10	265,5	85	15
20	316,1	73,5	26,5
30	288,1	67	33
40	251,6	58,5	41,5
50	232,2	54	46
60	204,3	47,5	52,5
75	180,6	42	58

Fuente: Adaptado de (Ramalho, 1996)

Los resultados de % de sólidos removidos en diferentes tiempos en cinco profundidades observados en las tablas 17, 18, 19, 20, 21

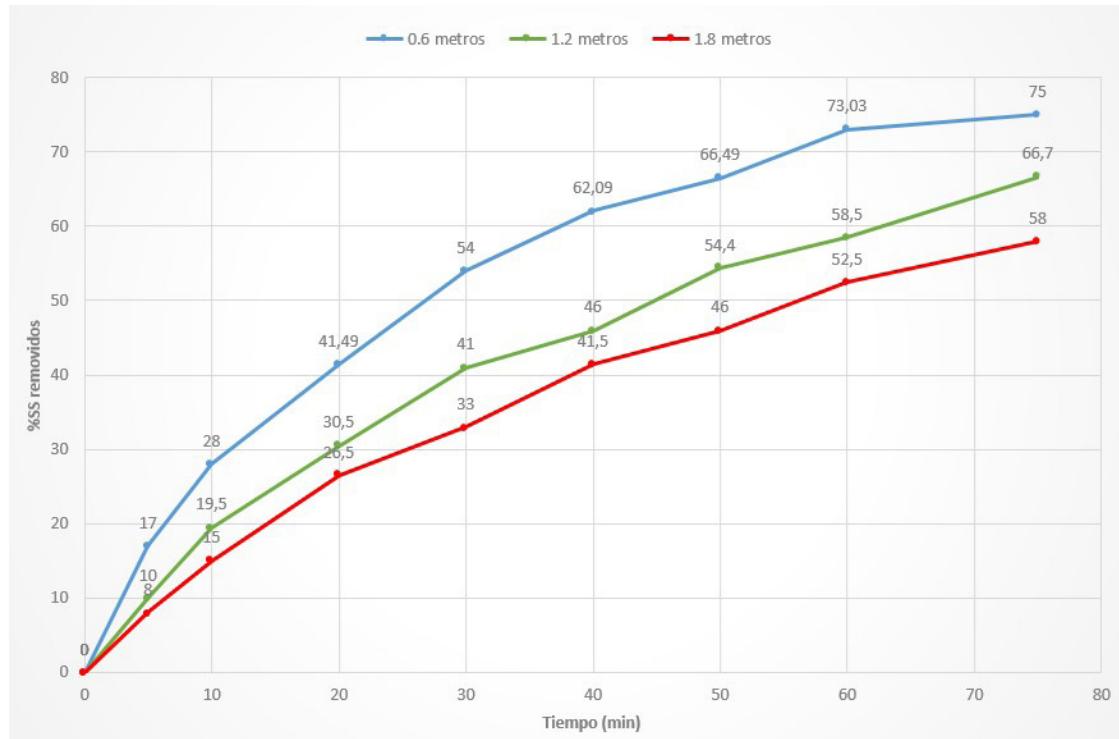


Figura 48. %SS Removidos Vs Tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Porcentaje de sólidos removidos a 0.6, 1.2, 1.8 m. de profundidad.

%SS Removidos	Tiempo (min)		
	0.6 m	1.2 m	1.8 m
5	1,2	2,5	3,7
10	2,5	5	6,5
20	6,7	11	14
30	11,7	19	25
40	18	30	39
50	27	44	56,5
60	38,5	61,5	77,5
70	55	87,5	
75	75		

Fuente: Adaptado de (Ramalho, 1996)

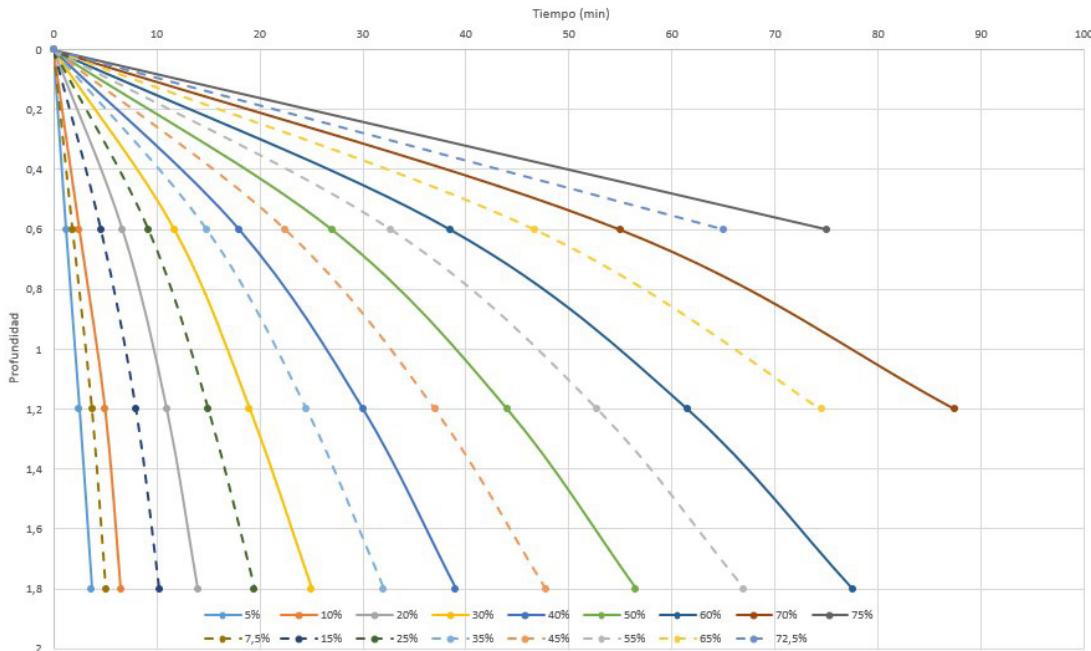


Figura 49. Perfil de sedimentación a diferentes % de SS removidos.

Fuente: Elaboración propia.

Determinación del porcentaje de sólidos suspendidos separados en función de tiempo 14,5min.

Tabla 18. Porcentajes sólidos suspendidos
tiempo 14,5min.

Detalle	Tiempo	
	14,5min	
Remoción	100%	20%
1º intervalo	$25\% = 1.14/1.8 * 10 =$	6,33
2º intervalo	$35\% = 0.58/1.8 * 10 =$	3,22
3º intervalo	$45\% = 0.35/1.8 * 10 =$	1,88
4º intervalo	$55\% = 0.19/1.8 * 10 =$	1,05
5º intervalo	$65\% = 0.09/1.8 * 10 =$	0,56
6º intervalo	$75\% = 0.03/1.8 * 10 =$	0,17
	Σ	33,21%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. SS removidos en función del tiempo de retención.

Tiempo de Retención (min)	% SS removidos totales
0	0
3,7	13,23
6,5	20,05
14,5	33,21
25	45,1
39	55,05
56,5	64,32
77,5	70,94

Fuente: Adaptado de (Ramalho, 1996)

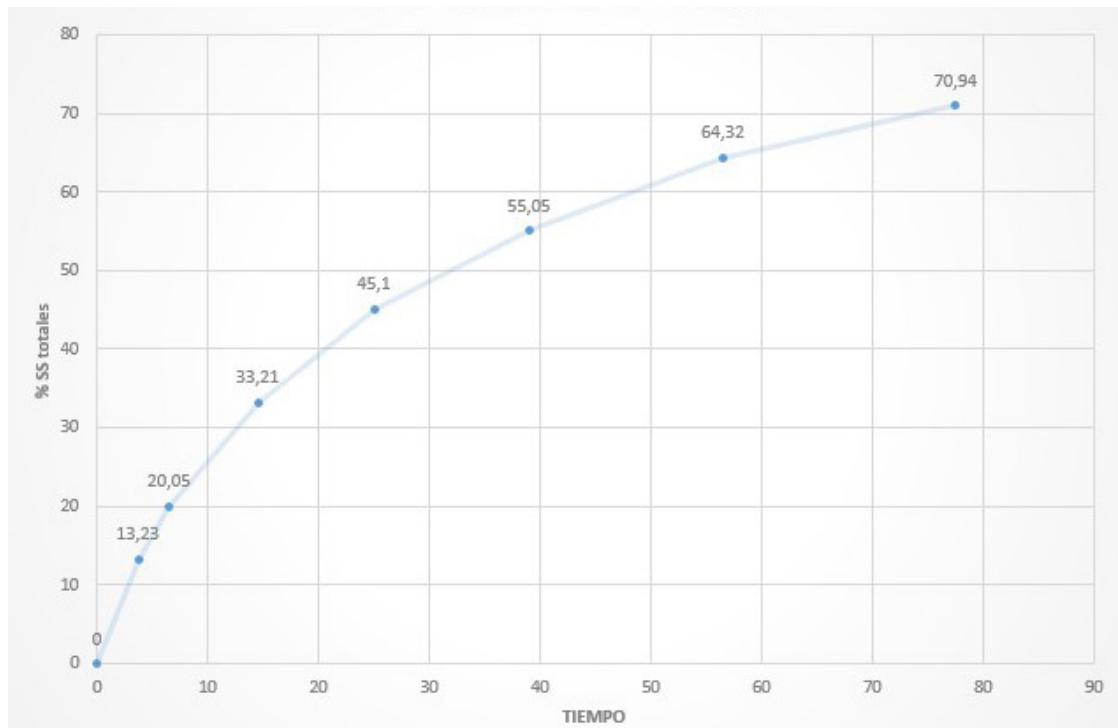


Figura 50. Tiempo de retención Vs %SS removidos totales.

Fuente:Elaboración propia.

Tabla 20. % SS removidos en función del factor de carga.

Tiempo (min)	Velocidad de Sedimentación (m/h)	Factor de carga ($m^3/m^2 * d$) Vs*24	% SS removidos
0	0	0	0
3,7	29,2	700,8	13,23
6,5	16,61	398,4	20,05
14,5	7,44	178,8	33,21
25	4,32	103,7	45,1
39	2,76	66,5	55,05
56,5	1,91	45,8	64,32
77,5	1,39	33,4	70,94

Fuente: Elaboración propia

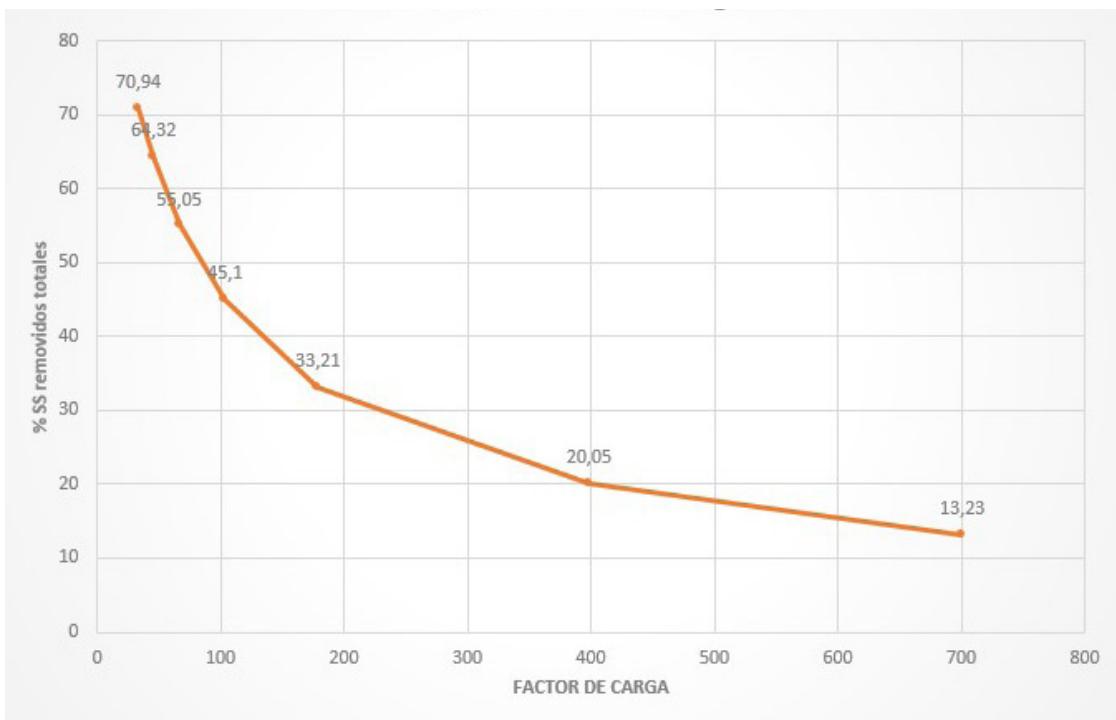


Figura 51. Factor de carga Vs %SS removidos totales.
Fuente:Elaboración propia.

5.5. FLOTACIÓN

La flotación es una operación unitaria que se emplea para la separación de partículas flotables y emulsiones de una fase líquida.

La separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas, normalmente aire, en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas, y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido. De esta forma, es posible hacer ascender a la superficie partículas cuya densidad es mayor que la del líquido, además de favorecer la ascensión de las partículas cuya densidad es inferior, como el caso del aceite en el agua. (Metcalf & Eddy, 1995)

5.5.1. Sistema de tratamiento de flotación con aire disuelto (fad)

La flotación por aire disuelto además de eliminar materia sólida y/o líquida de densidad inferior a la del agua, es capaz de eliminar sólidos de densidad superior.

El proceso FAD consiste en la creación de micro burbujas de aire en el seno del A.R., las cuales se unen a las partículas a eliminar formando agregados capaces de flotar por tener una densidad inferior a la del agua.

Por tanto, se puede decir que el objetivo de este proceso en el tratamiento primario es doble: reducción de materias flotantes y reducción de SS.

PARÁMETROS DE DISEÑO DEL PROCESO F.A.D.	
Reducción de SS	65% - 80%
Reducción de DBO	45% - 50%
Reducción de aceites	70% - 90%
Relación Aire/Sólidos (en peso)	0.03 0.08
Presión de Trabajo	2.5 atm
Tasa de Presurización	10% - 40%
Velocidad Descensional	2.5 - 10 m/h
Tiempo de Retención	20 - 40 min.
Carga de Sólidos	no limitante

Figura 52. Parámetros de diseño del proceso FAD.

Fuente: (Tejero S. T., 1992).

5.5.2. Tipos de procesos aplicables

La creación de burbujas en el proceso FAD, se realiza a través de los siguientes pasos (Tejero S. T., 1992), Figura 53:

- Presurización de un flujo de agua
- Disolución de aire en dicho flujo, sobresaturándolo, respecto a condiciones normales de presión.
- Despresurización a presión atmosférica, con lo que el exceso disuelto por encima del de saturación se libera en forma de microburbujas.

Aplicación

- En el caso de incidencia importante de vertidos industriales no tratados (refinerías, papeleras, pinturas, conserva de carnes, laminación...)
- Cuando el vertido se realiza al mar puede llegar a hacer cumplir las limitaciones del vertido sin necesidad de tratamiento biológico.
- Dada su gran versatilidad de funcionamiento, puede ser muy útil en los casos de grandes variaciones de vertido según temporadas.

El espesamiento del exceso de fangos activos del tratamiento biológico puede obviarse realizándose en el mismo FAD. (Tejero S. T., 1992)

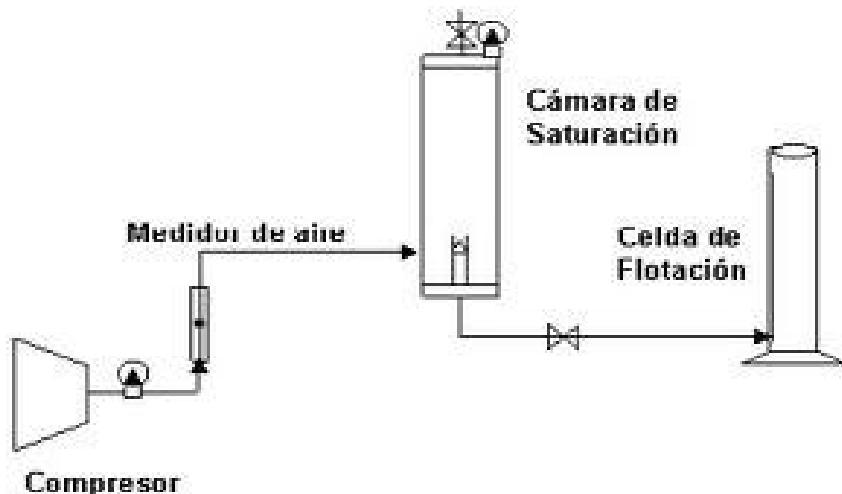


Figura 53. Sistema de presurización-sobresaturación.

Fuente: (Zulia, 2008).

5.5.3. Ventajas

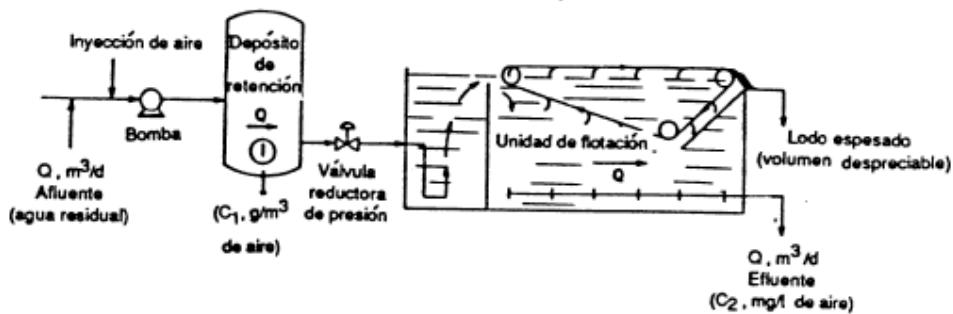
La principal ventaja del proceso de flotación frente al de sedimentación consiste en que permite eliminar mejor y en menos tiempo las partículas pequeñas o ligeras cuya deposición es lenta. Una vez las partículas se hallan en superficie, pueden recogerse mediante un rascado

superficial (Rojas J. A., 2001), A continuación se mencionan otras ventajas:

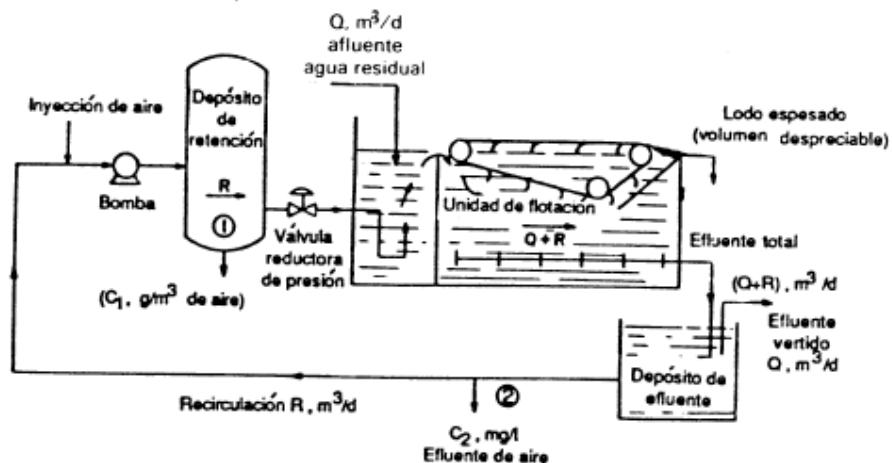
- Se retiran en un solo paso, las grasas y los sólidos livianos que se elevan a la superficie y arena y sólidos pesados que se precipitan en el fondo.
- Se pueden emplear altas cargas superficiales y períodos cortos de retención, lo que significa que el tamaño de los tanques es menor y hay unas necesidades menores de espacio así como ahorros en costos de construcción.
- Las emanaciones de olores a causa de los cortos períodos de retención se reducen y en unidades de presión y aireación por la presencia de oxígeno disuelto en el seno del efluente.
- Muchas veces, son más densos las espumas y lodos obtenidos de la unidad de flotación que una unidad de sedimentación.

5.5.4. Desventajas

- El equipo adicional que se requiere exige unos costos de funcionamiento más altos.
- Generalmente, las unidades de flotación no dan un tratamiento tan efectivo como las unidades de precipitación, aunque el rendimiento varía con el vertido.
- El tipo de presión tiene unas necesidades grandes de energía, lo que aumenta los costos de funcionamiento.
- Los tipos de vacío requieren una estructura estanca relativamente cara, capaz de mantener una presión de 0.2 atmósferas, cualquier fuga a la atmósfera disminuirá el funcionamiento.
- Se requiere un mantenimiento más experto en una unidad de flotación que en una de sedimentación. (Rojas J. A., 2001)



a) Sistema de flotación sin recirculación



b) Sistema de flotación con recirculación

Figura 54. Sistemas de Flotación a) sin recirculación, b) con recirculación.

Fuente: (Ramalho, 1996)

5.5.5. Variables de diseño

De mayor importancia: Presión, Tasa de recirculación, Concentración de sólidos entrante, período de retención. Al incrementar el período de retención, disminuyen los sólidos suspendidos en el efluente e incrementa la concentración de sólidos flotados. Si se diseña para clarificación, el período de retención suele ser de unos 20 a 30 minutos, con tasas de ascenso típicas del orden $0,061 (\text{m}^3/\text{min})/\text{m}^2$; si la aplicación es de espesamiento, se requieren períodos de retención mayores (3 a 5 veces).

5.5.6. Flotación por aire disuelto (FAD).

El aire se disuelve en el agua residual a presión de 3 a 5 atm, y luego se libera la presión hasta alcanzar la atmosférica.

En las instalaciones de pequeño tamaño, se puede presurizar a 275-230 kPa mediante una bomba la totalidad del caudal a tratar, añadiéndose el aire comprimido en la tubería de aspiración de la bomba. El caudal se mantiene bajo presión en un calderín durante algunos minutos, para dar tiempo a que el aire se disuelva. A continuación, el líquido presurizado se alimenta al tanque de flotación a través de una válvula reductora de presión, lo cual provoca que el aire deje de estar en disolución y que se formen diminutas burbujas distribuidas por todo el volumen de líquido. (Rojas, 2001)

En las instalaciones de mayor tamaño, se recircula parte del efluente del proceso de FAD (entre el 15 y el 120 por 100), el cual se presuriza, y se semi satura con aire. El caudal recirculado se mezcla con la corriente principal sin presurizar antes de la entrada al tanque de flotación, lo que provoca que el aire deje de estar en disolución y entre en contacto con las partículas sólidas a la entrada del tanque. Las principales aplicaciones de la flotación por aire disuelto se centran en el tratamiento de vertidos industriales y en el espesado de fangos. (Rojas, 2001)



Figura 55. Sistema de flotación por aire disuelto.

Fuente: Laboratorio de Aguas Fac. Ingeniería Química UG.

La flotación es una operación unitaria que se emplea para la separación de partículas flotables y emulsiones de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas, normalmente aire, en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas, y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido. De esta forma, es posible hacer ascender a la superficie partículas cuya densidad es mayor que la del líquido, además de favorecer la ascensión de las partículas cuya densidad es inferior, como el caso del aceite en el agua. En el tratamiento de aguas residuales, la flotación se emplea para la eliminación de la materia suspendida y para la concentración de los fangos biológicos.

De acuerdo a Romero Rojas Jairo, 2001 para el cálculo de A/S en diferentes presiones de operación utilizamos la siguiente ecuación:

$$\frac{A}{S} = \frac{Cd[f(P_T - P_V) - (P_L - P_V)]}{S_0(760 - P_V)}$$

- A/S = relación a dimensional aire/solido
 C = solubilidad de saturación del aire a 1 Atm. ml/l
 d = densidad del aire a las condiciones del problema mg/ml
 f = fracción de aire disuelto a la presión Pt generalmente 0.5
 Pt = presión absoluta de operación en mm de Hg
 Pv = presión de vapor del agua a la temperatura de operación mm de Hg
 PL = presión local atmosférica mm de Hg.

Para la aplicación de la ecuación antes mencionada se utiliza las figura 56, 57, 58 que corresponde a los valores de solubilidad de saturación del aire en agua a una atmósfera, densidad de aire, presión de vapor del agua, a diferentes temperaturas.

Temperatura °C	Solubilidad, C mL aire/L de agua
0	29,2
5	25,7
10	22,8
15	20,6
20	18,7
25	17,1
30	15,7

Figura 56. Solubilidad de saturación del aire en agua a una atmósfera.

Fuente: (Romero Rojas J., 2001, pag. 351).

Temperatura T, °C	Densidad, mg/mL
0	1,293
2	1,284
4	1,274
5	1,270
6	1,265
8	1,256
10	1,247
12	1,238
14	1,230
15	1,226
16	1,221
18	1,213
20	1,205
22	1,196
24	1,188
25	1,184
26	1,180
28	1,173
30	1,165
35	1,146
40	1,127
50	1,093
60	1,060
70	1,029
80	1,000
90	0,972
100	0,946

Figura 57. Sistema de flotación por aire disuelto.
Fuente: (Romero Rojas J. , 2001, pag. 356).

Temperatura °C	Presión de vapor kPa	Presión de vapor mm Hg
0	0,61	4,6
2	0,71	5,3
4	0,82	6,2
5	0,87	6,5
6	0,94	7,1
8	1,09	8,2
10	1,23	9,2
12	1,42	10,7
14	1,61	12,1
15	1,70	12,8
16	1,81	13,6
18	2,02	15,2
20	2,34	17,6
22	2,66	20,0
24	3,02	22,7
25	3,17	23,8
26	3,38	25,4
28	3,71	27,8
30	4,24	31,8
40	7,38	55,4
50	12,33	92,5
60	19,92	149,4
70	31,16	233,7
80	47,34	355,1
90	70,10	525,8
100	101,33	760,0

Figura 58. Sistema de flotación por aire disuelto.

Fuente: (Romero Rojas J. , 2001, pag. 357).

5.5.7. Aplicación práctica.

Ejercicio 5.7

Para una relación de aire/sólidos igual a 0.005, con una temperatura de 24°C. Determinar la presión requerida para la unidad FAD sin recirculación suponiendo concentración de sólidos en el afluente de 0.32%. El factor de saturación 0.5. La presión barométrica 660.

Datos	
A/S	0.85
T	24°C
P _v	22.7 mm Hg
S ₀	3200
f	0.5
Presión barométrica	660
P _I	660 mm Hg

Solución:

Corrección de densidad:

$$d = \frac{1188(660)}{760} = 1.031 \text{ mg/ml}$$

Sin recirculación

$$\frac{A}{S} = \frac{Cd[f(P_T - P_V) - (P_L - P_V)]}{S_0(760 - P_V)}$$

$$0.005 = \frac{17.42(1.031)[0.5(P_T - 22.7) - (660 - 22.7)]}{3200(760 - 22.7)}$$

$$P_T = 1950.21 \text{ mm Hg abs}$$

Ejercicio 5.8

Diseñar un espesor de flotación para conectar un lodo de 0.33% de sólidos en un lodo con 4% de sólidos, suponiendo los siguientes condiciones.

- Con recirculación A/S = 0.02, presión barométrica (P_L) = 740 mm Hg, $f = 0.5$, $C_s = 25\text{m/d}$, $Q = 450\text{m}^3\text{d}$, $T = 23^\circ\text{C}$.
- Con recirculación A/S = 0.01, $P_T = 40 \text{ psi}$.

Solución:

a) Sin recirculación

- De la ecuación se obtiene la presión de operación requerida

$$C = 17.74$$

$$d = \frac{1192(740)}{760} = 1160 \text{ mg/ml}$$

$$P_V = 21.35$$

$$\frac{A}{S} = \frac{Cd[f(P_T - P_V) - (P_L - P_V)]}{S_0(760 - P_V)}$$

$$0.02 = \frac{17.74(1.160)[0.5(P_T - 21.35) - (740 - 21.35)]}{3300(760 - 21.35)}$$

$$P_T = 6196.71 \text{ mm Hg abs}$$

$$P_{TM} = 6196.71 - 740 = 5456.71 \text{ mm Hg} = 105.54 \text{ PSI} = 727.502 \text{ kPa}$$

- El área superficial requerida de flotación será:

$$A = \frac{Q}{CS} = \frac{450}{25} = 18\text{m}^3$$

- La carga de sólidos será:

$$Carga = \frac{450 \times 3300}{18} = 82.5 \text{ kg/m}^2\text{d}$$

b) Con recirculation

- De la siguiente ecuación se obtiene el caudal de recirculación.

$$\frac{A}{S} = \frac{C_d Q_R [f(P_T - P_V) - (P_L - P_V)]}{S_0 Q (760 - P_V)}$$
$$0.01 = \frac{17.74(1.160)Q_R[0.5(2808.02 - 21.35) - (740 - 21.35)]}{3300(450)(760 - 21.35)}$$

$$Q_R = 790.04 \frac{m^3}{d}$$

$$R = \frac{Q_R}{Q} = \frac{790.04}{450} = 1.755 = 175.56\%$$

- El área superficial requerida de flotación será:

$$A = \frac{Q + Q_R}{CS} = \frac{790 + 450}{25} = 49.60 \text{ m}^2$$

CAPÍTULO VI

TRATAMIENTO SECUNDARIO

6. TRATAMIENTO SECUNDARIO

6.1. OBJETIVO

El tratamiento secundario o tratamiento biológico tiene como objetivo principal la reducción de materia orgánica coloidal como la materia orgánica disuelta. El proceso se basa en que microorganismos adecuados consuman la materia orgánica, mediante la coagulación. Despues de un proceso biológico el efluente pasa a una sedimentación secundaria con el fin de eliminar el floculo biológico que se ha generado.

6.2. DEPURACIÓN BIOLÓGICA

La depuración biológica en las aguas residuales se lleva a cabo mediante la eliminación de los contaminantes biodegradables por medio de una biocenosis (Figura 59) o comunidad de microorganismos principalmente bacterias y otros organismos mantenida en un ambiente que con un control especial.

La contaminación del agua, substrato y/o nutrientes, quedara eliminada debido a que la biocenosis la procesa y genera nuevo tejido celular ($C_5 H_7 NO_2$) y gases como, anhídrido carbónico (CO_2 , en ambiente aerobio y metano en ambiente anaerobio, nitrógeno y sulfídrica en ambiente anóxico. (Tejero S. T., 1992)

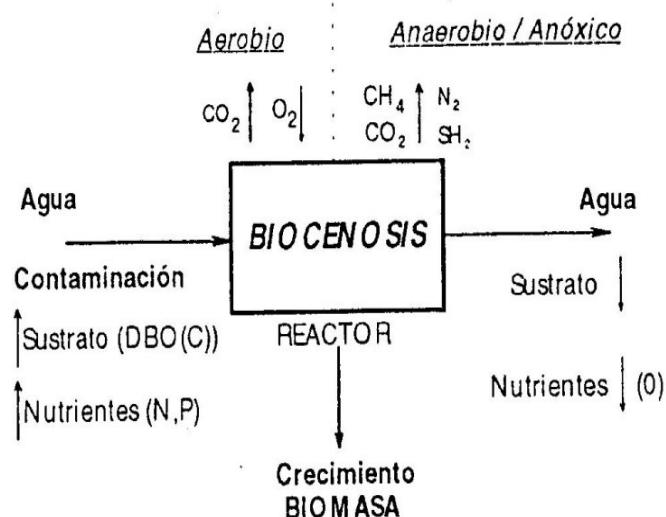


Figura 59. Gráfico de depuración biológica.
Fuente: (Tejero S. T., 1992).

El proceso biológico se basa en el consumo de materia orgánica por organismos adecuados principalmente bacterias que convierten la materia orgánica carbonosa coloidales y disueltas en diferentes gases y tejido celular y como el tejido celular tiene peso específico mayor que el agua se puede eliminar por decantación. En esta etapa se consiguen importantes rendimientos en eliminación de DBO. (Tejero S. T., 1992)

Existen cuatro grupos principales de procesos biológicos: procesos aerobios, procesos anóxicos, procesos anaerobios y procesos combinados aerobios con anóxicos o con anaerobios. Dentro de cada grupo hay diferentes tipos dependiendo el tipo de crecimiento, así mismo dependiendo del régimen de flujo predominante los procesos pueden ser de flujo continuo o intermitente y del tipo de mezcla completa, flujo en pistón o flujo arbitrario.

Tabla 21. Principales procesos de tratamiento biológico.

TIPO	CRECIMIENTO	PROCESO	USO PRINCIPAL
AEROBIOS	SUSPENDIDO	LODOS ACTIVADOS - CONVENCIONAL - MEZCLA COMPLETA - AIREACIÓN ESCALONADA - ESTABILIZACIÓN Y CONTACTO - OXÍGENO PURO - TASA ALTA - AIREACIÓN PROLONGADA - PROCESO DE KRAUSS - ZANJON DE OXIDACIÓN - LAGUNAS AIREADAS - DIGESTIÓN AEROBIA - LAGUNAS AEORBIAS	REMOCIÓN DE DBO Y NITRIFICACIÓN REMOCIÓN DE DBO Y NITRIFICACIÓN REMOCIÓN DE DBO - ESTABILIZACIÓN REMOCIÓN DE DBO Y NITRIFICACIÓN
	ADHERIDO	FILTROS PERCOLADORES - TASA BAJA - TASA ALTA TORRES BIOLÓGICAS UNIDADES ROTATORIAS DE CONTACTO BIOLÓGICO REACTORES DE LECHO FIJO	REMOCIÓN DE DBO Y NITRIFICACIÓN REMOCIÓN DE DBO Y NITRIFICACIÓN REMOCIÓN DE DBO Y NITRIFICACIÓN REMOCIÓN DE DBO Y NITRIFICACIÓN
ANÓXICOS	SUSPENDIDO	BARDENPHO DESNITRIFICACIÓN DESNITRIFICACIÓN	REMOCIÓN DE DBO, N Y P REMOCIÓN DE NITRÓGENO REMOCIÓN DE NITRÓGENO
	ADHERIDO		
ANAEROBIOS	SUSPENDIDO	DIGESTIÓN ANAEROBIA ANAEROBIO DE CONTACTO	REMOCIÓN DE DBO – ESTABILIZACIÓN REMOCIÓN DE DBO
	HÍBRIDO	LAGUNAS ANAEROBIAS MANTO DE LODOS – FLUJO ASCENSIONAL (PAMLA) O UASB	REMOCIÓN DE DBO – ESTABILIZACIÓN REMOCIÓN DE DBO Y SS
	ADHERIDO	FILTRO ANAEROBIO LECHO EXPANDIDO	REMOCIÓN DE DBO – ESTABILIZACIÓN REMOCIÓN DE DBO – ESTABILIZACIÓN

Fuente: (Rojas J. A., 2001)

6.3. TRATAMIENTO AEROBIO

6.3.1. Lodos Activados

Este proceso fue desarrollado en Inglaterra en 1914 por Ardra y Lockett, (Metcalf & Eddy, 1995, pag. 436) y su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia. Desde el punto de vista de funcionamiento, el tratamiento biológico de aguas residuales mediante el proceso de fangos activados, se realiza a través de un tanque o reactor biológico, donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión y se realiza la oxidación de la materia orgánica. El contenido del reactor se conoce con el nombre de “líquido mezcla”. El ambiente aerobio en el reactor se consigue mediante el uso de difusores, que también sirve para mantener el líquido mezcla en estado de mezcla completa.

Al cabo de un periodo determinado de tiempo, la mezcla de las nuevas células con las viejas se conduce hasta un tanque de sedimentación para su separación del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recircula para mantener en el reactor la concentración de células deseada, mientras que la otra parte se purga del sistema (fango en exceso). En el proceso de fangos activados, las bacterias son los microorganismos más importantes, ya que son los causantes de la descomposición de la materia orgánica del afluente. En el reactor, o tanque biológico, las bacterias aerobias o facultativas utilizan parte de la materia orgánica del agua residual con el fin de obtener energía para la síntesis del resto de la materia orgánica en forma de células nuevas.

El de aireación prolongada es una variante del proceso de flujo en pistón con recirculación, donde todas las partículas que entran en el reactor biológico permanecen en el interior del mismo durante idéntico periodo de tiempo.

El agua procedente del tratamiento primario: Arqueta de desbaste, cámara de grasas, pasa al tanque de aireación donde es mezclada con aire disuelto que fluye por los difusores siendo uniforme este suministro de aire disuelto que fluye por los difusores siendo uniforme este suministro de aire a lo largo de toda la longitud del tanque. Durante el periodo de aireación se produce la absorción, floculación y oxidación de la materia orgánica. Los sólidos del fango activado se separan en un decantador secundario. Este proceso necesita de una carga orgánica reducida y un largo periodo de aireación (Ramalho, 1990)

El proceso de lodo activado ha demostrado ser muy eficaz tanto en el tratamiento de vertido urbano como en el tratamiento de vertidos industriales de grandes industrias. Este proceso crea poblaciones biológicamente activas que son capaces de adsorber la materia orgánica de aguas residuales convertidas por un sistema de oxidación, por enzimas en productos finales simples como CO_2 , H_2O , NO_3 y SO_4 . Los lodos biológicos que se desarrollan naturalmente en las aguas residuales sometidos a aireación contienen una parte considerable de materia coloidal y en suspensión.

A continuación en la figura 60 se encuentra un bioreactor de alta velocidad y una biomasa suspendida y adherida a medio soporte el cual es una variante del sistema de lodos activados.

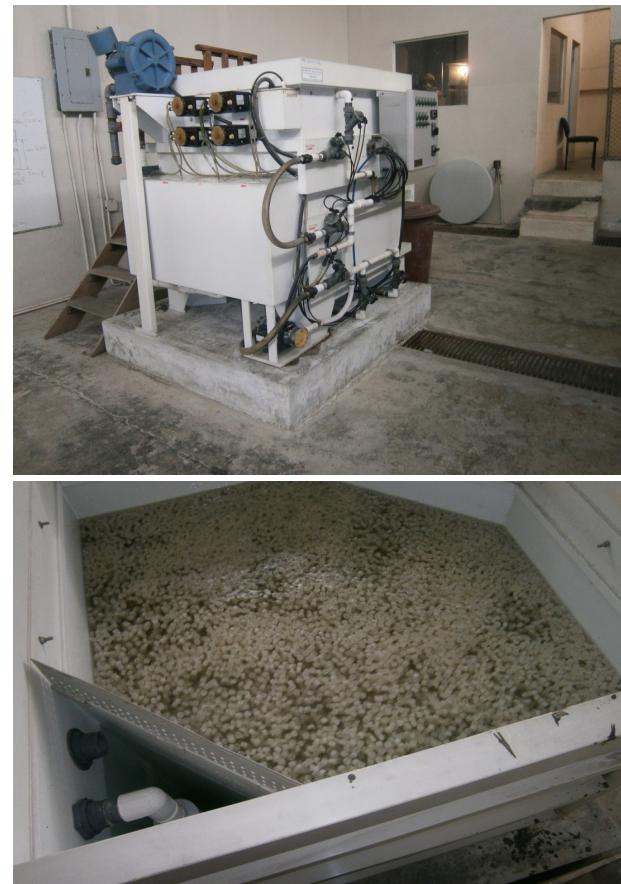


Figura 60. a). Bioreactor de alta velocidad HS Bio Tec 05 m³ /h.

b). Biomasa suspendida y adherida a medio soporte.

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias Fac. Ing. Qca. UG.

6.3.2. Aplicación práctica.

Ejercicio 6.1

Diseñar un proceso de lodos activados para producir un efluente con DBO de 25 mg/l y sólidos suspendidos totales de 25 mg/l. El afluente contiene una DBO de 200 mg/l. El caudal es de 200 l/s, Y=0.65 mg SSV/mgDBO; kd=0.05d-1; θC=10 d; la concentración de SSVLM es de 2 500 mg/l. La proporción volátil de los sólidos totales es del 80%; la concentración de sólidos totales del lodo sedimentado es igual a 15 000 mg/l. Adaptado (Romero Rojas J. , 2001)

- La DBO soluble del efluente se calcula por la expresión:

$$S_e = DBO_e - 0.63SS$$

$$S_e = 25 - 0.63 * 25 = 9 \text{ mg/l}$$

- La biomasa en el reactor se calcula por la ecuación:

$$XV = \frac{\theta_C YQ(S_0 - S)}{1 + k_d \theta_C}$$

$$XV = \frac{(10)(0.65)(0.2)(86400)(200 - 9)}{1 + 0.05(10)} = 1.43 * 10^7 \text{ g SSV}$$

$$XV = 1.43 * 10^4 \text{ kg SSV}$$

- El volumen del reactor es:

$$V = \frac{XV}{X} = \frac{1.43 * 10^7}{2500} = 5720 \text{ m}^3$$

- La producción de lodo se obtiene de la ecuación:

$$P_x = \frac{YQ(S_0 - S)}{1 + k_d \theta_C} = \frac{XV}{\theta_C}$$

$$P_x = \frac{0.65(0.2)(86400)(200 - 9)}{1 + 0.05(10)} = 1430208 \frac{\text{gSSV}}{d} = 1430 \text{ kg} \frac{\text{SSV}}{d}$$

$$P_x = \frac{2500(5720)}{10} = 1430000 \frac{\text{g}}{d} = 1430 \text{ kg} \frac{\text{SSV}}{d}$$

- El producido de sólidos totales de desecho es:

$$\text{Lodo seco} = \frac{1430}{0.8} = 1787.5 \text{ kg/d}$$

- El caudal de lodos de desecho será:

$$Q = \frac{1787.5(10^3)}{15000} = 119 \frac{\text{m}^3}{d}$$

- El caudal de recirculación se puede calcular por la ecuación:

$$Q_R = \frac{QX}{X_R - X} = \frac{0.200x2500}{(0.8x15000) - 2500} = \frac{0.053\text{m}^3}{s} = 4547 \text{ m}^3/\text{d}$$

- La relación de recirculación es:

$$R = \frac{Q_R}{Q} = \frac{4\ 547}{0.2 \times 86\ 400} = 0.26 = 26\%$$

- El tiempo de retención hidráulico es:

$$\theta = \frac{V}{Q} = \frac{5\ 720}{0.2 \times 86\ 400} = 0.3310\ d = 8\text{h}$$

- La cantidad de oxígeno requerido se calcula de la siguiente manera:

$$DO = 1.5Q(S_0 - S_e) - 1.42X_R Q_W$$

$$DO = \frac{1.5 \times 0.2 \times 86\ 400(200 - 9) - 1.42(0.8 \times 15\ 000)(120)}{1\ 000}$$

$$DO = 2\ 922\ kgO_2/d$$

- El caudal de aire en condiciones normales se puede calcular así:

$$Q_{aire} = \frac{DO}{0.232(1.19)}$$

$$Q_{aire} = \frac{2\ 922}{0.232(1.19)} = 10\ 590\ m^3/d$$

- Para una eficiencia de transferencia de oxígeno del equipo de aireación, en condiciones reales, del 8%, la cantidad real de aire será:

$$Q_{aire} = \frac{10\ 590}{0.08} = 132\ 380\ m^3/d$$

- El volumen de aire requerido por unidad de DBO aplicada al tanque de aireación es:

$$\frac{Q_{aire}}{DBO} = \frac{132\ 390(1\ 000)}{200(0.2)(86\ 400)} = 38\ m^3/kg$$

- El volumen de aire requerido por unidad de DBO removida será igual a:

$$\frac{Q_{aire}}{DBOR} = \frac{132\ 390(1\ 000)}{(200 - 9)(0.2)(86\ 400)} = 40.11\ m^3/kg$$

- La carga orgánica volumétrica del proceso es:

$$COV = \frac{QS_0}{V} = \frac{0.2(86\ 400)(200)}{5\ 720} = 604\ g\ DBO/m^3d$$

- La relación A / M, según la ecuación:

$$\frac{A}{M} = \frac{QS_0}{VX} = \frac{0.2(86\,400)(200)}{5\,720(2\,500)} = 0.24d^{-1}$$

- La eficiencia en remoción de DBO total es:

$$E = \frac{S_0 - S_e}{S_0} = \frac{200 - 25}{200} = 0.88$$

- La eficiencia en remoción de DBO soluble es

$$E = \frac{S_0 - S_e}{S_0} = \frac{200 - 9}{200} = 0.96$$

6.4. TRATAMIENTO ANAEROBIO



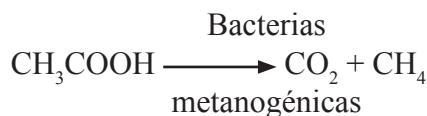
Figura 61. Reactor biológico anaerobio UASB.
Fuente: Elaboración propia. Visita industrial FIQ.

El reactor de flujo ascensional y manto de lodos anaerobio concebido en inglés como UASB y en español como RAFA o PAMLA, es un proceso en el cual el agua residual se introduce por el fondo del reactor y fluye a través de un manto de lodos conformado por grano biológico o partículas de microorganismos.

El tratamiento anaerobio se utiliza tanto para las aguas residuales como para la digestión de lodos, dando un producto final de gases, principalmente metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno (H_2S), mercaptano (RSH) e hidrógeno (H_2), (Ramalho, 1996, pág. 503). El proceso comprende dos etapas: fermentación ácida y fermentación metánica.

En la etapa de fermentación ácida, los compuestos orgánicos complejos del agua residual (proteínas, grasas e hidratos de carbono) se hidrolizan para producir unidades moleculares menores, las cuales son sometidas a biooxidación, convirtiéndose en ácidos orgánicos de cadena corta, tales como acético ($\text{CH}_3 - \text{COOH}$), propiónico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$) y butílico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$), efecto producido gracias a una población heterogénea de bacterias facultativas y anaerobias. Además, no se produce una reducción importante de la DQO, ya que principalmente lo que ocurre es la conversión de las moléculas orgánicas complejas en ácidos orgánicos de cadena corta que ejercen también una demanda de oxígeno. (Ramalho, 2000)

En la etapa de fermentación metánica, “microorganismos metagénicos” que son anaerobios, convierten los ácidos de cadenas más largas a metano, dióxido de carbono y ácidos orgánicos de cadenas más cortas. Las moléculas ácidas se rompen repetidamente dando lugar al ácido acético que convierte en CO_2 y CH_4 .



El grupo de bacterias facultativas y anaerobias responsable de la etapa de fermentación ácida tiene una velocidad de crecimiento más elevada que las bacterias metanogénicas responsables de la etapa de fermentación metánica. Como resultado, la etapa de fermentación ácida es relativamente rápida por lo que la etapa de fermentación metánica es la que controla la velocidad en los procesos anaerobios.

Ya que la fermentación metánica controla la velocidad del proceso, es importante mantener las condiciones de una fermentación metánica eficaz. El tiempo de residencia para los microorganismos metánicos debe ser el adecuado o si no son eliminados del sistema. (Ramalho, 1996, pág. 503)

6.4.1. Ventajas

Las ventajas de un tratamiento anaerobio según (Ramalho, 1996, pag. 504), son las siguientes:

1. Ya que no se emplea equipo de aireación, se produce ahorro de coste de inmovilizado así como de consumo energético en el tratamiento anaerobio.
2. El coeficiente de producción de biomasa Y para los procesos anaerobios es mucho menor que para los sistemas aerobios. Esto significa que se produce menos biomasa por unidad de reducción de sustrato y en consecuencia se presentan ahorros considerables en los procesos de manejo y evacuación del exceso de lodo (purga). Esto

- significa también un menor requisito de nutrientes (nitrógeno y fósforo).
3. En los procesos anaerobios es posible operar a cargas orgánicas del afluente superior que para el caso de los procesos aerobios. Este hecho resulta de la limitación de velocidad de la transferencia de oxígeno de los procesos aerobios.
 4. La producción de metano en los procesos anaerobios es una ventaja debido a su valor como combustible. Una parte sustancial de la necesidad energética de los procesos anaerobios puede obtenerse de los gases emitidos.

6.4.2. Desventajas

(Ramalho, 1996, pag. 504), también menciona desventajas, tales como:

1. Se necesitan mayores tiempos de residencia. En consecuencia, los costes de inversión en volumen de vasija son superiores en el tratamiento anaerobio.
2. Los malos olores asociados a los procesos anaerobios, debido principalmente a la producción de H₂S y mercaptanos, fundamentalmente en zonas urbanas.
3. Se necesitan mayores temperaturas para asegurar que los procesos anaerobios se producen a velocidades razonables. Normalmente, la temperatura de los procesos anaerobios está alrededor de los 35°C, lo que significa que puede necesitarse el precalentamiento de la alimentación o el calentamiento del reactor anaerobio. Sin embargo, este requisito energético puede no ser una desventaja seria, si una parte sustancial puede suministrarse a partir del gas metano producido.
4. La sedimentación de la biomasa anaerobia en el clarificador secundario es más difícil que la decantación de la biomasa en el proceso de lodos activos. Esto significa que los costes de inversión para la clarificación son superiores. Sin embargo, si el agua residual a tratar en el proceso anaerobio contiene una concentración elevada de sólidos en suspensión a los que pueda adherirse la biomasa, pueden conseguirse buenas condiciones de sedimentación en el clarificador secundario. Este es el caso de algunas aguas residuales industriales como las de las industrias de conservas de carne, mataderos, cerveza y conservas de pescado, a las que normalmente se aplica el tratamiento anaerobio.
5. La operación de las unidades anaerobias es más difícil que las aerobias, siendo el proceso más sensible a las cargas de choque.

CAPÍTULO VII

TRATAMIENTO TERCIARIO O
AVANZADO

7. TRATAMIENTO TERCIARIO O AVANZADO

7.1. TRATAMIENTO TERCIARIA

Si el efluente obtenido hasta este punto no cumple con las normativas ambientales para descarga, debe aplicar tratamiento terciario, hasta lograr eliminar los compuestos orgánicos e inorgánicos que afectan la calidad del agua.

El tratamiento terciario o avanzado puede tener diversos fines depende el proceso que se requiera. Se puede perseguir los siguientes fines:

- Disminución de microorganismos fecales y gérmenes patógenos
- Disminución de la demanda de oxígeno, mediante el proceso de nitrificación se elimina la materia orgánica nitrogenada.
- Precipitación de fosforo mediante por insolubilización.
- Eliminación de materia orgánica refractaria aplicando proceso de adsorción con carbón activo (Tejero S. T., 1992)

7.2. TRATAMIENTOS TERCIARIOS QUE SE PUEDEN APLICAR

- Desinfección del efluente generalmente con cloro
- Nitrificación y des nitrificación
- Coagulación, floculación sedimentación y filtración
- Adsorción
- Procesos de membrana

El tratamiento avanzado del agua residual, se define como aquel adicional necesario para la eliminación de los sólidos suspendidos y las sustancias disueltas que permanecen en ella después del tratamiento secundario convencional. Sustancias pueden ser materia orgánica o sólidos en suspensión, y su naturaleza puede variar desde iones inorgánicos relativamente simples, como el calcio, potasio, sulfato, nitrato y fosfato, hasta un número cada vez mayor de compuestos orgánicos sintéticos muy complejos. A continuación algunos de ellos.

7.2.1. Desinfección

La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos que causan enfermedades. Hay tres categorías de organismos entéricos de origen humano las bacterias, los virus y los quistes amebianos. El concepto de desinfección es diferente de esterilización, en el se eliminan todos los microorganismos es decir se busca una eliminación del 100% de los organismos. (Tejero S. T., 1992)

Se pueden indicar tres tipos básicos de desinfección:

- Tratamiento físico
- Radiación

- Métodos químicos

Los métodos más utilizados son la cloración la ozonización u la radiación UV.

7.2.1.1. Acción del cloro

Al añadir cloro gas al agua se produce la siguiente reacción:



El ácido hipocloroso se ioniza o se disocia en iones hidrógeno e hipoclorito en otra ecuación reversible:

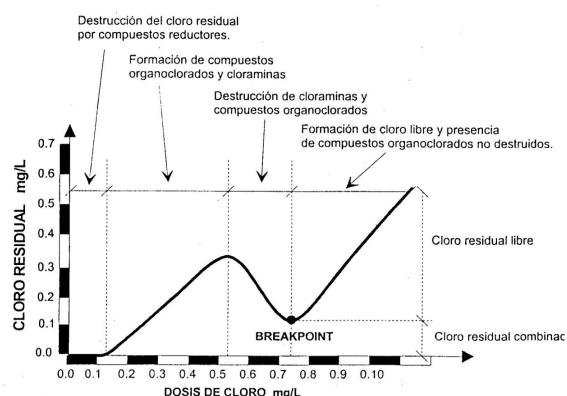


Figura 62. Reacciones del cloro con agua que contenga amónico.

Fuente: (Tejero S. T., 1992).

7.2.2. Nitrificación y desnitrificación

7.2.2.1. Nitrificación biológica

La nitrificación es el primer paso en el proceso de eliminación de nitrógeno por el proceso nitrificación – desnitrificación. A continuación se describen los dos procesos.

Proceso de nitrificación

En este proceso intervienen dos tipos de bacterias Nitrosomonas y Nitrobacter. Las Nitrosomonas oxidan el amónico, producto intermedio, mientras que la Nitrobacter transforman el nitrato en nitrato. Cuando se evidencia que no hay acumulación de nitrato a nitrato tiene lugar por medio de una serie de complejas reacciones que gobiernan el proceso de conversión global.

A continuación las reacciones que tienen lugar de forma aproximada.

Reacción con las Nitrosomonas



Reacción con los Nitrobacter



Estas ecuaciones permiten calcular las cantidades necesarias para los procesos de las diferentes especies químicas. (Metcalf & Eddy, 1995)

Las especies químicas principales que contienen nitrógeno y que se encuentran disueltas en las aguas se las divide en cuatro grupos:

- Sustancias orgánicas nitrogenadas procedentes de la descomposición de materia orgánica.
- NH₄₊ (amonio), que en ambientes alcalinos se encuentra como NH₃ (amoniaco).
- Nitratos (NO₃⁻), por oxidación de los anteriores, procedentes de abonos. etc.
- Nitritos (NO₂⁻), que suelen pasar a nitratos fácilmente.

7.2.2.2. Desnitrificación biológica

Es la segunda etapa de la eliminación de nitrógeno mediante el proceso nitrificación – desnitrificación

Proceso de desnitrificación

Metcalf & Eddy, indican que en este proceso ocurre la eliminación del nitrógeno en forma de nitrato por conversión en nitrógeno gas, esto se puede conseguir biológicamente bajo condiciones anóxicas (sin oxígeno) , el proceso se conoce con el nombre de desnitrificación. Anteriormente se lo conocía como proceso de desnitrificación anaerobia. Se lleva a cabo bajo la acción de diversas bacterias, entre las que se destacan: Aclromobacter, Aerobacter, Alcaligenes, Bacillus, Flavobacterium, Lactobacillus, Micrococcus, Pseudomonas y Spirillum. Estas bacterias son heterótrofas capaces de la reducción desimilatoria del nitrato, que es un proceso de dos etapas. El primero consiste en la conversión del nitrato en nitrito y a continuación se produce óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gas. Las reacciones de reducción del nitrógeno son las siguientes:



El contenido de nitrógeno en las aguas residuales urbanas suele ser de origen doméstico y está compuesto principalmente por nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniaco (NH₃, NH₄⁺) siendo poco abundante el resto de especies químicas de nitrógeno. Se puede encontrar

nitratos o compuestos nitrogenados de origen industrial cuando el agua residual recoge vertidos industriales, aguas pluviales de la ciudad, de escorrentía agrícolas, etc.

En la siguiente tabla se especifica los efectos de las operaciones y procesos de tratamiento en los compuestos del nitrógeno. (Según Metcalf & Eddy, 1995).

Con relación al proceso de osmosis inversa la eliminación del nitrógeno orgánico, amónico, amonio y nitrato está entre el 60 -90 %. Y la eliminación del nitrógeno total que entra al proceso es del 80-90%.

Operaciones y procesos de tratamiento	Compuestos de nitrógeno			Eliminación del nitrógeno total que entra en el proceso, % ^b
	Nitrógeno orgánico	NH ₃ - NH ₄ ⁺	NO ₃	
Tratamiento convencional				
Primario	10-20 % eliminado	Ningún efecto	Ningún efecto	5-10
Secundario	15-50 % eliminado ^c urea→NH ₃ - NH ₄ ⁺ ^d	< 10 % eliminado	Ligero	10-30
Procesos biológicos				
Asimilación bacteriana	Ningún efecto	40 - 70 % eliminado	Ligero	30-70
Desnitrificación	Ningún efecto	Ningún efecto	80-90 % eliminado	70-95
Cultivo de algas	Transformación parcial a NH ₃ - NH ₄ ⁺	→ Células	→ Células	50-80
Nitrificación	Limitado	→ NO ₃ ⁻	Ningún efecto	5-20
Estanques de estabilización	Transformación parcial a NH ₃ - NH ₄ ⁺	Eliminación parcial por arrastre	Eliminación parcial por nitrificación/desnitrificación	20-90

Figura 63. Efectos de diversas operaciones y procesos de tratamiento sobre los compuestos de nitrógeno.
Fuente: (Metcalf & Eddy, 1995).

El vertido de nitrógeno a los cauces públicos en el agua residual es perjudicial por dos motivos:

- 1) En la fase de nitrificación se consume mucho oxígeno del que hay disuelto en el agua. Si se vierte mucho nitrógeno amoniaco a un medio acuático, puede ocurrir una nitrificación que agote el oxígeno del agua y cause la asfixia y muerte de los peces y seres vivos que necesitan oxígeno para vivir.
- 2) El nitrógeno como ión nitrato obtenido tras la nitrificación también puede ser un factor desencadenante de eutrofización.

7.2.3. Adsorción con carbón activado

La adsorción, fenómeno que ocurre cuando moléculas en solución golpean la superficie de un sólido adsorbente y son adheridas a su superficie, es el proceso por el cual moléculas de un fluido son concentradas sobre la superficie de otra fase mediante fuerzas químicas o físicas o por ambas. El material concentrado constituye el adsorbato y el material que adsorbe es el adsorbente. La adsorción supone la acumulación del adsorbato sobre una superficie o interfaz. El proceso puede ocurrir en la interfaz entre materiales de tipo líquido-líquido,

gas-líquido, gas-sólido o líquido -sólido. La adsorción de contaminantes, sobre carbón activado, se usa mucho en el tratamiento de aguas y en la purificación del aire.

En general, existen tres tipos de adsorción: física, química y de intercambio. La adsorción física no es específica y se debe a la acción de fuerzas débiles de atracción entre moléculas como las fuerzas de Van der Waals; en tal caso, la molécula adsorbida tiene movimiento libre sobre la superficie del sólido adsorbente y no está unida a un sitio específico; puede condensarse y formar varias capas superpuestas sobre la superficie del adsorbente; generalmente es reversible. La adsorción química se debe a fuerzas mucho más fuertes, como las que conducen a la formación de compuestos químicos; el compuesto adsorbido forma una capa monomolecular sobre la superficie del adsorbente y las moléculas no son libres de moverse de un sitio a otro; cuando la superficie está cubierta por el material adsorbido, la capacidad del adsorbente está prácticamente agotada. La adsorción química no es, generalmente reversible y para remover el material adsorbido se debe calentar el adsorbente. La adsorción de intercambio se usa para describir la adsorción debida a la atracción eléctrica entre el adsorbato y la superficie del adsorbente, como ocurre en el intercambio iónico. Los iones de un contaminante se concentran sobre sitios de carga eléctrica opuesta sobre la superficie del adsorbente. A mayor carga eléctrica del ion, mayor atracción; así mismo, a menor tamaño el ion, mayor atracción. (Romero Rojas J. , 2001).

7.2.4. Las membranas en el tratamiento de aguas residuales

El proceso por membrana es uno de los más avanzados que se tienen en la actualidad, una membrana conocida como membrana semipermeable es una lámina fina de material capaz de separar sustancias en función de sus propiedades físicas, químicas, esto sucede cuando se aplica una fuerza directora a través de la misma. Las membranas se las puede clasificar por el tipo de sustancias separadas y por las fuerzas directoras empleadas. Por ejemplo microfiltración (MF.) y osmosis inversa (OI), son dos procesos por membrana que utilizan la presión para transportar agua a través de la membrana. Las membranas MF son capaces de separar solo partículas mientras que la OI retiene muchos solutos a medida que el agua pasa a través de ellas. La electrodiálisis (ED) también es capaz de separar solutos iónicos del agua pero en este caso los iones son transportados a través de la membrana y la fuerza impulsora es un potencial eléctricos. Figura 65 (American Water Works Association Research Foundation, 1998)

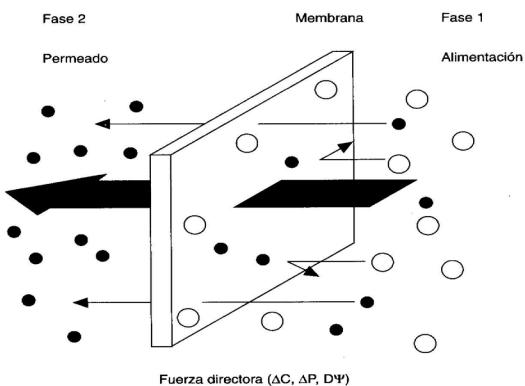


Figura 64. Fuerzas impulsoras a través de la membrana.

Fuente: (American Water Works Association Research Foundation, 1998).

7.2.4.1. Osmosis inversa

Denominada hiperfiltración, es el proceso mediante el cual se separan las sales disueltas en disolución del agua a través de una membrana semipermeable lo cual se efectúa a una presión superior a la presión osmótica provocada por las sales disueltas en el agua residual. Las presiones varían desde presión atmosférica a 6900 kN/m². La osmosis inversa presenta la ventaja de eliminar materia orgánica disuelta susceptible que no es separada por otras técnicas de desmineralización. El costo muy elevado de la osmosis inversa es una desventaja para su utilización.

Componentes principales de una unidad de osmosis inversa

- La membrana
- Soporte de la membrana
- Recipiente contenedor
- Bomba de alta presión

La membrana tiene como material el acetato de celulosa y nylon. Se han utilizado sistemas de soporte de membrana como: tejido espiral, tubular y de fibra hueca. En el tratamiento de aguas residuales domésticas el soporte más conveniente es el de tejido espiral. La aplicación de las unidades de osmosis inversa puede ser en paralelo o en serie, la primera se utiliza para obtener capacidad hidráulica y la segunda para lograr el grado de desmineralización requerido. (Metcalf & Eddy, 1995, pp. 858,859). El separador automático a base de membrana filtrante industrial separator 2 state waste sep model 02OT202 de 5 m³/h de capacidad, presenta un equipo de filtración, cuatro equipos de ultrafiltración y tres de osmosis inversa. Es utilizado para tratamiento de aguas residuales como efluentes de industria textil.

Operación de membrana	Fuerza directora	Mecanismo de separación	Estructura de membrana	Fase 1*	Fase 2
Microfiltración	Presión	Cribado	Macroporos	L	L
Ultrafiltración	Presión	Cribado	Mesoporos	L	L
Nanofiltración	Presión	Cribado + (solución/difusión + exclusión)	Microporos	L	L
Osmosis Inversa	Presión	Solución/difusión + exclusión	Densa	L	L
Pervaporación	Actividad (presión parcial)	Solución-difusión	Densa	L	G
Arrastre de membranas	Actividad (presión parcial)	Evaporación	Macroporos (membrana de gas)	L	G
Destilación de membranas	Actividad (temperatura)	Evaporación	Macroporos (membrana de gas)	L	L
Dialisis	Actividad (concentración)	Difusión	Mesoporos	L	L
Electrodialisis	Potencial eléctrico	Intercambio iónico	Intercambio iónico	L	L

* Fase I es la alimentación L = Líquido G = Gas.

Figura 65. Operaciones importantes de membrana.

Fuente: (American Water Works Association Research Foundation, 1998).



Figura 66. Separador automático a base de membrana de osmosis inversa.

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias Fac. Ing. Qca. UG.



Figura 67. Desalinizador de agua de mar Modelo M1000.

Fuente: Laboratorio de Operaciones Unitarias Fac. Ing. Qca. UG.

El sistema de Osmosis Inversa sea wáter desalinator, modelo M1000, tiene la finalidad de purificar el agua salobre y agua de mar. Este equipo presenta una bomba de alta presión

que presionan el agua salobre o agua de mar contra filtros luego atraviesa la superficie de una membrana semipermeable muy fina que contiene poros pequeños, separa compuestos orgánicos tales como sal, partículas, minerales y otras especies disociadas de la que pasa a través de la membrana. Estos poros pequeños también tienen del poder de impedir el paso de las bacterias patógenas que causan enfermedades. Al final queda agua limpia libre de microorganismos.

7.2.5. Tratamiento con tecnología electroquímica

Desde hace décadas se investiga la aplicación de técnicas electroquímicas a la descontaminación de efluentes industriales acuosos, y en la actualidad existen técnicas electroquímicas que pueden competir con las técnicas convencionales de tratamiento en la descomposición de determinados tipos de efluentes industriales. (Barrera Díaz, 2014, pág. 18)

7.2.5.1. Electrocoagulación

La electrocoagulación presenta una larga historia en la tecnología de tratamiento de aguas, en 1909 fue patentada en el Reino Unido. Barrera, 2014. La define como un proceso eficiente para desestabilizar finalmente las partículas en agua natural o en la residual, usualmente se utiliza electrodos de aluminio o de hierro, y al aplicar la corriente eléctrica los ánodos producen iones de aluminio Al^{3+} o de hierro Fe^{2+} estos iones son muy buenos coagulantes y pueden hidrolizarse cerca del ánodo para producir una serie de intermedios activados que son capaces de desestabilizar las partículas dispersas que se hayan presentes en el agua, luego de la desestabilización se produce una aglomeración de partículas formando flóculos. En cambio en el cátodo se generan pequeñas burbujas de hidrógeno lo que permite que floculo flote facilitando la separación de las partículas del agua residual según lo mencionan. (Chen, 2004; Holt, 2004; Canizares, 2004.)

La coagulación asistida electroquímicamente, o electrocoagulación (EC), es un proceso electroquímico en el que, a partir de compuestos procedentes de la disolución de un ánodo, se agrupa la materia coloidal existente en un agua residual, lo que posibilita su conversión en sólidos suspendidos y su separación del agua mediante técnicas convencionales de separación sólido/líquido, tales como la decantación, la flotación y la filtración. Como consecuencia de su disolución, los ánodos van despareciendo a medida que transcurre el tratamiento, llegando un momento en el que es necesaria su reposición (ánodos de sacrificio). (Barrera Díaz, 2014, pág. 29)

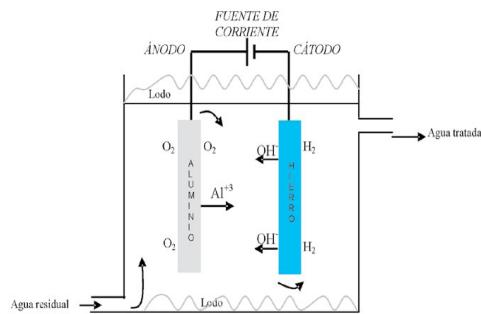


Figura 68. Proceso de Electrocoagulación.

Fuente: (Mejía, Ruiz, & Giraldo, 2006).

Además, algunos ejemplos de aplicación de esta tecnología a casos reales incluye (Barrera Díaz, 2014, pág. 32):

- Agua de abastecimiento, centrados en la eliminación de materia coloidal, de flúor, o bien en la de nitratos.
- Aguas residuales urbanas.
- Aguas residuales procedentes de la industria textil, con un elevado contenido de tintes, colorantes y sólidos en suspensión.
- Aguas residuales agroindustriales.
- Aguas procedentes de la fabricación de puertas, con alto contenido de materia coloidal y orgánica.
- Aguas residuales procedentes de un sector industrial que engloba distintos tipos de actividades, para la eliminación de DQO, color y coliformes, entre otros parámetros.
- Aguas procedentes de una industria de fabricación de papel, para la eliminación de fenol y lignina.
- Aguas residuales procedentes de procesos de galvanoplastia, para la eliminación de metales y materia orgánica.
- Emulsiones de aceite en agua procedentes de restaurantes, de la industria de mecanizado de metales, y procedentes del pulido en la fabricación de piezas de metales semiconductores empleados en la integración de circuitos.



Figura 69. Reactor de electrocoagulación.

Fuente: Autoría propia.

Ventajas

Son muchas las ventajas de la electrocoagulación. Entre las más relevantes están:

- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- Purifica el agua y permite su reciclaje.
- El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación.
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad.

Desventajas

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.
- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto.
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

8. NOMENCLATURA

ASTM	Sociedad Americana de Normalización de Ensayos y Materiales.
AWWA	Asociación Americana de Empresas de Abastecimiento de Agua.
CAG	Carbón activado granular
DAM	Drenaje ácido de minería
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno.
DBO ₁	Demanda bioquímica de oxígeno límite o última. Normalmente expresada a 20 días de ensayo. La DBO ₅ suele representar el 60-70 % de la DBO ₁ .
DBO ₅	Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días de ensayo (incluida la correspondiente a los sólidos que pueda contener la muestra)
DBO _e	DBO total deseada del efluente, mg/L
DQO	Demanda química de oxígeno total (incluida la correspondiente a los sólidos que contiene la muestra)
EDAR	Estación depuradora de aguas residuales
DAF	Flotación por aire disuelto.
IUPAC	Abreviatura de la International Union of Pure and Applied Chemistry (Union Internacional de Química Pura) que efectúa recomendaciones sobre nomenclatura química. Al escribir la fórmula química de un compuesto, se escribe primero el cation luego el anión.
L	Litros
M	Molaridad
MF	Micro filtración En alcalinidad representa la alcalinidad obtenida con el indicador mixto
mg	miligramos

MWCO	Molecular Weight Cut-Off
NF	Nano filtración
n	Número de protones cedidos o donados
NA	Número de avogadro = $6,22 \times 10^{23}$
OD	Oxígeno disuelto
OI	Ósmosis inversa
P	Equivale a la alcalinidad de la fenolftaleina
Pt	Platino
Q	Caudal de aguas residuales crudas, m^3/d
Q_w	Caudal de lodo dispuesto, m^3/d
Q_e	Caudal efluente tratado, m^3/d
S	Concnetración de sustrato en el efluente, mg/L
S_0	DBO del agua residual cruda, mg/L
S_e	DBO del efluente, mg/L
SS	Sólidos suspendidos del efluente, mg/L
SI	Sistema internacional
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
U	Tasa específica de utilización de sustrato. d^{-1}
V	Volumen del líquido en el tanque de aireación, m^3

X	SSVLM, concentración de sólidos suspendidos volátiles en el tanque de aireación, mg/L
X_R	Concentración de SSV en el lodo dispuesto, mg/L
X_e	Concentración de SSV en el efluente tratado, mg/L
X_0	Biomasa en el efluente, mg SSV/L
Y	mg SSV/mgDBO
Θ_c	Tiempo promedio de retención celular con base en el volumen del tanque de aireación, d
Θ	Tiempo de retención hidráulico, d

9. BIBLIOGRAFÍA

- Ambiente, M. d. (2012). Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria . Quito : Corporación de Esstudios y Publicaciones .
- American Public Health Association, A. (2012). Standard Methods for Examination of water and wastewater. Washington DC: American Public Health Association .
- American Water Works Association Research Foundation, A. (1998). Tratamiento del agua por procesos de membrana. Madrid: Mc Graw-Hill.
- Barrera Díaz, C. E. (2014). APPLICACIONES ELECTROQUÍMICAS AL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (Vols. 978-607-7815-13-6). Mexico DF, Mexico: Reverté Ediciones.
- Bernard J. Nebel, R. T. (1999). Ciencias Ambientales. Ecología y desarrollo sostenible. México: Hispanoamericana S.A.
- Dègremont. (1976). MANUAL TÉCNICO DEL AGUA (Vols. 978-8430016518). España: Urmo S.A.
- DMA, D. d. (s.f.). Mediadores de caudales. Guayaquil, Ecuador.
- ESTRUAGUA. (2015). [www.estruagua.com](http://www.estruagua.com/images/stories/productos/rejas_de_gruesos/reja_manual/reja_manual_g.jpg). Obtenido de http://www.estruagua.com/images/stories/productos/rejas_de_gruesos/reja_manual/reja_manual_g.jpg
- L. Galarza, F. R.-H. (30 de Octubre de 2002). Rediseño, Construcción y Evaluación de la Unidad Didáctica Piloto de Sedimentación Floculenta. Tesis de Grado de Ingeniero Químico. Guayaquil, Guayas, Ecuador.
- Lazcano Carreño, C. (2016). BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL DE AGUAS Y AGUAS RESIDUALES (Segunda ed., Vols. 978-958-771-344-2). Bogotá, Colombia: Ecoe Ediciones Ltda.
- Limpia, G. A. (10 de diciembre de 2013). <http://www.aqualimpia.com/ActivePlant.htm>. Obtenido de <http://www.aqualimpia.com/ActivePlant.htm>: <http://www.aqualimpia.com/ActivePlant.htm>
- Mejía, A. P., Ruiz, Á. A., & Giraldo, L. F. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Producción + Limpia, 58-77.
- Metcalf, & Eddy. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. MADRID: McGRAW W-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA S.A.
- Ministerio del Ambiente, E. (4 de 11 de 2015). Acuerdo Ministerial 097. Registro Oficial(397). Quito, Pichincha, Ecuador.
- Monroy, M. A. (2010). MEDIDORES DE FLUJO DE CANALES ABIERTOS. Guatemala: Universidad de San Carlos Guatemala.
- Nalco Chemical Company, (. (1995). Manual del agua. Mexico: Mc Graw-Hill.
- Okun, C. R. (1990). Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. Mexico: Limusa.
- Ramalho, R. S. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Barcelona: Rivert S>A.
- Robles, F. O., Torres, J., & Sánchez, M. (2014). TRATAMIENTO DE AGUAS PARA LA ELIMINACIÓN DE MICROORGANISMOS Y AGENTES CONTAMINANTES (Vols. 978-84-7978-903-9). Murcia: Ediciones Díaz de Santos.

- Romero Rojas, J. A. (2001). Tratamiento de Aguas Residuales (Primera Edición ed., Vols. 958-8060-13-3). Bogotá, Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sarasquete, V. S. (Febrero de 2008). <http://rodin.uca.es/>. (U. d. Cádiz, Ed.) Obtenido de <http://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/6430/34209645.pdf?sequence=1>
- Tchobanoglous, C. (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales (Vol. 1). (S. a. Systems, Trad.) Bogota, Santafé, Colombia: McGraw-Hil Interamericana S.A.
- Tejero, S. J. (2000). Curso sobre tratamiento de agua residuales y explotacion de estaciones depuradoras. Corruna : E.T.C Ingenieros de Caminos.
- Tejero, S. T. (1992). depuracion de Aguas Residuales. Madrid: c.
- Valencia, J. A. (2000). Teoria y Practica de la purificacion de agua. Colombia: Nomos S.A.
- Zulia, R. T. (1 de abril de 2008). www.scielo.org.ve. Obtenido de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S0254-07702008000100007&script=sci_arttext

DOCENCIA

Profesora de las Asignaturas Cualitativa, Ingeniería de Aguas y Medio Ambiente en la Facultad de Ingeniería Química desde 1988.

Profesora de las Asignaturas. Bioingeniería, Enzimología, Ecología, Balance de Materia y Energía y Bioingeniería Alimentaria, Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Profesora de las Asignaturas: Recursos Hídricos y Contaminación atmosférica en la Facultad de Filosofía, Letras y ciencias de la Educación, Universidad de Guayaquil

CARGOS

Directora Técnica de Laboratorio de Aguas de la Unidad de Control de Calidad. Facultad de Ingeniería Química (UCC)

Directora del Departamento de Ingeniería Ambiental de la Fac. Ing. Qca .desde 2001 hasta el 2013, Universidad de Guayaquil.

Subdecana de la Facultad de Ingeniería Química Abril 2013, Universidad de Guayaquil.

Decana de la Facultad de Ingeniería Química Mayo 2014, Universidad de Guayaquil.

