



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

CONSTRUCCIÓN DE MODELOS PILOTO DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA APOYO A
LA ENSEÑANZA DE LA INGENIERÍA SANITARIA EN LA
FES ARAGÓN.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:
MENDEZ GONZALEZ OSCAR
VALVERDE VALVERDE HECTOR

ASESOR:
I.Q. SERGIO ALFONSO MARTÍNEZ GONZÁLEZ



MÉXICO

2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A MI MAMA

POR QUE DIA TRAS DIA DA SU VIDA, CARIÑO Y SUS ORACIONES PARA QUE ESTE BIEN, QUE SEA UNA PERSONA BUENA, HONESTA Y RESPONSABLE. NO SE COMO AGRADESCERTE TODO LO QUE HACES POR MI, TE QUIERO MUCHO MAMA.

A MIS HERMANOS Y ABUELITA

POR SER MUY BUENOS HERMANOS CONMIGO, POR BRINDARME SU APOYO EN TODOS MOMENTO AUNQUE AVECES NOS ENOJEMOS SE QUE SIEMPRE CUENTO CON USTEDES. A MI ABUELITA QUE LLEVO EN MI CORAZÓN Y SE QUE ME CUIDA DESDE DONDE ESTE

A LA UNAM

POR ABRIRME SUS PUERTAS, DANDOME LA OPORTUNIDAD DE ESTUDIAR UNA CARRERA Y CONVERTIRME EN UNA PERSONA DE PROVECHO.

A LA ENEP ARAGÓN

POR SU HOSPITALIDAD, HABIENDOME PERMITIDO DE DISFRUTAR DE GRATOS MOMENTOS Y A LA CUAL SIENTO COMO SI FUERAS MI SEGUNDA CASA.

A MI ASESOR

POR HABER ACEPTADO DIRIGIRME, BRINDARME SU AMISTAD, DEDICARME SU TIEMPO Y PREOCUPARSE JUNTO CONMIGO PARA LLEVAR A CABO ESTE GRAN TRABAJO.

A MIS SINODALES

POR HABERSE TOMADO EL TIEMPO DE REVISAR ESTE TRABAJO, POR LAS OBSERVACIONES, RECOMENDACIONES Y FELICITACIONES.

A MIS AMIGOS

POR SER LOS MEJORES AMIGOS QUE PODRIA TENER, POR BRINDARME SU AMISTAD, CARIÑO Y APOYO, Y EL HABER PASADO MOMENTOS MUY GRATOS E INOLVIDABLES EN MI VIDA DENTRO Y FUERA DE LA ESCUELA.

A MIS PROFESORES

POR EL CARIÑO QUE DESMUSTRAN A SUS ALUMNOS, POR TODAS SUS ENSEÑANZAS, CONSEJOS Y PREOCUPARSE EN QUE SALIERA LO MEJOR PREPARADO POSIBLE PROFESIONALMENTE Y PARA LA VIDA.

*NO SE QUE MAS DECIRLES
A TODOS QUIENES ME HAN APOYADO
NADA MAS QUE GRACIAS
CON TODO MI CARIÑO
Y AFECTO.*



AGRADECIMIENTOS.

Siempre me imagine como daría mis agradecimientos al culminar mi carrera, pero... Y como poder dar a entender lo agradecido que estoy con:

MI MAMÁ

Por sus preocupaciones que me tuvo desde niño, que siempre vio por mí para que no me faltar lo necesario. Que siempre me enseña a ser justo y respetuoso con los demás.

Que además su delicadeza de mujer es tan grande como su fortaleza y su porte de líder.

Algún día espero darte las gracias sobre todo por ser mi mamá y haberme dado la vida.

Te quiero mucho mamá *Felia*

MIS HERMANOS

Por su paciencia y su amor por mí, a pesar de mis *berrinches*.

A ti Hilda por tu fortaleza ante la adversidad y tu capacidad de ser líder.

A ti Alejandro por tu paciencia, y por tu sentido del humor aun en las crisis.

A ti Adriana por tu lealtad, prudencia e inseparable compañía.

MI PAPÁ

Porque para él no habíamos otros que su familia, a pesar de la distancia por su trabajo siempre hubo tiempo para un "mi querido periquín" o a "mi retrato".

A pesar de tu rudeza nunca faltó el amor, el cariño y un beso en la frente con toda la ternura de un verdadero hombre.

Algún día espero llegar a ser una institución en vida como tú. Tener el reconocimiento y respeto de aquello a quien tu le llamas "mi casa..."

MIS SOBRINOS

Alancito por tu amistad, Bris por tu nobleza, Calín por tu audacia y Lesli por tu sinceridad. Porque siempre los llevo muy en mi mente y mi corazón.

Y los que vengan...

MI CHICA ESPECIAL

Por tu ternura, cariño, paciencia y amor. Porque luchare por ser un buen compañero contigo y nuestra familia pequeñita.

Gracias prince bonita, gracias Evilí

A MI ALMA MATER, MI UNIVERSIDAD

Porque te llevo en la sangre y siempre te estaré agradecido por hacer de mi un hombre de bien que se dedique a trabajar honorablemente y desarrollar mis conocimientos a favor de mi país.

MIS AMIGOS Y PROFESORES

Porque sin ellos también no estaría yo aquí. Por su amistad apoyo y compañía. En momentos difíciles y en las aventuras de escuela

Amigos de verdad como Oscar y Humberto, Ing. Sergio M., Ismael, Familia Seyde y todos aquellos quien en mi han confiado y sepan que les seré incondicional.

Y a ti en especial. TÚ que siempre has estado a mi lado, que nunca me has dejado solo, que cuando te he necesitado ahí has estado. Solo quiero que sepas que te quiero y que eres un buen amigo.

Muchas gracias DIOS

Héctor

ÍNDICE.	PAG.
INTRODUCCIÓN.	iv
I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.	1
1.1. FUENTES DE GENERACIÓN.	2
1.1.1. NATURALES.	2
1.1.2. ANTROPOGENICAS.	4
1.1.2.1. DOMESTICAS.	4
1.1.2.2. INDUSTRIALES.	6
1.1.2.3. AGROPECUARIO Y GANADERO.	8
1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.	9
1.2.1. FÍSICAS.	9
1.2.2. QUÍMICAS.	11
1.2.3. BIOLÓGICAS.	18
1.3. EFECTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES.	20
II. TIPOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.	23
2.1. PRETRATAMIENTO.	24
2.1.1. CRIBADO.	25
2.1.1.1. CRIBADO DE GRUESOS.	26
2.1.1.2. TAMICES.	28
2.1.1.2.1. CRIBADORES FIJOS.	29
2.1.1.2.2. CRIBADORES MOVILES.	29
2.1.2. DESARENADORES.	30
2.1.2.1. TIPOS DE DESARENADORES.	31
2.1.3. FLOTACIÓN.	31
2.2. TRATAMIENTO PRIMARIO.	32
2.2.1. SEDIMENTACIÓN.	33
2.2.1.1. COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.	37
2.2.2. FILTRACIÓN.	46

2.3. TRATAMIENTO SECUNDARIO.	48
2.3.1. PROCESOS AEROBIOS.	52
2.3.1.1. LODOS ACTIVADOS.	55
2.3.1.2. FILTROS PERCOLADORES.	59
2.3.1.3. BIODISCOS.	61
2.3.1.4. LAGUNAS DE OXIDACIÓN.	63
2.3.2. PROCESOS ANAEROBIOS.	63
2.3.2.1. FOSA SÉPTICA.	68
2.3.2.2. TANQUES IMHOFF.	69
2.3.2.3. REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE.	71
2.3.3. PROCESOS ANOXICOS.	72
2.4. TRATAMIENTO TERCARIO.	74
2.4.1. DESINFECCIÓN.	74
2.4.1.1. CLORACIÓN.	76
2.4.1.2. OZONACIÓN.	79
2.4.2. ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO.	80
III. PARÁMETROS IMPORTANTES PARA EL DISEÑO DE LOS	86
 PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.	
3.1. SEDIMENTADOR.	87
3.2. TANQUE DE LODOS ACTIVADOS.	92
3.2.1. BALANCE DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA.	92
3.2.2. BALANCE DE MASA DEL SUSTRATO.	97
3.2.3. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DE LICOR MEZCLADO Y	98
PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS.	
3.2.4. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DEL LICOR MEZCLADO.	99
3.2.5. PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS.	100
3.2.6. LA SÍNTESIS OBSERVADA.	102
3.2.7. REQUERIMIENTOS DE OXIGENO.	103
3.2.8. RELACIÓN ALIMENTO – MICROORGANISMO (A/M).	104
3.2.9. TASA ESPECÍFICA DE UTILIZACIÓN DE SUSTRATO.	105

3.2.10. PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.	106
3.2.11. SECUENCIA DE CÁLCULO DE UN PROCESO DE CRECIMIENTO SUSPENDIDO COMPLETAMENTE MEZCLADO SIN CONSIDERAR LA NITRIFICACIÓN.	106
IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.	109
4.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS Y PROBLEMÁTICA EN LA CONSTRUCCIÓN.	110
4.1.1. ELECCIÓN DE MATERIAL PRINCIPAL.	110
4.1.2. COLUMNA DE SEDIMENTACIÓN.	111
4.1.3. PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.	118
4.1.3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MESAS.	119
4.1.3.2. EQUIPO COMPLEMENTARIO: BOMBAS DOSIFICADORAS Y AGITADORES.	122
4.2. APLICACIÓN DE LOS MODELOS PILOTO.	124
4.2.1. SEDIMENTACIÓN PRIMARIA.	125
4.2.2. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL POR EL PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.	136
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	141
APÉNDICE.	143
A PLANOS.	144
B FOTOS.	155
BIBLIOGRAFÍA.	165

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN.

El uso y manejo inadecuado de los recursos hídricos, son algunos de los factores limitantes para el desarrollo sustentable a nivel mundial. La salud y el bienestar del ser humano, la seguridad alimentaria, el desarrollo industrial y la calidad de los ecosistemas que dependen de manera directa de un adecuado manejo y gestión del recurso hídrico se encuentran en riesgo, debido a que el crecimiento de la población y el desarrollo económico se constituyen en factores de presión sobre los recursos naturales y el ambiente; igualmente, la expansión de la frontera agrícola, la deforestación, la minería, la industrialización y el desarrollo urbano son, entre otras, las actividades que generan los impactos ambientales más significativos sobre el ambiente. De la misma forma, cada una de ellas demanda el suministro o abastecimiento y disponibilidad de grandes volúmenes de agua, pero existe el inconveniente de la *generación de aguas residuales*.

Las aguas residuales son aguas naturales que han sufrido un cambio en su composición física, química y biológica debido al uso que le fue proporcionado, por lo que es imperativo su tratamiento para recuperar la calidad que tenía antes del uso.

El diseño de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR) requiere de personal con experiencia, ya que una gran parte de la información requerida se obtiene de pruebas experimentales que se reportan en referencias especializadas y que generalmente, se presentan en intervalos, dependiendo del tipo de agua a estudiar.

Por lo anteriormente expuesto, este trabajo tiene como objetivo “*Construir modelos pilotos de operaciones de sedimentación y procesos de aerobios de depuración (lodos Activados) para ser operados por estudiantes de la Carrera de Ingeniería Civil de la FES Aragón y así obtener datos experimentales que les sirvan para diseñar STAR*” y se divide en cinco capítulos los cuales se describen a continuación.

En el primer capítulo se presentan las fuentes de generación de aguas residuales, los efectos al ambiente y sus características físicas, químicas y biológicas.

INTRODUCCIÓN.

En el segundo capítulo se explican los principales métodos de tratamiento del agua residual, comenzando con el pretratamiento que es la separación del material de gran tamaño que puede ocasionar daños en el equipo de bombeo. Posteriormente, se habla del tratamiento primario, en el cual se remueven principalmente sólidos suspendidos mediante la sedimentación, ya sea por gravedad o mediante la utilización de agentes coagulante o floculantes. A continuación se explica el tratamiento secundario donde se remueven sólidos disueltos (materia orgánica principalmente) por la acción de microorganismos, enfocándose al proceso de lodos activados, debido a que es uno de los equipos que se construyeron junto con el equipo de sedimentación. Por último, se presenta el tratamiento terciario donde se eliminan sustancias inorgánicas disueltas y se desinfectan los efluentes para tener un agua de mayor calidad.

En el capítulo tercero se presentan los modelos más usados para el diseño de un tanque sedimentador y de un proceso de lodos activados, así como la secuencia de cálculo para cada uno de ellos.

En el capítulo cuatro se explica cómo se construyeron los modelos piloto, es decir, la columna de sedimentación y el de lodos activados, presentándose los materiales, las medidas y características de cada uno, así como las pruebas a que se llevaron a cabo para verificar su correcto funcionamiento. Asimismo, se presentan las prácticas de laboratorio propuestas para la aplicación de estos modelos piloto.

El capítulo cinco corresponde a las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

CAPÍTULO I.
GENERALIDADES DE LAS AGUAS
RESIDUALES.

1.1. FUENTES DE GENERACIÓN.

Las aguas residuales son las aguas de 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, así como la mezcla de ellas y de acuerdo con esta definición se pueden identificar dos fuentes de generación de aguas residuales, las naturales y las antropogénicas.

1.1.1. NATURALES.

Cuando se formó la Tierra, hace aproximadamente cuatro mil quinientos millones de años, ya tenía en su interior vapor de agua. En un principio, era una enorme bola en constante fusión con cientos de volcanes activos en su superficie. El magma, cargado de gases con vapor de agua, emergió a la superficie gracias a las constantes erupciones. Posteriormente, la Tierra se enfrió, condensando una parte del vapor de agua que se precipitó al suelo en forma de lluvia.

El agua de la Tierra - que constituye la hidrosfera - se distribuye en tres reservorios principales: los océanos, los continentes y la atmósfera, entre los cuales existe una circulación continua. Esta circulación y conservación de agua en la Tierra se llama *ciclo hidrológico*. (Figura 1.1).

El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua líquida pasa de la superficie terrestre a la atmósfera en forma de vapor y regresa en sus fases líquida y sólida. La transferencia de agua desde la superficie de la Tierra hacia la atmósfera, en forma de vapor de agua, se debe a la evaporación directa y a la evapotranspiración por las plantas y animales.

El agua que se precipita en el suelo puede tener varios destinos, una parte es aprovechada por los seres vivos; otra escurrirá por la superficie del terreno que se concentra en surcos y

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

va a originar las líneas de agua hasta llegar a un río, un lago o el océano, a este fenómeno se le conoce como escurrimiento. Otra pequeña cantidad se filtrará a través del suelo, formando capas de agua subterránea, a este proceso se le conoce como percolación.

La energía solar es la fuente de energía térmica necesaria para el paso del agua desde las fases líquida y sólida a la fase de vapor, y también es el origen de las circulaciones atmosféricas que transportan el vapor de agua y mueven las nubes. La fuerza de gravedad da lugar a la precipitación y al escurrimiento, por lo que el ciclo hidrológico es un agente modelador de la corteza terrestre debido a la erosión y deposición de sedimentos por vía hidráulica. Asimismo, condiciona la cobertura vegetal y la vida en la Tierra.

El ciclo hidrológico, visto a una escala planetaria, es como un gigantesco sistema de destilación, extendido por todo el planeta, ya que al evaporarse el agua deja atrás todos los elementos que la contaminan o la hacen no apta para consumo. Por ello el ciclo del agua es un proceso de purificación a gran escala.

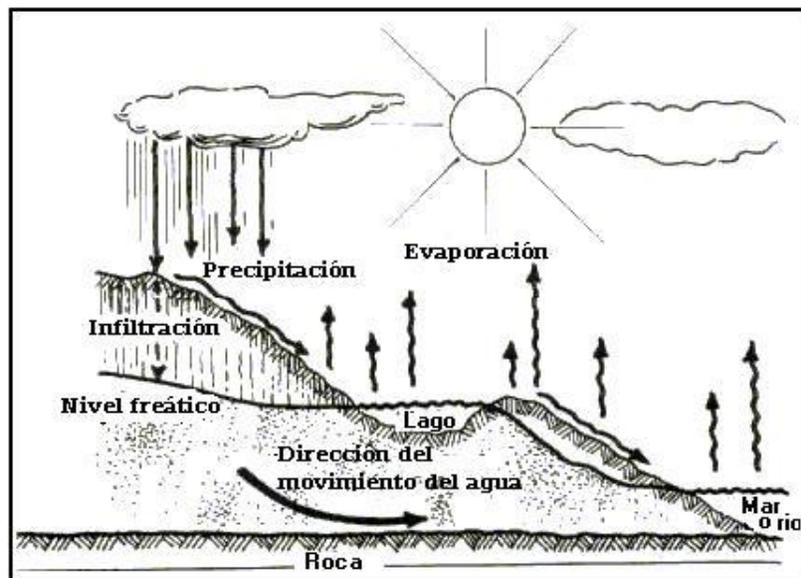


Figura 1.1. Ciclo hidrológico.

Fuente: jmarcano.com

Por otro lado, la contaminación natural consiste en la presencia de materiales en el agua sin que intervenga la acción humana, siendo los más importantes los siguientes:

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

- La emisión de pólenes, esporas, hojas secas y otros residuos vegetales, y excrementos de peces y aves acuáticas.
- La emisión de gases y polvos, debido a la presencia de volcanes e incendios forestales.
- También partículas procedentes del espacio exterior como son el polvo extraterrestre, meteoritos que de alguna u otra forma entran en nuestra atmósfera.

Los diferentes gases y partículas de los emisores anteriores son arrastrados mediante el ciclo hidrológico por las gotas de lluvia, la evaporación y aguas del deshielo a la superficie terrestre, contaminando así depósitos superficiales como lagos, lagunas y ríos, y a través de la infiltración, los subterráneos como pozos y el manto freático.

Todos estos contaminantes naturales sufren una serie de procesos químicos y biológicos que forman parte de la capacidad autodepuradora del agua y en su mayoría son eliminados.

1.1.2. ANTROPOGENICAS.

Esta fuente de contaminación es causada por las actividades y necesidades del hombre, de forma directa o indirecta, por lo tanto, se pueden clasificar a las aguas residuales en varios tipos, dependiendo del origen de los contaminantes presentes y que se explican cada uno con detalle en los siguientes apartados.

1.1.2.1. DOMESTICAS.

Las aguas residuales domesticas son el producto de las diferentes actividades cotidianas que el hombre realiza en el lugar donde habita. Estas pueden ser:

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

1. Desechos humanos y animales. Son las exoneraciones corporales que llegan a formar parte de las aguas negras, mediante los sistemas hidráulicos de los retretes y en cierto grado de los procedentes de los animales, que van a dar a las alcantarillas al ser lavadas en el suelo o en las calles. Estos desechos son los más importantes en lo que se refiere a la salud pública, porque pueden contener organismos perjudiciales al ser humano, por lo que un proceso de tratamiento seguro y eficaz constituye el principal problema de acondicionamiento de las aguas negras para su disposición.

2. Desperdicios caseros. Proceden del lavado de la ropa, del aseo personal, de la preparación de los alimentos y lavado de la loza. Casi todos estos desechos contienen jabones y detergentes sintéticos que generalmente tienen agentes espumantes que afectan a los ecosistemas acuáticos. Los desechos de cocina tienen partículas de alimentos y grasas que, con el uso cada vez mayor de aparatos domésticos para moler basura, se están convirtiendo en la parte más importante de los desechos caseros.

3. Aguas de lavado de las calles y corrientes pluviales. Las lluvias depositan cantidades variables de agua en la tierra y gran parte de ella lava la superficie, al escurrir arrastrando polvo, arena, hojas y otras basuras. En algunas poblaciones se deja que estos escurrimientos pluviales vayan al alcantarillado o drenajes que sirven para coleccionar los desechos propios de la comunidad, formando parte importante de las aguas residuales. En otras, se coleccionan se forma independiente estos escurrimientos para su disposición y posterior reuso. El volumen de las corrientes pluviales varía según la intensidad de la precipitación, la topografía y las superficies pavimentadas y techadas.

Por otra parte, el precio del agua es un factor de gran incidencia en el consumo, ya que la cantidad de agua de consumo doméstico no debería superar los 200 lt/persona/día con un promedio de 60 a 70 % para baño, lavandería, cocina y aseo, y un 30 a 40 % para arrastre sanitario. Sin embargo, este último porcentaje puede disminuirse con el fomento de los inodoros de bajo volumen de descarga.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

1.1.2.2. INDUSTRIALES.

Los desechos industriales producto de los procesos fabriles son parte importante de las aguas negras de una población y deben tomarse las precauciones necesarias para su eliminación. En muchas regiones se colectan los desechos industriales junto con los otros componentes de las aguas negras de la población para su tratamiento y eliminación final. Estos desechos tienen una gran variación en su tipo y cantidad, pues dependen de la clase de giro industrial.

Las aguas residuales industriales contienen sustancias químicas (inorgánicas y orgánicas) que interfieren con la disposición final de las aguas negras de la comunidad, debido a que dañan las alcantarillas y/o alteran los procesos de una planta de tratamiento. Por esa razón deben recibir un tratamiento preliminar, o eliminar dichas sustancias antes de combinarlas con las aguas residuales municipales.

Los contaminantes más comunes de las descargas industriales en general proceden de las siguientes fuentes:

- Acondicionamiento de agua para enfriamiento.
- Purgas de lodos acumulados en torres de enfriamiento.
- Lavado de materias primas.
- Procesos de transporte con residuos de producto terminado.
- Lavado de equipo.
- Desechos de materia orgánica generados durante el proceso de industrialización.
- Desechos ácidos y alcalinos generados en prácticas auxiliares del proceso industrial regeneración de intercambiadores iónicos, lavado de filtros, limpieza del equipo, etc.

Cada industria en particular, genera descargas características de acuerdo a los procesos específicos de transformación de la materia prima. En la Tabla 1.1 se presentan los caudales descargados por diferentes tipos de industrias a manera de ejemplo.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Tabla 1.1. Caudal descargado por diferentes tipos de industria.

Industria	Caudal de aguas residuales (m ³ /s)	Material orgánica generada* (miles ton/año)
Azucarera	45.6	1869
Química	13.4	635
Petrolera	7.0	1247
Hierro y acero	4.5	93
Celulosa y piel	4.5	85
Textil	2.9	196
Beneficio de café	1.9	80
Cerveza y malta	1.1	95
Alimenticia	1.2	99
Agropecuaria	0.7	33
Acabado de metales	0.2	1.7
Curtidora	0.1	13.3
Vitivinícola	0.1	5.3

*Medida en términos de DBO₅.

Fuente: Comisión Nacional del Agua.

El 97% de las empresas del sector industrial mexicano se clasifica en micro y pequeños establecimientos; la falta de recursos ha sido siempre un obstáculo en el financiamiento de plantas de tratamiento de agua, equipos de control e instalación de tecnología más limpia.

Hasta principios de la década de los noventa, la industria se responsabilizó de forma limitada del agua residual y de los problemas ambientales relacionados con ella, debido a que de un total generado de 64.5 m³/s sólo se trataron 5.3 m³/s, es decir, el 8%. Actualmente este porcentaje ha crecido y de acuerdo con la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales a nivel nacional se trata el 38% del agua residual generada.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Sin duda, la industria con mayor participación relativa en transmisión de carga orgánica al agua es la azucarera con un 53 %, le siguen la elaboración de bebidas y la fabricación de alcohol con un 10 %, la petrolera, la celulosa y papel, la alimenticia, la metálica básica y la química con un 5 % cada una. Algunas de estas industrias están establecidas en zonas con baja disponibilidad de agua, lo que resulta en una sobreexplotación de acuíferos, contaminación de los ecosistemas y altos costos de oportunidad. Se considera que muchas empresas podrían utilizar aguas tratadas o grises en sus servicios o procesos, con lo que se disminuiría la presión ejercida sobre la capacidad de los acuíferos o, en su caso, se podría aumentar la cobertura del servicio de agua potable en favor del consumo doméstico.

1.1.2.3. AGROPECUARIO Y GANADERO.

La contaminación de origen agrícola deriva del uso de plaguicidas, fertilizantes y abonos, que son arrastrados por el agua de riego, llevando consigo sales compuestas de nitrógeno, fósforo, azufre y trazas de elementos organoclorados que pueden llegar al suelo por lixiviación y así, contaminar las aguas subterráneas. En explotaciones ganaderas, la contaminación procede principalmente de las excretas de los animales de corral, que también pueden contaminar las aguas subterráneas.

El sector agrícola es el responsable de generar 337 m³/s de aguas residuales, lo que representa el 62% del total nacional. No existen datos relativos a la carga contaminante derivada de actividades agrícolas pero sin duda es significativa dado el intenso uso de plaguicidas y fertilizantes químicos. Las aguas de retorno agrícola no reciben tratamiento alguno, en gran parte por su carácter difuso o no puntual.

El aporte de contaminantes a cuerpos receptores y la filtración de agua con alto contenido de nutrientes a los acuíferos durante sus procesos de recarga, destacan por su importancia y gravedad. La elaboración de un inventario completo de emisiones de aguas residuales (puntuales y no puntuales) que incluya las del sector agrícola es vital para el diseño de políticas en materia ambiental y de salud.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.

La generación de aguas residuales es un producto inevitable de la actividad humana. El tratamiento y disposición apropiada de las aguas residuales supone el conocimiento de las características físicas, químicas y biológicas de dichas aguas; de su significado y de sus efectos sobre la fuente receptora.

1.2.1. FÍSICAS.

Las principales características físicas que se determinan en el agua residual para estimar el tipo de contaminantes presentes se describen a continuación:

Color. Generalmente, la coloración es indicadora de la composición y concentración de las aguas residuales urbanas, variando del gris al negro según la cantidad de materia orgánica que contenga. Esto afecta a la difusión de la luz en el medio (y por tanto a la fotosíntesis) a la vez que provoca una mayor absorción de energía solar, por lo que la temperatura puede aumentar ligeramente. El color se evalúa mediante el método del platino-cobalto y la comparación con discos coloreados.

Olor. Es típico que en las aguas residuales urbanas se produzcan malos olores debido a la putrefacción en condiciones anaerobias de la materia orgánica, que genera compuestos olorosos como el sulfuro, los mercaptanos (olor a coles podridas), el amoníaco y las aminas (olor a pescado), el indol o algunos fosforados. Aunque en ocasiones pueda parecer de poca importancia este tema, hay que tener en cuenta la tensión psicológica que pueden generar olores molestos, pudiendo producir reducción del apetito, desequilibrios respiratorios, náuseas, etc.

Temperatura. Es común encontrar la temperatura de los efluentes urbanos entre los 10 y 20 grados centígrados, y aunque no suele plantear grandes problemas, en determinadas circunstancias puede provocar el desplazamiento de unas especies vivas, así como variar la

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

solubilidad de gases y sales o la disociación de éstas, y por lo tanto, la conductividad eléctrica y el pH del agua.

Turbiedad. Es una medida de la transmisión de luz en el agua. Es debida a la existencia de materia en suspensión de tamaño pequeño, como son limos y arcillas, siendo proporcional su concentración con el grado de contaminación.

Densidad. Es la masa por unidad de volumen, incrementándose de acuerdo al tipo y cantidad de contaminantes presentes en el agua.

Conductividad eléctrica. Es una medida de la capacidad de una disolución para conducir una corriente eléctrica. Los valores se incrementan dependiendo de la cantidad de iones presentes en el agua.

Sólidos. Según su composición se dividen en dos tipos:

- **Sólidos orgánicos.** Tienen un origen vegetal, animal o sintético. Un ejemplo de este tipo de sólidos es la materia orgánica, grasas, aceites, plásticos, ácidos orgánicos, entre otros.
- **Sólidos inorgánicos.** Se incluyen en este grupo todos los sólidos de origen mineral, como son sales, arcillas, lodos, arenas, gravas y ciertos compuestos como sulfatos, carbonatos, etc..

Otra forma de clasificar a los sólidos es de acuerdo a su presentación:

Sólidos sedimentables. Son aquellas partículas más gruesas que se depositan por gravedad en el fondo del cuerpo de agua. Se componen de un 70% de sólidos orgánicos y de un 30% de sólidos inorgánicos.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Sólidos suspendidos. Son las partículas flotantes, como trozos de vegetales, animales, basuras, etc., y aquellas otras que también son perceptibles a simple vista y tienen posibilidades de ser separadas del líquido por medios físicos. Generalmente se componen de un 68% de sólidos orgánicos y de un 32% de sólidos inorgánicos.

Sólidos disueltos. Son partículas de tamaño intermedio entre 0.2 μm y 1 μm , a los que se les conoce como coloides y son los responsables de proporcionar el color al agua residual. Se calcula que están constituidos por un 75% de componentes orgánicos y un 25% de componentes inorgánicos. Son fácilmente degradables.

1.2.2. QUÍMICAS.

La **materia orgánica** es el factor característico de las aguas residuales debido a las proteínas, hidratos de carbono, aceites y grasas procedentes de excretas y residuos domésticos vertidos. Su afección principal y más importante es la reducción del contenido de oxígeno disuelto, lo que provoca la desaparición de especies exigentes de oxígeno disuelto y la evolución de condiciones aerobias a anaerobias. Esto, además, afecta a la composición química del agua y por consiguiente a la biológica, pues dependiendo del tipo de poblaciones de organismos presentes en el agua, las reacciones biológicas generarán productos diferentes, esto se puede apreciar en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. Compuestos químicos obtenidos de acuerdo a la cantidad de oxígeno disuelto presente en el medio.

ELEMENTO DE PARTIDA	PRODUCTOS	
	Condiciones aerobias	Condiciones anaerobias
C	CO ₂	CH ₄
N	NH ₃ y HNO ₃	NH ₃ y aminas
S	H ₂ SO ₄	H ₂ S
P	H ₃ PO ₄	PH ₃

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Las **grasas y aceites** provenientes de las cocinas, estacionamientos públicos y privados, vías públicas, así como los agentes tensoactivos (detergentes), impiden el intercambio gaseoso entre el agua y la atmósfera, ocasionando la degradación del cuerpo de agua conocido como eutrofización debido a que dificultan la transpiración de las plantas o afectan a animales como los anfibios.

La forma habitual de evaluar el grado de contaminación por materia orgánica es a través de la medición del oxígeno necesario para conseguir la oxidación de la materia orgánica, tanto por “vía biológica” o por “vía química”, estos ensayos son conocidos como Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno, respectivamente.

Otro tipo de compuestos químicos que se encuentran en el agua son los **nutrientes**. Éstos son productos existentes de forma natural en el medio, pero un exceso de concentración provoca una excesiva fertilidad del mismo. La proliferación de fitoplancton produce una cantidad elevada de materia orgánica, la cual, al morir los individuos se descompone consumiendo el oxígeno del medio, con las consecuencias que esto puede acarrear para el medio acuático. Los nutrientes fundamentales en el medio acuático son el nitrógeno, fósforo, carbono, hierro y azufre.

- El **fósforo** es un elemento limitante para el desarrollo de organismos en el agua. Los vertidos urbanos suponen un gran aporte de este elemento debido a los detergentes y abonos que contienen, con lo que puede dejar de ser limitante y producirse la eutrofización del medio. Además, los fosfatos tienen gran influencia en el transporte y retención de los metales en el agua debido a fenómenos de complejación química. El fósforo puede encontrarse en el agua en forma disuelta o en suspensión.
 - El **nitrógeno** se puede presentar en la forma de amonio, nitritos o nitratos según el grado de oxidación de la materia orgánica. El amonio es la forma en que se presenta en primer lugar tras la transformación de la urea proveniente de la orina (30 gr. de urea por litro de orina), así como de la disolución de diversos compuestos nitrogenados en fase de descomposición. El amonio es perjudicial para la vida piscícola, aunque no en usos
-

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

agrícolas. Los nitritos y nitratos constituyen el segundo y tercer estado de oxidación, a los que se llega por la acción de las bacterias aerobias nitrosomas y nitrobacter. Son menos tóxicos que el amonio, pero sigue estando presente el peligro por eutrofización.

Los **metales pesados**, son los compuestos químicos inorgánicos que están siendo estudiados en gran medida, debido a su alta potencialidad tóxica en los organismos vivos, aún a concentraciones tan bajas como son $\mu\text{g/L}$. Estos compuestos como el plomo, mercurio, cobalto, cadmio, cobre, entre otros, son comunes de encontrar en las descargas de aguas residuales provenientes de las industrias y que ingresan a las cadenas tróficas cuando son ingeridos por los peces y plantas en medios acuáticos. A continuación se presentan las características de algunos metales pesados.

- **Plomo.** La concentración máxima que puede estar presente en los cuerpos de agua es de 0.15 mg/m^3 . Este metal es parecido al mercurio y se acumula en huesos y dientes, se aloja en los riñones y en el tejido óseo lo que dificulta su tratamiento. Puede volver inmóvil a una persona en períodos de tensión y desarrollo y si llega al cerebro causa un retraso mental conocido como Saturnismo.
- **Manganeso.** Esta presente en pequeñas cantidades en los pozos de agua, por lo que es muy común que se realicen análisis al agua para determinar su concentración. El hombre necesita alrededor de 3 a 9 mg/d y es obtenido a través de algunos alimentos, sobre todo en huevo, granos y en vegetales verdes.
- **Cadmio.** La exposición a este metal es limitado a pesar de que es un agente extremadamente toxico. La exposición a este agente por humos y polvo en cantidades de 0.5 a 2.5 mg/m^3 puede causar neumonía, mientras que en cantidades de 9.0 mg/m^3 puede matar en cuestión de pocas horas. En una exposición crónica ataca a los riñones, huesos y pulmón. Este metal requiere especial interés debido a que puede ser descargado en las aguas residuales por industrias productoras de pilas recargables e ingresar fácilmente al ser humano debido a que el cuerpo lo confunde con calcio llegando rápidamente a la estructura ósea ocasionando osteoporosis.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

- **Cromo.** En el cromo existen tres estados de oxidación, el estado neutral (0), el cual se encuentra en el chapado de joyería de fantasía; el estado +3 encontrado en el polvo fundido y óxidos gastados; y el estado +6 que es el más tóxico y un fuerte oxidante que puede quemar severamente. En algunas personas les puede causar dermatitis aún el estado neutro.

Se han desarrollado una serie de técnicas analíticas para determinar las concentraciones de los compuestos químicos que están presentes en el agua y posteriormente evaluar si representan un riesgo a la salud de los organismos vivos que están en contacto con ella. A continuación se plantea el objetivo por el que se desarrollan algunas de las técnicas analíticas existentes.

- **pH.** Mide la concentración de iones hidrógeno en el agua, para ello se cuanta con una escala de 0 a 14. Esta escala está dividida en tres zonas, la primera es de 0 a 6 indicando un agua ácida, la segunda es de 8 a 14 indicando un agua alcalina, mientras que la tercera es de 6 a 8 indicando un agua neutra. El agua cuando no está contaminada presenta valores dentro del rango neutro, mientras que si este valor se desplaza a cualquiera de las otras dos zonas, se puede inferir el tipo de contaminante presente.
 - **Alcalinidad.** Este parámetro se mide para determinar la concentración de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos, ya que estos ayudan a regular el pH. Normalmente, el agua residual es alcalina.
 - **Oxígeno Disuelto.** Uno de los factores más importantes para la vida en el agua es la cantidad de oxígeno que ésta contenga en disolución. Esta cantidad puede ser incrementada por captación y difusión a través de la superficie del agua, por la acción fotosintética o por el descenso de temperatura. Sin embargo, también puede disminuir por la respiración de los organismos, por elevación de la temperatura o por reacciones químicas; por lo que la contaminación de cualquier tipo suele provocar una disminución de concentración de este gas en el agua.
-

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO).** Es un parámetro que mide la cantidad de materia orgánica susceptible de ser oxidada por medios químicos que hay en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en mg de O₂/litro. Es un método aplicable en aguas continentales (ríos, lagos, acuíferos, etc.), aguas residuales o cualquier agua que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica. El método mide la concentración de materia orgánica. Sin embargo, debido a los compuestos químicos que se utilizan en el ensayo, también mide la materia inorgánica susceptible de ser oxidada como los sulfuros, sulfitos, yoduros, entre otros.
- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).** Es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser degradada u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, y se utiliza para determinar su grado de contaminación. Normalmente se mide transcurridos 5 días por lo que se representa como DBO₅ y se expresa en mg de O₂/litro. Es un método aplicable en aguas superficiales continentales (ríos, lagos, acuíferos, etc.), aguas residuales o cualquier agua que pueda contener una cantidad apreciable de materia orgánica.

Existen caracterizaciones típicas de agua residual, las cuales sirven como referencia de los parámetros necesarios para el diseño de un sistema de tratamiento, pero hay que recordar que cada agua residual es única en sus características y que, en lo posible, los parámetros de contaminación deben evaluarse en el laboratorio para cada tipo. Las Tablas 2.3 a 2.7 resumen valores promedio de las características más importantes evaluadas en las aguas residuales y también revelan la importancia de su origen, así como la magnitud del caudal que la aportan. En las aguas residuales se transportan principalmente excretas y orina humanas por lo que en las Tablas 1.3 y 1.4 se muestra la composición de estos materiales, mientras que en las Tablas 1.5 a 1.7 se muestra la composición típica de algunos tipos de aguas residuales.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Tabla 1.3. Composición de excrementos y orina humanos.

Característica	Materia fecal	Orina
Cantidad (húmeda) por persona por día	135 – 270 g	1 – 1.3 kg
Cantidad (seca) por persona por día	37 – 70 g	50 – 70 g
Humedad, %	66 – 80	93 – 96
Materia orgánica, %	88 – 97	65 – 85
Nitrógeno, %	5.0 – 7.0	15 – 19
Fósforo (como P ₂ O ₃), %	3.0 – 5.4	2.5 – 5.0
Potasio (como K ₂ O), %	1.0 – 2.5	3.0 – 4.5
Carbón, %	44 – 55	11 – 17
Calcio (como CaO), %	4.5	4.5 – 6.0

Fuente: Romero Rojas, 1999.

Tabla 1.4. Composición de la orina humana.

Característica	Promedio	Intervalo
Volumen, L/cd	1.57	0.69 – 2.5
pH	6.1	5.6 – 6.8
Conductividad, mS/cm	17.49	8.72 – 26.8
NH ₄ – N, mg/cd	571	318 – 883
Urea, g/cd	16.8	11.8 – 23.8
Nitrógeno total, g/cd	10.8	7.7 – 15
Fósforo, g/cd	0.93	0.6 – 1.48
Potasio, g/cd	2.6	1.38 – 3.52
DQO, g/cd	12.97	5.37 – 24.02
DBO, g/cd	6.06	1.76 – 9.79

Fuente: Romero Rojas, 1999.

Tabla 1.5. Composición aproximada de un ARD (mg/L), basada en un caudal de 400 L/hab.d

Parámetro	Cruda	Sedimentada	Tratada Biológicamente
Sólidos totales	800	680	530
Sólidos totales volátiles	440	340	220
Sólidos suspendidos	240	120	30
Sólidos suspendidos volátiles	180	100	20
DBO	200	130	30
Nitrógeno total como N	35	25	20
Nitrógeno inorgánico como N	15	15	20
Fósforo total como P	10	8	7
Fósforo soluble como P	7	7	7

Fuente: Romero Rojas, 1999.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Tabla 1.6. Composición típica de las aguas residuales domésticas.

Parámetro	Magnitud
Sólidos totales	720 mg/L
Sólidos disueltos	500 mg/L
Sólidos disueltos volátiles	200 mg/L
Sólidos suspendidos	220 mg/L
Sólidos suspendidos volátiles	165 mg/L
Sólidos sedimentables	10 mg/L
DBO	220 mg/L
COT	160 mg/L
DQO	500 mg/L
Nitrógeno total	40 mg/L - N
Nitrógeno orgánico	15 mg/L - N
Nitrógeno amoniacal	25 mg/L - N
Nitritos	0 mg/L - N
Nitratos	0 mg/L - N
Fósforo total	8 mg/L - P
Fósforo orgánico	3 mg/L - P
Fósforo inorgánico	5 mg/L - P
Cloruros	50 mg/L - Cl
Alcalinidad	100 mg/L – CaCO ₃
Grasas	100 mg/L

Fuente: Romero Rojas, 1999.

Tabla 1.7. Características de un agua residual domestica típica.

Parámetro	Magnitud
DBO	200 mg/L
DQO	400 mg/L
Sólidos suspendidos totales	200 mg/L
Sólidos suspendidos volátiles	150 mg/L
Nitrógeno amoniacal	30 mg/L - N
Ortofosfatos	10 mg/L - P

Fuente: Romero Rojas, 1999.

La cantidad y concentración de las aguas residuales es función de su origen y de sus componentes, por lo que las concentraciones de contaminantes varían de una ciudad a otra y de un país a otro. Para ciudades grandes se pueden usar, como valores de referencia, los incluidos en las tablas anteriores; para comunidades pequeñas o áreas rurales las aguas residuales son predominantemente domésticas.

1.2.3. BIOLÓGICAS.

Las aguas residuales contienen incontables organismos vivos, la mayoría de los cuales son demasiado pequeños para ser visibles, excepto bajo el microscopio, su presencia es de suma importancia, debido a que son las encargadas de llevar a cabo los procesos de degradación de la materia orgánica. A continuación se explican algunos tipos de organismos presentes en las aguas residuales.

Las **bacterias** son organismos vivos, de tamaño microscópico, que constan de una sola célula y que de acuerdo con su metabolismo se pueden clasificar en bacterias aerobias (requieren oxígeno), bacterias anaerobias (no requieren de oxígeno) y bacterias anóxicas (obtienen el oxígeno de compuestos químicos existentes en el agua); otra clasificación es debida a sus funciones y pueden ser bacterias patógenas, bacterias indicadoras y bacterias depuradoras.

- Las **bacterias patógenas** son las que viven normalmente a expensas de otro organismo vivo, llamado huésped, porque necesitan recibir el alimento ya preparado para consumirlo y generalmente no se desarrollan fuera del cuerpo del huésped. Estas bacterias pueden ocasionar enfermedades en los seres humanos como la fiebre tifoidea, la disentería, el cólera, u otras infecciones intestinales.
- Las **bacterias indicadoras** son aquellas, que como su nombre lo dice, indican una probable contaminación del agua por materia fecal principalmente y un ejemplo de estas bacterias son las denominadas coliformes que significa *con forma de coli*, refiriéndose a la bacteria principal del grupo, la *Escherichia coli*, descubierta por el bacteriólogo alemán Theodor von Escherich en 1860. Von Escherich la bautizó como *bacterium coli* ("bacteria del intestino", del griego *κόλον*, *kolon*, "intestino"). Con posterioridad, la microbiología sistemática nombraría el género *Escherichia* en honor a su descubridor. Dentro de este grupo de bacterias se encuentran los coliformes fecales que son bacterias que se encuentran en los intestinos de los animales (incluido el humano) y que si se detectan en el agua indica una contaminación fecal del agua.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

- El último grupo de bacterias son las **depuradoras**, las cuales se alimentan de materia orgánica muerta, descomponiendo los sólidos orgánicos para obtener el sustento necesario, y produciendo a su vez sustancias de desecho que consisten en sólidos orgánicos e inorgánicos. Por esta actividad son de suma importancia en los métodos de tratamiento de aguas negras ideados para facilitar o acelerar la descomposición natural de los sólidos orgánicos. Tales procesos de descomposición no progresarían sin su actividad. En ausencia de vida bacteriana (esterilidad) no tiene lugar la descomposición. Hay muchas especies de bacterias depuradoras y cada una de ellas desempeña un papel específico en la descomposición de los sólidos orgánicos. Cada especie tiende a morir una vez que ha cumplido su misión en el proceso de descomposición.

Hay cuatro tipos de **protozoarios** por lo que se debe tener cuidado cuando se manipula agua residual, siendo dos amibas *Entamoeba histolytica* y *Giardida lamblia*; un ciliado llamado *Balantidium coli*; y una coccidida en la *Criptosporidium genus*. Todos estos son capaces de formar esporas resistentes que se encuentran en el lodo de sedimentación que son transportados por los aireadores. Estos organismos pueden causar diarrea y deshidratación severa. De estos organismos, el mas severo es *Entamoeba histolytica* que puede causar abscesos cerebrales también es conocido como “La venganza de Moctezuma.” Una buena higiene es la mejor forma de combatir a estos agentes patógenos.

Los hongos son organismos muy comunes en el tratamiento de aguas residuales y aproximadamente de cuatro a cinco clases de hongos diferentes habitan en las aguas residuales. Las enfermedades más comunes son infecciones en el oído y la piel, acompañadas por problemas respiratorios.

Los **helmintos** son parásitos a los que se les debe tener especial cuidado en climas tropicales o en temporadas calidas. Se encuentran principalmente en los sedimentos de los cuerpos de agua y en los sólidos que son transportados en las aguas residuales, un ejemplo de estos parásitos son los *Ascaris lumbricoide* y la llamada Solitaria. Debido a que la resistencia de los huevecillos de helmintos es alta, el agua tratada no deberá ser utilizada en riego con fines agrícolas.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Hay otra forma de vida que se encuentra en las aguas residuales, y son los **virus**. Estos son todavía más pequeños que cualquiera de los otros organismos microscópicos, y demasiado pequeños para poder ser observados al microscopio ordinario que se usa en los trabajos de bacteriología. No tienen un papel importante en el proceso de tratamiento de las aguas residuales, su importancia estriba en que, como las bacterias patógenas, son los agentes causantes de cierto número de enfermedades en el hombre, como por ejemplo la hepatitis, que se desarrolla en los intestinos del hombre y son arrastrados por las materias fecales hasta el agua.

1.3. EFECTOS DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Todas las aguas residuales tienen efectos indeseables, no solo para el hombre que depende de ella para vivir y sus diferentes actividades, sino que también afecta al medio ambiente. En las Tablas 1.8 a 1.11 se presentan en forma breve y generalizada, los efectos más importantes de los principales agentes contaminantes de las aguas residuales.

Tabla 1.8. Efectos indeseables de las aguas residuales.

Contaminante	Efecto
Materia orgánica biodegradable	Desoxigenación del agua, muerte de peces, olores indeseables
Materia suspendida	Deposición en los lechos de los ríos; si es orgánica se descompone y flota mediante el empuje de los gases; cubre el fono e interfiere con la reproducción de los peces o transforma la cadena alimenticia.
Sustancias corrosivas, cianuros, metales, fenoles	Extinción de peces y vida acuática, destrucción de bacterias, interrupción de la auto purificación.
Microorganismos patógenos	Enfermedades gástricas y diarreicas en el ser humano y algunas otras como hepatitis, salmonella, cólera, entre otras.

Fuente: Romero Rojas, 1999.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Tabla 1.9. Efectos indeseables de las aguas residuales 2.

Contaminante	Efecto
Sustancias que causan turbiedad, temperatura, color, olor.	El incremento de la temperatura afecta a los peces, el color, olor y turbiedad hacen estéticamente inaceptable el agua para uso público.
Sustancias o factores que transforman el equilibrio biológico	Pueden causar crecimiento excesivo de hongos o plantas acuáticas, las cuales alteran el ecosistema acuático, causan olores, etcétera.
Constituyentes minerales	Aumenta la dureza, limitan los usos industriales sin tratamiento especial, incrementan el contenido de sólidos disueltos a niveles perjudiciales para los peces o la vegetación, contribuyen a la eutrofización del agua.

Fuente: Romero Rojas, 1999.

Tabla 1.10. Contaminantes de importancia en aguas residuales.

Contaminante	Causa de importancia
Sólidos suspendidos	Puede conducir al desarrollo de depósitos de lodos y condiciones anaerobias cuando se descargan AR crudas en un medio acuático.
Materia orgánica biodegradable	Esta compuesta principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas. Se mide en términos de DBO y DQO por lo general. Si no es previamente removida puede producir agotamiento del OD de la fuente receptora y desarrollo de condiciones sépticas.
Patógenos	Producen enfermedad.
Nutrientes	El C, N y P son nutrientes. Cuando se descargan en las aguas residuales puede producir crecimiento de vida acuática indeseable. Cuando se descargan en cantidades excesivas sobre el suelo puede producir polución del agua subterránea.
Materia orgánica refractaria	Resiste tratamiento convencional. Ejemplos: detergentes, fenoles y pesticidas agrícolas.
Metales pesados	Proviene de aguas residuales comerciales e industriales y es posible que deban ser removidos para reuso del agua.
Sólidos inorgánicos disueltos	Algunos como el calcio, sodio y sulfatos son agregados al suministro doméstico original como resultado del uso y es posible que deban ser removidos para reuso de agua

Fuente: Romero Rojas, 1999.

CAPÍTULO I. GENERALIDADES DE LAS AGUAS RESIDUALES.

Tabla 1.11. Contaminantes de importancia en aguas residuales 2.

Contaminante	Parámetro típico de medida	Impacto ambiental
Materia orgánica biodegradable	DBO, DQO	Desoxigenación del agua, generación de olores indeseables.
Materia suspendida	SST, SSV	Causa turbiedad en el agua, deposita lodos
Patógenos	CF	Hace el agua insegura para consumo y recreación.
Amoniaco	NH_4^+ - N	Desoxigena el agua, es toxico para organismos acuáticos y puede estimular el crecimiento de algas.
Fósforo	Ortofosfatos	Puede estimular el crecimiento de algas.
Materiales tóxicos	Como cada material toxico especifico	Peligroso para la vida vegetal y animal.
Sales inorgánicas	SDT	Limita los usos agrícolas e industriales del agua
Energía térmica	Temperatura	Reduce la concentración de saturación de oxigeno en el agua, acelera el crecimiento de organismos acuáticos.
Iones hidrógeno	pH	Riesgo potencial para los organismos acuáticos.

Fuente: Romero Rojas, 1999.

CAPÍTULO II.
TIPOS DE TRATAMIENTO.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

El objetivo básico de implementar un sistema de tratamiento de agua residual es proteger la salud y promover el bienestar de la sociedad. El retorno de las aguas residuales a nuestros ríos o lagos nos convierte en usuarios directos e indirectos de las mismas, y a medida que crece la población, aumenta la necesidad de promover sistemas de tratamiento que permitan eliminar los riesgos para la salud y minimizar los daños al ambiente.

En un desarrollo gradual de sistemas de tratamiento se pueden considerar como metas principales del tratamiento de aguas residuales, las siguientes:

- Remoción de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- Remoción de sólidos suspendidos
- Remoción de microorganismos patógenos

Posteriormente ha sido necesario agregar la remoción de nitrógeno y fósforo, pero actualmente también se remueven a los metales pesados, algunas sustancias inorgánicas disueltas y las sustancias orgánicas refractarias como los detergentes, fenoles y plaguicidas.

La complejidad del sistema de tratamiento es, por tanto, función del uso que se quiera dar al agua tratada, debido a que se involucran un gran número de operaciones y procesos que se clasifican como pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado de aguas residuales y que se explicarán cada uno de ellos en los siguientes apartados.

2.1. PRETRATAMIENTO.

Fundamentalmente el pretratamiento o tratamiento preliminar consiste en eliminar los sólidos de gran tamaño y materia gruesa flotante, tales como arenas, madera, plásticos, así como cantidades excesivas de aceites o grasas que pueden dañar o alterar el adecuado funcionamiento de los equipos y procesos del sistema de tratamiento de aguas residuales.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Las operaciones unitarias más comunes en el pretratamiento son: cribado, triturado, desarenado y flotación. Los dos primeros tienen aplicación común en el tratamiento de aguas residuales domésticas, pero es posible aplicarlos en algunas descargas de aguas residuales industriales, sobre todo cuando el drenaje se combina con las aguas pluviales; mientras que el desarenado se aplica a todo tipo de agua que contenga sólidos sedimentables y la flotación para eliminar grasas y aceites.

Cabe destacar que algunos autores clasifican a todas las operaciones unitarias que se efectúan antes de un tratamiento secundario como tratamiento primario, por lo que incluyen, además de las operaciones antes mencionadas, la sedimentación primaria, neutralización y homogeneización.

2.1.1. CRIBADO.

El cribado es un método que elimina los contaminantes más voluminosos, ya sean flotantes o suspendidos presentes en el agua residual. Las cribas se clasifican en función del tamaño de la partícula removida, como finas o gruesas (Tabla 2.1) y sirven como instrumento de protección de equipo.

En general, en las plantas de tratamiento, el cribado de gruesos se utiliza para remover los sólidos de gran tamaño o basura, los cuales al transportarse con la corriente de agua residual pueden interferir en la operación del equipo de la planta como bombas o válvulas, aereadores mecánicos y filtros mecánicos, afectando la eficiencia de remoción del sistema de tratamiento.

Las cribas finas, se desarrollaron para eliminar algas y otras plantas acuáticas por tamizado directo. En algunas instalaciones se emplea este tipo de cribado para mejorar la calidad del efluente secundario.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Tabla 2.1. Tamaño de la abertura de los cribadores de gruesos y finos.

Tipo de tamiz.	Abertura (mm).	Observaciones.
Rejillas antes de las bombas de agua residual y del desarenador.	51 a 153	
Rejillas antes de otras unidades o procesos.	19 a 51	Pueden usarse aberturas de 25 mm
Desmenuzadores.	6 a 19	La abertura está en función de la capacidad hidráulica de la unidad
Tamiz fijo (estático)	2.3 a 6.4	Aberturas menores a 2.3 mm son usadas en pretratamiento y/o tratamiento primario
Tamiz ajustable.	0.02 a 0.3	

Fuente: Noyola Robles, 2000.

2.1.1.1. CRIBADO DE GRUESOS.

El tamizado de sólidos de gran tamaño es normalmente empleado como una unidad del tratamiento primario con el propósito de proteger el equipo de la planta de tratamiento, así como reducir alteraciones en la eficiencia de operación. Una muestra de su efectividad radica en la disminución de los costos de operación y mantenimiento del equipo. Se incluyen en este grupo los cribadores de barras (rejillas), desmenuzadores y mallas metálicas. Los más comunes son las rejillas y desmenuzadores.

- Las **rejillas** tienen como principal función, junto con un sistema de colección, prevenir que troncos, madera, tocones, botellas de plástico y otros objetos voluminosos entren a la planta de tratamiento.

Una unidad de rejillas consiste de barras de acero verticales o inclinadas espaciadas a intervalos iguales, situadas en forma perpendicular al canal a través del cual fluye el agua residual. Las rejillas son usadas antes de las bombas para el manejo de agua residual, medidores, desarenadores y sedimentadores primarios y en obras de desvío.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

La abertura de las barras se define en función del tipo de basura presente en el flujo. Para rejillas gruesas se consideran aberturas entre 75 y 150 mm, mientras que en las rejillas finas los claros son entre 15 y 75 mm. Las rejillas pueden ser limpiadas manual o mecánicamente. Si la limpieza no se realiza con frecuencia, la remoción de los sólidos atrapados puede provocar turbulencia cuando la velocidad de flujo es alta; una velocidad alta reduce la eficiencia de captura.

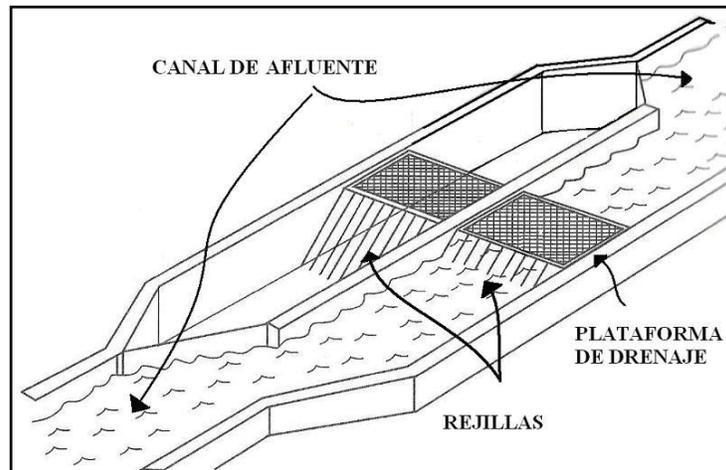


Figura 2.1. Rejillas.

Fuente: Romero Rojas, 1999.

- El uso de **desmenuzadores** acondiciona a la materia orgánica biodegradable para su posterior tratamiento. El empleo de estos equipos evita el contacto del operador con la basura, pero aumenta la carga de sólidos para las unidades posteriores.

Los desmenuzadores (Tabla 2.2) se instalan en la corriente del agua residual, cortan el material de 6 a 19 mm, pero no lo eliminan, por lo que las unidades posteriores tendrán que hacerlo. Los sólidos de los desmenuzadores y trituradores pueden generar depósitos en los tanques de digestión u obstrucciones en los difusores de aire. Todos los desmenuzadores generan residuos del material que cortan, afectando equipos como aireadores mecánicos, mezcladores y bombas.

Tabla 2.2. Algunos mecanismos de corte de los desmenuzadores.

Diferentes mecanismos de corte.
1. El material voluminoso se corta a través de dientes y barras contenido en un tambor que pasa por un peine fino.
2. Cortadores colocados en un armazón oscilante fijo dentro de un tambor semicircular.
3. Una rejilla estacionaria captura los sólidos voluminosos mientras que los de menor tamaño pasan a través de dientes cortantes montados en discos rotatorios.
4. Los cortadores rotatorios trabajan por arriba o debajo de las rejillas cortantes, reteniendo los sólidos y permitiendo su entrada.

Fuente: Noyola Robles, 2000.

- Los cribadores de **malla metálica** son usados después de que se tritura la basura. La principal aplicación de éstos es la remoción de sólidos que puedan obstruir los orificios del lecho de los filtros. Asimismo, su uso previene la obstrucción en tuberías y equipo de distribución y ayuda a reducir el contenido de materia putrescible en el desarenador.

2.1.1.2. TAMICES.

El cribado fino ha sido usado en lugar de la sedimentación primaria para la remoción de los sólidos presentes en el agua residual antes del tratamiento secundario o su descarga en cuerpos receptores. También se emplean en sistemas de tratamiento sin sedimentación primaria, que han tenido problemas de obstrucción, para mejorar los procesos subsecuentes.

La abertura de las cribas varía de 2.3 a 6.0 mm, aunque actualmente las aberturas menores de 2.3 mm son más utilizadas en el pretratamiento y/o tratamiento primario. También se usan cribadores con tambores giratorios que ayudan a incrementar la eficiencia de remoción en las plantas de tratamiento secundarias. El plato perforado y las barras de espacio cerrado, normalmente, tienen aberturas mayores a 0.02 mm.

Las mallas metálicas, al igual que los cribadores de gruesos, se emplean cuando se requiere un tamizado muy fino, por lo que han encontrado su uso sobre todo en tratamiento de aguas residuales industriales para efluentes que contienen fibras o pelusa.

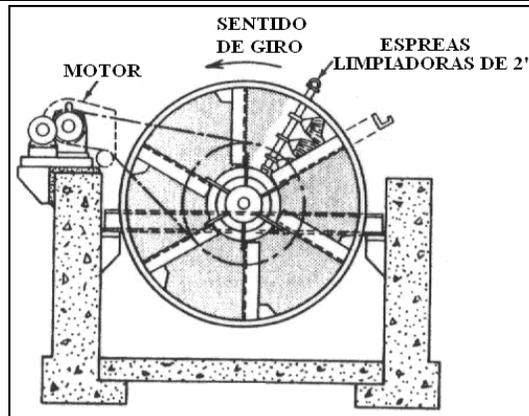


Figura 2.2. Tamiz.

Fuente: Letterman, 1999.

2.1.1.2.1. CRIBADORES FIJOS.

La aplicación de los tamices estáticos en el tratamiento del agua residual municipal reduce la Demanda Bioquímica de Oxígeno y los Sólidos Suspendedos en un 20 a 35%, de esta forma, el uso de estos cribadores es común para el pretratamiento; considerándose en algunos casos como un tratamiento primario. Sin embargo, su uso requiere de un estudio detallado y una comparación de la calidad del tratamiento con otros procesos. Se emplean platos perforados, mallas metálicas o rejillas de pequeña abertura. La aberturas van de 0.2 a 1.2 mm, el rango de operación es de 400 a 1200 lt/m².min y las perdidas de carga que provocan son de 0.8 a 1.4 m.

2.1.1.2.2. CRIBADORES MÓVILES.

Se usan para pulir los efluentes provenientes del tratamiento secundario y lagunas aeradas. Asimismo, se emplean para proteger el equipo mecánico, así como para tratar un agua residual proveniente de un sistema de alcantarillado combinado. Los cribadores móviles son tamices de limpieza continua. El filtro consiste de un cilindro rotatorio que tiene una malla adherida al área superficial de un tambor. Los tamices se fabrican de acero inoxidable, nylon o poliéster con aberturas de 0.02 a 3 mm. Aquellos con tamaño de poro de 0.005 mm son poco utilizados.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Una de las principales desventajas de estas unidades es la pérdida de carga y los altos requerimientos de energía. La pérdida de carga varía de 0.9 a 1.5 m, incluyendo la succión y descarga.

Se han alcanzado remociones de sólidos suspendidos presentes en un efluente secundario de 57 a 89% con tamices de 0.020 mm y de 55 a 73% con tamiz de 0.035 mm.

2.1.2. DESARENADORES.

Los desarenadores tratan el agua residual proveniente de los sistemas de drenaje combinados y separados que contiene arena. Esta se caracteriza por ser no putrescible y tener una velocidad de sedimentación mayor que la correspondiente a la materia orgánica biodegradable. Los materiales que caen en esta categoría son partículas de arena, grava y trazas de minerales, y orgánicos no putrescibles como granos de café y semillas.

Eliminar el arena del agua residual protege a los equipo mecánico de la abrasión y el desgaste; reduce la obstrucción de los conductos por la acumulación de material inerte en los tanques de aeración y lodo digerido, dando lugar a pérdidas en el volumen.

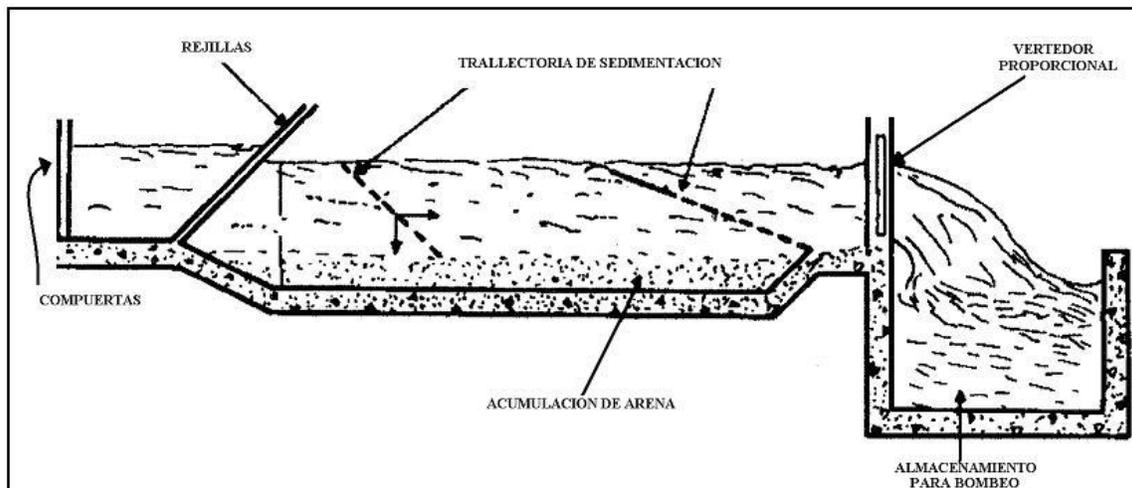


Figura 2.3. Desarenador.

Fuente: Ramírez Cortina, 1992.

2.1.2.1. TIPOS DE DESARENADORES.

La cantidad y composición de la arena y su efecto en las unidades de tratamiento son las principales consideraciones en la selección de los métodos y equipo de remoción. Los métodos se eligen con base en la pérdida de carga, requerimientos de espacio, topografía, tipo de equipo utilizado en la planta y consideraciones económicas.

Algunos desarenadores se emplean para controlar la velocidad del agua residual que entra en la planta. Estos se pueden dividir básicamente en tres tipos: de velocidad controlada, aireados y de nivel constante.

2.1.3. FLOTACIÓN.

La tecnología convencional de los sistemas de flotación para la separación de aceites y sólidos en suspensión en agua fue desarrollada originalmente por la industria del petróleo. La función principal de los separadores API (siglas de American Petroleum Institute) es separar el aceite libre del agua residual, pero como no es capaz de separar sustancias solubles ni de romper emulsiones nunca debe emplearse para dichas funciones. Sin embargo, lo mismo que en cualquier otro equipo de sedimentación, a la vez que el aceite se separa, se decantan los sólidos en suspensión. El diseño de los separadores agua – aceite se basa en la velocidad ascensorial de partículas esféricas de aceite de un diámetro de 0.015 cm.

2.2. TRATAMIENTO PRIMARIO.

El tratamiento primario se refiere comúnmente a la remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica y organismos patógenos mediante procesos de sedimentación. Generalmente, el tratamiento primario remueve alrededor del 40 al 60% de los sólidos suspendidos del agua residual cruda y un 35 a 40% de la DBO, estas eficiencias pueden incrementarse cuando se agregan compuestos químicos en los tanques primarios, por lo que se eliminan casi todos los sólidos coloidales, así como los sedimentables, es decir, equivalentes al 80 a 90 por ciento de los sólidos suspendidos.

Los dispositivos que se usan en el tratamiento primario, están diseñados para retirar de las aguas residuales los sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, mediante el proceso físico de sedimentación. Esto se lleva a cabo reduciendo la velocidad del flujo por lo que los sistemas de recolección del agua residual se construyen para mantener una velocidad de unos 0.60 m/s, siendo apropiada para arrastrar todos los sólidos y prevenir que se depositen en las líneas del sistema, pero al ingresar al pretratamiento la velocidad se debe reducir hasta unos 0.30 m/s esto es para que los sólidos de gran tamaño se precipiten. La velocidad se sigue disminuyendo por lo que en el tratamiento primario se tienen valores de 0.01 a 0.02 m/s, por lo que ahora se pueden separar algunos sólidos disueltos presentes en el agua residual.

Los equipos involucrados en el tratamiento primario se conocen como tanques de sedimentación primaria, algunos de los cuales tienen la función de servir para la descomposición de los sólidos orgánicos sedimentados, es decir, la digestión de lodos.

Debido a la diversidad de formas, diseños y operación, los tanques de sedimentación pueden dividirse en cuatro grupos generales:

- 1) Tanques sépticos.
- 2) Tanques de doble acción, como son los de Imhoff y algunas otras unidades patentadas.
- 3) Tanques de sedimentación simple con eliminación mecánica de lodos.

4) Clarificadores de flujo ascendente con eliminación mecánica de lodos.

Los tanques sépticos y los tanques de dos pisos (Imhoff) son utilizados como tratamiento único de las aguas residuales municipales, en los cuales los sólidos (suspendidos y sedimentables) se sedimentan y son degradados en el mismo sistema por vía biológica.

Los tanques de sedimentación simple son los que comúnmente se conocen como sedimentadores primarios o clarificadores primarios, los cuales son utilizados en el tratamiento primario de las aguas residuales y siempre se encuentran antes de un reactor biológico de tratamiento de agua residual.

Los clarificadores secundarios son sistemas utilizados en el tratamiento secundario químico para la eliminación de los flóculos formados en el reactor biológico de tratamiento.

Cuando se usan compuestos químicos, se emplean otras unidades auxiliares como son:

- 1) Unidades dosificadoras de reactivo.
- 2) Mezcladores.

En muchos casos el tratamiento primario es adecuado para que se pueda permitir la descarga del agua residual tratada a los cuerpos receptores como ríos, lagos, lagunas, entre otros, sin que su calidad interfiera con un posterior uso.

2.2.1. SEDIMENTACIÓN.

La sedimentación es un proceso físico de separación de sólidos o partículas suspendidas más pesadas que el agua mediante la acción de la gravedad. Esta operación se emplea como etapa complementaria de otros procesos como la coagulación-floculación, la precipitación, la oxidación biológica, etc. Las Tabla 2.3 y 2.4 muestran el peso específico de algunas

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

partículas que se separan por sedimentación, así como las velocidades de sedimentación de algunos materiales que se pueden encontrar en el agua residual.

La cantidad de sólidos contenidos en las aguas residuales es generalmente muy pequeña, menos de 0.1 % en peso, pero es la fracción que presenta el mayor problema para su tratamiento y disposición. Los sólidos pueden estar contenidos en el agua en forma disuelta, flotando o suspendidos, por lo tanto, la sedimentación se emplea para eliminar la fracción de sólidos *sedimentables* de los sólidos en suspensión.

Se consideran sólidos sedimentables a las partículas que por su tamaño y peso sedimentan en una hora. Los sólidos sedimentables de las aguas residuales domésticas están constituidos aproximadamente de un 75% de sólidos orgánicos y por un 25% de inorgánicos. Generalmente la cantidad de sólidos sedimentables se expresa en mL de sólido por L de agua residual, pero también se da en partes por millón (ppm).

Tabla 2.3. Velocidades de decantación de diferentes sólidos.

Naturaleza del sólido.	Peso específico.	Velocidad de decantación (cps)	Tiempo de sedimentación (a H = 1m)
Limo y arcilla	2.65	$\leq 7 \times 10^{-3}$	3 h 58 min
Flóculo de aluminio y fierro	1.002	8.3×10^{-2}	20 min
Precipitados de carbonato y calcio	1.200	4.2×10^{-2}	40 min
Materia orgánica residual primaria	1.001	4.2×10^{-2}	40 min
Licor mezclado	1.005	2.0×10^{-1}	8 min 20 s

Fuente: Noyola Robles, 2000.

Tabla 2.4. Características de las partículas comúnmente encontradas en aguas residuales.

Partículas.	Peso específico.	Tamaño.
Arcilla.	2 – 3	10 mm
Sólidos orgánicos.	1.2 – 1.4	1 mm
Floculos de bacterias.	1.01 – 1.1	10 – 100 mm
Carbón activado.	1.4 – 1.6	0.5 – 4 mm
Arena.	2.65	1 mm
Arena con arcilla.	2.6 – 3.5	100 mm a 1 mm

Fuente: Jiménez Cisneros, 2006.

La sedimentación puede efectuarse por cuatro mecanismos principales, de acuerdo a la concentración de sólidos y su tendencia a interactuar entre sí, los cuales se explican a continuación:

a) Sedimentación de partículas discretas.

Este mecanismo se presenta en una suspensión con baja concentración de sólidos, en la que las partículas sedimentan como entidades individuales y hay interacción significativa entre ellas.

b) Sedimentación de partículas floculentas.

Las partículas floculentas son las que por sus características se agregan o colapsan con otras, cuando entran en contacto directo entre ellas, de manera que cambian de tamaño y forma alterando su gravedad específica con cada contacto. Estas partículas se encuentran en sedimentadores de procesos primario avanzado y de biológicos. La aplicación de la sedimentación a estos procesos permite obtener un efluente estable, con bajas concentraciones de sólidos (<10 mg/L) y baja turbiedad (<10 UTN), por lo que se les denomina clarificadores.

c) Sedimentación zonal.

Este tipo de sedimentación ocurre en suspensiones de concentración intermedia, donde las fuerzas entre las partículas son suficientes para unir a las partículas vecinas e inducir su sedimentación.

d) Sedimentación de compresión.

Este mecanismo de sedimentación ocurre cuando las partículas están en una concentración, que se forma una estructura, por lo tanto, la sedimentación ocurre únicamente por compresión de la estructura. La compresión tiene lugar debido al peso de las partículas. Este tipo de sedimentación ocurre usualmente en las capas bajas de los lodos sedimentados.

La sedimentación en un sistema de tratamiento de aguas residuales se usa para los siguientes propósitos:

- Para remover sólidos sedimentables y materia flotante de aguas residuales crudas, reduciendo así el contenido de sólidos suspendidos.
- Para remover los sólidos derivados del crecimiento biológico formado en reactores biológicos intermedios, como los filtros percoladores de primera etapa.
- Para remover la biomasa y sólidos suspendidos de reactores biológicos secundarios, como los procesos de lodos activados y los filtros percoladores.
- Para remover sólidos suspendidos y floculados, o precipitados químicamente, en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Para llevar a cabo la sedimentación se utilizan generalmente tanques circulares de 3 a 60 m de diámetro, en el que la profundidad del agua cuando se emplea un sedimentador primario es de 2 a 3 m, y cuando se usa como secundario y espesador, es de 3 a 4 m o más. La pendiente del piso, más común, para un sedimentador primario con mecanismo de rastras es de 1:12 y cuando se usa como espesador, la pendiente es de 2:12

La sedimentación debe ser considerada en el tratamiento de los residuos industriales sólo cuando estos están combinados con descargas domésticas, o contienen un alto porcentaje de sólidos suspendidos sedimentables, como en el caso de los residuos de industrias de papel, envasado de alimentos, lavado de cartón, etc.

2.2.1.1. COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN.

Este proceso es utilizado para remover sólidos que tienen un tamaño de 10 a 120 μm y por ello no sedimentan por acción de la gravedad o lo hacen en forma muy lenta. Se reportan eficiencias de remoción del 80 al 90% del total de la materia suspendida, del 40 al 70% de la DBO_5 , del 30 al 60% de DQO y del 80 al 90% de bacterias, con respecto a la cantidad de sólidos coloidales presentes.

Este tratamiento se aplica en situaciones específicas como son:

- El agua residual contiene gran cantidad de compuestos en estado coloidal o suspendido, y que pueden o no ser potencialmente tóxicos.
- Los componentes del agua residual no son biodegradables.
- Los reactivos para el tratamiento se adquieren a precios bajos.
- Se desea garantizar la sedimentación de los sólidos.
- Como pretratamiento con la finalidad de aumentar la eficiencia de los siguientes procesos de remoción.
- Cuando los requisitos del efluente justifican el empleo de un proceso primario avanzado.

Los sólidos coloidales suspendidos en el agua presentan una carga electrostática sobre su superficie, que provoca la repulsión entre partículas y les impide agruparse para formar sólidos conglomerados de mayor tamaño. La coagulación consiste en añadir compuestos químicos al agua para reducir las fuerzas de tensión que apartan a los sólidos suspendidos entre sí, y mediante una agitación mecánica controlada, se facilita el encuentro de las partículas, acelerando el proceso de floculación.

El proceso tiene más de 100 años de aplicación y se dejó de emplear en agua residual doméstica en 1930 en favor de los procesos biológicos, debido al elevado costo ocasionado por el tratamiento aplicado a la gran cantidad de lodos generados. Actualmente, su aplicación se ha retomado con dos fines: la eliminación del fósforo y la obtención de

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

efluentes de calidad media con costos menores a los convencionales (biológicos). Este nuevo auge se debe a la síntesis de nuevos polímeros que permiten emplear bajas dosis de coagulantes y producir menores cantidades de lodos.

Un coloide se puede definir como una partícula que se mantiene en suspensión debido a su tamaño extremadamente pequeño (1 a 200 μm), a su estado de hidratación y su carga eléctrica superficial. Hay dos tipos de coloides, los hidrofóbicos y los hidrofílicos que los hace reaccionar de forma diferente de acuerdo a los medios en que se encuentren.

Es importante conocer qué tipo de coloides se encuentran en el efluente al que se le va a dar tratamiento, para conocer su comportamiento y elegir el medio químico más adecuado para su remoción del agua a tratar.

Los coloides hidrofílicos (liofílicos), cuando se concentran pueden alcanzar valores muy altos de viscosidad y formar geles, en cambio, los hidrofóbicos (liofóbicos) no cambian su viscosidad por efecto de la concentración. La diferencia entre los coloides hidrofílicos e hidrofóbicos se resume en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Características de los coloides hidrofílicos e hidrofóbicos.

Característica.	Hidrofóbicos.	Hidrofílicos.
Estado físico	Suspensión	Emulsión
Tensión superficial	Similar a la del medio	Mucho menor que la del medio
Viscosidad de suspensión coloidal	Similar a la de la fase dispersante	Mucho mayor a la de la fase dispersante
Efecto Tyndall	Muy pronunciado	Pequeño o totalmente ausente
Facilidad de reconstitución	De difícil reconstitución	Fácilmente reconstituible
Reacción a electrolitos	Fácilmente coagulable	Menos sensitivo a la acción de los electrolitos y requieren mayor dosis para coagular
Ejemplos	Óxidos de metales, sulfuros, haluros de plata, metales, bióxido de silicio	Proteínas, almidones, gomas, mucílagos y jabones

Fuente: Ramírez Cortina; 1992.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Los coagulantes más comunes son las sales de hierro y aluminio. Los iones precipitantes presentes en estas sales (Fe y Al) son liberados por la alcalinidad del agua o producida por la adición de carbonato de sodio o cal. Los reactivos que se añaden al agua residual en la precipitación o coagulación química, reaccionan con las sustancias que normalmente están presentes en el desecho o que se adicionan con este propósito. La cantidad de reactivos usados generalmente se expresa en Kg/m³ de agua tratada.

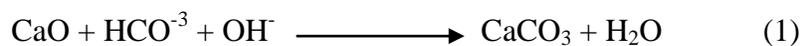
Las reacciones simplificadas de los coagulantes más usados se presentan a continuación.

A) Cal o hidróxido de calcio.

El hidróxido de calcio o cal por su bajo costo ha sido usado ampliamente como primer paso en la sedimentación. Existen dos tipos de cal: cal viva (CaO) y cal apagada (Ca(OH)₂). El tipo de cal que se usa para el tratamiento depende de las necesidades del proceso.

La cal promueve la coagulación debido al incremento del pH en las aguas residuales y reacciona con los bicarbonatos y fosfatos formando precipitados de carbonato de calcio, hidroxiapatita de calcio e hidróxido de magnesio. La precipitación de este último puede empezar a un pH de 9.5 pero no es completa hasta un pH de 11.

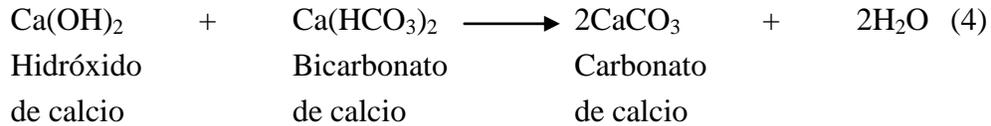
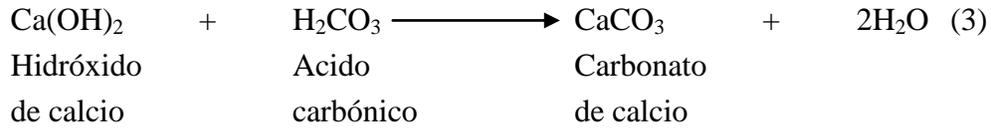
La cal reacciona con la alcalinidad natural del bicarbonato, precipitándose el carbonato de calcio (CaCO₃). El exceso de los iones de calcio (Ca²⁺) reaccionará con el fósforo, precipitándose la hidroxiapatita. Las reacciones químicas se resumen en las ecuaciones siguientes:



La cal es utilizada conjuntamente con el sulfato ferroso, para formar el precipitado de hidróxido férrico. Generalmente se requiere más cal cuando se usa sola que cuando se utiliza con el sulfato de hierro.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Los principios de la clarificación con cal se explican con las siguientes reacciones:

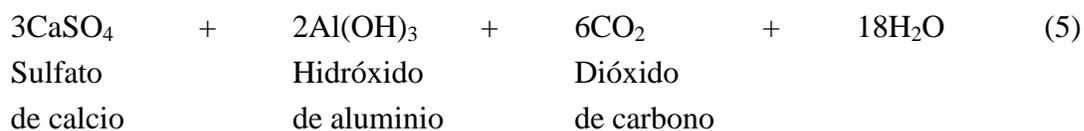
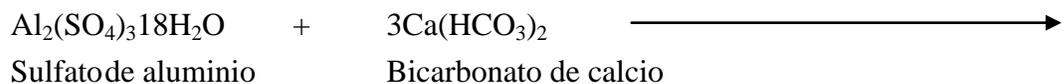


Se debe adicionar una cantidad suficiente de cal para que se combine con el ácido carbónico libre y con los bicarbonatos, para producir el carbonato de calcio, el cual actúa como coagulante.

Si se usan grandes cantidades de cal en el tratamiento, una parte de la materia orgánica suspendida se puede disolver debido al hidróxido de calcio, por lo tanto, el efluente puede resultar con características peores que el agua residual original. Por otro lado, si se usa poca cal, el efluente no llega a clarificarse.

B) Sulfato de aluminio (alumbre).

Cuando se añade alumbre a un agua residual que contiene alcalinidad de bicarbonato de calcio y magnesio, la reacción que ocurre se puede representar de la forma siguiente:



CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

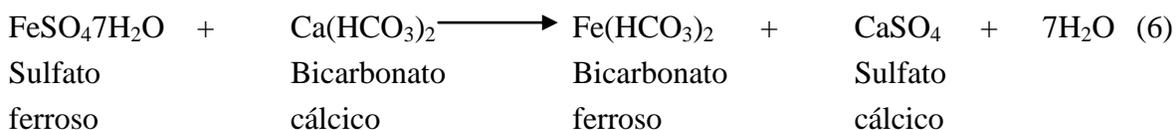
El hidróxido de aluminio es un floculo insoluble gelatinoso que sedimenta lentamente en el agua residual, atrapando materia suspendida y produciendo otros cambios. La reacción es similar cuando se tiene bicarbonato de magnesio en lugar de sales de calcio.

Debido a que la alcalinidad se reporta en términos de carbonato de calcio (CaCO_3), el peso molecular es 100g/mol, por lo tanto, la cantidad de alcalinidad necesaria para reaccionar con 10 mg/L de alumbre es:

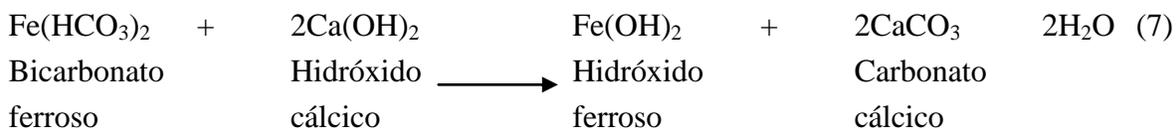
$$10.0 \times (3 \times 100) / 666.7 = 4.5 \text{ mg/L}$$

C) Sulfato ferroso y cal.

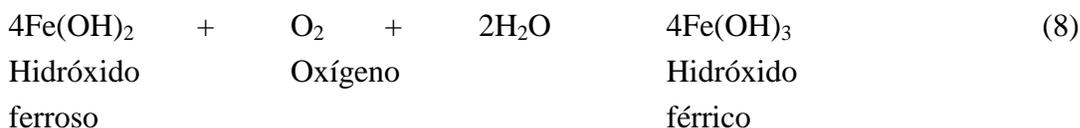
En la mayoría de los casos el sulfato ferroso no se emplea solo como precipitante, se debe adicionar cal al mismo tiempo, para formar el precipitado. La reacción con el sulfato ferroso se muestra en la siguiente ecuación:



Si se adiciona cal en forma de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ la reacción que tiene lugar es:



El hidróxido ferroso se oxida luego a hidróxido férrico, con el oxígeno disuelto en el agua:



CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

El hidróxido férrico formado es un floculo gelatinoso insoluble, similar al de la alúminia. De acuerdo a las reacciones tenemos:

Para 10 mg/L de sulfato ferroso se necesita:

Alcalinidad:

$$10.0 \times ((100 / 278) = 3.6 \text{ mg/L}$$

Cal

$$10.0 \times (2 \times 56) / 278 = 4.0 \text{ mg/L}$$

Oxígeno:

$$10.0 \times 32 / (4 \times 278) = 0.29 \text{ mg/L}$$

Durante el tratamiento, la oxidación se favorece a un pH alto, el cual se logra con un exceso de cal. En el tratamiento de las aguas residuales, la experiencia ha demostrado que los mejores resultados se obtienen adicionando en exceso la cal hasta producir un color rosa a la fenolftaleína como indicador. Debido a la formación del hidróxido férrico depende del oxígeno disuelto, la ecuación (8) no se completa si las aguas residuales no contienen oxígeno. Se puede usar sulfato férrico en lugar del sulfato ferroso y se evita la adición de cal y la necesidad de oxígeno disuelto.

Para una adecuada selección de los coagulantes se debe tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- a) Los tipos y cantidades de productos químicos que van a ser utilizados como coagulantes, floculantes y controladores de pH
- b) Su manejo y forma de adicionarse.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

La selección más adecuada del tipo de coagulante deberá estar basada en la “prueba de jarras” (determinación empírica) y en la medición de potencial Z (determinación teórica); ambas deben realizarse para optimizar el tratamiento.

Por otro lado, los productos hidrolizados formados por los *coagulantes* presentan una sedimentación lenta, en estos casos, la adición de un coadyuvante, como son los polielectrolitos, aumenta la eficiencia de sedimentación notablemente; por tal razón, la floculación es la operación unitaria aplicada a las aguas residuales, para que por medio de sustancias químicas (polielectrolitos) se aumente el contacto entre las partículas finas en la coagulación, para formar flóculos, los cuales sedimentan más fácilmente.

La floculación se ve favorecida por la agitación moderada del agua residual, por medio de paletas a baja velocidad. Si la agitación es demasiado rápida, los flóculos se rompen, por tal motivo, debe controlarse la velocidad dentro de un rango en el que se puedan formar los flóculos grandes para que sedimenten. Los compuestos utilizados para la floculación son polielectrolitos de origen natural o sintético. El funcionamiento de un polielectrolito es específico, dependiendo del tamaño, densidad y carga de las partículas a flocular y del pH del polímero en solución. Para la correcta selección del polielectrolito se recomienda hacer la prueba de jarras.

La experiencia ha demostrado que los polímeros aniónicos en combinación con las sales de hierro y aluminio, son más efectivos para remover coloides, cuando se utilizan en los sedimentadores primarios. Las especies catiónicas generalmente se aplican en el espesamiento de lodos. En algunos casos, se utilizan como coadyuvantes para mejorar la sedimentación de las sales metálicas en el tratamiento de las aguas residuales industriales.

Existen dos tipos de floculación, los cuales se explican a continuación:

1) Floculación natural. En este tipo de floculación actúan los procesos naturales de sedimentación, provocados por la agregación de partículas suspendidas para formar flóculos capaces de precipitarse a causa de su volumen y aumento de masa. Esta agregación

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

de los coloides empezará inmediatamente después de la adición de los floculantes a causa del movimiento browniano en el líquido, conociéndose como una floculación pericinética. Este tipo de floculación requiere un tiempo de retención muy grande, pues no se controla el movimiento browniano y consecuentemente el tiempo de sedimentación, por lo cual no es recomendable su empleo.

2) Floculación inducida.

En la floculación inducida u ortocinética se propician las colisiones de las partículas por medios mecánicos o hidráulicos, para acelerar y controlar el proceso de sedimentación.

En la floculación inducida se usa la agitación para acelerar la agregación de partículas coloidales. Las partículas se mueven en el sentido de la rotación del agua, y debido a diferencias en su peso, viajan a diferentes velocidades, lo que provoca una colisión entre ellas y por consiguiente un aumento en su tamaño.

A este proceso se le conoce como floculación ortocinética.

La agitación en los floculadores se puede lograr por medios hidráulicos o mecánicos:

- a) La floculación hidráulica es el método más simple que se emplea para generar gradientes de velocidad por disipación de energía en un fluido mediante baffles o deflectores instalados en la trayectoria del fluido de alimentación al tanque de sedimentación.
- b) La floculación mecánica se basa en la disponibilidad de agitadores mecánicos que ofrecen una mayor versatilidad en el diseño y operación de los equipos.

Los floculantes pueden ser de origen natural o sintético, orgánicos e inorgánicos; entre los sintéticos orgánicos se tienen los polielectrolitos que pueden ser aniónicos, catiónicos o neutros.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Los floculantes inorgánicos naturales más usados son: bentonita y sílice activada. Las arcillas del tipo de la bentonita son floculantes naturales, se utilizan siempre en combinación con coagulantes del tipo de hidróxidos metálicos, se aconseja una dosis de 3 a 20 mg/L, y se recomienda realizar la prueba de jarras para determinar la dosificación óptima. La sílice activada es un polisilicato cargado negativamente (polielectrolito aniónico), que se prepara mediante la neutralización parcial a un pH de 6 a 7, de una solución concentrada de silicato de sodio. Esta se diluye subsecuentemente y debe ser empleada cuando está recientemente preparada, ya que es termodinámicamente inestable.

Los floculantes sintéticos orgánicos son polímeros con cadenas ramificadas o lineales, se caracterizan por el número de subunidades o por su peso atómico. Las dosis que generalmente se emplean son pequeñas, menos de 1 mg/L, pues una sobredosis puede reestabilizar los sólidos, haciéndolos muy difíciles de sedimentar. Se recomienda hacer la prueba de jarras para la correcta dosificación del polímero.

En el tratamiento de las aguas residuales industriales se utilizan diversos productos químicos para precipitar los contaminantes. En la Tabla 2.6 y 2.7 se presenta una relación de las descargas industriales y los coagulantes – floculantes usados en cada caso.

Tabla 2.6. Relación de descarga y coagulante – floculante.

Descarga industrial.	Reactivo químico.
Alimenticia	Acido lignin-sulfónico. Acido dodecibencen-sulfónico. Trisulfato de glucosa. Cloruro férrico (III). Sulfato de aluminio.
Coque y Alquitrán	Cal o Hidróxido de sodio.
Electrolítica	Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S).
Extrativa de Cadmio	Xantatos.

Fuente: Ramírez Cortina, 1992.

Tabla 2.7. Relación de descarga y coagulante – floculante 2.

Descarga industrial	Reactivo químico
Fertilizantes	Para fosfatos: Sales ferrosas (II). Sulfato de aluminio. Cal. Para nitrógeno: Sulfato de magnesio y fosfatos.
Fotográficos	Sulfato de aluminio.
Galvanoplastia	Cal
Metalúrgica y Minera	Cal y Sulfato de aluminio.
Plástico	Cal
Papel	Bentonita, coalín, almidón. Poliácridamida.
Productos Químicos Orgánicos	Sulfato de aluminio y Cloruro férrico (III).
Refinería de Petróleo	Sulfato de aluminio y Cloruro férrico (III).
Textil	Bentonita y Sulfato de aluminio.

Fuente: Ramírez Cortina, 1992.

2.2.2. FILTRACIÓN.

La filtración del agua es un proceso físico que separa los sólidos suspendidos y la materia coloidal de la fase líquida por medio de un material poroso o por membranas. Durante la filtración el agua llena los poros del filtro y las impurezas son retenidas en el empaque por adhesión. Aunque los filtros de membrana tienen una alta eficiencia, la rentabilidad del proceso hace que estos filtros se limiten para tratamientos específicos y que sea la filtración con materiales porosos la más común para el agua.

Tanto en el campo de la potabilización como en el del tratamiento del agua residual, este proceso es siempre complementario de otros. Para evaluar su eficiencia se emplean los criterios de producción de agua por corrida y la eliminación de turbiedad. En la medida en que se emplean medios más finos mayor es la eficiencia lograda pero menor es la duración de la corrida. Para mantener el buen rendimiento se debe lavar periódicamente el filtro, lo que supone por una parte, un alto consumo de agua procesada para este fin, y por otro, la

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

interrupción del proceso. El lavado de estos sistemas se realiza en sentido ascendente hasta una expansión del lecho de entre 20% y 50%. La duración de corrida oscila entre 20 y 140 h, siendo el óptimo de 30 a 40 h en potabilización y de 6 a 48 h en tratamiento de efluentes secundarios, con un óptimo a las 24 h.

Las características más importantes del proceso de filtración se tiene:

- Remueve partículas y materia coloidal no sedimentable después de la floculación biológica o química, o de ambas.
- Incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, fósforo, DBO, DQO, metales pesados, asbestos, bacterias, huevos de helmintos, virus y otras sustancias.
- Mejora la eficiencia y reduce el costo de desinfección a través de la remoción de materia orgánica suspendida y otros materiales no deseados.
- Asegura la operación continua de la planta y calidad constante del efluente.

2.3. TRATAMIENTO SECUNDARIO.

El tratamiento biológico o secundario de aguas residuales supone la remoción de contaminantes mediante actividad biológica. La actividad biológica se aprovecha para remover principalmente sustancias orgánicas biodegradables, coloidales o disueltas, mediante su conversión en gases que escapan a la atmósfera y en biomasa (floculo biológico sedimentable y sólidos inorgánicos) extraíble mediante sedimentación. La actividad biológica también se utiliza para remover nitrógeno y fósforo del agua residual. El proceso se esquematiza en la Figura 2.4.

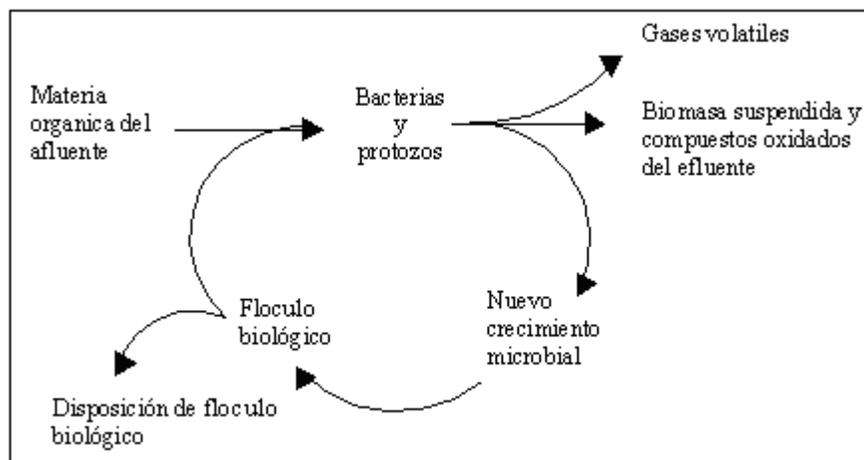


Figura 2.4. Descomposición microbiana de la materia orgánica.

Fuente: Romero Rojas, 1999.

En forma general, el tratamiento biológico se lleva a cabo por la transferencia de la materia orgánica del agua residual hacia la película o flóculo (biomasa), por contacto interfacial, y/o adsorción. La materia orgánica es utilizada por los microorganismos para su metabolismo y generación de células nuevas, mientras que las células viejas mueren deslavándose y precipitándose al fondo.

En los sistemas biológicos, se tienen poblaciones complejas de microorganismos mezcladas e interraccionadas (Figura 2.5), en las que cada uno de ellos tiene su propia curva de crecimiento, la cual depende de las condiciones del sistema, pH, temperatura, aireación o

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

anaerobiosis y disposición de nutrientes. Estas condiciones también afectan la eficiencia del proceso biológico.

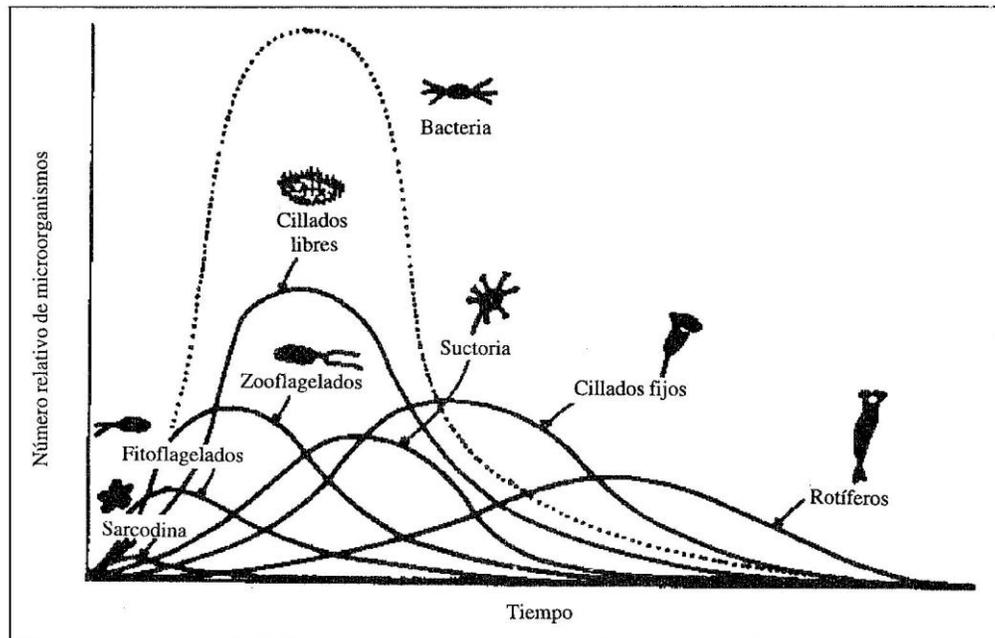


Figura 2.5. Curvas de crecimiento de microorganismos en agua residual con tratamiento biológico.

Fuente: Ramírez Cortina, 1992.

Es importante conocer si el agua residual a tratar por medios biológicos contiene compuestos químicos tóxicos que puedan ser inhibitorios del crecimiento microbiano, en tal caso, se podría hacer un pretratamiento para su eliminación o plantear un tratamiento fisicoquímico.

Los procesos biológicos se clasifican de acuerdo al metabolismo de los microorganismos utilizados en la biodegradación de la materia orgánica en cuatro grupos principales:

- Aerobios. El tratamiento se efectúa en presencia de oxígeno
- Anaerobios. El tratamiento ocurre en ausencia del oxígeno
- Anóxicos. En este proceso se remueve nitrógeno, mediante conversión de nitrato en nitrógeno gaseoso, en ausencia de oxígeno. El proceso anóxico se conoce también, como desnitrificación anaerobia pero como las vías principales de conversión bioquímica no son anaerobias sino una modificación de las vías aerobias, se considera

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

más apropiado denominarlo proceso anóxico en vez de anaerobio. Los anóxicos se llevan a cabo en presencia de oxígeno combinado (NO_3^- , SO_4^{2-} , etc.)

- Facultativos. En estos procesos existen poblaciones mixtas, además de que intervienen microorganismos, denominados facultativos, que son indiferentes a la presencia o ausencia de oxígeno

En la Tabla 2.8 se resumen los principales procesos de tratamiento biológico y su uso más importante.

Tabla 2.8. 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 Krauss - zanjón de oxidación Lagunas aireadas Digestión aerobia Lagunas aerobias	Remoción de DBO y nitrificación Remoción de DBO y nitrificación Remoción de DBO y 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 Adherido	Bardenpho Desnitrificación Desnitrificación	Remoción de DBO, N y P Remoción de nitrógeno Remoción de nitrógeno
Anaerobios	Suspendido	Digestión anaerobia Anaerobio de contacto	Remoción de DBO y estabilización Remoción de DBO
	Híbrido	Lagunas anaerobias Manto de lodos – flujo Ascensional (PAMLA) oUASB	Remoción de DBO y estabilización Remoción de DBO y SS
	Adherido	Filtro anaerobio Lecho expandido	Remoción de DBO y estabilización Remoción de DBO y estabilización

Fuente: Romero Rojas, 1999.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Otra clasificación de dichos procesos es por el tipo de crecimiento de los microorganismos, algunos ejemplos de estos procesos se muestran en la Tabla 2.9.

- Crecimiento suspendido. En estos sistemas los microorganismos se encuentran libres dentro del tanque. Tienen la ventaja de que han sido muy aplicados por lo que fácilmente se encuentra información sobre ellos. El mayor inconveniente es que, frecuentemente, tienen problemas de decantación, por ello los microorganismos se escapan con el efluente. Requieren, además, de energía para realizar el mezclado del contenido del tanque.
- Crecimiento adherido. En estos sistemas los microorganismos se encuentran adheridos en un soporte. Tienen, por regla general, menor volumen que los sistemas con biomasa suspendida y producen flóculos con alto grado de sedimentabilidad.
- Crecimiento mixto. Es una combinación de los anteriores

Tabla 2.9. Sistemas biológicos de tratamiento.

Biomasa suspendida	Aerobios	Lodos activados (9 variantes) Lagunas aireadas Lagunas de oxidación de tasa alta Nitrificación
	Anóxicos	Tipo de lodos Reactor de lecho ascendente
	Anaerobio	Digestor de tasa alta Contacto anaerobio Reactor de lecho de lodos con flujo ascendente
Biomasa fija	Aerobios	Filtro percolador Disco biológico rotatorio Filtro sumergido Lecho fluidificado
	Anóxicos	Filtro sumergido Disco biológico rotatorio Lecho fluidificado
	Anaerobio	Filtro anaerobio Disco biológico rotatorio Laguna anaerobia Lecho fluidificado
	Combinado	Uso de suelo como método de tratamiento

Fuente: Jiménez Cisneros, 2006.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Dependiendo del régimen de flujo predominante, los procesos se consideran de flujo continuo o intermitente y de acuerdo al tipo de mezclado en completa, flujo pistón o flujo arbitrario.

La principal diferencia entre un proceso aerobio y un anaerobio consiste en la forma en que utiliza la energía contenida en el sustrato, por lo tanto, una bacteria anaerobia utiliza el 10% de dicha energía para funciones de reproducción, dando origen a nuevas células y el 90% restante lo dirige a la producción de gas metano; mientras que una bacteria aerobia emplea de 60% a 65% de la energía del sustrato en la síntesis de nuevas células, mientras la fracción restante es utilizada para realizar las funciones metabólicas. Las implicaciones ingenieriles de lo anterior son muy importantes. Por un lado, la vía anaerobia produce pocos lodos (células), mientras que la aerobia genera una cantidad aproximadamente cinco veces mayor. Sin embargo, los efluentes tratados por vía anaerobia pueden requerir un postratamiento, ya que, conservan aún cierto contenido de materia orgánica y no tiene oxígeno disuelto, lo que afecta a los cuerpos receptores.

2.3.1. PROCESOS AEROBIOS.

Las bacterias son los organismos más importantes en el tratamiento aerobio de las aguas residuales, porque son excelentes oxidantes de la materia orgánica y crecen bien en aguas residuales, siendo capaces de formar una capa floculenta gelatinosa de buenas características para la remoción de la materia orgánica. Algunos ejemplos de estas bacterias son: *Zooglea ramigera*, *Pseudomonas*, *Flavobacterium* y *Alcaligenes*.

El oxígeno molecular libre es agregado al sustrato (materia orgánica) para propiciar su oxidación o mineralización. La reacción es muy eficiente porque libera grandes cantidades de energía que es almacenada, preferentemente, en la biomasa sintetizada y los residuos de dicho catabolismo son compuestos estables de bajo contenido energético. El proceso aerobio se ejecuta para obtener la energía necesaria para la síntesis del tejido celular nuevo.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

En ausencia de materia orgánica el tejido celular se respirara endogenamente y se convertirá en productos gaseosos y en energía para mantenimiento (Figura 2.6).

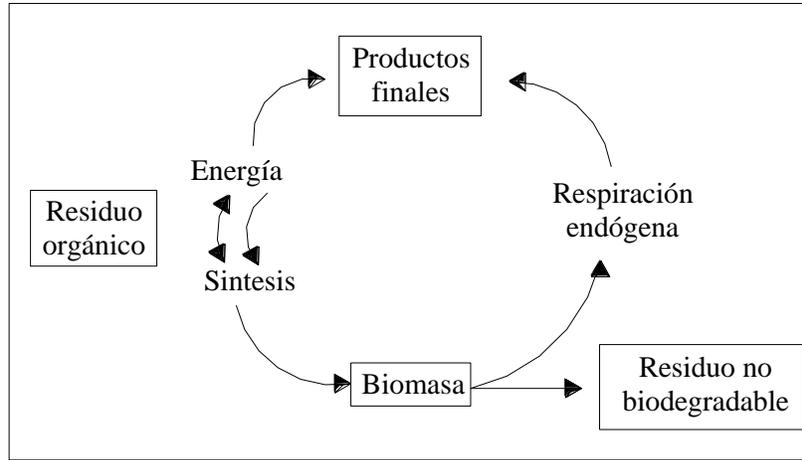
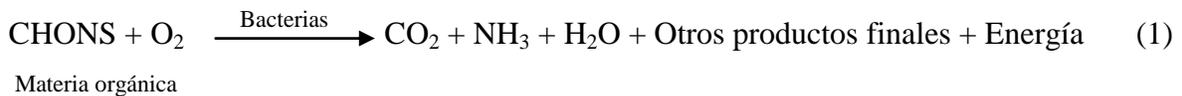


Figura 2.6. Proceso Aerobio.

Fuente: Romero Rojas, 1999.

Las tres reacciones esenciales, catabolismo, anabolismo y autólisis ocurren simultáneamente y suelen describirse de la siguiente manera:

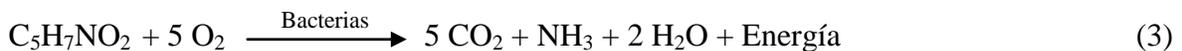
- Catabolismo (oxidación o descomposición)



- Anabolismo (síntesis o asimilación)



- Autólisis (respiración endógena o auto oxidación)



CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

La fórmula $C_5H_7NO_2$ representa la composición promedio celular bacteriana sugerida por Hoover y Porges en 1952, ampliamente citada en la literatura. De la relación (3) se deduce que para oxidar 113 gramos de biomasa se requieren 160 gramos de oxígeno; es decir, que para oxidar un gramo de biomasa se consumen 1.42 gramos de oxígeno.

Como guía interpretativa se puede suponer que un tercio de la DBO disponible se usa en reacciones catabólicas y que dos tercios de ella satisface en reacciones anabólicas (Figura 2.7). La reacción de autólisis no se completa como se indica teóricamente. En realidad se forman productos orgánicos estables, puesto que una porción de la biomasa celular es resistente a la descomposición aerobia. La literatura menciona en general, un 77% de la biomasa como porción biodegradable, en términos de sólidos suspendidos volátiles.

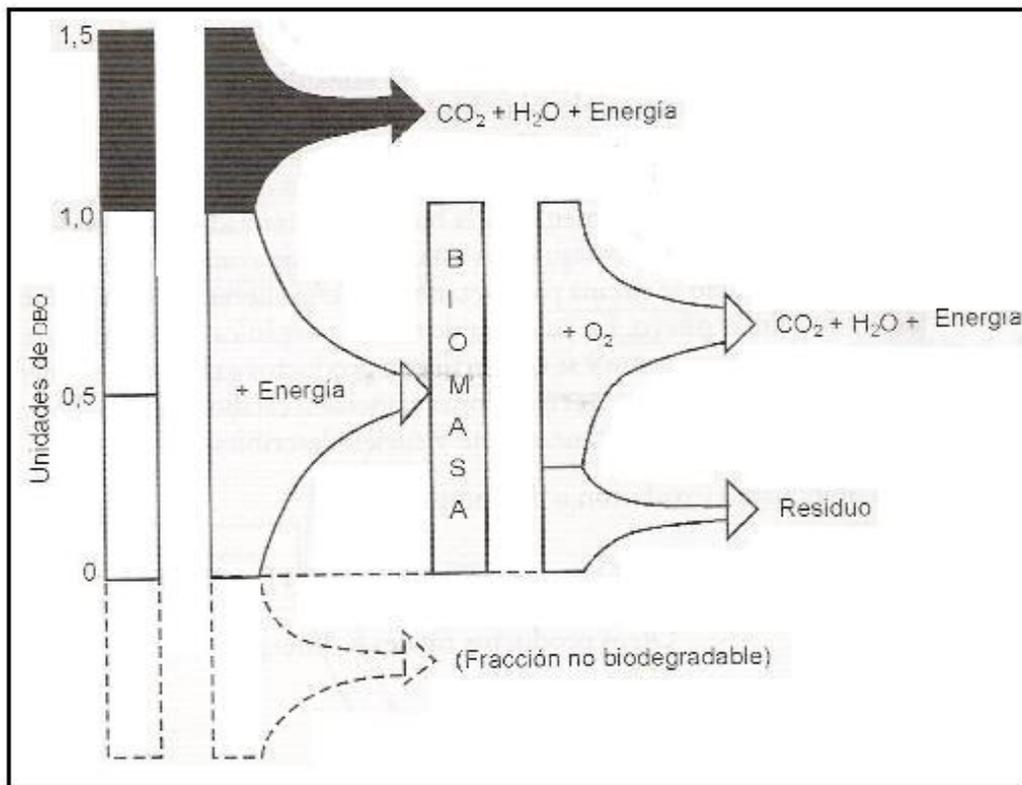


Figura 2.7. Reacciones de oxidación biológica aerobia.

Fuente: Romero Rojas, 1999.

A continuación se presentan algunos ejemplos de los procesos aerobios más representativos utilizados para el tratamiento de las aguas residuales.

2.3.1.1. LODOS ACTIVADOS.

El proceso de lodos activados fue desarrollado en Inglaterra, en 1914 por Edward Arden y W.T. Lockett y puesto en práctica en 1916 en Manchester, Inglaterra. Todos los procesos de lodos activados tienen en común el contacto de aguas residuales con floculo biológico previamente formado en un tanque de aireación. (Figura 2.8). El lodo activado consiste en una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos; tiene la propiedad de poseer una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos que se encuentran en el agua residual, a la cual debe su nombre de activado.

El resultado final es una porción de materia orgánica susceptible de descomposición biológica, convertida en compuestos inorgánicos y el resto, transformada en lodo activado adicional. La materia orgánica biodegradable contenida en el agua residual es degradada en forma aerobia por microorganismos presentes en los flóculos, en sustancias más simples e inocuas para el ambiente.

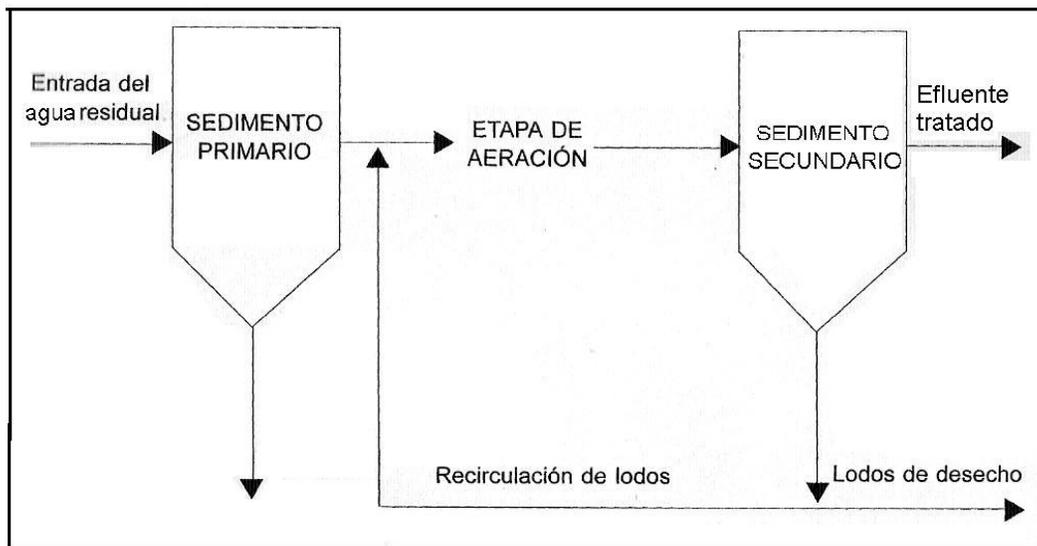


Figura 2.8. Proceso de lodos activados convencional.

Fuente: Jiménez Cisneros, 2006.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Es esencialmente un tratamiento por contacto de flóculos biológicos suspendidos en tanques de aireación con sistema de sedimentación secundario anexo. Este proceso tiene la particularidad de recircular los lodos o flóculos maduros, para mantener una "siembra" constante y joven de microorganismos adaptados (lodos activados) en el tanque.

El afluente (agua residual que se va a tratar) entra al tanque en donde tiene contacto con los microorganismos, por esta razón, se le denomina tanque de aireación. Los flóculos abundantes en bacterias, hongos y protozoarios se mantienen en circulación y suspensión, ya sea por agitación mecánica o neumática. En el tanque, el oxígeno necesario es introducido por inyección de aire a presión o por aireación mecánica (agitación). Los objetivos que se buscan al introducir el aire son oxigenar la biomasa y mantenerla en suspensión.

En este sistema de tratamiento el agua residual llega al tanque de aireación y permanece bajo un flujo turbulento durante un tiempo de retención adecuado para la degradación de la materia orgánica, hasta un nivel fijado por el diseño del proceso.

Transcurrido cierto tiempo, el efluente conocido como "licor mezclado" se pasa a un sedimentador secundario en donde se separa el agua clarificada de los lodos formados por los microorganismos sedimentados (biomasa). Si en esta etapa no se consigue una óptima separación de los sólidos presentes, que en su mayoría son microorganismos formados en el tanque de aeración, no se tendrá una adecuada degradación.

Después de que el sistema ha alcanzado un estado estable, del tanque sedimentador (sedimentador secundario) se extraen los lodos por la parte inferior.

Una parte de los lodos sedimentados y maduros se desechan, equivalente al nuevo material celular formado y la otra, se recircula hacia el tanque de aeración para que continúen trabajando con una concentración óptima de lodos o flóculos suspendidos. A pesar de su amplia aplicación se ha encontrado que, con frecuencia, existen problemas de decantación; el costo del equipo de aeración, así como la operación y mantenimiento son elevados.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

El sistema de lodos activados es el más aplicado en el mundo. La versatilidad y criterios de diseño bien definidos lo han convertido en el sistema de referencia para el tratamiento de agua residual municipal.

La remoción de materia orgánica por este sistema es de 55 - 95% de DBO, 50 - 80 % de DQO y 55 - 95 % en sólidos suspendidos, dependiendo del tipo de aguas residuales que se traten. Para lograr eficiencias de 85% a 95% el tiempo de retención celular es de 4 a 15 días, mientras que el tiempo de retención hidráulico es de 4 a 8 h, manteniendo una recirculación del 25% al 50%.

Las ventajas de este tipo de tratamiento son: obtención de un efluente final claro, relativamente estable en putrefacción, ausencia de olores durante el proceso y altos rendimientos en remoción de materia orgánica. Los inconvenientes son: volumen de lodos mayor al que se obtienen con otros procesos y altos costos de operación.

El medio ambiental de un sistema de lodos activados puede considerarse un medio acuático, es colonizado por microorganismos muy variados, como bacterias, hongos, protozoos y metazoos pequeños; la agitación constante y la recirculación de los lodos hacen un medio inhóspito para la macrofauna acuática.

Las bacterias constituyen el grupo mas importante de microorganismos por su función en la estabilización del material orgánico y en la formación del floculo de lodo activo. Se han encontrado una gran variedad de especies de bacterias en los lodos activados siendo muy comunes las de los géneros *Alcaligenes flavobacterium*, *Bacillus* y *Pseudomonas*. En el proceso de purificación son importantes las bacterias nitrificantes; tales como *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*, al igual que la *Zooglea ramigera*, considerada por algunos autores como organismo principal en la formación de lodo activo por su gran habilidad para formar floculo biológico.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Uno de los problemas mas comunes en los procesos de tratamiento biológico aerobio es la sedimentabilidad pobre de los lodos activados asociados con crecimientos filamentosos, los cuales producen floculo biológico flotante. La presencia de bacterias filamentosas es adversa a las buenas características de sedimentabilidad del floculo de lodos activados y debe eliminarse.

Los hongos normalmente no abundan en los lodos activados; se presentan en condiciones poco comunes, por ejemplo, cuando se trata un agua residual con contenido deficiente de nitrógeno. Así, pueden dominar la comunidad y ser responsables de la mayor parte del tratamiento; sin embargo, aunque son tan efectivos como las bacterias para la estabilización del material orgánico, su asentamiento es mas difícil pues producen también floculo biológico flotante. El problema de floculo biológico flotante de hongos, en lodos activados, surge también en el tratamiento de residuos ácidos, donde los mohos, hongos filamentosos, crecen mejor y pueden conducir a la formación de floculo biológico de pobre asentamiento. En general, aunque se introducen algas con las aguas residuales, la ausencia de luz adecuada y la mezcla intensa hace que normalmente no se encuentren en los lodos activados.

Los protozoos son, con las bacterias, los organismos más abundantes en lodos activados. Algunos son completamente o parcialmente sapróbios y compiten con las bacterias por el material orgánico; otros son holozoicos y usan material orgánico sólido como alimento, al igual que bacterias y otros protozoos, proveyendo un enlace vital en la cadena alimenticia y en el proceso de tratamiento. Los más comunes, posiblemente, sean los protozoos flagelados; también se han encontrado amibas en las paredes de los tanques de aireación. Los metazoos, formas superiores, son usualmente raros en lodos activados; algunas veces se encuentran rotíferos, sobre todo en procesos de aireación prolongada con carga orgánica baja. Generalizando, el proceso biológico que tiene lugar en un sistema aerobio de lodos activados se puede esquematizar como se indica en la Figura 2.9.

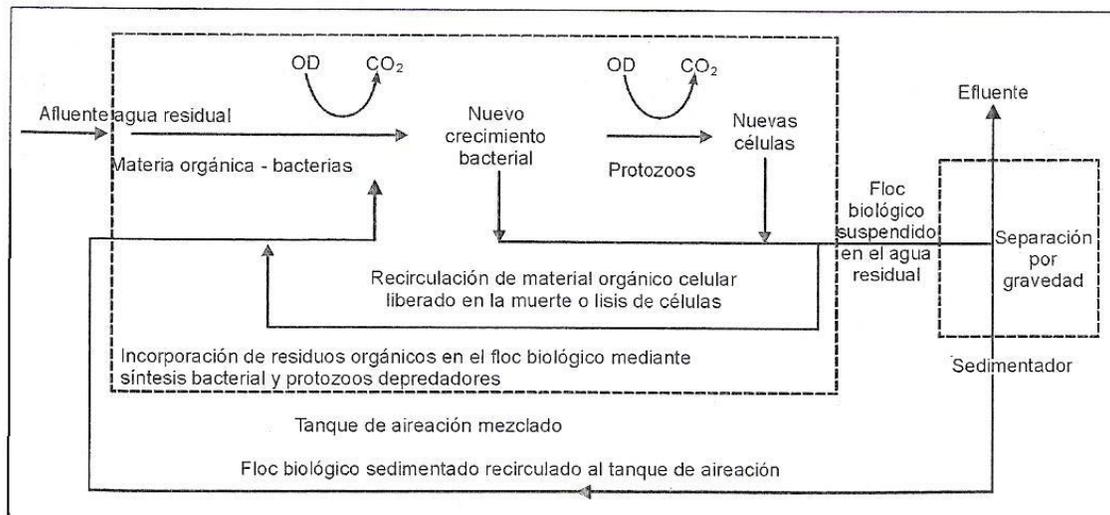


Figura 2.9. Esquema del proceso de lodos activados.

Fuente : Romero Rojas, 1999.

2.3.1.2. FILTROS PERCOLADORES.

El filtro percolador, también se conoce como filtro rociador, biotorre y biofiltro se clasifica dentro de los procesos biológico con crecimiento de biomasa fija. Es considerado el proceso biológico de tratamiento de agua más antiguo. El mecanismo principal de remoción de la materia orgánica de este sistema no es la filtración, sino la adsorción y asimilación biológica en el medio de soporte. En la opción de baja tasa no se requiere recirculación, a diferencia del sistema de lodos activados donde ésta es determinante para mantener los microorganismos en el licor mezclado. Sin embargo, ambos sistemas son similares en cuanto a la dependencia de la oxidación biológica de la materia orgánica presente en el agua residual produciendo dióxido de carbono y energía, la cual se usa como sustento y promotor para el crecimiento de la biomasa.

Una vez que el filtro se encuentra operando, la superficie del medio comienza a cubrirse con una película viscosa y gelatinosa que contiene principalmente bacterias. El efluente de la sedimentación primaria se distribuye uniformemente en el medio de soporte del filtro a través de un sistema distribuidor de flujo. El oxígeno es necesario para que se lleve a cabo el metabolismo biológico aerobio; éste es suministrado por la circulación natural del aire a

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

través de los intersticios entre el medio filtrante y, parcialmente, por el oxígeno disuelto presente en el agua residual. Posteriormente, comienza el desarrollo microbiano en la interfase anaerobia del medio filtrante, generando el crecimiento de organismos anaerobios y facultativos que, junto con los organismos aerobios, forman el mecanismo básico para la remoción de la materia orgánica. Durante la operación, la capa anaerobia pierde la habilidad de adherirse al medio y el paso del agua residual la desprende (lava) favoreciendo el crecimiento de una nueva película.

Los filtros percoladores se clasifican de acuerdo con las cargas hidráulica y orgánica en filtros de tasa baja, media, alta y super alta. La carga hidráulica es el volumen total del líquido que pasa por el filtro por unidad de tiempo por unidad de superficie de filtro ($m^3/m^2 \cdot d$). La carga orgánica se expresa como kilogramos de DBO por día por volumen de medio filtrante ($kg/m^3 \cdot d$). La mayoría de los filtros de baja tasa están diseñados con profundidades de lechos empacados que varían entre 1.5 y 3.0 m, mientras que los de alta tasa tienen profundidades de 1.0 a 2.0 m.

Los filtros que tienen empaque plástico se construyen con profundidades que varían entre 9 y 12 m. El empleo de un empaque sintético ha permitido manejar cargas orgánicas e hidráulicas altas debido a su gran área de superficie y espacios vacíos.

En un filtro biológico se pueden presentar algunos problemas de olores, sobre todo cuando el agua residual llega en condiciones sépticas. Esto es particularmente cierto para la variante de baja tasa. Los filtros biológicos de baja tasa pueden alcanzar eficiencias en la remoción de DBO de 90% a 95% y producir un afluyente nitrificado. Los filtros de media y alta tasa tienen eficiencia de 85% a 90% y su efluente está sólo parcialmente nitrificado.

El agua residual en los filtros de forma cilíndrica se distribuye, generalmente, sobre el empaque mediante un sistema rotatorio consistente en un dispositivo de dos o más brazos con boquillas (Figura 2.10), los cuales giran en plano horizontal. La velocidad de giro varía de acuerdo con la reacción dinámica del agua que sale, y debe ser inferior de una

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

revolución en 10 minutos para una distribución de dos brazos. Además, deben evitarse velocidades mayores de 1.2 m/s.

La ventilación de los filtros percoladores es muy importante para favorecer el mantenimiento de las condiciones aerobias. Los fabricantes de empaques de tipo sintético recomiendan 0.1 m^2 de área de ventilación por cada 3 a 4.5 m de altura de la torre del filtro, o bien, 0.1 m^2 de superficie de ventilación por 23 m^2 de la superficie del filtro.

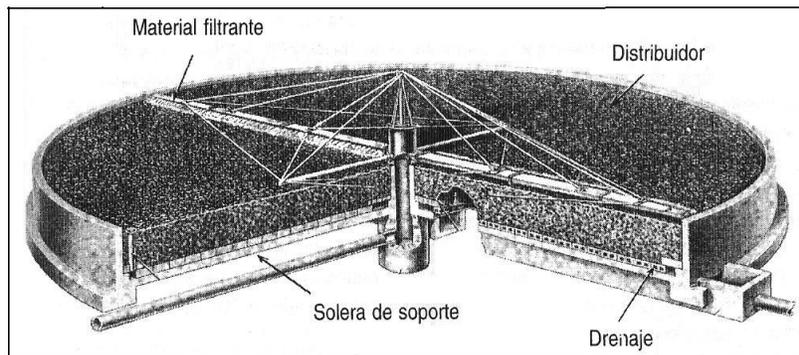


Figura 2.10. Filtro percolador.

Fuente: Jiménez Cisneros, 2006.

2.3.1.3. BIODISCOS.

Los biodiscos son clasificados como un tratamiento aerobio de crecimiento fijo de biomasa. Consiste en una serie de discos circulares de 2 a 3 m de diámetro, fabricados de poliestireno o cloruro de polivinilo (PVC) desplegado o corrugado, de 10 a 20 mm de ancho, montados sobre un eje horizontal con espaciamiento de 20 mm entre los discos adyacentes. La flecha transmite el movimiento de un equipo motorreductor. Los discos están sumergidos en 40% de su superficie, de manera que al rotarlos, la biopelícula entra en contacto con el agua residual y con el aire en forma alternada con velocidad de 2 a 6 rpm. De esta forma se realiza la aeración de los microorganismos. Posteriormente, el agua tratada pasa a un sedimentador secundario, en donde se separa la biopelícula desprendida que constituye los lodos de purga del sistema y que se deben tratar antes de su disposición final. El proceso no requiere recirculación y sus costos de operación son reducidos.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

La rotación es el mecanismo de eliminación del exceso de sólidos en los discos por medio de fuerzas cortantes que crea la misma rotación y para mantener los sólidos en suspensión, de tal modo que pueden ser transportados desde el reactor al sedimentador.

Los discos biológicos rotatorios son, generalmente, más confiables que otros procesos de capa fija, debido a la gran cantidad de masa biológica presente. Esto también les permite resistir mejor las sobrecargas hidráulicas y orgánicas. La disposición en serie de este sistema con flujo pistón elimina los cortocircuitos y amortigua las sobrecargas. El sistema está constituido por un sedimentador primario, un sistema de discos biológicos rotatorios y un sedimentador secundario (Figura 2.11).

En general, se realizan arreglos de dos o tres tanques de biodiscos conectados en serie, lo que puede llevar a altas eficiencias en la remoción de materia orgánica y en la nitrificación. En el tratamiento de agua residual doméstica se alcanza una remoción de materia orgánica de 90% a 95% medida como DBO_5 . Puede considerarse 2 a 3 m^2 de biodisco por habitante como una aproximación de diseño.

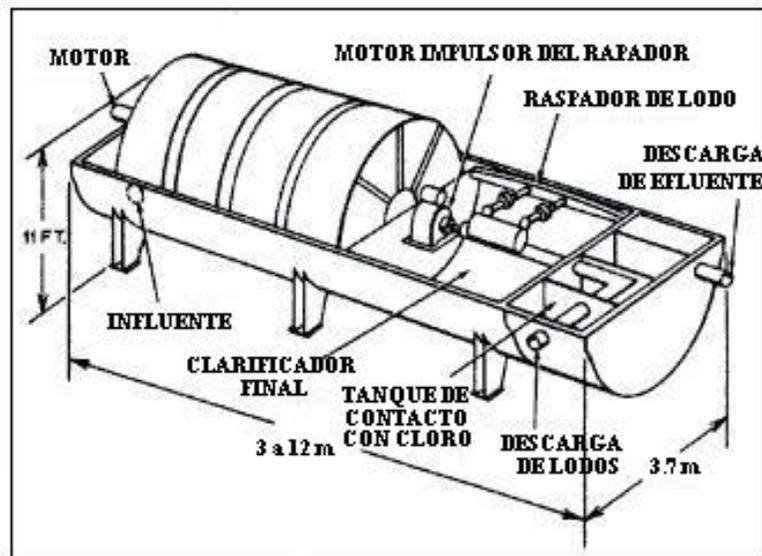


Figura 2.11. Unidad de biodiscos empaquetados.

Fuente: David H. F. Liu, 2000.

2.3.1.4. LAGUNAS DE OXIDACIÓN.

El sistema se basa en el mantenimiento de condiciones aerobias en lagunas, separadas por diques. Este método es una solución en zonas llanas.

Las lagunas y estanques de oxidación tienen muchas aplicaciones en el tratamiento de las aguas residuales crudas. Están diseñadas para funcionar descubiertas y cuentan o no con concreto y acero en su construcción. Una laguna es una zanja diseñada que recibe el agua residual cruda que no ha sido expuesta a un tratamiento biológico de oxidación previo. La excavación es de bajo costo lo que permite un sistema rápido de construcción. La operación es mínima y el flujo es por gravedad a menos que cuente con un sistema de recirculación.

La recirculación puede reducir el aumento de sólidos en el fondo, la zanja de oxidación es usualmente un sistema facultativo, por lo tanto, las condiciones anaerobias existen cerca del fondo y las condiciones aerobias prevalecen en las capas superiores de la laguna.

2.3.2. PROCESOS ANAEROBIOS.

El proceso anaerobio o fermentación lo definió Pasteur como la vida sin aire. Es la descomposición u oxidación de compuestos orgánicos, por medio de microorganismos, principalmente bacterias en ausencia de oxígeno libre (anaerobiosis) para obtener la energía requerida para el crecimiento y mantenimiento de los organismos anaerobios.

Este sistema degrada con mayor eficiencia la materia orgánica, produciendo una mezcla de gas, llamada biogás, compuesta de metano (60 – 70%), bióxido de carbono (30 – 40%) y trazas de ácido sulfhídrico e hidrógeno. Este proceso ocurre en forma natural en los pantanos y en el fondo de las lagunas y lagos, donde no hay oxigenación.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

El proceso anaerobio es menos eficiente en producción de energía que el aerobio, puesto que la mayoría de la energía liberada en el catabolismo anaerobio proveniente de la sustancia descompuesta aún pertenece en los productos finales orgánicos reducidos como el metano, generándose una cantidad de biomasa mucho menor que la producida en el proceso aerobio. El proceso se puede representar esquemáticamente como se indica en las Figuras 2.12 y 2.13.

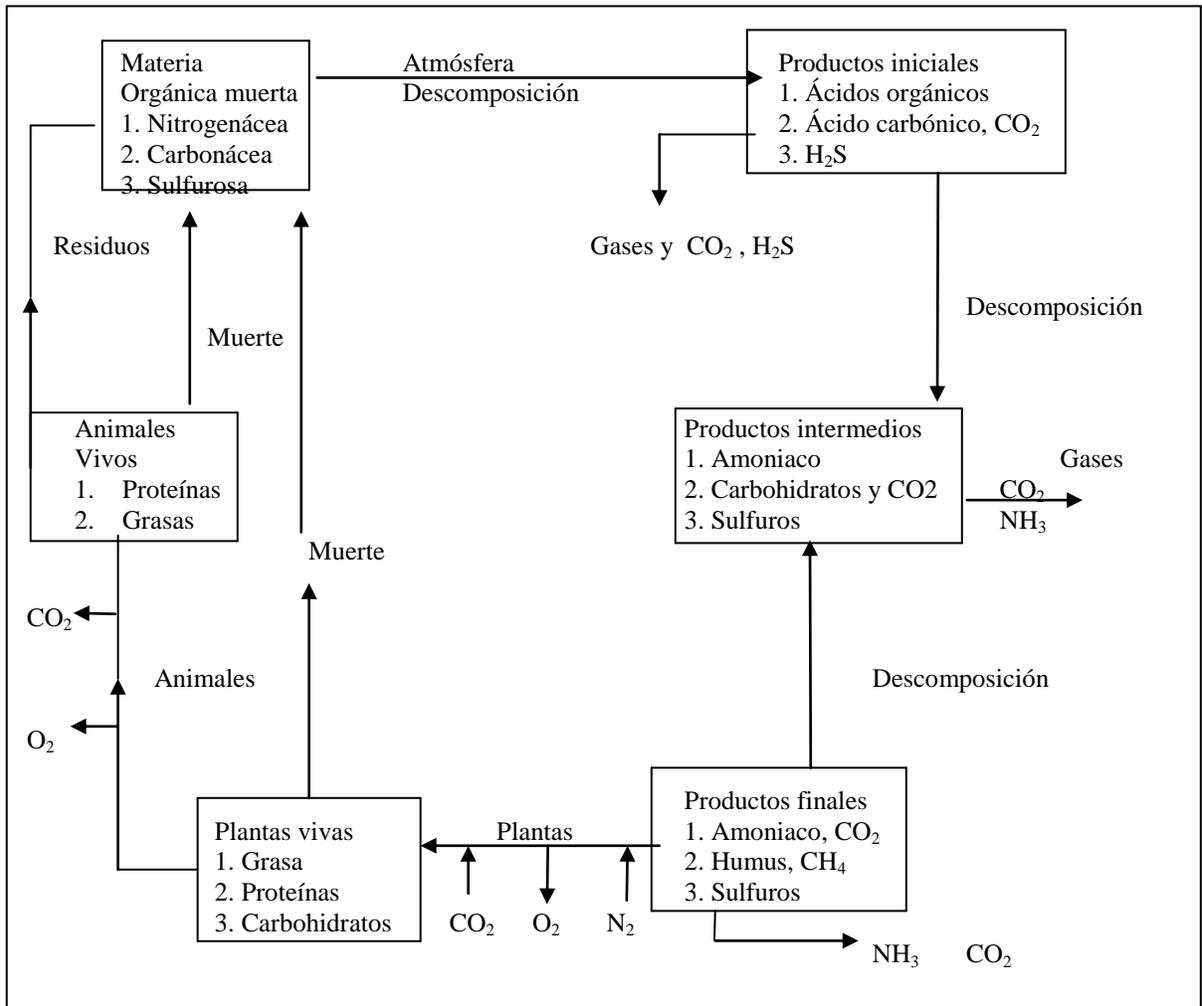
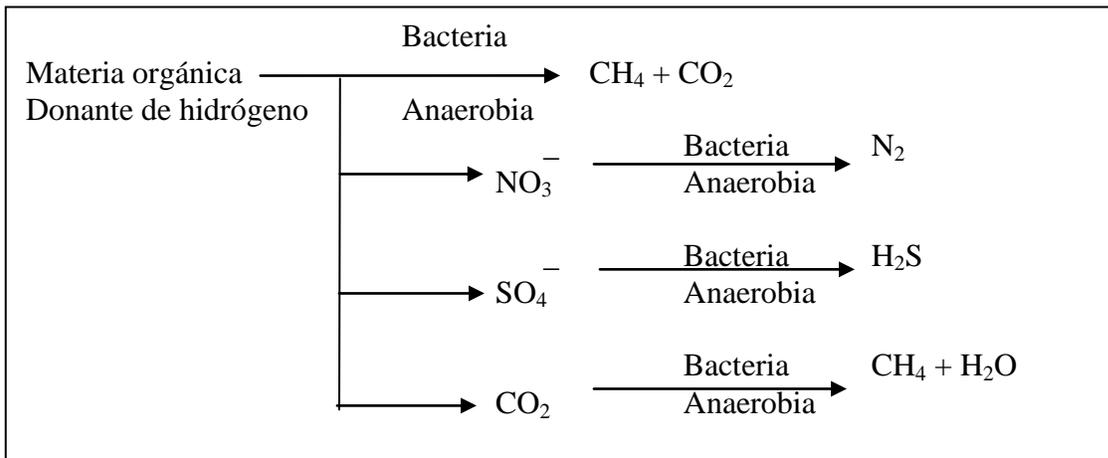


Figura 2.12. Transformación natural anaerobia.

Fuente: Romero Rojas, 1999.



Fuente: Romero Rojas, 1999.

El uso de los sulfatos y del CO₂ como aceptadores de electrones requiere condiciones estrictamente anaerobias, es decir, ausencia de oxígeno y nitratos. Los carbohidratos contienen oxígeno que puede emplearse como aceptor de los electrones; una porción del carbohidrato es oxidado en CO₂ y ácidos orgánicos mientras que otra porción es reducida en aldehídos, cetonas y alcoholes. Prácticamente, la descomposición anaerobia es posible con todos los compuestos orgánicos que contienen oxígeno en sus moléculas.

En el tratamiento anaerobio se puede considerar que ocurren los procesos básicos de la descomposición anaerobia, es decir, desnitrificación de nitratos, respiración de sulfatos, hidrólisis, y fermentación acetogénica y metanogénica. El proceso microbiano es muy complejo y está integrado por múltiples reacciones paralelas y en serie, interdependientes entre sí. En su forma más elemental, se puede considerar el proceso anaerobio de descomposición de la materia orgánica integrado por dos etapas: fermentación de ácidos y fermentación de metano, que ocurren simultáneamente, como se representa en la Figura 2.14.

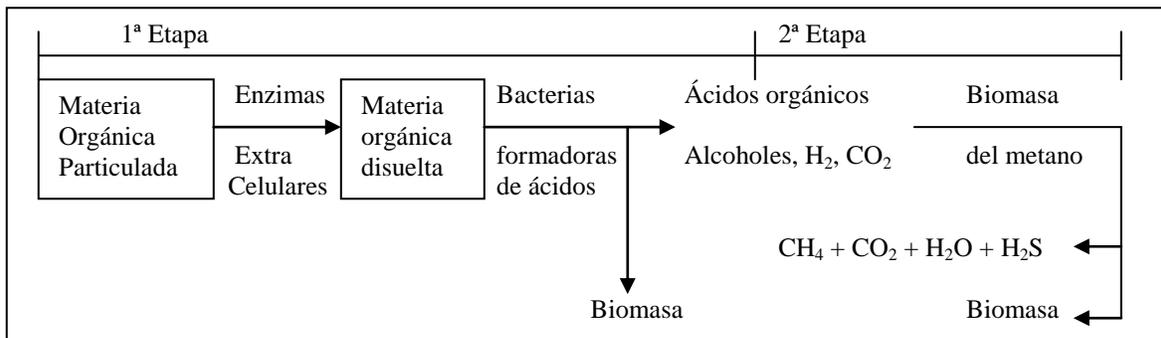


Figura 2.14. Diagrama elemental del proceso anaerobio.

Fuente: Romero Rojas, 1999.

En la fermentación ácida (Ácido génesis) los compuestos orgánicos de estructura compleja (proteínas, grasas, carbohidratos) son primero hidrolizados en unidades moleculares más pequeñas y sometidos a biooxidación para convertirlos en ácidos orgánicos simples de cadena corta, principalmente ácido acético, propiónico y butírico, hidrógeno y CO₂. En esta etapa la degradación se lleva a cabo por bacterias facultativas y anaerobias, llamadas bacterias acidogénicas.

En la fermentación metanogénica (Metanogénesis), los microorganismos metanogénicos, en condiciones estrictamente anaerobias, convierten los productos de la fermentación ácida en CO₂ (bióxido de carbono) y CH₄ (metano) principalmente. El metano no puede ser utilizado por las bacterias en condiciones anaerobias.

Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas y tienen una velocidad de reproducción más lenta que las bacterias acidogénicas, ocasionando la acidificación del sistema de tratamiento, siendo esto a veces una limitación del tratamiento debido a que disminuye su eficiencia.

El tratamiento anaerobio se aplica tanto a aguas residuales con alto contenido de materia orgánica, como a los lodos residuales de las plantas de tratamiento.

Las ventajas de este tratamiento son:

- Baja producción de lodos residuales.
- Producción de biogás, el cual puede ser utilizado como combustible.
- Baja demanda de nutrientes (fósforo y nitrógeno).
- Lodos residuales estables.

Los inconvenientes de este sistema son:

- Largos períodos de tiempo de retención (3 - 10 días).
- Períodos relativamente largos para estabilizar el sistema al principio.
- Altas temperaturas necesarias para lograr un adecuado tratamiento, lo cual representa gasto de energía.

Los sistemas más comunes para el tratamiento anaerobio son los siguientes:

- Digestores.
- Lagunas anaerobias.
- Fosas sépticas.

En el caso de descargas industriales se usan los digestores, de los que actualmente existen diferentes patentes comerciales. En la Figura 2.15 se muestra un diagrama de un digestor anaerobio de una etapa con mezcla completa.

Las fosas sépticas han sido utilizadas para tratamiento de las aguas residuales domésticas en poblaciones rurales.

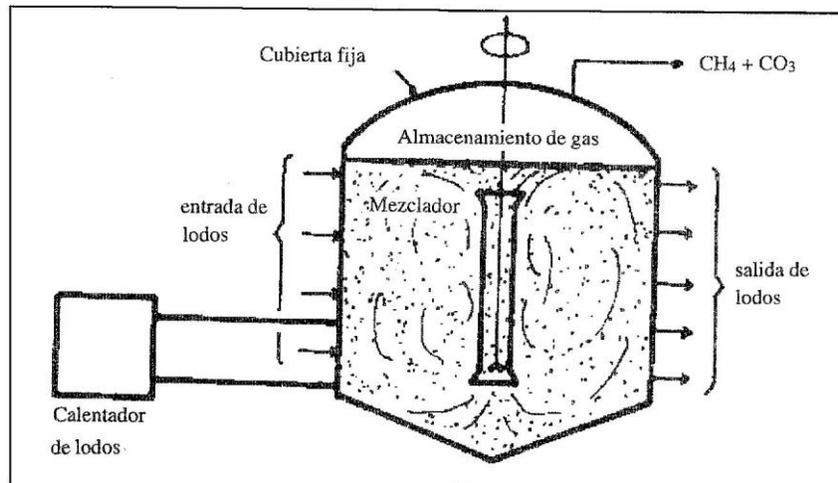


Figura 2.15. Diagrama de un digester anaeróbico de una etapa con mezcla completa.

Fuente: Ramírez Cortina, 1992.

2.3.2.1. FOSA SÉPTICA.

Es un sistema individual de disposición de aguas residuales para una vivienda o un conjunto de ellas; consiste en uno o varios tanques o compartimientos, en serie, de sedimentación de sólidos en el que se combina con la digestión. El tanque séptico recibe las aguas residuales, permitiendo la sedimentación y que pase el líquido relativamente claro al campo de absorción, el cual está en la próxima estación de tratamiento. El resto de los sólidos son digeridos lentamente en el fondo del tanque.

La descomposición anaerobia en un tanque séptico se lleva a cabo de forma lenta. Son tanques generalmente subterráneos, pueden ser cilíndricos o prismáticos rectangulares, sellados, construidos en materiales impermeables como concreto, fibra de vidrio, acero, etc. Situado a más de 15 m de cualquier fuente de abastecimiento. Debe tener una salida para gases. La relación de área superficial a profundidad debe ser mayor de 2. El período de retención es de más de 24 horas. La remoción de DBO en un tanque séptico puede ser del 30 al 50%. Los sólidos sedimentables acumulados se remueven periódicamente y se descargan en una instalación de tratamiento. Los tanques sépticos son económicos debido a que su tratamiento incompleto es recomendable para pequeños flujos.

La función más utilizada del tanque séptico es la de acondicionar las aguas residuales para disposición subsuperficial en lugares donde no existe un sistema de alcantarillado sanitario. En la Figura 2.16 se muestra una fosa séptica de una casa.

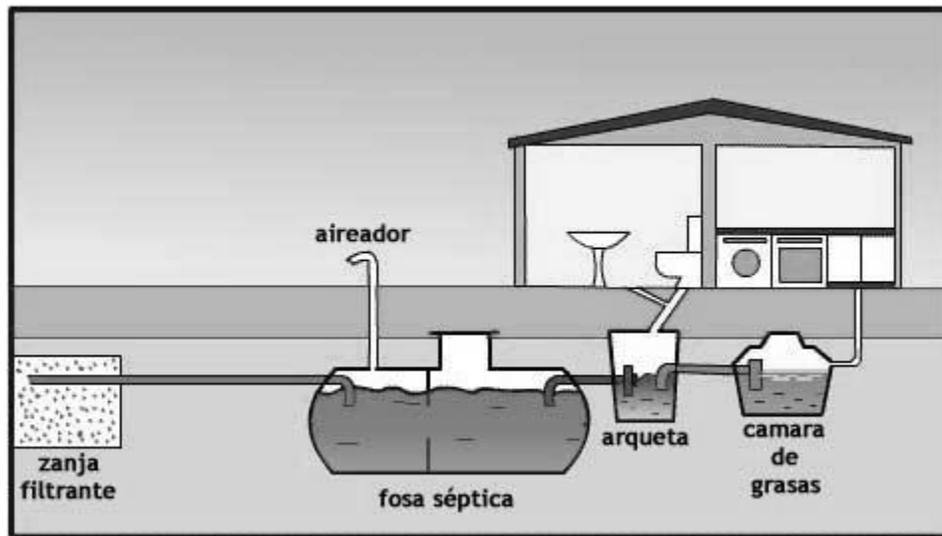


Figura 2.16. Fosa séptica.

Fuente: www.yahoo.com.mx

2.3.2.2. TANQUES IMHOFF.

Se conocen también como tanques de doble acción en el cual se realizan los procesos de sedimentación y digestión. Se dividen en tres cámaras que son:

1. La sección superior, (cámara de sedimentación)
2. La sección inferior (cámara de digestión de lodos)
3. El respiradero y la cámara de natas o áreas de ventilación del gas.

Un tanque Imhoff es un sistema séptico de dos escenarios donde el lodo se digiere en un tanque separado. Esto evita mezclar el lodo digerido con las aguas residuales entrantes. También algunos diseños de tanque sépticos tienen un segundo lugar donde el efluente de la primera etapa anaerobia se airea antes de que se drene en el campo de la filtración.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

El proceso que toma lugar en un tanque imhoff es similar al tanque séptico excepto que el tanque Imhoff esta diseñado para que el flujo atraviese a la cámara superior que está separada de la cámara de digestión resultando en dos tanques. El compartimiento superior actúa sólo como zona de sedimentación donde los más pequeños y los no digeribles toman lugar. En la Figura 2.17 se muestra un tanque Imhoff tipico.

El proceso es recomendable para ciudades y comunidades pequeñas, es decir, para comunidades que oscilen entre los 5,000 habitantes o menos. Los tanques Imhoff ofrecen ventajas para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, ya que integran la sedimentación del agua y la digestión de los lodos sedimentados en la misma unidad, necesita una operación muy simple y no requiere de partes mecánicas, sin embargo, para su uso correcto se requiere que las aguas negras pasen por el proceso de cribado y remoción de arena. Es conveniente en climas calurosos pues esto facilita la digestión de los lodos. En la selección de esta unidad de tratamiento se debe considerar que los tanques Imhoff pueden producir olores desagradables.

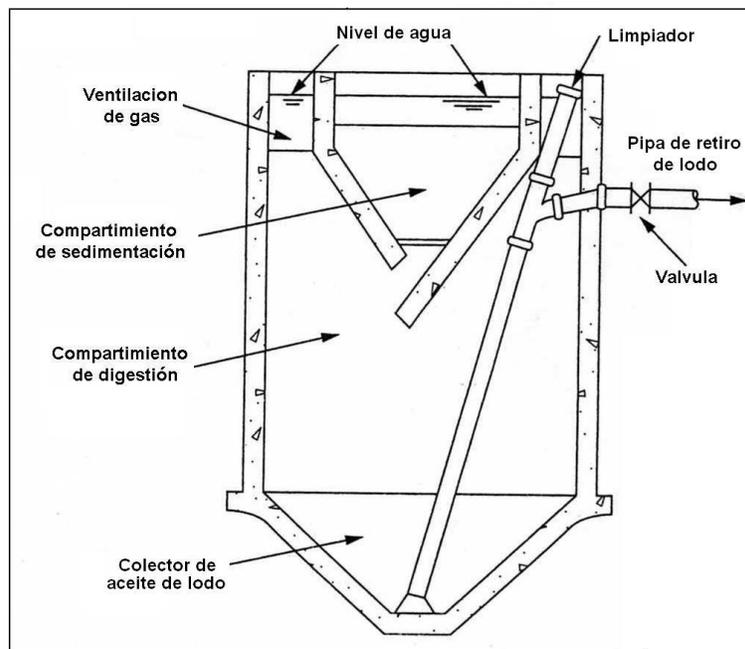


Figura 2.17. Tanque Imhoff típico de una comunidad pequeña.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1991.

2.3.2.3. REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE.

También conocido como RAFA por sus siglas o en inglés UASB es un proceso continuo de tratamiento anaerobio de aguas residuales en el cual el desecho circula de abajo hacia arriba a través de un manto de lodos o filtro, para estabilizar parcialmente la materia orgánica. El desecho se retira del proceso en la parte superior; normalmente se obtiene gas como subproducto del proceso. Figura 2.18.

Un RAFA consta de cuatro partes esenciales:

1. El tanque del Reactor.
2. El sedimentador (ubicado en la parte superior).
3. El Sistema hidráulico (toberas, canaleta, influente y efluente).
4. La cámara de almacenaje de gas.

El tratamiento se efectúa por contacto del agua residual con el lodo granulado o floculento en el cual se deben desarrollar bacterias con buenas características de sedimentación, bien mezcladas por el gas en circulación. La concentración de SSV en el manto de lodos puede alcanzar los 100 g/L. Los gases de la digestión aerobia se adhieren a los granos o partículas biológicas o causan circulación interna para proveer la formación de más granos.

El gas libre y las partículas adheridas al gas se elevan hacia la parte superior del reactor. Las partículas que se elevan chocan con el fondo de las pantallas desgasificadoras para que el gas se libere. Los granos desgasificados caen de nuevo sobre la superficie del manto de lodos y el gas libre se captura en los domos localizados en la parte superior del reactor. La porción líquida fluye al sedimentador donde se separan los sólidos residuales del líquido. Esta recirculación interior de sólidos removidos permite edades de lodos prolongadas y hace innecesaria la recirculación externa de lodos.

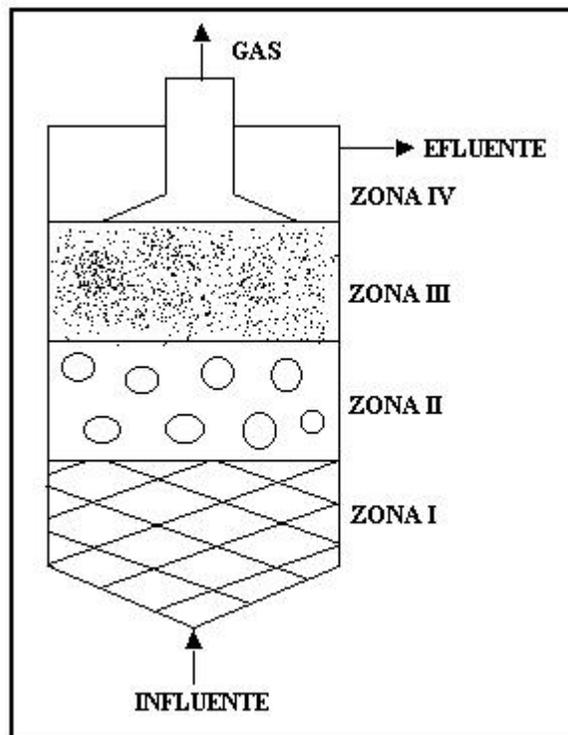


Figura 2.18. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente.

Fuente: Hernández Pérez, 1996.

2.3.3. PROCESOS ANOXICOS.

Es el tratamiento en el cual existen los procesos aerobio y anaerobio. Es llevado a cabo por bacterias desnitrificadoras principalmente y un ejemplo de estos procesos son las lagunas facultativas. Son aquellas en las cuales la parte superior permanece aerobia mientras que en la inferior no hay oxígeno disuelto (Figura 2.19). La mayoría de las lagunas de estabilización son del tipo facultativo. En efecto, casi todas contienen materia sedimentada que conforma una capa bentónica anaerobia. En el caso de una laguna que recibe aguas residuales crudas, el volumen de la materia sedimentable puede ser considerable; en cambio, en un sistema de lagunas conectadas en serie, la carga de materia sedimentable decrece en la medida que se pasa a lo largo del sistema.

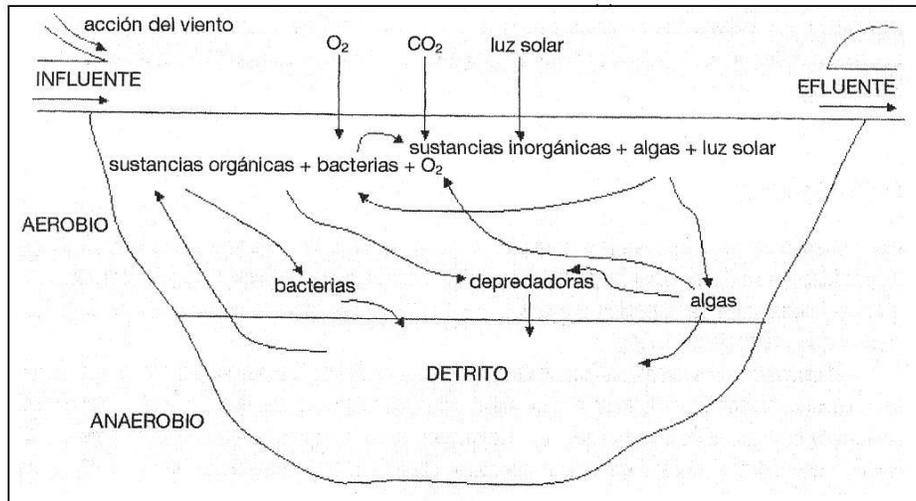


Figura 2.19. Laguna facultativa.

Fuente: Jiménez Cisneros, 2006.

El tratamiento en las lagunas es de tipo biológico e intervienen bacterias y algas. La oxigenación se realiza, en parte, gracias a la acción fotosintética de las algas presentes. Se eliminan nutrientes (N y P) en proporción de 70% a 90%, por lo que el efluente de estas aguas no agrava el problema de la eutrofización. Requiere un desazolve cada 5 o 10 años. Las lagunas deben estar alejadas de las zonas habitacionales por problemas de olores. Se debe efectuar un estudio del suelo previo a la instalación (para evitar la contaminación de los mantos freáticos), de los vientos dominantes y curso del agua que actuará como receptor final. El principal requerimiento es la necesidad de superficie.

Los procedimientos para el diseño pueden ser empíricos o teóricos y toman en cuenta los factores que afectan la degradación de la materia orgánica por las bacterias y la producción del oxígeno por las algas. En ambos casos, la temperatura mínima de operación, la intensidad de la luz y la concentración de nutrientes son importantes.

En general, se recomienda una profundidad de 1.8 metros, pero puede ser mayor cuando el afluente contenga exceso de sólidos sedimentables. Lagunas de poca profundidad pueden dar resultados muy pobres, especialmente durante períodos de verano excesivamente calientes y secos o cuando las aguas residuales contienen grandes cantidades de sólidos sedimentables.

2.4. TRATAMIENTO TERCIARIO.

El tratamiento terciario, se define así, porque generalmente se aplica a los efluentes de los tratamientos secundarios para lograr un mayor grado de depuración del agua, de acuerdo al uso que se le quiera dar.

Los procesos más comunes en el tratamiento terciario son: adsorción con carbón activado, intercambio iónico, ósmosis inversa y desinfección; otros procesos también importantes son, electrodiálisis y ultrafiltración. Estos procesos no son exclusivamente terciarios, también se aplican como tratamiento único en los casos que así se requieren.

El tratamiento terciario generalmente se aplica para remover sustancias inorgánicas disueltas como son metales pesados y sales minerales. El caso de la adsorción con carbón activado se aplica a la remoción de compuestos orgánicos resistentes a la oxidación en el tratamiento secundario.

2.4.1. DESINFECCIÓN.

Es la inactivación y/o destrucción de microorganismos (en teoría patógenos, pero incluye de todo tipo) del agua, aunque la esterilización, es decir, la destrucción total de la materia viviente en el agua, no es el objetivo. En general, la desinfección tiene por objeto reducir los coliformes fecales hasta menos de 1,000 NMP/100 mL en agua residual y a 2.2 NMP/100 ml, que es el límite de detección en agua potable.

Un buen desinfectante debe ser tóxico para los microorganismos en concentraciones lo suficientemente bajas, pero inocuo para los humanos o animales. Además, debe persistir una concentración remanente para prevenir el recrecimiento de organismos en el sistema de distribución de agua potable.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Los factores adversos para la desinfección son la turbiedad y la presencia de organismos resistentes al desinfectante. La turbiedad ofrece protección a los organismos y las partículas mayores pueden absorber el desinfectante, reduciendo la concentración efectiva para la desinfección.

Los organismos más resistentes a los desinfectantes son los virus, quistes y esporas. Para destruirlos es necesario más tiempo de contacto y de concentraciones mayores de desinfectante.

Los desinfectantes que se emplean son los del grupo de halógenos, el ozono o la plata. También se emplea la radiación gama o ultravioleta. La cloración, en América, es sinónimo de desinfección, mientras que en Europa la ozonación es la práctica común. En la Tabla 2.10 se comparan los tres métodos de desinfección mas comunes.

Tabla 2.10. Comparación de los principales métodos de desinfección.

VARIABLE	UV	OZONO	CLORO
Tiempo de contacto	1 a 10 s	10 a 20 min	30 a 50 min
Tanque de reacción	ninguno	requerido	requerido
Mantenimiento	mínimo	considerable	mediano
Instalación	sencilla	complicada	complicada
Influencia de			
- materia suspendida	alta	alta	alta
- temperatura	ninguna	alta	alta
- pH	ninguna	baja	alta
Residuos en el agua	nulo	mínimo	presentes
Influencia del agua	nula	presente	presente
Corrosión	ninguna	presente	presente
Toxicidad	bajo	alto	bajo

Fuente: Jiménez Cisneros, 2006.

Los principales factores que influyen en la acción de un desinfectante son:

- Tiempo de contacto.
- Tipo y concentración del agente químico.
- Intensidad y naturaleza de los agentes físicos.
- Temperatura.
- Número y tipo de organismos.

2.4.1.1. CLORACIÓN.

La cloración es el proceso más usado en el tratamiento de aguas residuales industriales y urbanas. Algunos efluentes industriales que normalmente se cloran antes de su descarga a las aguas receptoras son los procedentes de las plantas de azúcar de caña, de azúcar de remolacha, de centrales lecheras, de las fabricas de pasta y papel, de las plantas textiles, de las de curtido, de las petroquímicas, de las farmacéuticas y de las de acabado superficial de los metales.

Este es un método de tratamiento que puede emplearse para muy diversos propósitos, en todas las etapas de un tratamiento de aguas negras y aún antes del tratamiento preliminar. Generalmente se aplica el cloro a las aguas negras con los siguientes propósitos:

- 1) Desinfección o destrucción de organismos patógenos.
- 2) Prevención de la descomposición de las aguas negras para:
 - a) Controlar el olor.
 - b) Protección de las estructuras de la planta.
- 3) Como auxiliar en la operación de la planta para:
 - a) La sedimentación.
 - b) El abultamiento de los lodos activados.
- 4) Ajuste o abatimiento de la demanda bioquímica de oxígeno.

Los objetivos de la cloración se resumen como sigue:

1. **Desinfección.** Fundamentalmente el cloro es un desinfectante debido a su fuerte capacidad de oxidación, por lo que destruye o inhibe el crecimiento de bacterias y algas.
 2. **Reducción de la DBO.** El cloro produce una reducción de la DBO por oxidación de los compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales.
 3. **Eliminación o reducción de colores y olores.** Las sustancias que producen olor y color presentes en las aguas residuales se oxidan mediante el cloro.
-

4. **Oxidación de los iones metálicos.** Los iones metálicos que están presentes en forma reducida se oxidan por el cloro (por ejemplo, ferroso o ferrico y manganoso a mangánico).
5. **Oxidación de los cianuros a productos inocuos.**

La aplicación del cloro como oxidante ha sido limitada debido a la formación de compuestos orgánicos halogenados, en especial cloroformo y otros trihalometanos (THM). Como oxidante, el cloro remueve eficientemente el cianuro.

Se debe tener siempre una cantidad excedente de cloro, llamada cloro residual, para tener una eficaz capacidad desinfectante en las tuberías; para ello, es conveniente rebasar el punto de quiebre. En la Figura 2.20 se presenta la evolución del cloro residual y el punto de quiebre. Las fases que se distinguen son: primero, la formación de cloraminas, la destrucción de estos compuestos y, por último, la etapa donde se tiene cloro residual.

El cloro se usa en estado gaseoso, sólido o líquido y en forma pura o combinada. El cloro gaseoso es, generalmente, considerado como la forma más rentable para las plantas de tratamiento de gran tamaño (>200 L/S).

El cloro tiene fuerte afinidad por varios compuestos, particularmente por los agentes reductores. En estas reacciones tiende a perder sus electrones y formar el ion cloruro o compuestos organoclorados. Las sustancias con las cuales reaccionan frecuentemente son Fe^{2+} , Mn^{2+} , NO_2 , H_2S así como la mayor parte de los compuestos orgánicos presentes. Las reacciones con los compuestos inorgánicos son rápidas, en cambio, las que se llevan a cabo con los compuestos orgánicos son muy lentas y su grado de desarrollo depende de la cantidad de cloro disponible.

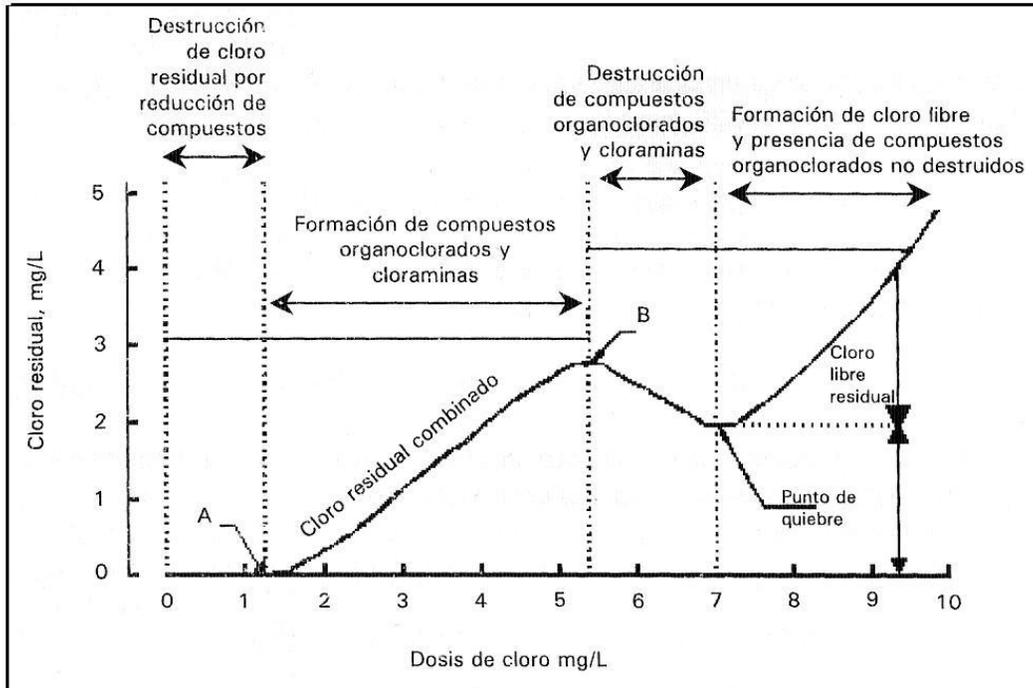


Figura 2.20. Punto de quiebre de cloración.
Fuente: Jiménez Cisneros, 2006.

En la práctica, la cloración del agua potable implica el suministro de 2 a 3 mg/L de cloro, con tiempo de contacto de 15 a 30 min., además de garantizar el adecuado gradiente de velocidad para el mezclado. La dosis típica debe proporcionar al menos 0.2 mg/L de cloro libre residual, después de 15 min de tiempo de contacto. En agua residual las dosis varían entre 10 y 30 mg/L, con tiempo de contacto de 30 min.

La cloración provoca la formación de compuestos en pequeñas cantidades, ya que se han identificado 235 compuestos diferentes en el agua potable, de ellos el 34% son halogenados con cloro. El cloroformo fue el que se encontró en mayor concentración (100 ppb). En 1976, se encontró que una docena de estos compuestos halogenados son mutagénicos y tanto el cloroformo como el tetracloruro de carbono provocan cáncer del tracto digestivo. Es importante tener en cuenta que el daño causado es comparativamente menor al causado por los microorganismos. La EPA estima que existe una muerte adicional por cada 100,000 individuos por el consumo de 2 L/d de agua con 0.05 mg de trihalometanos/L durante 10 años. Para eliminar estos compuestos se requiere de la adsorción sobre carbón activado o intercambio iónico.

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Otras formas de cloración se realizan con hipoclorito de calcio, $\text{Ca}(\text{ClO})_2$; hipoclorito de sodio, NaClO y dióxido de cloro, ClO_2 . El hipoclorito de sodio y de calcio se usan, frecuentemente en plantas de tratamiento pequeñas. El uso del dióxido de cloro presenta algunas propiedades importantes, como el hecho de que no producen subproductos tóxicos.

2.4.1.2. OZONACIÓN.

El ozono, junto con el cloro residual libre son los dos germicidas más potentes y efectivos que se emplean en el tratamiento del agua. Es interesante señalar que el uso del ozono como desinfectante es más antiguo que el del cloro. Entre sus ventajas se tiene la elevada eficiencia para eliminar virus y quistes, la capacidad para controlar problemas de olor, sabor y color y el hecho de que su producto de descomposición sea el oxígeno disuelto. Adicionalmente, su funcionamiento no se ve afectado por el pH. Entre sus desventajas está que se debe producir eléctricamente en la medida en que es empleado, no puede almacenarse y es difícil adaptarlo a las variaciones de carga y de la calidad del agua del afluente. Por ello, la aplicación del ozono se ha limitado a las fuentes de abastecimiento con demanda baja o constante, como es el caso del agua proveniente de acuíferos.

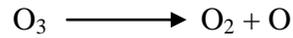
El ozono se emplea también para la oxidación de compuestos orgánicos complejos con el objeto de mejorar su adsorción y biodegradabilidad. Sin embargo, estos dos objetivos son incompatibles: la ozonación produce compuestos polares que se adsorben con menos facilidad pero que tienen menor peso molecular, lo que los hace más biodegradables.

No obstante, que tanto el cloro como el ozono son oxidantes, la desinfección utilizando cloro se lleva a cabo por la oxidación de los grupos aminoácidos de las células bacteriales y de las cápsulas proteicas de los virus. En contraste, el mecanismo de desinfección del ozono es la oxidación citoplasmática completa de los virus y las bacterias.

Las características del ozono y del cloro son complementarias. El ozono proporciona una actividad germicida rápida y buena capacidad viricida, mejora el sabor, color y olor del

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

agua. En cambio, el cloro tiene capacidad germicida constante, es flexible y tiene actividad persistente aún en el sistema de distribución. Por ello, la combinación de ambos compuestos puede resultar un sistema ideal de desinfección.



Las dosis para desinfección de agua potable varían de 2 a 10 mg/L y llegan hasta 40 mg/L en agua residual.

2.4.2. ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO.

Adsorción es el proceso físico y/o químico en el cual la sustancia se acumula en la interfase sólido - líquido. El factor más importante durante la adsorción es la superficie disponible. Se distingue el adsorbato (sustancia que debe ser eliminada) y el adsorbente (fase sólida en la cual ocurre la acumulación).

En el interior del adsorbente las moléculas están completamente rodeadas por moléculas similares y por lo tanto, están sujetas a fuerzas balanceadas, como se indica por la flecha en la Figura 2.21. Las moléculas de la superficie están sujetas a fuerzas desbalanceadas y pueden aprisionar moléculas de un soluto que esté en contacto con el sólido. Este fenómeno se denomina adsorción física o de Van der Waals.

La capacidad de la adsorción está directamente relacionada con el total de la superficie del adsorbente, esto es, entre mayor superficie, se tienen más fuerzas residuales desbalanceadas disponibles para la adsorción.

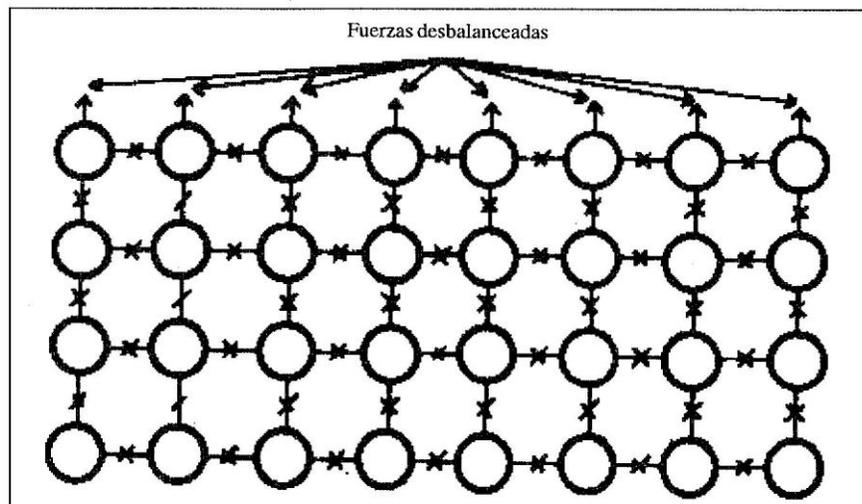


Figura 2.21. Representación de las fuerzas de un sólido.

Fuente: Sette Ramalho, 1986.

Los procesos de adsorción ocurren en tres etapas:

- Transferencia de las moléculas del adsorbato a través de la película que circunda al adsorbente.
- Difusión a través de los poros.
- Captura por medio de enlaces, de las moléculas del adsorbato en la superficie activa del adsorbente.

La estructura molecular del contaminante es importante y define el grado de adsorción que puede ocurrir. Como regla general, los compuestos de cadena ramificada se adsorben más fácilmente que los de cadena lineal. Las moléculas de baja polaridad y solubilidad tienden a ser completamente adsorbidas.

El proceso de adsorción se aplica para compuestos orgánicos no biodegradables o refractarios. La remoción de contaminantes orgánicos depende del peso molecular, polaridad, solubilidad y ramificación de cada compuesto; los que se remueven más eficientemente son aquellos cuyo peso molecular varía entre 100 y 10,000. Es más eficiente para moléculas no disociadas que para soluciones ionizadas.

Para la adsorción de especies iónicas, el mecanismo más importante es la atracción electrostática, la cual depende del pH y la fuerza iónica. La adsorción de electrólitos se usa para el control de metales pesados, fluoruros y otros minerales.

Hay dos tipos de adsorción: química y física. La adsorción química es el resultado de la formación de una capa monomolecular del compuesto adsorbido en la superficie, a través o mediante fuerzas electrostáticas del balance residual de la superficie de las moléculas. La adsorción física resulta de la condensación molecular en las capilaridades de la superficie sólida del adsorbente.

Adsorción en carbón activado.

En la práctica, la operación de adsorción en carbón activado puede ser mediante un sistema intermitente o continuo. En el sistema intermitente el carbón activado se mezcla con el agua residual y se deja reposar, posteriormente se separa y se obtiene el agua tratada. La operación continua se hace con columnas empacadas con carbón granular (40 a 80 mallas), este método es más económico que la operación intermitente.

La remoción de compuestos orgánicos en columnas de carbón activado ocurre por tres mecanismos:

- 1) La adsorción de las moléculas orgánicas.
- 2) La filtración de partículas mayores.
- 3) La sedimentación de materia coloidal.

La eficiencia de remoción depende principalmente del tiempo de contacto entre el efluente y el carbón activado.

Como el efluente pasa a través del lecho, el carbón cercano al punto de alimentación se satura primero, por lo que se reemplaza con carbón fresco. Esto se puede hacer operando

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

varias columnas en serie mediante válvulas. La primera columna se reemplaza cuando queda saturada y el flujo del efluente se corta para pasarlo a una de las últimas columnas en la serie. En instalaciones grandes la regeneración del carbón gastado es esencial debido a intereses económicos.

Carbones como adsorbentes.

Los carbones activados tienen una amplia aplicación como adsorbentes en el tratamiento del agua o plantas potabilizadoras que va desde la eliminación de sabores y olores causados por compuestos orgánicos muy específicos, como organoclorados, carbono orgánico residual, y precursores de los trihalometanos (THM) como las sustancias húmicas. El carbón activado se aplica para remover color, fenoles, DQO, sustancias con bajo peso molecular, la mayoría de los metales pesados, etc. También, es posible la remoción de plaguicidas como: Aldrín, Endrín, Dieldrín, DDD, DDT, DDE, Toxafeno y Aroclor 1242.

En el tratamiento de las aguas residuales se aplica el carbón activado únicamente cuando se desea lograr efluentes de alta calidad. La aplicación más común es como tratamiento terciario en la depuración del agua residual ha sido en tratamiento terciario, después de un proceso biológico. Se ha encontrado que la adición directa de carbón activado en un tanque de aeración aumenta la eficiencia del proceso y resulta, económicamente más competitiva para bajas concentraciones (Figura 2.22).

El afluente al proceso de carbón activado debe ser tener un bajo contenido de materia orgánica medida como DBO y DQO, también debe contener un bajo contenido de sólidos suspendidos. Si las concentraciones son altas, la columna puede convertirse en anaerobia y producir ácido sulfhídrico.

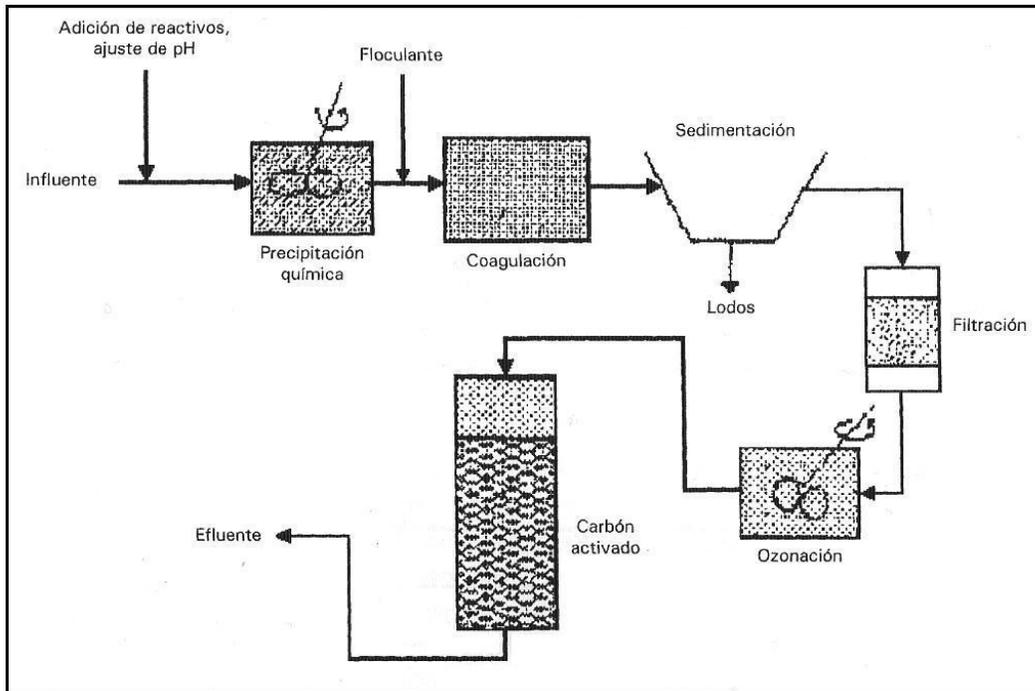


Figura 2.22. Tratamiento con carbón activado.

Fuente: Jiménez Cisneros, 2006.

Otro factor de importancia en la operación del proceso es la regeneración del carbón saturado, ya que la disposición del carbón contaminado con compuestos tóxicos representa un alto riesgo de impacto al medio ambiente.

Preparación del carbón activado.

Los carbones activados se preparan a partir de gran variedad de compuestos orgánicos como madera, lana, lignina, carbón vegetal, turba, bagazo, aserrín, residuos del petróleo y cáscara de nuez, mediante procesos térmicos que implican la deshidratación y carbonización, seguidos por la aplicación de vapor caliente que permite obtener una estructura muy porosa con grandes áreas superficiales (tan elevadas como de 500 a 1,400 m²/g).

CAPÍTULO II: TIPOS DE TRATAMIENTO.

Los mejores son fabricados con base en la lignina. Las mejores características físicas (en especial, dureza y densidad) proceden del carbón. Bajo estas condiciones, el material puede ser bombeado junto con el agua sin que se deteriore.

El carbón activado es clasificado de acuerdo con su estado físico en polvo o granular. O también en su uso como potabilización, decoloración, etc. El Carbón Activado en Polvo (CAP) posee dos propiedades importantes, la filtrabilidad y la densidad. Las principales propiedades físicas del Carbón Activado Granular (CAG) son la dureza y el tamaño de la partícula; éste último es el más barato en la regeneración. La velocidad de adsorción del CAP es 100 veces mayor que la del CAG. Sin embargo, el carbón activado en polvo es el más difícil de manejar.

Reactivación del carbón activado.

La gran ventaja del carbón activado como adsorbente es que permite la posibilidad de su reactivación (hasta 30 veces o más) sin pérdida apreciable de su poder adsorptivo. Usualmente la reactivación se hace calentando el carbón entre 800 - 930° C durante 30 minutos en una corriente de aire – vapor (reactivación térmica). Esta operación puede realizarse en hornos de hogar múltiple (o en un horno rotatorio. Los compuestos orgánicos se queman y el carbón activado se restablece básicamente a su capacidad inicial de adsorción.

Normalmente, se tiene una pérdida de 5% durante la regeneración. La reactivación o reemplazamiento del carbón incide de manera importante en los costos de tratamiento, llegando a representar más del 50% de los costos totales. Cuando se usa para eliminar compuestos volátiles el carbón activado es regenerado mediante vapor.

**CAPÍTULO III.
PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS
PROCESOS UNITARIOS DE
TRATAMIENTO.**

**CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS
PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.**

3.1. SEDIMENTADOR.

El objetivo del tratamiento de aguas residuales por sedimentación consiste en remover los sólidos sedimentables y los flotantes, así como reducir el contenido de sólidos suspendidos. Los tanques de sedimentación primaria tienen eficiencias de remoción de sólidos suspendidos del 50 al 70%, y de DBO del 25 al 40%.

Los parámetros típicos para el diseño de un sedimentador primario rectangular se muestran en la Tabla 3.1, los datos de dimensionamiento típico de los tanques se muestran en la Tabla 3.2, los valores típicos de las constantes empíricas a y b utilizadas para el cálculo de la remoción de DBO y SST se muestran en la Tabla 3.3 y por último, en la Tabla 3.4. se presentan los valores típicos de gravedad específica y concentración de sólidos en tanques de sedimentación primaria.

Tabla 3. 1. Parámetros típicos para un sedimentador primario rectangular.

Parámetro.	Unidad.	Intervalo.	Valor Típico.
Tanque de sedimentación primario seguido por un tratamiento secundario			
Tiempo de retención	h	1.5 – 2-5	2.0
Rapidez de desbordamiento:			
Flujo promedio	m ³ /m ² d	30 – 50	40
Flujo máximo	m ³ /m ² d	80 – 120	100
Sedimentación primaria con retorno de lodos activados			
Tiempo de retención	h	1.5 – 2-5	2.0
Rapidez de desbordamiento:			
Flujo promedio	m ³ /m ² d	24 – 32	28
Flujo máximo	m ³ /m ² d	48 – 70	60

Fuente: Metcalf & Eddy, 2004.

**CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS
PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.**

**Tabla 3. 2. Datos de dimensionamiento típico para tanques de sedimentación
rectangulares y circulares usados para tratamiento de aguas residuales.**

Parámetro.	Unidad.	Intervalo.	Valor Típico.
Rectangular			
Profundidad	m	3 – 4.9	4.3
Largo	m	15 – 90	24 – 40
Ancho	m	3 – 24	4.9 – 9.8
Circular			
Profundidad	m	3 – 4.9	4.3
Diámetro	m	3 – 60	12 – 45
Pendiente del fondo	mm/mm	1/16 – 1/16	1/12

Fuente: Metcalf & Eddy, 2004.

Tabla 3. 3. Valores típicos para las constantes empíricas a 20°C.

Parámetro.	a	b
DBO	0.018	0.020
SST	0.0075	0.014

Fuente: Metcalf & Eddy, 2004.

**Tabla 3. 4. Valores típicos de gravedad específica y concentración de sólidos presentes
en un sedimentador primario.**

Tipo de sólidos.	Gravedad específica.	Concentración de sólidos (% como sólidos secos)	
Primarios solamente:			
Aguas residuales de fuerza media	1.03	4 – 12	6
De sistemas de alcantarillado combinados	1.05	4 – 12	6.5
Primario y lodos activados	1.03	2 – 6	3
Primario y escurrimientos de filtros de lodos	1.03	4 – 10	5
Natas	0.95	Muy variable	-----

Fuente: Metcalf & Eddy, 2004.

Una secuencia de los cálculos que se siguen para el diseño de los tanques de sedimentación es la siguiente:

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

- a) Se calcula el área superficial requerida. Para condiciones de flujo promedio, el área requerida es:

$$A = \frac{Q}{RD} \quad 3.1$$

Donde,

A: Área superficial requerida, m².

Q: Gasto de alimentación, m³/d.

RD: Rapidez de desbordamiento, m³/m² d.

- b) Determinación de la longitud del tanque.

$$L = \frac{A}{W} \quad 3.2$$

Donde,

L: Longitud del tanque, m.

W: Ancho del tanque, m.

- c) Cálculo del Tiempo de Retención y la Rapidez de Desbordamiento a flujo promedio.

Se asigna un valor recomendado para la profundidad del tanque, ya que es necesario para el cálculo del volumen del tanque,

$$V = L W P \quad 3.3$$

Donde,

V: Volumen del tanque, m³.

P: Profundidad del tanque, m.

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

Para el cálculo de la rapidez de desbordamiento.

$$RD = \frac{Q}{A} \quad 3.4$$

El tiempo de retención se calcula como,

$$t = \frac{V}{Q} \quad 3.5$$

Donde,

t: Tiempo de retención, h.

d) Cálculo del tiempo de retención y rapidez de desbordamiento a flujo máximo.

$$RD = \frac{Q}{A} \quad 3.6$$

$$t = \frac{V}{Q} \quad 3.7$$

e) Cálculo de la velocidad de arrastre,

$$V_H = \left[\frac{8k(s-1)gd}{f} \right]^{1/2} \quad 3.8$$

Donde:

V_H : Velocidad horizontal que se produce por e arrastre, m/s.

k: Constante que depende del tipo de material arrastrado, adimensional.

s: Gravedad específica de las partículas.

d: Diámetro de las partículas, m.

g: Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s².

f: Factor de fricción de Darcy-Weisbach, adimensional.

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

- f) Comparación de la velocidad de arrastre calculada a flujo máximo con la velocidad horizontal a flujo máximo.

La velocidad horizontal a flujo máximo se calcula como:

$$V = \frac{Q}{A_x} \quad 3.9$$

Donde:

A_x : Área transversal, $W * P$, m^2 .

V : Volumen horizontal a flujo máximo, m/s.

Si la velocidad horizontal a flujo máximo es más pequeña que la velocidad de arrastre, la materia sedimentada no se resuspenderá.

- g) Cálculo de las tasas de remoción de SST y DBO

A flujo promedio:

$$DBO_{removida} = \frac{t}{a + bt} \quad 3.10$$

$$SST_{removidos} = \frac{t}{a + bt} \quad 3.11$$

A flujo máximo:

$$DBO_{removida} = \frac{t}{a + bt} \quad 3.12$$

$$SST_{removidos} = \frac{t}{a + bt} \quad 3.13$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

Con el objeto de determinar la velocidad de sedimentación de las diversas variedades de sólidos, se requiere realizar ensayos en columnas de sedimentación (Figura 3.1).

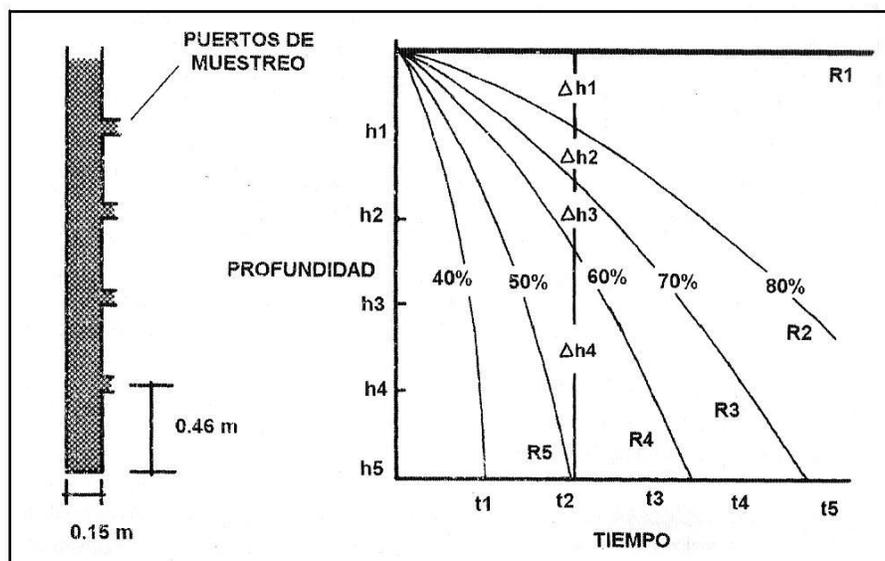


Figura 3. 1. Determinación de las velocidades de caída de las partículas.

Fuente: Jiménez Cisneros, 2006.

3.2. TANQUE DE LODOS ACTIVADOS.

El reactor completamente mezclado con recirculación es un modelo que representa a los procesos de crecimiento en suspensión, por ejemplo, los lodos activados. Los diagramas que se muestran en la Figura 3.2 incluyen la nomenclatura usada en la ecuación del balance de masa que se presenta en el siguiente apartado y que es la base para el diseño de los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales.

3.2.1. BALANCE DE PRODUCCIÓN DE BIOMASA.

Un balance de masa para los microorganismos en el reactor de mezcla completa mostrado en la Figura 3.2 a, puede ser escrito como se muestra a continuación, resaltando que el *crecimiento neto siempre es positivo*.

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

a) Expresión general

Rapidez de
 acumulación de microorganismos = Rapidez de flujo de microorganismos dentro del sistema - Rapidez de flujo de Microorganismos fuera del sistema + Crecimiento neto de microorganismos dentro del sistema
 sin el límite del sistema

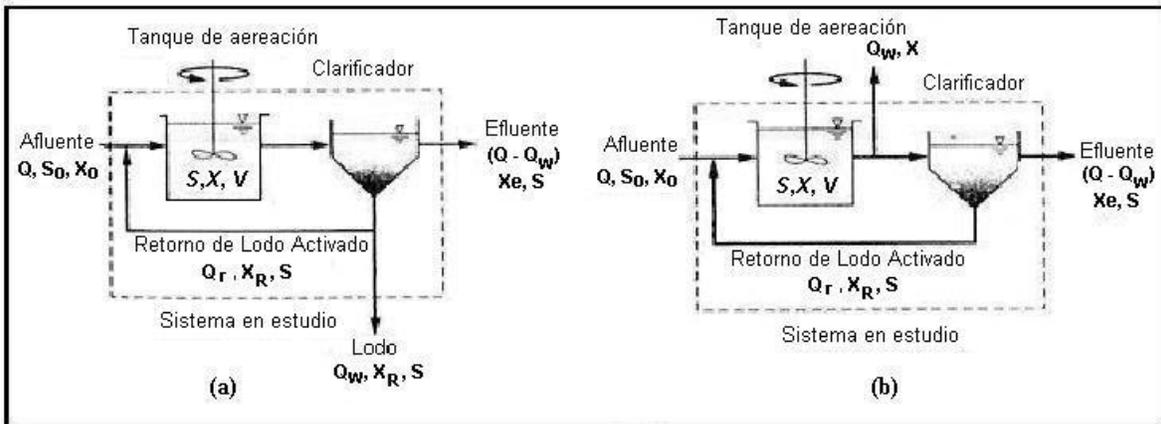


Figura 3.2. Diagrama esquemático de un proceso de lodos activados:

- (a) con eliminación de lodos desde la línea de retorno de lodo y,
- (b) con eliminación de lodos desde el tanque de aireación.

Fuente: Metcalf & Eddy, 2004.

b) Expresión simplificada

Acumulación = afluente – efluente + crecimiento neto

c) Representación simbólica

$$\frac{dX}{dt}V = QX_o - \left[(Q - Q_w)X_e - Q_w X_R \right] r_g V \quad 3.14$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

Donde:

dX/dt = Rapidez de cambio de la concentración de biomasa en el reactor, g VSS/m³·d

V = Volumen del reactor, m³

Q = Gasto del afluente, m³/d

X_o = Concentración de biomasa en afluente, g VSS/m³

Q_w = Gasto de lodo eliminado, m³/d

X_e = Concentración de biomasa en efluente, g VSS/m³

X_R = Concentración de biomasa en línea de retorno desde el clarificador, g VSS/m³

r_g = Rapidez neta de producción de biomasa, g VSS/m³·d

Si se asume que la concentración de microorganismos en el afluente puede ser despreciable y que la condición del estado estacionario prevalece ($dX/dt = 0$), la ecuación 3.14 se puede simplificar quedando de la siguiente manera

$$(Q - Q_w)X_e - Q_w X_R = r_g V \quad 3.15$$

La expresión anterior puede ser reestructurada (ecuación 3.17) si se toma en cuenta la definición de la rapidez de crecimiento de biomasa r_g , la cual se presenta en la ecuación 3.16.

$$r_g = -Yr_{su} - k_d X \quad 3.16$$

O también se puede expresar como,

$$r_g = Y \left(\frac{kXS}{K_s} + S \right) - k_d X \quad 3.17.$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

Donde:

Y = Coeficiente de síntesis, g VSS/g DQO_{bs}

r_{su} = Tasa de utilización de sustrato, g DQO_{bs}/m³·d

k_d = Coeficiente de decaimiento endógeno, g VSS/g VSS·d

X = Concentración de biomasa (microorganismos), g/m³

k = Rapidez máxima específica de utilización de sustrato, g sustrato/g microorganismo·d

S = Concentración de sustrato de crecimiento limitante en solución, g/m³

K_s = Constante de velocidad media, concentración de sustrato a la mitad de la rapidez máxima específica de utilización de sustrato, g/m³

Se obtiene entonces la siguiente expresión,

$$\frac{(Q - Q_w)X_e - Q_w X_R}{VX} = -Y \frac{r_{su}}{X} - k_d \quad 3.18$$

El inverso del término en el lado izquierdo de la ecuación 3.8 es definido como Tiempo de Retención de Sólidos (TRS ó SRT en ingles), expresado de la siguiente manera,

$$TRS = \frac{VX}{(Q - Q_w)X_e + Q_w X_R} \quad 3.19$$

Note que el numerador en la ecuación 3.18 representa la masa total de sólidos en el tanque de aireación y el denominador corresponde a la cantidad de sólidos perdidos por día en el efluente. Por definición el TRS son los sólidos en el sistema dividido por la masa de sólidos removidos por día. Usando la definición de arriba de TRS, la ecuación 3.17 puede ser escrita como:

$$\frac{1}{TRS} = -Y \frac{r_{su}}{X} - k_d \quad 3.20$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

El término $1/TRS$ se relaciona con μ es decir, la velocidad específica de crecimiento de biomasa expresada con la ecuación 3.20:

$$\frac{1}{TRS} = \mu \quad 3.21$$

De este modo, para un proceso de lodos activados completamente mezclado, el TRS (Que puede ser controlado por desechos sólidos) es el inverso de la velocidad específica promedio que se relaciona a los procesos biocinéticos.

En la ecuación 3.20 el término $(-r_{su}/X)$ es conocido como la tasa específica de utilización de substrato U y se calcula como sigue:

$$U = \frac{r_{su}}{X} = \frac{Q(S_o - S)}{VX} = \frac{S_o - S}{\tau X} \quad 3.22$$

Donde:

- U = Tasa específica de utilización de sustrato, g DBO o DQO/g VSS·d
- Q = Gasto del agua residual, m³/d
- S_o = Concentración de substrato soluble en el afluente, g DBO o DQObs/m³
- S = Concentración de substrato soluble en el efluente, g DBO o DQObs/m³
- V = Volumen del tanque de aireación, m³
- X = Concentración de biomasa, g/ m³
- τ = Tiempo de retención hidráulica, V/Q, d

Reagrupando los términos, se tiene la siguiente expresión:

$$\frac{1}{TRS} = \frac{YkS}{K_s + X} - k_d \quad 3.23$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

El Tiempo de Retención de Sólidos (TRS) es un parámetro importante en el diseño y operación de procesos de lodos activados. El TRS es el tiempo promedio que los sólidos de los lodos activados están en el sistema. Asumiendo que la concentración de sólidos en el clarificador mostrado en la Figura 3.2 (a) es despreciable comparado al que está en el tanque de aireación, el TRS es determinado mediante el cociente de la masa de sólidos en el tanque de aireación entre los sólidos removidos diariamente vía el efluente y por el proceso de control de desechos. Para muchos procesos de lodos activados, donde ocurre una adecuada floculación y el clarificador está diseñado adecuadamente, los SSV en el efluente son típicamente menores a 15 g/m^3 . Mientras que si los SSV son bajos, el exceso de sólidos debe ser removido del sistema por el desecho. El control de la concentración de lodos se logra, mediante la remoción de biomasa (lodo) del clarificador a través de la línea de recirculación como se muestra en la Figura 3.2 (a). Alternativamente, el control se logra por la eliminación del lodo a partir del tanque de aireación, tal y como se muestra en la Figura 3.2 (b).

La expresión que se tiene para obtener la concentración de sustrato disuelto en el efluente S, es la siguiente:

$$S = \frac{K_s + (k_d)TRS}{TRS(Yk - k_d) - 1} \quad 3.24$$

3.2.2. BALANCE DE MASA DEL SUSTRATO.

El balance de masa para la utilización del sustrato en el tanque de aireación (Figura 3.2) es:

Acumulación = afluente – efluente + generación

$$\frac{dS}{dt}V = QS_o - QS + r_{su}V \quad 3.25$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

Resolviendo la ecuación 3.25 y sustituyendo el valor de r_{su} y asumiendo condiciones de estado estacionario ($dS/dt = 0$), se tiene:

$$S_o - S = \left(\frac{V}{Q} \right) \left(\frac{kXS}{K_s + S} \right) \quad 3.26$$

De la ecuación 3.26 se tiene que el cociente del volumen del tanque de aireación y el gasto del afluente, se obtiene el Tiempo de Retención Hidráulico, representado por τ .

Por otro lado, la expresión que se emplea para obtener la concentración de biomasa en el tanque de aireación es la siguiente:

$$X = \left(\frac{TRS}{\tau} \right) \left[\frac{Y(S_o - S)}{1 + (k_d)TRS} \right] \quad 3.27$$

3.2.3. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DE LICOR MEZCLADO Y PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS.

La producción de sólidos de un reactor biológico representa la masa de material que debe ser retirado diariamente para mantener el proceso. Eso es de interés para cuantificar la producción de sólidos en términos de SST, SSV y biomasa. Por definición, el TRS también provee una conveniente expresión para calcular el lodo total producido diariamente por el proceso de lodos activados:

$$P_{XrVSS} = \frac{X_r V}{TRS} \quad 3.28$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

Donde:

$P_{X_T, VSS}$ = Sólidos totales retirados diariamente, g SSV/d

X_T = Concentración de SSVLM totales en el tanque de aireación, g SSV/m³

V = Volumen del reactor, m³

TRS = Tiempo de retención de sólidos, d

3.2.4. CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS DEL LICOR MEZCLADO.

El total de SSVLM en el tanque de aireación es equivalente a la concentración de biomasa X más la concentración de SSVnb, representados como X_i :

$$X_T = X + X_i \quad 3.29$$

Un balance de masa es necesario para determinar la concentración de SSVnb y la concentración de biomasa activa SSV. Un balance de masa sobre los materiales inertes es el siguiente:

$$\left(\frac{dX_i}{dt} \right) = QX_{o,i} - \frac{X_i V}{TRS} + r_{x,i} V \quad 3.30$$

Donde:

$X_{o,i}$ = Concentración de SSVnb en el afluente, g/m³

X_i = Concentración de SSVnb en el tanque de aireación, g/m³

$r_{x,i}$ = Rapidez de producción de SSVnb de los restos celulares, g/m³·d

Considerando un estado estacionario la Ecuación 3.30, se puede representar como:

$$X_i = \frac{X_{o,i} TRS}{\tau} + (f_d)(k_d)(X)(TRS) \quad 3.31$$

**CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS
PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.**

Combinando la ecuación 3.27 y la 3.31 se obtiene la siguiente expresión, con la cual se puede determinar la concentración total de SSVLM:

$$X_T = \left(\frac{TRS}{\tau} \right) \left[\frac{Y(S_o - S)}{1 + (k_d)TRS} \right] + (f_d)(k_d)(X)TRS + \frac{(X_{o,i})TRS}{\tau} \quad 3.32$$

(A)	(B)	(C)
Biomasa	Residuos	SSVnb
Heterótrofa	celulares	en el afluente

3.2.5. PRODUCCIÓN DE SÓLIDOS.

Sustituyendo la ecuación 3.32 en la ecuación 3.28 y reemplazando τ con V/Q , el total de SSV producidos y desechados diariamente se determina como sigue:

$$P_{X,vss} = \frac{QY(S_o - S)}{1 + (k_d)SRT} + f_d(k_d)X(V) + QX_{o,i} \quad 3.33$$

La ecuación 3.27 es sustituida en la ecuación 3.33 para determinar la rapidez de producción de SSV en términos de remoción de sustrato, de los SSVnb en el afluente y del coeficiente cinético como sigue:

$$P_{X,vss} = \frac{QY(S_o - S)}{1 + (k_d)SRT} + \frac{(f_d)(k_d)YQ(S_o - S)SRT}{1 + (k_d)SRT} + QX_{o,i} \quad 3.34$$

(A)	(B)	(C)
Biomasa	Residuos	SSVnb
Heterótrofa	celulares	en el afluente

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

El efecto del TRS en un sistema de lodos activados para remoción de sustrato soluble se ilustra en la Figura 3.3. Cuando el TRS se incrementa hay un decremento de biomasa, por lo tanto, se incrementa la concentración de residuos celulares propiciado que la diferencia entre SSVLM y la concentración de biomasa de SSV se incremente con el TRS.

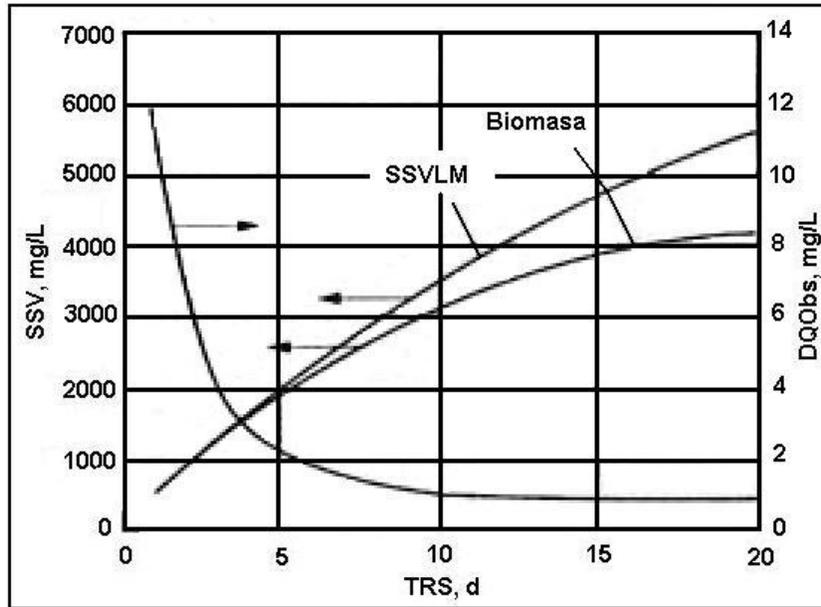


Figura 3.3. DQO biodegradable soluble y la concentración de SSVLM contra TRS para procesos de lodos activados de mezcla completa.

Fuente: Metcalf & Eddy, 2004.

La masa total de desecho sólido seco por día esta basado en los SST, el cual incluye los SSV más sólidos inorgánicos, por lo tanto, la ecuación 4.21 es modificada para calcular la producción de sólidos en términos de SST añadiendo los sólidos inorgánicos del afluente y calculando la biomasa de los SST y asumiendo una relación típica de biomasa (SSV/SST) de 0.85. La relación de los SSV/SST puede variar de 0.80 a 0.90.

$$P_{x,TSS} = \frac{A}{0.85} + \frac{B}{0.85} + C + Q(TSS_o - VSS_o) \quad 3.35$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

Donde:

$P_{X,TSS}$ = Producción neta diaria de lodos activados, medido en términos de sólidos suspendidos totales, kg/d

$TSSo$ = Concentración de agua residual en el afluente de SST, g/m^3

$VSSo$ = Concentración de agua residual en el afluente de SSV, g/m^3

La masa de SSVLM y SSLM pueden ser calculados mediante la ecuación 3.21 y 3.22 respectivamente, como sigue:

$$\text{Masa de SSVLM} = (X_{SSV})(V) = (P_{X,SSV})TRS \quad 3.36$$

$$\text{Masa de SSLM} = (X_{SST})(V) = (P_{X,SST})TRS \quad 3.37$$

Seleccionando una apropiada concentración de SSLM, el volumen de aireación puede ser determinado con la ecuación 3.37. El intervalo en el que se encuentran las concentraciones de SSLM es de 2000 a 4000 mg/L y debe ser compatible con las características de sedimentación de lodos y el diseño del clarificador.

3.2.6. LA SÍNTESIS OBSERVADA.

La síntesis observada Y_{obs} está basada en la medida total de producción de sólidos relativa a la remoción de substrato y puede ser calculada en términos de g SST/g DQObs o g DBO, o relativo a SSV como g SSV/g DQObs o g DBO.

La medida de producción de sólidos es la suma de los presentes en el afluente del sistema y sólidos desechados intencionalmente. La síntesis observada para SSV puede ser calculada dividiendo la ecuación 3.34 entre la rapidez de remoción de substrato, la cual es $Q(S_o - S)$:

**CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS
PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.**

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + (k_d)SRT} + \frac{(f_d)(k_d)(Y)SRT}{1 + (k_d)SRT} + \frac{X_{o,i}}{S_o - S} \quad 3.38$$

(A)	(B)	(C)
Biomasa	Residuos	SSVnb
Heterótrofa	celulares	en el afluente

Donde $Y_{obs} = \text{g SSV/g substrato removido}$.

Para aguas residuales sin SSVnb en el afluente la producción de sólidos consiste de sólo biomasa activa y residuos celulares, por lo que la síntesis observada para SSV es como sigue:

$$Y_{obs} = \frac{Y}{1 + (k_d)TRS} + \frac{(f_d)(k_d)(Y)TRS}{1 + (k_d)TRS} \quad 3.39$$

El impacto de un afluente sin SSVnb en la ecuación 4.38 sobre la síntesis observada depende de las características del agua residual y el tipo de pretratamiento. Los valores de $X_{o,i}/S_o$ se encuentran en el intervalo de 0.10 a 0.30 g/g para un agua residual con tratamiento primario y de 0.30 a 0.50 para agua residual sin tratamiento primario.

3.2.7. REQUERIMIENTOS DE OXIGENO.

El oxígeno requerido para la degradación biológica de material carbonáceo se determina a partir de un balance de masa usando la concentración de la Demanda Química de Oxígeno biodegradable (DQOb) del agua residual tratada y la cantidad de biomasa desechada del sistema por día. Si toda la DQOb fuera oxidada a CO_2 y H_2O la demanda de oxígeno debería ser igual a la concentración de DQOb, pero las bacterias oxidan una porción de la DQOb para proveer energía y otra la usan para crecimiento celular. El oxígeno también es consumido por respiración endógena y la cantidad dependerá del TRS. Para un TRS dado, un balance de masa en el sistema se expresa como sigue:

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

$$\text{Oxígeno usado} = \text{DQOb removida} - \text{DQO del lodo de desecho} \quad 3.40$$

Es decir,

$$R_o = Q (S_o - S) - 1.42 P_{X,\text{bio}} \quad 3.41$$

Donde:

R_o = Oxígeno requerido, kg/d

$P_{X,\text{bio}}$ = Biomasa como SSV desechados por día, kg/d

3.2.8. RELACIÓN ALIMENTO – MICROORGANISMO (A/M).

La relación Alimento – Microorganismo (A/M) se define como la tasa de DBO o DQO aplicada por unidad de volumen de licor mezclado y se puede expresar como sigue:

$$A/M = \frac{\text{Tasa total de substrato aplicado}}{\text{Biomasa microbiana total}} = \frac{QS_o}{VX} \quad 3.42$$

y

$$A/M = \frac{S_o}{\tau X} \quad 3.43$$

Donde:

A/M = Relación alimento – biomasa, g DBO o DQObs/g SSV.d

Q = Gasto de alimentación de agua residual, m³/d

S_o = Concentración de DBO o DQO biodegradable soluble (DQObs) en el afluente, g/m³

V = Volumen del tanque de aireación, m³

X = Concentración de biomasa en el licor mezclado en el tanque de aireación, g/m³

τ = Tiempo de retención hidráulico del tanque de aireación, V/Q.d

3.2.9. TASA ESPECÍFICA DE UTILIZACIÓN DE SUSTRATO.

La relación A/M puede relacionarse con la tasa específica de utilización de sustrato, U, definida anteriormente (ver Ecuación 3.22), por el proceso de eficiencia:

$$U = \frac{(A/M)E}{100} \quad 3.44$$

Donde E es la eficiencia de remoción medida como DBO o DQObs y se define por la siguiente expresión:

$$E, \% = \frac{S_o - S}{S_o}(100) \quad 3.45$$

Sustituyendo la ecuación 3.43 y la ecuación 3.45 en la ecuación 3.44, se tiene:

$$U = \frac{S_o - S}{\tau X} \quad 3.46$$

El valor de U puede también ser calculado de la siguiente manera:

$$U = \frac{kS}{K_s + S} \quad 3.47$$

Combinando Ecuaciones 3.47 y 3.23, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{1}{TRS} = YU - k_d \quad 3.48$$

Sustituyendo la ecuación 3.44 en la ecuación 3.48, se tiene una expresión en donde se involucra el TRS y la relación A/M, conociéndose esta expresión como “Ecuación de operación de la planta”:

$$\frac{1}{TRS} = Y(F/M) \frac{E}{100} - k_d \quad 3.49$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

Para el diseño de un sistema de tratamiento de agua residual municipal con lodos activados, los valores del TRS se encuentran en el intervalo de 20 a 30 días, el valor A/M se encuentra entre los valores de 0.10 a 0.05 g DBO/g SSV.d.

3.2.10. PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.

Los parámetros típicos usados para el diseño y operación de un proceso de lodos activados de mezcla completa se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Valores típicos de parámetros de diseño usados comúnmente en procesos de lodos activados.

Proceso	Tipo de reactor	TRS (d)	A/M (kg DBO/kg SSVLM.d)	Carga volumétrica (kg DBO/m ³ .d)	SSVLM (mg/L)	Tiempo de retención Hidráulico τ (h)
Mezcla completa	CMAS	3 - 15	0.2 – 0.6	20 - 100	1500 - 4000	3 - 5

Fuente: Metcalf & Eddy, 2004.

Tabla 3.6. Valores de coeficientes cinéticos típicos utilizados en los procesos de lodos activados para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Coeficiente.	Unidad.	Valor a 20°C	
		Intervalo.	Típico.
k	g DQObs/g SSVd	2 – 10	5
K _s	mg/L DBO	25 – 100	60
Y	mgSSV/mg DBO	0.4 – 0.8	0.6
	mgSSV/mg DQObs	0.3 – 0.6	0.4
K _d	g SSV/g SSV d	0.06 – 0.15	0.1
f _d	g SSV/g SSV	0.10 – 0.15	0.13

Fuente: Metcalf & Eddy, 2004.

3.2.11. SECUENCIA DE CÁLCULO DE UN PROCESO DE CRECIMIENTO SUSPENDIDO COMPLETAMENTE MEZCLADO SIN CONSIDERAR LA NITRIFICACIÓN.

a) Determinación de la concentración de la DQObs en el efluente.

Con la siguiente expresión se pretende determinar la calidad del efluente que en este caso se medirá como DQObs.

$$S = \frac{K_s + (k_d)TRS}{TRS(Yk - k_d) - 1} \quad 3.24$$

b) Se determina el Tiempo de Retención Hidráulico, τ .

Para determinar τ se debe conocer la concentración de SSVLM (X_T), en caso de no contar con este valor se puede usar los valores típicos de la Tabla 3.5 y resolver la siguiente expresión:

$$X_T = \left(\frac{TRS}{\tau} \right) \left[\frac{Y(S_o - S)}{1 + (k_d)TRS} \right] + (f_d)(k_d)(X)TRS + \frac{(X_{o,i})TRS}{\tau} \quad 3.32$$

La concentración de la biomasa X se determina usando la siguiente expresión:

$$X = \left(\frac{TRS}{\tau} \right) \left[\frac{Y(S_o - S)}{1 + (k_d)TRS} \right] \quad 3.27$$

Una vez calculado τ se determina el volumen del tanque de aireación, ya que

$$(\tau)(Q) = V$$

CAPÍTULO III. PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE LOS PROCESOS UNITARIOS DE TRATAMIENTO.

- c) Determinación de la Producción Total de Lodos como kg SSV/d.

$$P_{X_{\tau VSS}} = \frac{X_T V}{TRS} \quad 3.28$$

- d) Determinación de la Producción Total de Lodos como kg SST/d.

$$P_{X_{\tau SST}} = \frac{A}{0.85} + \frac{B}{0.85} + C + Q(TSS_o - VSS_o) \quad 3.35$$

- e) Determinación de la fracción de biomasa a partir de los valores de X y X_T.

$$\text{Fracción de biomasa} = X / X_T$$

- f) Cálculo de la síntesis de sólidos observada, medida como g SSV/g DQObs removida y como g SST/g DQObs removida.

$$\text{DQObs removida} = Q(S_0 - S)$$

$$\text{Como SSV,} \quad Y_{obs} = \frac{P_{X_{\tau SSV}}}{DQO_{bs} \text{ removida}}$$

$$\text{Como SST,} \quad Y_{obs} = \frac{P_{X_{\tau SST}}}{DQO_{bs} \text{ removida}}$$

- g) Determinación del requerimiento de oxígeno

$$R_o = Q (S_o - S) - 1.42 P_{X, \text{bio}} \quad 3.41$$

$$P_{X, \text{bio}} = P_{X_T, \text{SSV}} - P_{\text{SSVnb}}$$

**CAPÍTULO IV.
MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y
OPERACIONES UNITARIAS.**

4.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS Y PROBLEMÁTICA EN LA CONSTRUCCIÓN.

Con el fin de contar con equipos que sirvan de apoyo a las materias de contaminación del agua y tratamiento de aguas residuales, se construyeron dos columnas de sedimentación y un sistema biológico (lodos activados) que incluye un tanque de sedimentación primaria, un tanque de aireación y un tanque clarificador; todos estos equipos son a escala banco de laboratorio, ya que con ellos se podrán obtener datos experimentales que contribuyan a fortalecer las bases teóricas del diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales, así como los problemas que se pueden tener en la operación de los procesos.

En los apartados siguientes se presentan las características y dificultades que se presentaron en la fabricación de dichos equipos, así como las prácticas de laboratorio que se proponen para ser desarrolladas con los citados equipos.

4.1.1. ELECCIÓN DE MATERIAL PRINCIPAL.

El material que se eligió para fabricar los equipos fue el acrílico transparente por ser resistente y ligero, además que es más noble para trabajarlo. Se eligió la placa de 5mm de espesor para facilitar su cortado y manejabilidad en los diferentes pasos del proceso constructivo, debido a que no es tan delgada y frágil como la de 3mm, ni tan pesada y rígida como la de 10mm.

Para mejorar y aprovechar los materiales se utilizó el programa de dibujo y diseño AutoCAD, así como de Exel para cálculos con el cual se optimizó el tiempo y se disminuyó la cantidad de material desperdiciado.

4.1.2. COLUMNA DE SEDIMENTACIÓN.

La columna de sedimentación tiene el objetivo de proporcionar datos experimentales sobre la velocidad de sedimentación y tipo de sólidos que se presentan en un agua residual, siendo estos datos básicos para el diseño de tanque de sedimentación, ya sean primarios o secundarios.

En este caso la columna tiene una altura de 2.4 m, no se construyó más alta debido a la limitación de espacio y a la complejidad que representaría su manejo. Es de base rectangular de 16 x 20 cm, teniendo una capacidad de almacenamiento de 70 L.

Para realizar los cortes en el acrílico, se fabricaron unos cortadores los cuales están hechos de una segueta para arco de mano y corte metálico, que fue cortada a la mitad y con un esmerilador se desbaste hasta que adquirió una forma cóncava (Figura 4.1), siendo esta parte la que producía en el acrílico un rasgado el cual poco a poco producía el corte (Figura 4.2). Tenían una empuñadura de 15 cm aproximadamente y la cabeza de corte de 2 cm.



Figura 4.1. Esquema de un cortador para acrílico.



Figura 4.2. Cortado de placa de acrílico.

Una vez que las placas fueron cortadas a las dimensiones requeridas, se ajustaron los cortes con la ayuda de una máquina canteadora (Figura 4.3), se realizaron las perforaciones a una de las caras para colocar las válvulas de muestreo.



Figura 4.3. Canteado de acrílico para columna.

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

Para unir las piezas de acrílico fue necesaria la utilización de un adhesivo especial llamado AD-Cril. Este pegamento es una sustancia cristalina de consistencia viscosa y de secado rápido, por lo que su aplicación se hace con una brocha. Una herramienta muy útil en la aplicación del adhesivo fue una jeringa, debido a que se podían hacer las aplicaciones más rápidas y eficientes. Se debe aplicar presión en las piezas a unir de lo contrario pueden quedar burbujas.

Se emplearon placas de acero y ángulo de aluminio para que se ejerciera presión en el pegado y también para que las piezas formaran un ángulo de 90° (Figura 4.4).

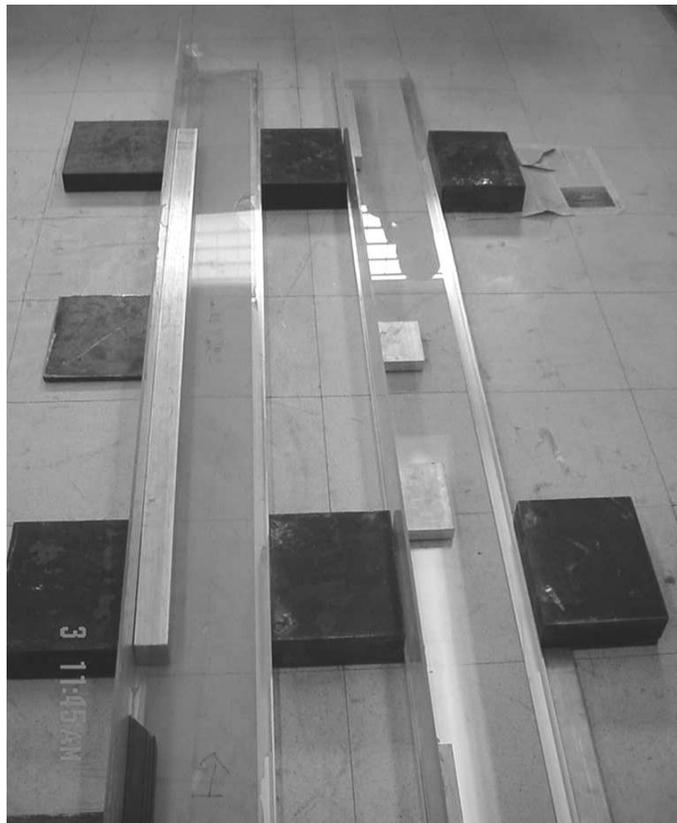


Figura 4.4. Pegado de columnas con ayuda de placas de acero.

En el caso de que quedaran burbujas se hace una segunda aplicación del adhesivo con la jeringa, de esta forma se asegura el sellado de las piezas. Se debe dejar en reposo durante 48 horas para que el adhesivo seque completamente.

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

Como medidas de seguridad, el adhesivo se debe manejar con una buena ventilación, usar de preferencia mascarillas con filtros para vapores orgánicos y no debe existir alguna fuente de calor o de chispas porque dicho adhesivo es inflamable.

Una vez unidas las caras que conformarán la columna, se procedió a hacer los puntos de muestreo, los cuales consistieron en cortar un tubo de cobre de 1/2 pulgada de diámetro en 16 tramos de 5 cm y unir dos tramos a una válvula de 1/2 " de diámetro de volante giratorio y cierre de compuerta hechas en bronce, mediante soldadura y soplete de gas portátil teniendo cuidado de no llegar a quemar el empaque de dichas válvulas. Esto generó un total de 8 válvulas de 12 cm de largo, 4 para cada columna. A estas válvulas se les agregó una pieza de acrílico cuadrado de 4 x 4 cm y 1 cm de espesor, esto con la finalidad de incrementar el apoyo del tubo en la columna.

Las 4 válvulas están puestas de manera perpendicular a la cara frontal con una separación entre ellas de 50 cm empezando de abajo hacia arriba a partir de los 20 cm y que permiten obtener un muestreo a diferentes alturas y así conocer las condiciones del agua en estudio.

Una válvula más se encuentra en la placa de fondo que además de muestreo funciona como válvula para drenado total y limpieza de la columna. Esta válvula está apoyada con una brida de 3 ¼ de diámetro hecha en hierro dulce, empaque de hule y salida a la válvula de 1/2 ", la sujeta a la placa de fondo 4 tornillos de cabeza plana de 1/4 de pulgada. Esta parte de tubería es de 1/2 " con codo a 90° que sobresale de la brida 12 cm y una extensión de 21.5 cm al que se le puede conectar una manguera para efectos de drenado.

Esta columna tiene una base metálica de forma piramidal truncada (Figura 4.5), hecho de ángulo de acero a 90° por 1½" y 1" de peralte que permite una mejor operación, limpieza y desalojo del último material sedimentado. La base mayor está hecha con ángulo de 1 ½ " de 3 mm de espesor la cual mide 65 x 52.5 cm, mientras que la base menor está hecha con ángulo de 1" de 3mm de espesor y mide 18 x 22cm. fue hecha en hierro para que soporte el peso de la columna con el líquido.

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

Esta base cuenta con 4 tornillos niveladores de 10 cm de alto por 9 mm de diámetro que al ajustarse se alcanza un nivel óptimo y se evitan movimientos por imperfecciones en el piso. También se le colocó un asiento de poliuretano que absorbe las imperfecciones y movimientos de la columna de acrílico y no la dañe cuando es colocada sobre la base metálica.



Figura 4.5. Base metálica con válvula de fondo.

La altura de la columna es de 2.66 m, lo que es necesario la colocación de un sistema de atirantado que le proporcione un equilibrio muy eficiente y sin el riesgo de que se voltee aún con carga máxima. Estos tirantes son de cable de acero trenzado de 1/32", comúnmente llamados "chicotes" de 1.30 metros de largo por lo que se unieron dos de ellos con tensores de 1/4 x 9" y están sujetos con prensadores de 1/2" por 7 mm de diámetro, que corren desde las esquinas de la base metálica hasta las esquinas de un marco superior que corona la columna. Este marco superior está hecho de ángulo de aluminio a 90° por 1" de 3mm de espesor al que se le empotra la columna y además evita que se llegue a despegar en esa parte. Para ayudar con la estructura de la columna, se agregaron cuatro ángulos de aluminio de 1" y con 3mm de espesor.

Después de haber armado la primera de dos columnas se procedió a hacerle su primer prueba de llenado (Figura 4.6), y cuando el nivel de agua se acercaba a las 3/4 partes de la columna, se colapso una de las paredes a 1/4 de la base.



Figura 4.6. Inicio de llenado en primera prueba.

Analizando el punto de falla, se llegó a la conclusión de que este problema se presentó debido a la presión de la columna de agua, ya que si se considera que el agua potable tiene un peso aproximado de 1 kg por cada litro, implica que la columna en la parte baja debe soportar una carga de 76 kg, y en el caso de contener agua residual la carga es mayor; por lo que se debe reforzar el primer tercio de abajo hacia arriba para evitar que se presente nuevamente.

Con la experiencia de la prueba, se diseñaron una serie de “cinturones” que tienen la capacidad de soportar el empuje del agua. Estos cinturones están hechos de ángulo de aluminio de 1" repartidos a 15, 20, 20, 20, 20, 30 y 50 cm medidos desde el fondo de la columna hasta la parte alta (Figura 4.7). El largo de estos es de 22.5 cm en el lado corto y 26.5 cm en el largo. Están sujetos a presión por unos tornillos de 1" x 1/4" con tuerca y rondana de presión, que los mantienen sin movimiento.

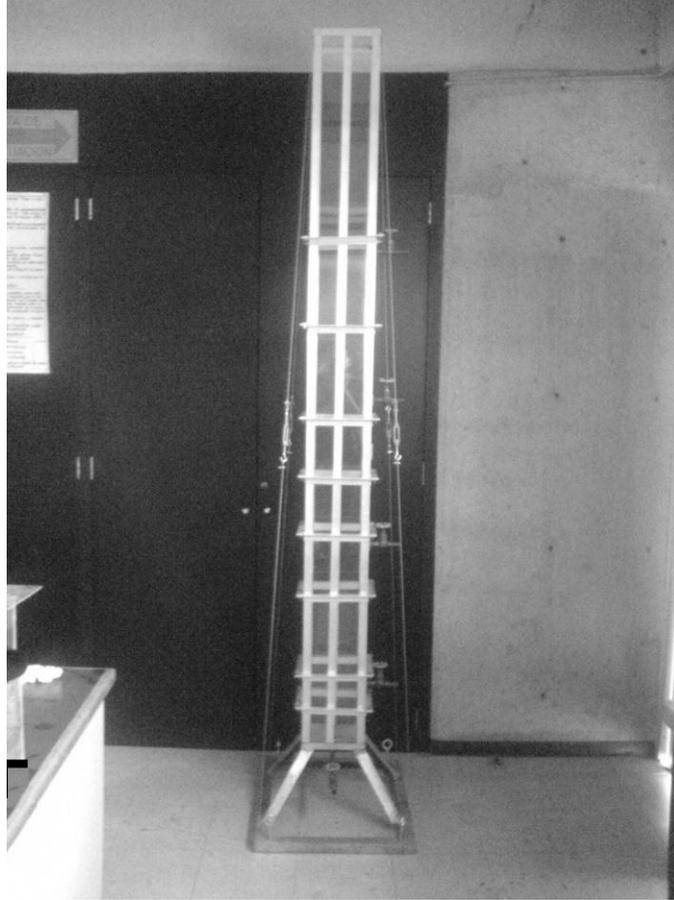


Figura 4.7. Columna final.

Se realizó nuevamente la prueba de llenado de la columna y se comprobó que las paredes soportaron sin inconvenientes en todos los niveles el empuje del agua, a pesar de que se notaba cierto grado de tensión en las mismas, solo se observaron fugas menores en algunas uniones de las placas y en dos de las válvulas, las cuales fueron selladas posteriormente con AD-Cril.

Se realizaron mas pruebas en ambas columnas para revisar su resistencia y observar alguna otra posible fuga. Las primeras pruebas consistieron en el llenado y vaciado por 3 ocasiones consecutivas con la que se ponía bajo prueba de los esfuerzos de carga y descarga rápida, las segundas pruebas fueron de carga por tiempo en la que la dejamos llena por lapsos de 5 horas y posteriormente, se mantuvo llena por 3 días. En cada una de las pruebas el llenado fue hasta el borde, rebasando los 2.20 metros normales y comprobando así que la prueba de carga y sellado había calificado satisfactoriamente.

4.1.3. PROCESO DE LODOS ACTIVADOS.

Este modelo consiste en una serie de 3 contenedores, en el primero se realizará la sedimentación primaria, en el segundo se tendrá el proceso de lodos activados y en el tercero, se tendrá el clarificador o sedimentador secundario.

Los contenedores son de forma cilíndrica, por lo que están constituidos de 2 piezas de acrílico transparente, siendo una de ellas el cuerpo del cilindro y la otra es la parte del fondo que tiene una forma parabólica. La forma de los contenedores se debe a que al no haber vértices internos se evitan las *zonas muertas* o *cortos circuitos*, ya que si se presenta este tipo de fenómeno los resultados no podrían ser confiables.

Se construyeron 3 cilindros de acrílico de 31 cm de diámetro, dos de los cuales tienen 50 cm de altura y el restante 40 cm. Se cortaron 2 placas de 100 x 51 cm y otra de 100 x 41 cm, se ajustaron las dimensiones con la ayuda de la máquina canteadora. El siguiente paso consiste en doblar las placas para formar los cilindros, por lo que este trabajo se realizó en un taller especializado externo. En este taller le dieron la forma de cilindro a las placas y se encargaron de hacer el domo del fondo que tiene 7 cm de altura. La capacidad de los cilindros de 50 cm de altura es de 35 L y el de 40 cm es de 40.

Una vez formados los cilindros, se procede a hacerles unas perforaciones de 1/2 " de diámetro en el centro de cada domo, las cuales se realizaron de manera progresiva con brocas de diferentes diámetros, desde uno pequeño hasta el diámetro final, todo esto para evitar que se rompa o estelle. La perforación se realiza para que ahí se coloque una válvula para retirar los sedimentos que se generen (Figura 4.8).



Figura 4.8. Cilindros termoformados con válvula.

4.1.3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE MESAS.

Es necesario construir algún tipo de soporte para la exposición y operación de los equipos del sistema de lodos activados, además se debe considerar que se debe trasladar a diferentes lugares y contar con espacio para la colocación de equipo adicional para su operación.

En el diseño también se contempló el peso de todos los accesorios y del agua que será ocupada, por lo que en la construcción se emplearon barras de acero en perfil angular de 90° de 1½ " con 3 mm de espesor. Una vez concluido el diseño y por lo tanto, conociendo la medida de cada tramo de ángulo, se calculó el número de piezas que se pueden obtener de cada barra de perfil, esto con el fin de disminuir el material desperdiciado.

Una vez cortadas las piezas se procedió a unir las con soldadura eléctrica (Figura 4.9), empezando con los rectángulos principales que formarían las bases superiores e inferiores, luego una serie de cuadrículas en la que descansan los cilindros dejando espacio para las válvulas de muestra o desalajo de agua y que están situadas en la parte intermedia; después se les pusieron ángulos de forma vertical para formar las patas de la mesa y con ellas unir todos los cuadros.



Figura 4.9. Soldado de mesa.

Para la movilidad del equipo se colocaron unas barras del mismo perfil en la parte inferior de la mesa, en las cuales mediante tornillos se fijaron unas ruedas (Figura 4.10). Una vez soldadas a la estructura principal se hicieron unas perforaciones de 1/3" de diámetro con taladro para la unión de las ruedas (Figura 4.11).



Figura 4.10. Rueda.



Figura 4.11. Perforación para sujetar ruedas.

Para dar estética y soporte a los cilindros, se colocaron una placas de madera (triplay) de 12 mm de espesor, a las cuales se les hicieron perforaciones para los tornillos con que se sujetarían a la estructura, asimismo, se hicieron tres perforaciones de 31 cm de diámetro por donde pasarían los cilindros (Figura 4.12). Posteriormente, la madera fue lijada con la ayuda de una lijadora eléctrica, se limpió el polvo y se les dieron dos manos de sellador para madera, después se procedió a sujetarlas con tornillos a la mesa y por ultimo se dieron dos manos de barniz transparente.



Figura 4.12. Lijado de madera y taladrado de hoyos.

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

Al final la mesa cuenta con dos niveles, el primer nivel tiene 66 cm de alto y 64.5 x 159.5 cm, en el cual están empotrados los cilindros dejando espacio para colocar equipo adicional. El segundo nivel tiene una altura de 96 cm y 65 x 41 cm donde se coloca una bomba dosificadora del agua que se va a estudiar.

4.1.3.2. EQUIPO COMPLEMENTARIO: BOMBAS DOSIFICADORAS Y AGITADORES.

Como complementos se tiene una bomba peristáltica (Figura 4.13) y dos agitadores. La bomba peristáltica es de marca Manostat y su función es la de alimentar el agua a tratar al primer tanque, así como trasvasarla hacia los siguientes tanques. Esta bomba trabaja con un motor eléctrico de corriente directa y velocidad variable controlada a través de un potenciómetro. Además cuenta también con cambio de sentido del flujo.



Figura 4.13. Bomba peristáltica.

Los dos agitadores de propelas que darán agitación al agua residual cuando tenga la mezcla de lodos activados. Estos agitadores al igual que la bomba, trabajan con un motor eléctrico de corriente directa y velocidad variable en ambas direcciones. Cada uno es gobernado por un controlador solid-state que ofrece un control preciso de ajuste de rango de 100:1. Un interruptor separado de adelante/apagado/atrás trabaja independientemente de la perilla de velocidad, permitiendo repetir velocidades de mezclado definidas para ser corridas en una siguiente vez.

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

Este controlador es conectado al mezclador por un cable de 180 cm que lo mantiene alejado de salpicaduras.

La flecha es una barra de 3/8" de diámetro a la que se le pueden colocar propelas de 5/16" de acero inoxidable para que sean resistentes a la corrosión y a la acidez de los líquidos. El soporte tiene resistencia a la corrosión al ser electropulido. La barra vertical es de 5/8" de diámetro por 70 cm de altura permitiendo el ajuste de altura a los elementos que se le puedan instalar.

Con el fin de proporcionar una adecuada oxigenación al tanque que funcionará como lodos activados, se colocará en el fondo del recipiente un difusor, el cuales mostrado en la Figura 4.14.



Figura 4.14. Difusores.

El sistema de tratamiento por lodos activados incluyendo los contenedores y accesorios se muestra en la Figura 4.15

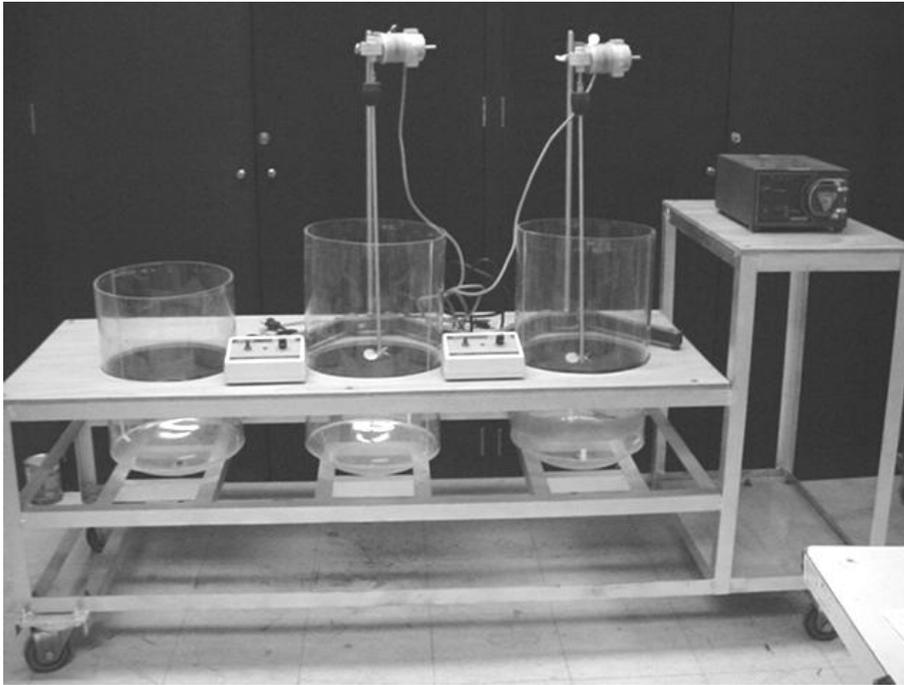


Figura 4.15. Modelo piloto de Reactor de Lodos Activados.

4.2. APLICACIÓN DE LOS MODELOS PILOTO.

El contar con modelos piloto de tratamiento biológico de aguas residuales apoyará el aprendizaje de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil de la FES Aragón, debido a que los conocimientos no serán sólo transmitidos de forma teórica, sino que podrán realizarse prácticas de laboratorio para obtener datos experimentales necesarios para el diseño, que generalmente se obtienen de referencias bibliográficas y que en ocasiones no cumplen con las características del agua y condiciones climáticas en México.

Para cumplir lo anterior, se diseñaron una serie de prácticas de laboratorio para cada uno de los equipos. En éstas se da un objetivo, equipo y materiales necesarios, así como el procedimiento a seguir, además la información que debe contener el reporte.

Para la columna de sedimentación se presentan dos prácticas: la primera en la que se determina la cantidad de floculante/coagulante y en la segunda se obtiene resultados para diseñar sedimentadores de acuerdo a las características del material particulado disuelto en el agua estudiada. Para el modelo de lodos activados, la práctica consiste en arrancar y operar el reactor y evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes de acuerdo con la edad de los lodos y la cantidad de sustrato de alimentación.

4.2.1. SEDIMENTACIÓN PRIMARIA.

Práctica No. 1 – Floculación y Coagulación.

Objetivo.

Determinar la cantidad óptima de diferentes floculantes / coagulantes para remover sólidos en aguas residuales mediante pruebas de jarras.

Introducción.

Las aguas residuales y naturales contienen tres tipos de sólidos no sedimentables:

- Suspendidos.
- Coloidales.
- Disueltos.

Los *sólidos suspendidos* son transportados gracias a la acción de arrastre y soporte del movimiento del agua; los más pequeños (menos de 0.01 mm) no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables, y los más grandes (mayores de 0.01 mm) son generalmente sedimentables.

Los *sólidos coloidales* consisten en limo fino, bacterias, partículas causantes de color, virus, etc., los cuales no se sedimentan sino después de períodos razonables y su efecto global se traduce en el color y la turbidez de aguas sedimentadas sin coagulación.

Los *sólidos disueltos*, materia orgánica e inorgánica, son invisibles separadamente, no son sedimentables y globalmente causan diferentes problemas de olor, sabor, color y salud, a menos que sean precipitados y removidos mediante métodos físicos y químicos.

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

La coagulación y floculación son procesos unitarios usados para causar la coalescencia o agregación de material suspendido no sedimentable y partículas coloidales del agua y de las aguas residuales; es el proceso por el cual se reducen las fuerzas repelentes existentes entre partículas coloidales para formar partículas mayores de buena sedimentación.

El proceso consiste en la adición de sustancias químicas al agua, su distribución uniforme en ella y la formación de un flóculo fácilmente sedimentable.

Las sustancias coagulantes de mayor uso son las sales de aluminio (sulfatos) y hierro (cloruros y sulfatos).

Equipo y materiales.

Crisoles Gooch.

Material de Vidrio (pipetas, vasos de precipitados y matraces).

Cronómetros.

Filtros para sólidos suspendidos.

Bomba de vacío.

Turbidímetro.

Potenciómetro.

Estufa.

Balanza analítica.

Equipo de pruebas de jarras.

Reactivos.

Sulfato de aluminio (solución de 50 g/L).

Cloruro férrico (solución de 50 g/L).

Hidróxido de sodio (1M).

Ácido sulfúrico (1M).

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

Procedimiento.

a) Determinación del pH óptimo.

- Determinar la concentración de sólidos suspendidos, turbidez y pH.
- Colocar en un vaso de precipitados con agitación, 200 mL de muestra. Adicionar de 1 en 1 mL la solución de 50 g de coagulante (Al o Fe) / L de agua, hasta observar una buena formación de flóculos. Registrar esta concentración de coagulante.
- En cada uno de los vasos de precipitados del equipo para prueba de jarras, coloque 2 L de agua residual. Adicionar ácido sulfúrico 1M o hidróxido de sodio 1M para ajustar el pH, para que cada vaso con las muestras de agua tenga un pH de 4, 5, 6, 7, 8 y 9.
- Adicione a las muestras para el coagulante para alcanzar la concentración que se obtuvo en el segundo paso.
- Mezcle rápido durante dos minutos a rpm máxima, después, durante 15 minutos mezcle de 10 a 20 rpm. Tome el tiempo en que se forman los flóculos en cada muestra.
- Espere 20 minutos para que se sedimenten los flóculos y determine nuevamente el pH, sólidos suspendidos y la turbidez de cada muestra.
- Construya una gráfica de cada uno de los parámetros anteriores en función del pH.

b) Determinación de la dosis de coagulante.

- Prepare seis muestras de 2 L de agua residual y ajuste todas al pH óptimo que se determino en la prueba a).
 - Para esta prueba use de 25% a 200% de la dosis de coagulante utilizada para determinar el pH óptimo; pruebe seis dosis diferentes.
 - Mezcle durante 2 minutos a rpm máxima, después mezcle lento durante 15 minutos a 10 – 20 minutos. Registre el tiempo en el que se forman los flóculos.
 - Deje sedimentar durante 20 minutos y determine en el sobrenadante los sólidos suspendidos y la turbidez de cada muestra.
 - Elabore una gráfica de sólidos suspendidos y de turbidez en función de la dosis de coagulante.
-

c) Propiedades de sedimentación y cantidad de lodos.

- Prepare 1.5 L de agua residual con pH y dosis óptima
- Mezcle rápidamente durante 2 minutos a rpm máxima (coagulación); después mezcle lentamente durante 15 minutos a 10 – 20 rpm y registre el tiempo en el que se formen los flóculos.
- Pase con cuidado a una probeta de 1 L para evitar que los flóculos se rompan.
- Mida la altura de la interfase a diferentes tiempos hasta la estabilización. Elabore la gráfica de la variación de la altura en función del tiempo para obtener la velocidad de sedimentación.
- Deje sedimentar durante 20 minutos y mida el volumen de los lodos. Elimine con cuidado el sobrenadante para no perder los lodos, mida la humedad y la concentración de los sólidos suspendidos.

Reporte de la práctica.

1. ¿Qué finalidad tiene el mezclado rápido?
2. ¿Qué finalidad tiene el mezclado lento?
3. Haga una gráfica de sólidos suspendidos residuales y de turbidez en función del pH.
4. Haga una gráfica de sólidos suspendidos residuales y de turbidez en función de la dosis de coagulante.
5. ¿Cuál es el pH y la dosis óptimos para los tipos de coagulantes probados?
6. De los coagulantes usados ¿Cuál recomendaría y por qué?

Práctica No. 2 – Sedimentación.

Objetivo.

A partir de resultados experimentales, obtener los parámetros de diseño de desarenadores, sedimentadores primarios y sedimentadores secundarios de partículas cuyo tipo de sedimentación es discreta, floculenta y zonal.

Introducción.

Esta práctica está dividida en dos secciones que tratarán los tipos de sedimentación discreta y floculenta; la sedimentación zonal no se estudiará debido a la dificultad que representa conseguir lodos de aguas residuales a diferentes concentraciones.

La sedimentación es un proceso mediante el cual se separan partículas de diferente tamaño. En el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, la sedimentación constituye la función a que se destinan:

1. Las cámaras desarenadoras que separan los sólidos inertes como minerales pesados o de otro tipo, del líquido que fluye (generalmente son aguas negras combinadas), por medio de la sedimentación discreta y el arrastre.
2. Los tanques sedimentadores primarios que colectan gran parte de la carga de impurezas en suspensión o de la carga de impurezas que han tomado la forma de sólidos en suspensión, antes de la descarga del efluente clarificado a las aguas receptoras o como etapa previa a su tratamiento posterior. En muchos casos se ayuda a sedimentar a las partículas mediante la adición de sustancias coagulantes o floculantes, conociéndose a esta sedimentación como floculenta.

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

3. Los tanques sedimentadores secundarios que colectan las sustancias convertidas en sólidos sedimentables, o que se han acondicionado como tales en alguna otra forma, mediante procesos biológicos, es decir, captan el efluente de un proceso de lodos activados, a este tipo de sedimentación se le conoce como zonal.

Primera parte: Sedimentación discreta.

Equipo y material

Probetas de 1 L.

Cronómetros.

Crisoles Gooch

Material de vidrio (pipetas, vasos de precipitados, matraces).

Filtros para sólidos suspendidos.

Bomba de vacío.

Tubería de vidrio.

Estufa.

Balanza analítica.

Procedimiento.

1. Llene una probeta de 1L con la muestra que contiene arena (partículas discretas) a las concentraciones de 100, 250, 500 y 750 mg de arena / L.
 2. Mezcle durante 1 minuto para homogeneizar; deje reposar para permitir la sedimentación.
 3. Tome muestras a diferentes intervalos (cada 4 minutos) a una altura predeterminada y constante (20 cm) de la superficie del líquido en la probeta.
 4. Analice los sólidos suspendidos totales de las muestras tomadas en diferentes tiempos.
-

**CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS
Y OPERACIONES UNITARIAS.**

5. Haga lo mismo para las diferentes concentraciones especificadas en el primer punto de esta práctica, es decir, 100, 250, 500 y 750 mg de arena / L.

Cálculos.

1. Elabore un cuadro como el que se muestra a continuación para cada una de las concentraciones especificadas en el punto 1 del procedimiento.

Tiempo (min)	Sólidos Suspendedos (mg/L)	Velocidad de Sedimentación (cm/min)	Sólidos Suspendedos Residuales (%)
0.0			100
4.0			
8.0			
12.0			
16.0			
20.0		1	

Para el cálculo de la velocidad de sedimentación para cada tiempo, se obtiene dividiendo la distancia ($D = 20$ cm) entre el tiempo de sedimentación, primera columna del cuadro anterior.

El porcentaje de sólidos residuales se obtiene de la siguiente forma:

$$\% SR = \frac{S_t}{S_0} * 100$$

Donde:

S_t = Concentración de sólidos al tiempo t.

S_0 = Concentración de sólidos iniciales (t=0)

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

2. Elabore una gráfica de la fracción de sólidos residuales (cuarta columna) contra la velocidad de sedimentación (tercera columna).
3. De la figura obtenida experimentalmente seleccione una velocidad de sedimentación (V_0) y calcule el total de sólidos suspendidos removidos (R) a la velocidad seleccionada, según la siguiente ecuación.

$$R = (1 - C_0) + \frac{1}{V_0} \int_0^{C_0} V dC$$

Donde:

C_0 = Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor o igual a V_0

V_0 = Factor de carga (Flujo / área).

V = Velocidad de sedimentación.

4. Calcule el factor de carga ($Q/A = m^3/(m^2d)$) para la velocidad seleccionada.
5. Hago lo mismo que el punto 3, pero ahora seleccione diferentes velocidades de sedimentación.
6. Obtenga la gráfica del porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales para diferentes factores de carga.

Reporte de la práctica.

1. Para las diferentes concentraciones de sólidos, especificadas en el primer punto del procedimiento, reporte los cálculos y las gráficas de:
 - a. Porcentaje de sólidos residuales en función de la velocidad de sedimentación.
 - b. Porcentaje de remoción de SST en función del factor de carga.
 2. Analice y concluya sobre los resultados y las gráficas obtenidas.
-

Segunda parte: Sedimentación flocculenta.

Equipo y material

Probetas de 1 L.

Cronómetros.

Crisoles Gooch

Material de vidrio (pipetas, vasos de precipitados, matraces).

Filtros para sólidos suspendidos.

Bomba de vacío.

Tubería de vidrio.

Estufa.

Balanza analítica.

Columna de sedimentación.

Procedimiento.

1. Prepare 70 L de muestra ajustando a las condiciones óptimas de pH y de la dosis de coagulante para obtener una clarificación óptima de la muestra. Homogenice mediante agitación.
 2. Determine la concentración de sólidos suspendidos al tiempo cero.
 3. Adicione la muestra a la columna de sedimentación.
 4. tome al mismo tiempo muestras de las cuatro válvulas de la columna a los 5, 10, 20, 30 y 40 minutos.
 5. Determine la concentración de SST de cada una de las muestras tomadas.
 6. Al terminar habrá obtenido los sólidos suspendidos residuales para los tiempos especificados en el punto 4, a cada altura de la columna, lo mismo que los sólidos suspendidos totales en los lodos.
 7. Al finalizar la prueba, lave la columna de sedimentación con agua, detergente y esponja suave para evitar que se raye.
-

**CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS
Y OPERACIONES UNITARIAS.**

Cálculos.

1. Calcule de la siguiente forma la fracción de sólidos suspendidos totales residuales (X_0) en cada punto de muestreo:

$$X_0 = \frac{SST}{SST_0}$$

Y en porcentaje:

$$Y = \frac{SST}{SST_0} * 100$$

2. Para calcular la fracción de los sólidos suspendidos totales removidos en cada punto de muestreo y en porcentaje se tiene:

$$\text{Fracción de SST removidos} = 1 - X_0$$

En porcentaje:

$$\text{SST removidos} = 100 - Y$$

3. Llene el siguiente cuadro para cada altura de donde se tomaron las muestras (0.5, 1.0 y 1.5 m).

Tiempo (min)	SST residuales (mg/L)	SST residuales (%)	SST removidos (%)
5			
10			
20			
30			
40			

Con los datos de la tabla elabore para cada altura una gráfica de porcentaje de SST removidos en función del tiempo. Con base en esta gráfica elabore una figura de profundidad en función del tiempo a diferentes porcentajes de sólidos suspendidos removidos.

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

4. Obtenga la remoción de sólidos suspendidos totales para la altura de 1.5 m utilizando los tiempos obtenidos para esta altura. Utilice los datos del cuadro anterior, de la gráfica del punto 3 y de la siguiente ecuación.

$$\text{Remoción}_{total} = (1 - X_0) + \int_0^{x_0} \frac{h}{H} dx$$

Donde:

h = Profundidad de sedimentación media.

H = Altura de sedimentación (en este caso 1.5 m).

Reporte de la práctica.

1. Para las tres diferentes alturas de la columna obtenga la curva de variación del porcentaje de sólidos removidos en función del tiempo.
2. Haga una gráfica de remoción total en función del tiempo de sedimentación.
3. Haga una gráfica de remoción total en función del factor de carga ($\text{m}^3/\text{m}^2\text{d}$).
4. Para los lodos (datos obtenidos en la válvula de hasta abajo), trace una gráfica de los porcentajes de sólidos, en función del tiempo de sedimentación.

4.2.2. TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL POR EL PROCESO DE Lodos Activados.

Práctica No. 3 – Métodos para controlar sistemas de lodos activados.

Objetivo.

Aplicar los métodos para controlar la operación de procesos aerobios de tratamiento de aguas residuales en un sistema piloto de lodos activados, utilizando la variación de la edad de lodos (TRS) y la relación alimento – microorganismo (A / M).

Introducción.

Los lodos activados al igual que las lagunas de aireación son los procesos más utilizados para el tratamiento de las aguas residuales. La principal diferencia entre estos procesos es la recirculación de los lodos biológicos en el biorreactor aireado; en el caso de las lagunas no hay recirculación de lodos, mientras que en el sistema de lodos activados sí la hay, lo que permite mantener altas concentraciones de lodos biológicos, también conocidos como Sólidos Suspendidos Volátiles del Licor Mezclado (SSVLM) y como consecuencia, se tiene que los tiempos de residencia, el tamaño de los reactores y las áreas de construcción sean menores que cuando se utilizan lagunas aireadas.

Las condiciones para operar estos sistemas deben estar controladas a fin de mantenerlas dentro de ciertos límites y así obtener un buen nivel de eficiencia para remover los contaminantes. De los métodos de control más utilizados se tienen:

1. El mantenimiento constante de los sólidos suspendidos volátiles del licor mezclado (SSVLM).
 2. El mantenimiento constante de la relación alimento – microorganismo (A/M)
 3. El mantenimiento constante de la edad de los lodos (TRS).
-

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

El primer método tiene la limitante de que ignora la relación A/M, lo que puede provocar ineficiencias en la operación del sistema.

Equipo y material

Rotámetro.

Bombas peristálticas.

Crisoles Gooch y filtros.

Cronómetros.

Medidos de oxígeno disuelto.

Material de vidrio (pipetas, vasos de precipitados, matraces).

Microscopio.

Portas y cubre objetos.

Agitador magnético.

Reactivos.

Reactivos para el análisis de Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO).

Equipo de lodos activados.

El equipo está formado por dos recipientes de acrílico transparente que permite ver lo que está pasando en el interior del sistema.

El reactor biológico que trabaja con un volumen de operación de 20 litros que tiene un difusor y un motor de velocidad controlada y variable, que mueve una flecha con turbina desmontable y una válvula que sirve para muestreo y purga. La alimentación se hace por

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

medio de una bomba dosificadora que puede ajustarse para manejar diferentes flujos (L/h), por lo tanto, diferentes tiempos de residencia hidráulicos en el reactor aireado.

El agua tratada que sale del reactor entra en el sedimentador con una capacidad de 20 litros de volumen de operación; el sedimentador cuenta con un motor de velocidad controlada y variable que hace girar unas aspas ubicadas en el fondo para concentrar los lodos.

Procedimiento experimental.

Primera parte: arranque del reactor de lodos activados.

1. Ajuste el flujo de alimentación que se desea utilizando la bomba dosificadora y el flujo de lodos que se harán recircular con la bomba de recirculación.
2. Verifique que las válvulas de descarga estén cerradas y proceda a cargar el reactor y el sedimentador con agua residual doméstica, obtenida del reactor de aireación de alguna planta de tratamiento de aguas residuales en operación; como esa agua ya tiene lodos activados ya no será necesario desarrollarlos, lo que permitirá ahorrar tiempo.
3. Aplique aire al reactor y ponga en operación el motor para comenzar una agitación, regulando la velocidad. Se recomienda mantener una concentración de oxígeno disuelto de 1.5 a 2.0 mg/L.
4. Confirme que el agua que se va a tratar entre en el reactor biológico y posteriormente pase al otro tanque.
5. Mantenga una recirculación de lodos adecuada, aproximadamente el 90%.
6. Las aspas del sedimentador deben girar a una velocidad de 0.3 m/min para evitar que el lodo se expanda.

Segunda parte: variación de la edad de lodos (TRS).

Después del arranque del equipo, se puede proceder a ajustar el flujo de alimentación inicial (Q_F) a 6 L/h a fin de mantener un tiempo de residencia hidráulico (t_h) de cinco horas, con un flujo de reciclo de lodos (Q_r) de 1.8 L/h.

CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS Y OPERACIONES UNITARIAS.

Antes de iniciar cada una de las pruebas es necesario dejar que el sistema opere durante un período de 3 a 4 tiempos de residencia (15 a 20 horas) para alcanzar el equilibrio. Los flujos de desecho de lodos (Q_w) que se manejarán en cada prueba son los siguientes:

Prueba	Q_w (L/d)
1	0
2	0.35
3	0.70
4	1.40

Tercera parte: variación de la relación alimento – microorganismo (A/M).

Ajuste el flujo de alimentación inicial (Q_F) a 6 L/h para mantener un tiempo de residencia hidráulico (t_h) de 5 h, con un flujo de desecho de lodos (Q_w) de 1.4 L/d. al comienzo de cada una de las pruebas deje que el sistema opere durante un período de 3 a 4 tiempos de residencia (15 a 20) horas para alcanzar el equilibrio. Pruebe ahora cuatro relaciones de reciclo de lodos \mathcal{R} fijando los flujos de reciclo (Q_r) en cada prueba, según el cuadro siguiente:

Prueba	r (Q_r / Q_F)	Q_r (L/h)
1	0	0
2	0.15	0.9
3	0.30	1.8
4	0.60	3.6

Mediciones.

Cuando se alcance el equilibrio del sistema según los criterios especificados en el método experimental efectúe las siguientes determinaciones en todas las pruebas:

**CAPÍTULO IV. MODELOS PILOTO DE PROCESOS
Y OPERACIONES UNITARIAS.**

Análisis	Agua residual inicial	Licor mezclado	Efluente	Corriente de reciclo
DBO, DQO	X		X	
pH	X	X	X	
SST, SSV		X	X	X
Oxígeno disuelto		X		
Observación microscópica		X		X

La edad de los (TRS) se obtiene con la siguiente ecuación:

$$TRS = \frac{X_{va} * V}{Q_w * X_u + Q_e * X_e}$$

Donde:

Xva = Concentración de SSVLM (mg/L)

Xu = Concentración de SSV en el flujo de reciclo (mg/L)

Xe = Concentración de SSV en el efluente final (mg/L)

Qw = Flujo de desecho (L/d)

Qe = Flujo del efluente tratado (L/d)

V = Volumen del reactor (L)

Reporte de la práctica.

1. Para conocer la variación de la edad de lodos y de la relación A/M, registre los resultados de todos los análisis. Analícelos y determine las condiciones en las que opera mejor el sistema y explique su respuesta.
2. Trace la gráfica de DQO del agua tratada de la relación A/M y de la concentración de SSV en el reactor biológico, según la edad de los lodos para la variación de la relación A/M. Analice.

Haga un dibujo de lo observado en el microscopio.

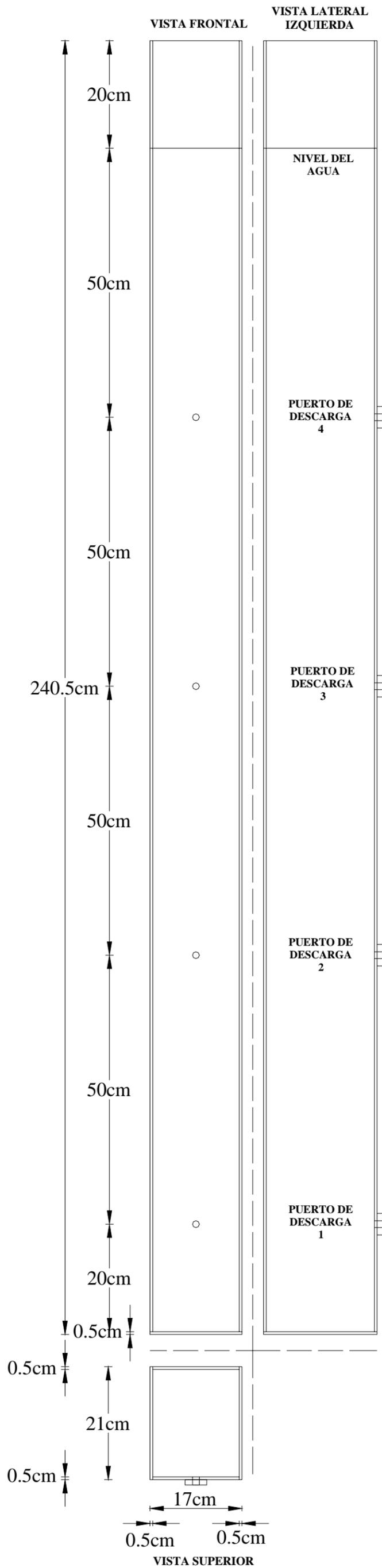
**CAPÍTULO V.
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

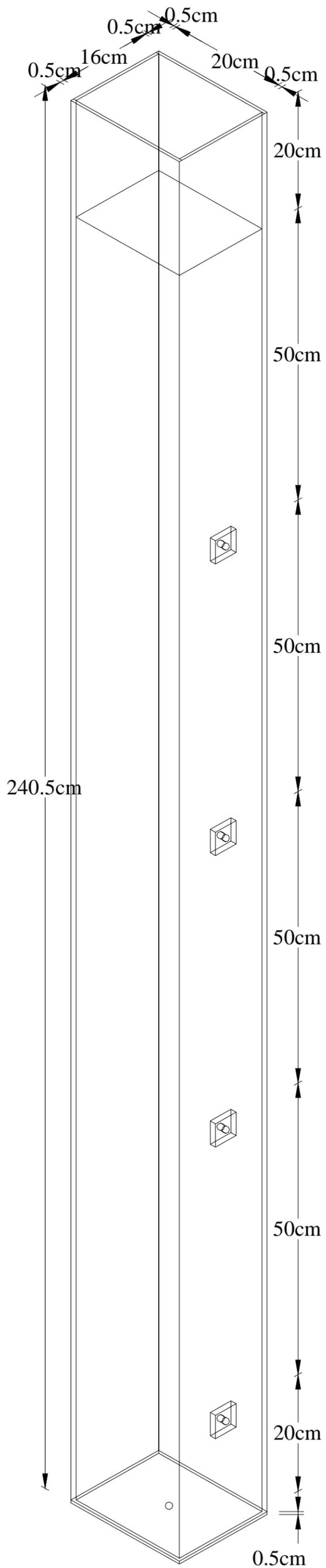
1. Los modelos de operaciones unitarias de tratamiento de aguas residuales a escala laboratorio que se construyeron son:
 - Dos columnas de sedimentación
 - Un sistema de tratamiento biológico por lodos activados que incluye un tanque de sedimentación primaria, un tanque aireador y un tanque clarificador
2. Se diseñaron tres prácticas de laboratorio, de las cuales dos están enfocadas a la sedimentación y la restante al proceso biológico.
3. El contar con los modelos y las prácticas de laboratorio contribuirán a mejorar la enseñanza de los conceptos ambientales en la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Estudios Superiores Aragón, debido a dichos conceptos no sólo se transmitirán a los alumnos de forma teórica sino también de forma práctica, contribuyendo a que adquirirán experiencia para el diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales a escala real.
4. Se recomienda que se diseñen y construyan otros modelos de tratamiento de aguas residuales para que de esta forma, se pueda hacer un comparativo entre las eficiencias de remoción de contaminantes, requerimientos energéticos de operación y los procedimientos de funcionamiento de cada uno de los modelos. Entre los que se sugieren están los humedales artificiales, biodiscos y un reactor anaerobio.
5. Se recomienda diseñar nuevas prácticas de laboratorio para que se puedan obtener otro tipo de datos con dichos modelos, como por ejemplo, para determinar el tiempo de residencia del agua residual.

APÉNDICE

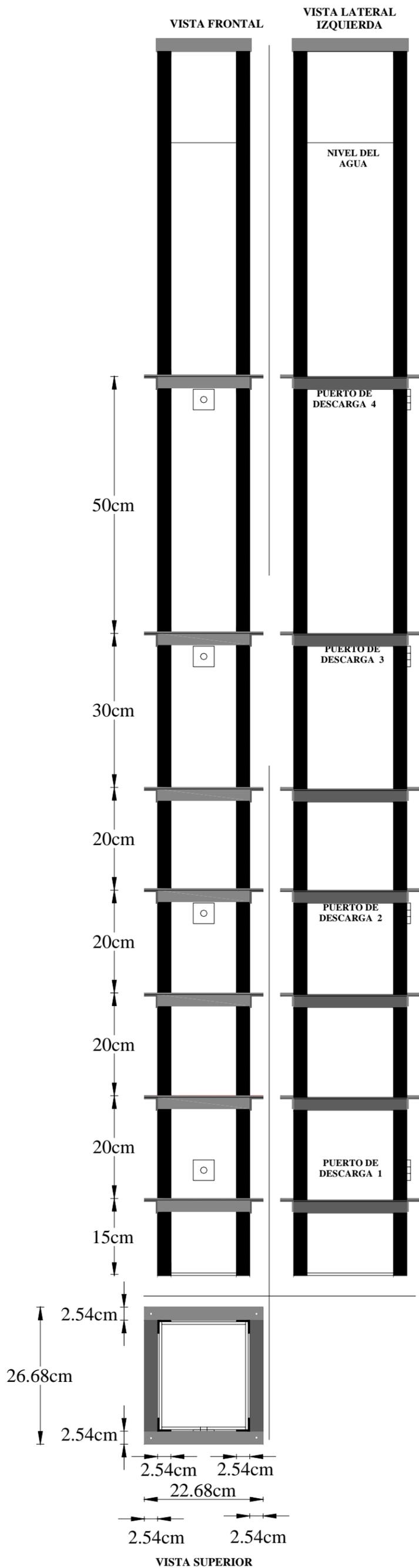
A. PLANOS.



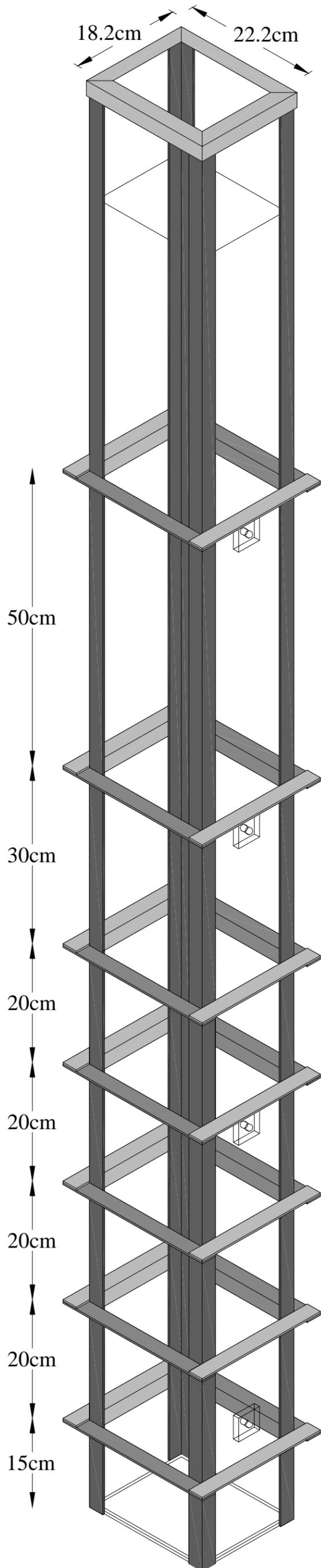
		<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p> <p>FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES</p> <p>ARAGÓN</p> <p>TESIS DE LICENCIATURA</p> <p>INGENIERÍA CIVIL</p>	
Realizó: Oscar Mendez González		Montea Columna Acrílico.	
Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González		Plano No. 1.	



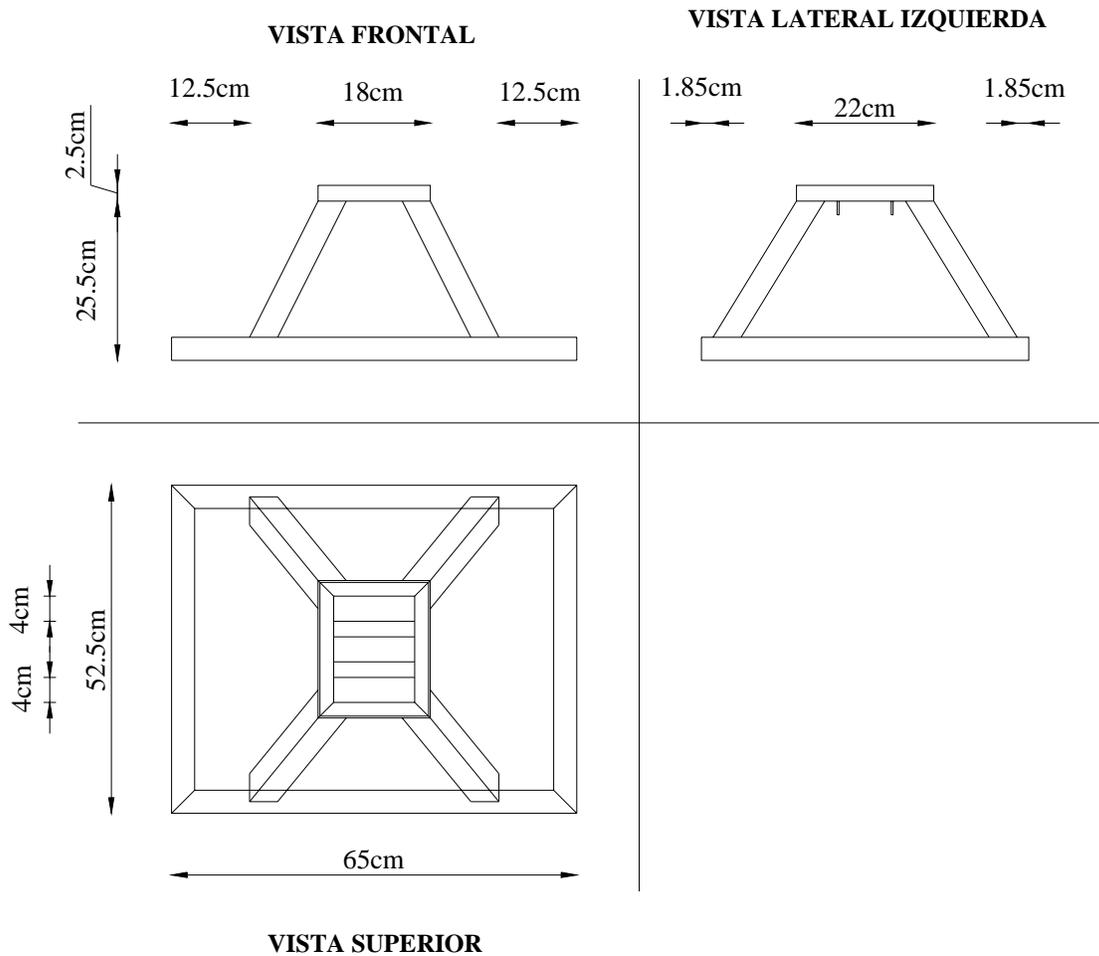
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO	
	FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN	
TESIS DE LICENCIATURA	
INGENIERÍA CIVIL	
	
Isométrico Columna	
Acrílico.	
Plano No. 2.	
Realizó: Oscar Mendez González	
Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González	



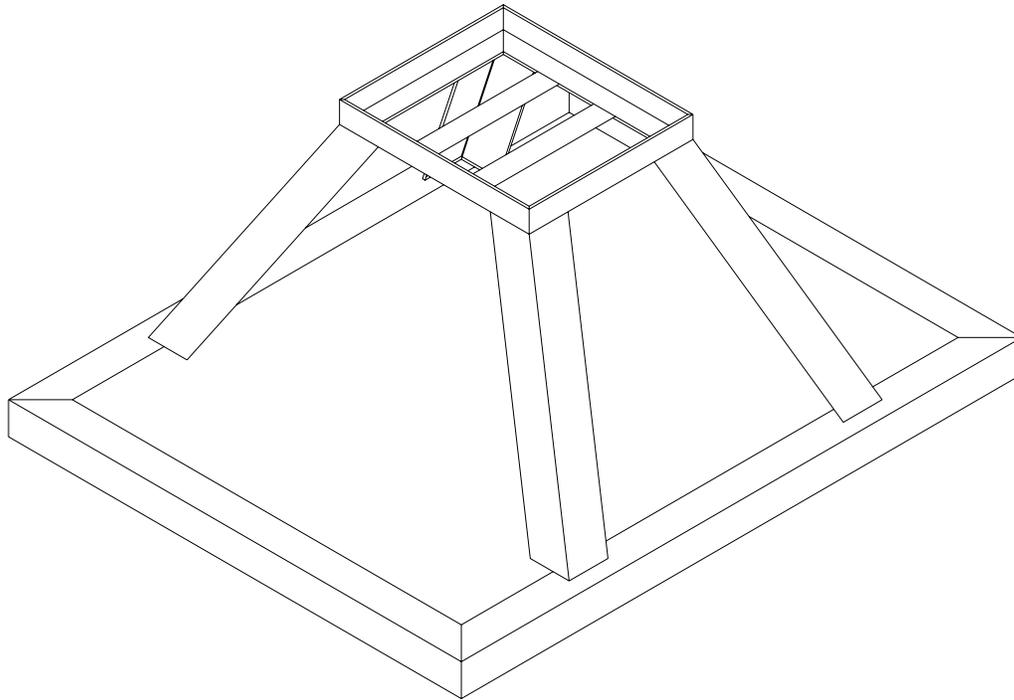
	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p> <p>FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES</p> <p>ARAGÓN</p> <p>TESIS DE LICENCIATURA</p> <p>INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>Realizó: Oscar Mendez González</p> <p>Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González</p>		<p>Montea Columna Refuerzo Aluminio. Plano No. 3.</p>



	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN TESIS DE LICENCIATURA INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>Realizó: Oscar Mendez González Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González</p>		<p>Isométrico Columna Refuerzo Aluminio. Plano No. 4.</p>



	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p>	
	<p>FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES</p>	
	<p>ARAGÓN</p>	
	<p>TESIS DE LICENCIATURA</p>	
	<p>INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>Realizó: Oscar Mendez González</p>	<p>Montea Base Columna.</p>	
<p>Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González</p>	<p>Plano No. 5.</p>	



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ARAGÓN

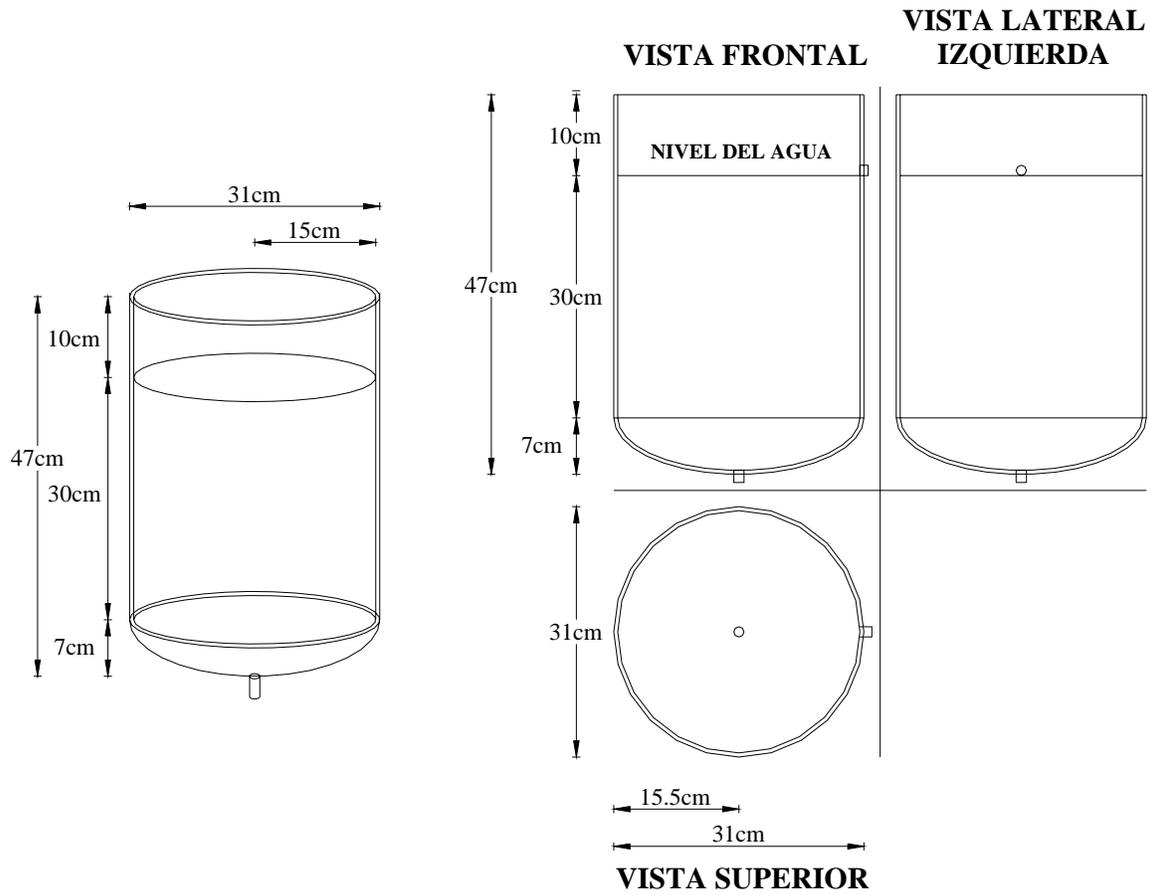
TESIS DE LICENCIATURA

INGENIERÍA CIVIL

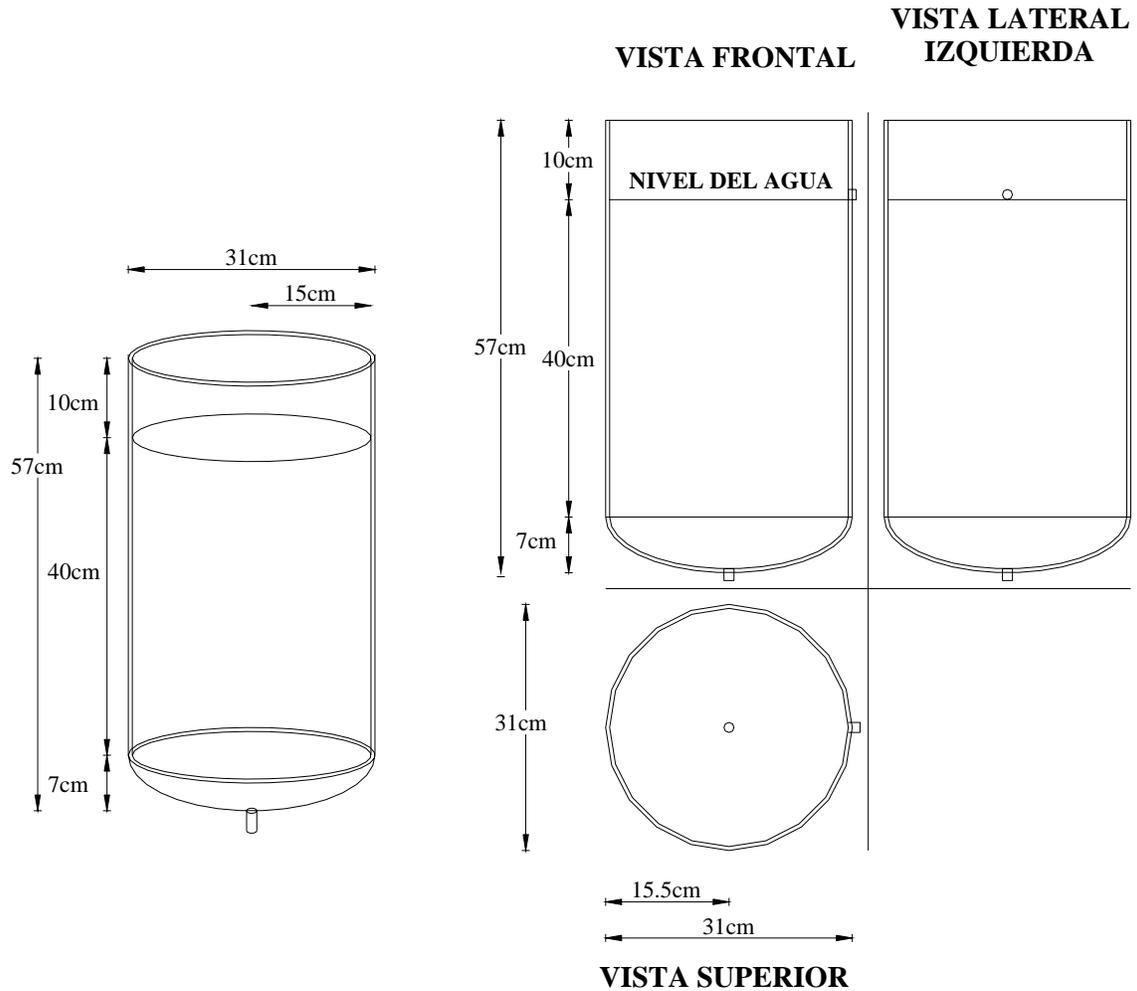


Realizó: Oscar Mendez González
Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González

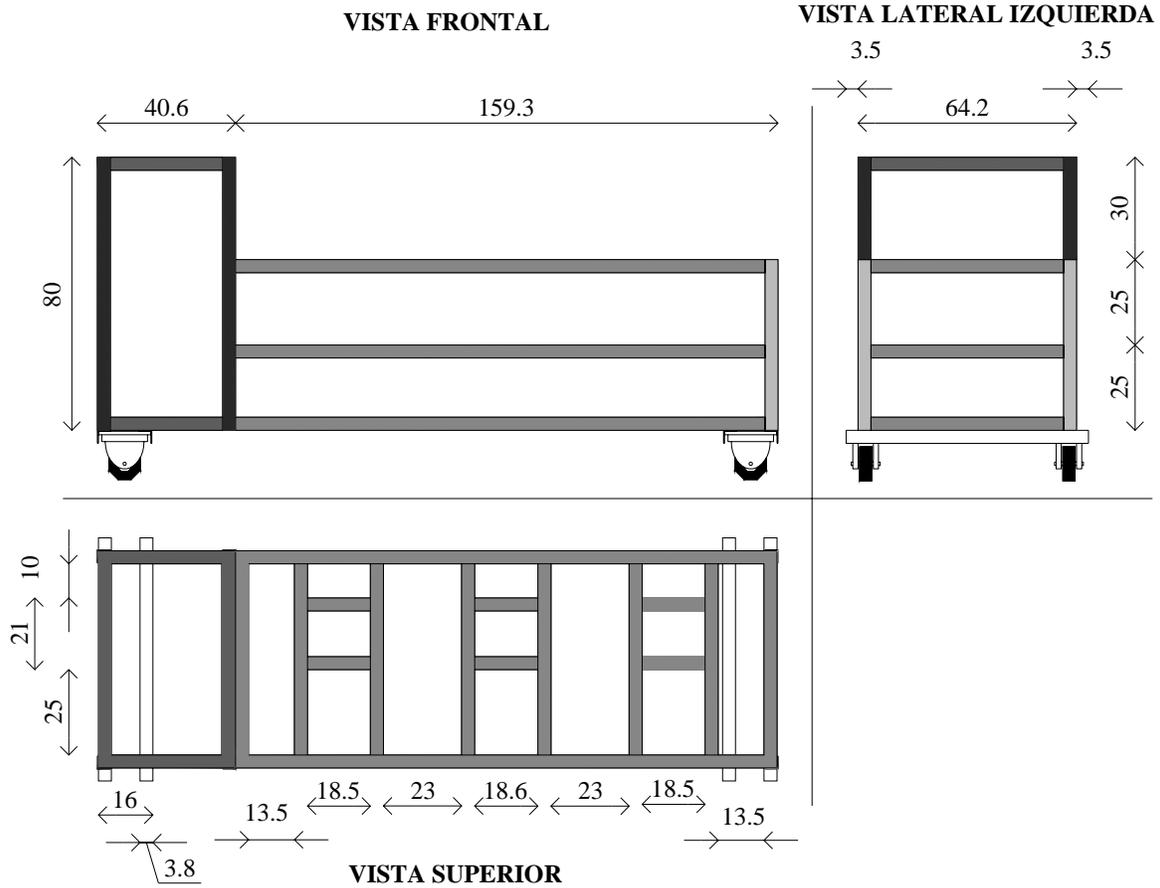
Isométrico Base Columna.
Plano No. 6.



	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p> <p>FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES</p> <p>ARAGÓN</p> <p>TESIS DE LICENCIATURA</p> <p>INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>Realizó: Oscar Mendez González Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González</p>	<p>Isométrico y Montea Cilindros Tipo 1. Plano No. 7.</p>	



	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p>	
	<p>FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES</p>	
	<p>ARAGÓN</p>	
	<p>TESIS DE LICENCIATURA</p>	
	<p>INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>Realizó: Oscar Mendez González</p>	<p>Isométrico y Montea Cilindros Tipo 2.</p>	
<p>Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González</p>	<p>Plano No. 8.</p>	



	<p>UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO</p>	
	<p>FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES</p>	
	<p>ARAGÓN</p>	
	<p>TESIS DE LICENCIATURA</p>	
	<p>INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>Realizó: Oscar Mendez González Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González</p>	<p>Montea Mesa de Hierro para Lodos. Plano No. 9. Observación: Medidas en centímetros.</p>	



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ARAGÓN

TESIS DE LICENCIATURA

INGENIERÍA CIVIL



Realizó: Oscar Mendez González

Isometrico Mesa de Hierro para Lodos.

Revisó: I.Q. Sergio Alfonso Martínez González

Plano No. 10.

B. FOTOS.



Corte de placas.



Comprobación de medidas.



Canteado de caras de columna.



Pintado de base columna.



Columna sin refuerzo.



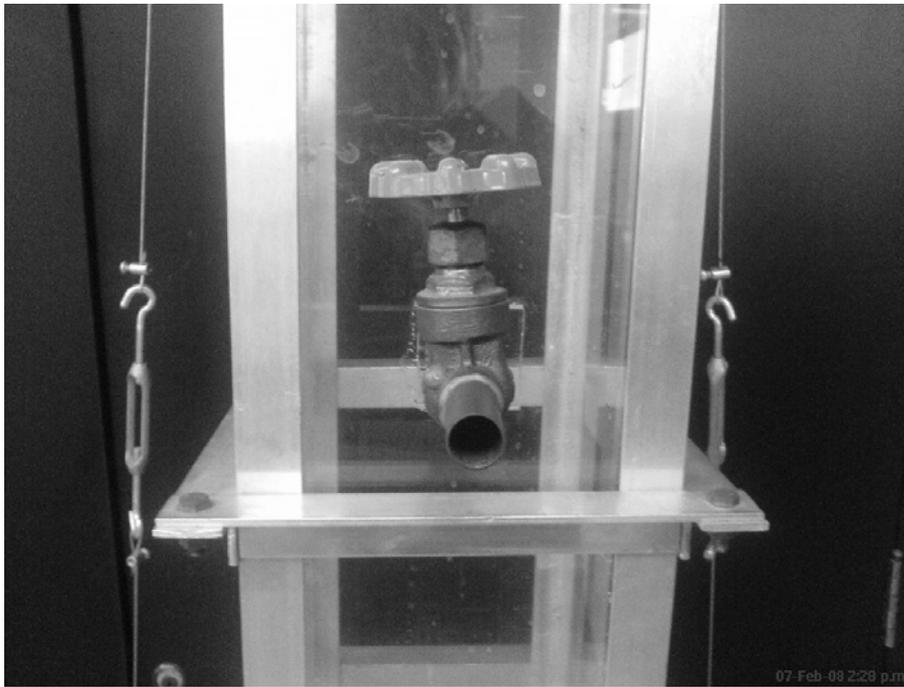
Preparación de columna primera prueba.



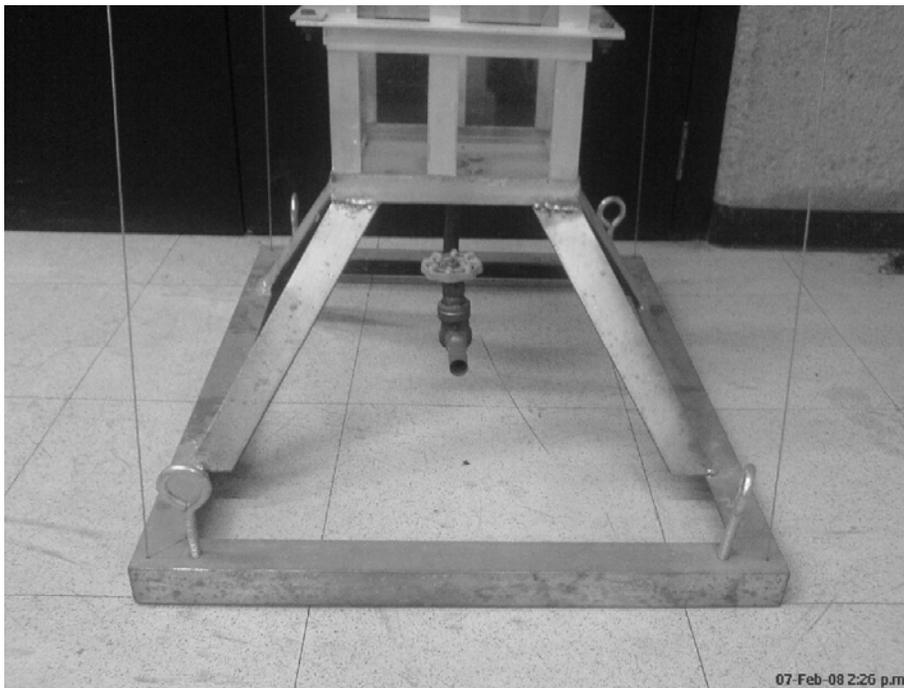
Inicio de prueba.



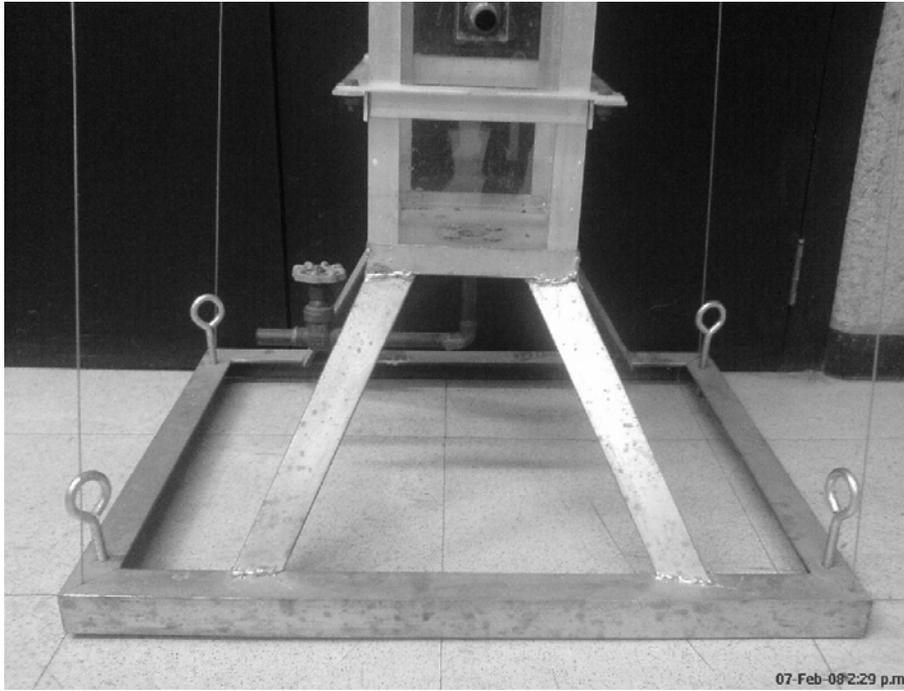
Válvulas y cinturones de columna vista lateral.



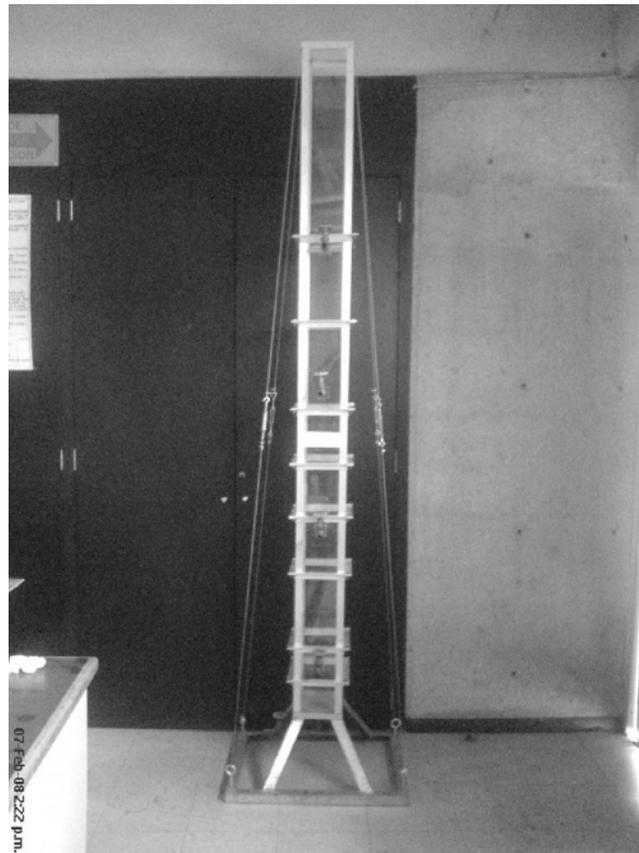
Válvulas y cinturones de columna vista frontal.



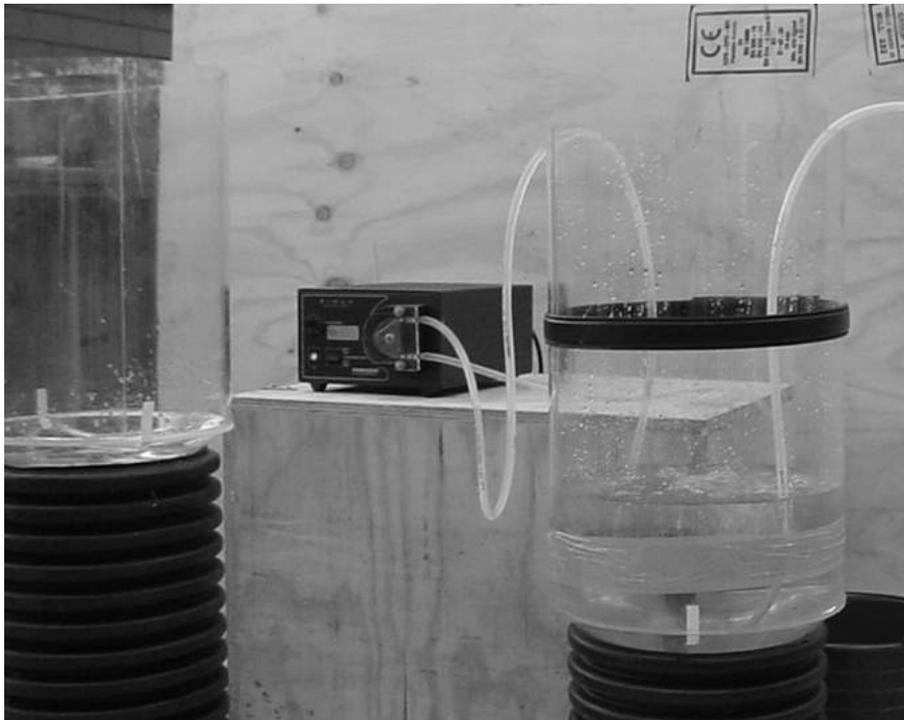
Columna con base – vista frontal.



Columna con base – vista lateral.



Columna final vista frontal.



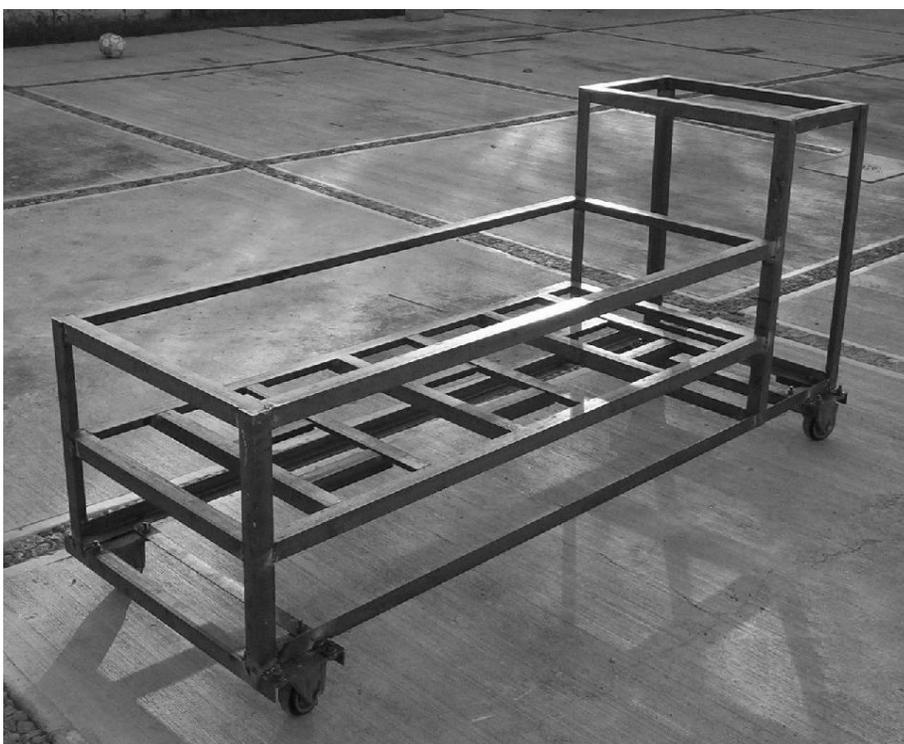
Prueba de cilindros.



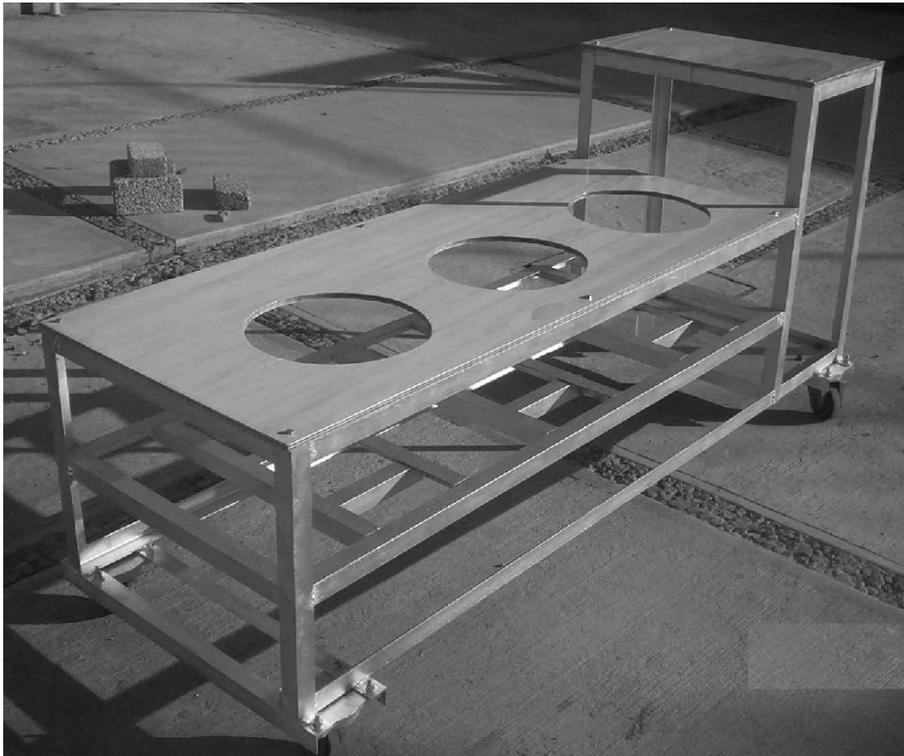
Prueba de cilindros.



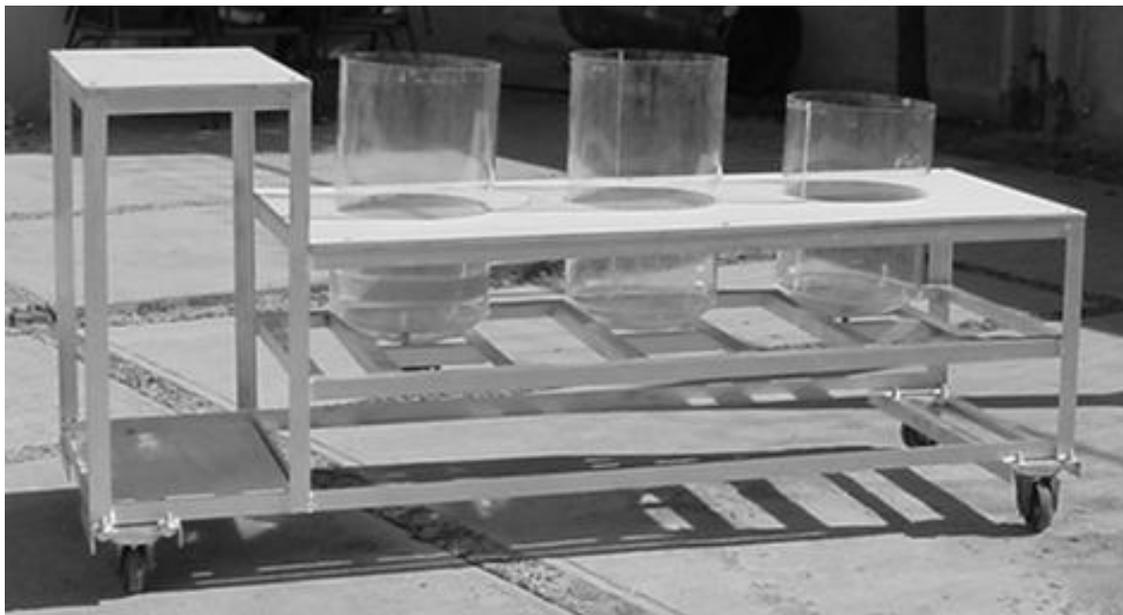
Soldado de mesa de Lodos Activados.



Mesa Lodos soldada.



Mesa Lodos pintada y con placas de triplay.



Mesa Lodos Activados.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) **METCALF & EDDY; Wastewater Engineering, Treatment And Reuse**; Singapur 2004; Editorial Mc Graw Hill; Cuarta edición; 1820 páginas.
 - (2) **JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS; Tratamiento De Aguas Residuales, Teoría y Principios**; México 1999; Editorial Alfa Omega; 2ª. Edición; 1232 páginas.
 - (3) **CLEMENTINA R. RAMÍREZ CORTINA; Tratamiento De Aguas Residuales Industriales**; México, D.F. 1992; Editorial Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco; Editorial Eón, S.A. de C.V.; Primera edición; 204 paginas.
 - (4) **ALBERTO LOYOLA ROBLES; Alternativas de Tratamiento de Aguas Residuales**; México, D.F. 2000; Editorial IMTA; Primera Reimpresión; 413 paginas.
 - (5) **JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS; Calidad Del Agua**; México 1999; Editorial Alfa Omega; 2ª. Edición; 274 páginas.
 - (6) **RUBENS SETTE RAMALHO; Tratamiento De Aguas Residuales**; Barcelona España, 1986; Editorial Reverte S.A.; Segunda edición; 705 paginas.
 - (7) **DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK, Manual De Tratamiento De Aguas Negras**; México, D.F. 2000; Editorial Limusa, Noriega Editores; Decimoctava reimpresión; 304 paginas.
 - (8) **BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS; La Contaminación Ambiental en México: Causas, Efectos y Tecnología Apropriada**; México, D.F. 2006; Limusa Editores, Instituto de Ingeniería UNAM, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C.; FEMISCA; Edición 2006; 926 paginas.
 - (9) **GORDON MASKEW FAIR; Abastecimiento de Aguas y Remoción de Aguas Residuales**, Tomo I: Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales; México D.F. 2002; Editorial Limusa, Noriega Editores; Edición 16; 548 paginas.
-

- (10) **GORDON MASKEW FAIR; Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales**, Tomo II: Ingeniería Sanitaria y de Aguas Residuales; México D.F. 2002; Editorial Limusa, Noriega Editores; Edición 17; 764 paginas.
- (11) **MARIANO SEOANEZ CALVO; Ingeniería del Medio Ambiente Aplicada al Medio Natural Continental**; España, 1999; Ediciones Mundi-Prensa; Segunda Edición; 702 paginas.
- (12) **HAROLD E. BABBITT; Alcantarillado y Tratamiento De Aguas Negras**; México D.F. 1977; Editorial Continental; Sexta Edición en Español; 885 paginas.
- (13) **EDUARDO ROZANO, JOSÉ LUIS DAPENA; Tratamiento Biológico De Las Aguas Residuales**; Madrid, España, 2002; Editorial Díaz de Santos; Reimpresión 2002; 511 paginas.
- (14) **RUBEN S. RAMALHO; Tratamiento de Aguas Residuales**; Barcelona, España, 1996; Editorial Reverte S.A.; Edición Revisada; 705 paginas.
- (15) **WOLFGANG PURSCHEL; Tratado General del Agua y su Distribución, Tomo 6: El Tratamiento de las Aguas Residuales Domesticas (Técnicas de Depuración)**; España 1982; Urmo S.A. Ediciones; Primera Edición en Español; 132 paginas.
- (16) **HAROLD E. BABBITT; Alcantarillado y Tratamiento de Aguas Negras**; México D.F. 1983; Editorial Continental; Octava Impresión; 884 paginas.
- (17) **BLANCA ELENA JIMÉNEZ CISNEROS; Filtración de Agua**; México D.F. 1995; Editorial Instituto de Ingeniería; Edición 1995; 121 paginas.
-

- (18) **LUIS LESUR; Manual de Purificación del Agua, Una guía paso a paso**; México D.F. 1998; Editorial Trillas; Primera Edición; 96 paginas.
- (19) **MAURICIO ATHIÉ LAMBARRI; Calidad y Cantidad de Agua en México**; México D.F. 1987; Editorial Universo Veintiuno; Primera Edición; 152 paginas.
- (20) **JACQUES BECHAUX; Manual Técnico del Agua**; España 1979; Editorial Degremont; Cuarta Edición; 1216 paginas.
- (21) **SHUNDAR LIN; Water and Wastewater Calculations Manual**; México D.F. 2001; Editorial Mc Graw Hill; Primera Edición; 854 paginas.
- (22) **E. ROBERTS ALLEY; Water Quality Control Handbook**; México D.F. 2000; Editorial Mc Graw Hill; Primera Edición; 1392 paginas.
- (23) **RAYMOND D. LETTERMAN; Water Quality & Treatment, A Handbook of Community Water Supplies, American Water Works Association**; México D.F. 1999; Editorial Mc Graw Hill Inc.; Quinta Edición; 1246 paginas.
- (24) **DAVID H. F. LIU; Wastewater Treatment**; New York 2000; Lewis Publisher; Primera Edición; 458 paginas.
- (25) **HERNANDEZ PEREZ, Floriberta; TESIS “PROYECTO EJECUTIVO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES A BASE DE UN REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE PARA LA ENEP ARAGÓN”**; San Juan de Aragón, México; ENEP Aragón; 1996; 168 paginas.
- (26) Folleto ECOCE 2005; **Mas de 100 consejos para cuidar el ambiente desde mi hogar**; Primera reimpresión 2005; SEMARNAT.
-

PAGINAS WEB

SECRETARIA DE ECONOMÍA.

www.economia-noms.gob.mx

MONOGRAFÍAS.COM.

<http://www.monografias.com/trabajos14/problemadelagua/problemadelagua.shtml>

SAGAN GEA.ORG.

http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/8agua.html

http://www.sagan-gea.org/hojared_AGUA/paginas/31agua.html

Autor: Biól. María Guadalupe Lomelí R., I.Q. Ramón Tamayo O.

SEMARNAT (SECRETARIA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES).

www.semarnat.gob.mx/programas/hidraulico.shtml#1#1

CNA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA).

www.cna.gob.mx

INE (INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA).

www.ine.gob.mx

CONSEJO CORDINADOR EMPRESARIAL.

http://www.cce.org.mx/cespedes/publicaciones/otras/Ef_Agua/cap_3.htm

REVISTA MEXICANA DE COMUNICACIÓN.

<http://www.mexicanadecomunicacion.com.mx/Tables/RMC/rmc93/comunicar.html>

GRUPO REF.

<http://www.gruporeef.com/mig.htm>

EDUCARON AMBIENTAL EN LA REPUBLICA DOMINICANA.

www.jmarcano.com/nociones/ciclo1.html

EXPLORA – CONACYT (COMISIÓN NACIONAL DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA).

www.explora.cl/otros/agua/ciclo2.html

WIKI BOOKS.ORG

http://es.wikibooks.org/wiki/Ingenier%C3%ADa_de_aguas_residuales/Tratamiento_primario

EMAGISTER.COM.

<http://www.emagister.com/tratamiento-aguas-tratamiento-primario-parametros-hidraulicos-i-cursos-315829.htm>

PRONAP (DIRECCIÓN GENERAL DE FORMACIÓN CONTINUA DE MAESTROS EN SERVICIO) – SEP (SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA).

http://pronap.ilce.edu.mx/materiales/documentos/matbibliografico/guias_talleres/tba/uso_agua.pdf; **LIBRO:** Secretaría de Educación Pública, 2000; El uso eficiente del agua desde las escuelas primarias; Carlos Castañeda Estrada, Noemí García García.