



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA**



**TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL
GENERADA EN UN EDIFICIO MEDIANTE
CONTACTORES BIOLÓGICOS ROTATORIOS**

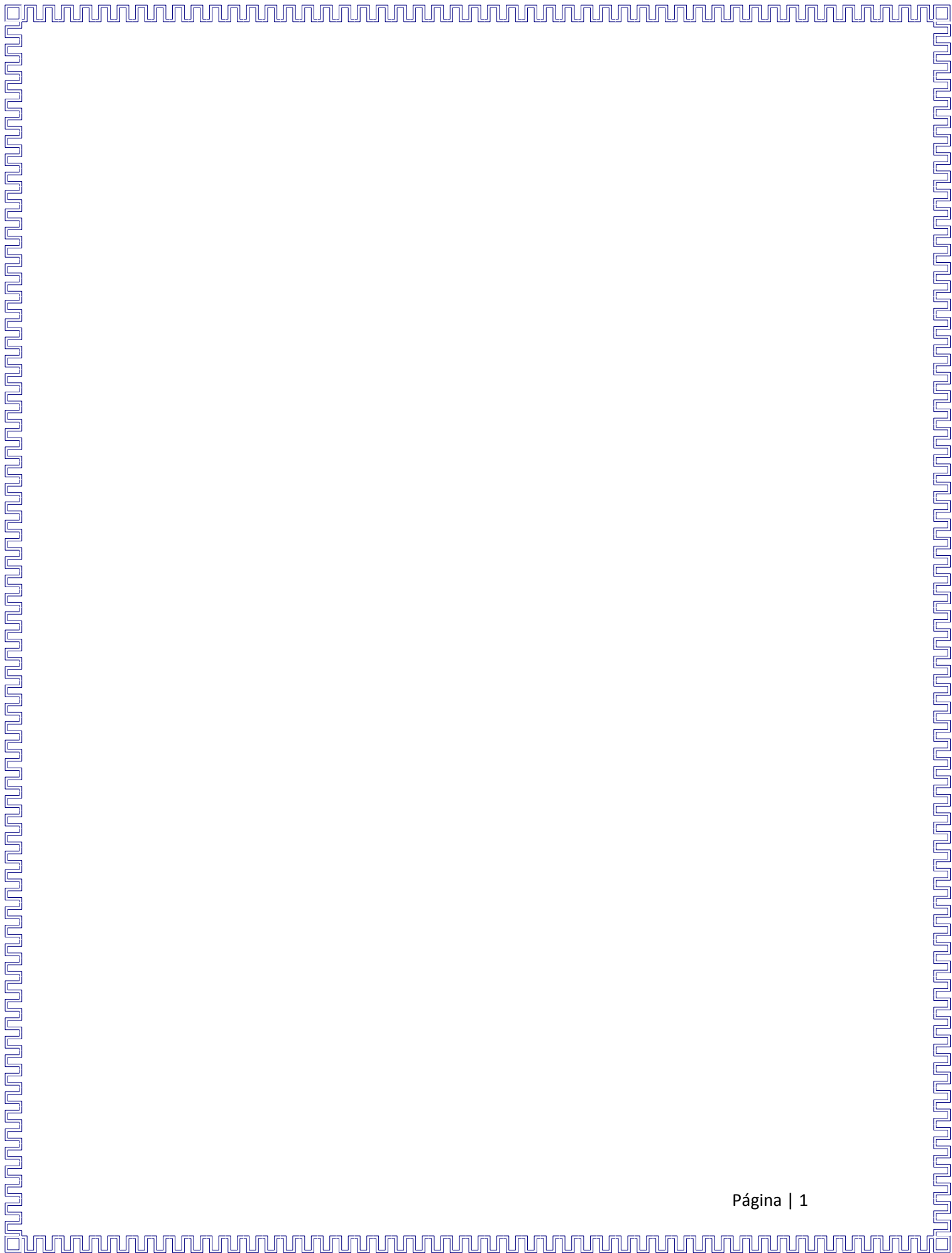
TESIS

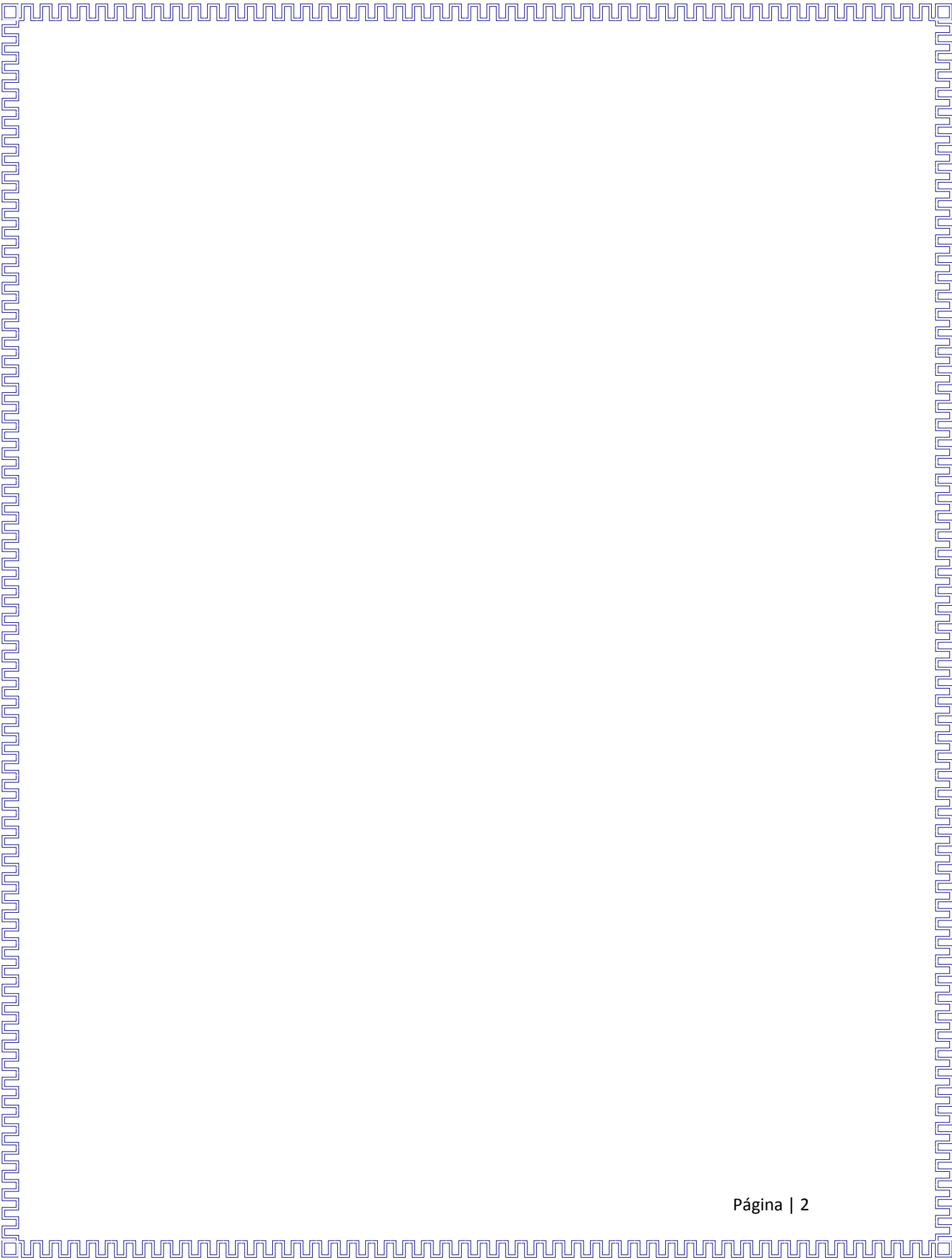
**QUE PARA OBTENER EL
GRADO DE INGENIERO CIVIL
PRESENTA:**

PEDRO FABIÁN LAZCANO NAVARRO

TUTOR:

DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ





Índice

Introducción.....	8
Objetivo.....	8
Alcances y limitaciones.....	8
Capítulo 1: Marco teórico.....	10
1.1. Procesos biológicos.....	10
1.2. Contactores biológicos rotatorios.....	21
Capítulo 2: Historia del sistema de CBR.....	31
2.1. Origen del proceso.....	31
2.2. Época moderna.....	32
Capítulo 3: Situación actual y tendencias en el uso del sistema CBR.....	35
3.1. Situación internacional y tendencias.....	35
3.2. Situación en México.....	37
Capítulo 4: Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales.....	41
4.1. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento.....	44
4.2. Elementos que conforman cada nivel de tratamiento.....	45
Capítulo 5: Evaluación del funcionamiento del proceso CBR.....	56
5.1. Metodología.....	56
5.2. Características del reactor.....	58
5.3. Caracterización del agua residual.....	58
5.4. Aforo.....	60
5.5. Normatividad aplicable.....	62
Capítulo 6: Resultados y análisis.....	68
6.1. Procedimiento.....	68
6.2. Resultados y análisis de las pruebas de DBO5.....	68
6.3. Resultados y análisis de las pruebas de sólidos (ST y SST).....	78
Capitulo7: Conclusiones y recomendaciones.....	82
Anexos:.....	84

Anexo 1 : Metodología de las pruebas de laboratorio.....	84
Anexo 2: Metodología para la variación del gasto empírico en el sistema CBR.....	89
Referencias.....	90

Índice de Figuras:

<i>Figura 1-1. Proceso anaerobio</i>	12
<i>Figura 1-2. Reactor de digestión anaerobia</i>	12
<i>Figura 1-3. Reactores de primera generación</i>	13
<i>Figura 1-4. Reactores de segunda generación</i>	14
<i>Figura 1-5. Reactores de tercera generación</i>	14
<i>Figura 1-6. Proceso aerobio</i>	16
<i>Figura 1-7. Esquema de una laguna facultativa</i>	17
<i>Figura 1-8. Esquema de una laguna anaerobia profunda</i>	18
<i>Figura 1-9. Imagen de una laguna aerada</i>	18
<i>Figura 1-10. Representación del tratamiento de lodos activados</i>	19
<i>Figura 1-11. Imagen de un Filtro Percolador típico</i>	21
<i>Figura 1-12. Proceso convencional de los CBR</i>	22
<i>Figura 1-13. Fases de un CBR</i>	23
<i>Figura 1-14. Fases de la biopelícula en los CBR</i>	25
<i>Figura 1-15. Curvas de diseño para remoción de DBO y DBO soluble en relación a la CH</i>	28
<i>Figura 1-16. Curvas de Remoción de NH₃N en relación a la CH</i>	28
<i>Figura 2-1. Primeros sistemas CBR</i>	31
<i>Figura 2-2. Sistema CBR descubierto de poliestireno</i>	33
<i>Figura 3-1. Sistema CBR prefabricado</i>	35
<i>Figuras 3-2 y 3-3. Superficie corrugada de los CBR</i>	36
<i>Figuras 3-4 a 3-7. PTAR compacta con sistema CBR incorporado en el mercado</i>	37
<i>Figura 3-8. Número de PTAR con sistemas CBR en México</i>	38
<i>Figura 3-9. PTAR de Acapantzingo Cuernavaca</i>	40
<i>Figura 3-10. PTAR “el Orito” en el estado de Zacatecas</i>	41
<i>Figura 3-11. PTAR de Cerro del Agua (CU).</i>	42
<i>Figura 4-1. Croquis de la ubicación de la PTAR del estudio</i>	43
<i>Figura 4-2. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento</i>	44
<i>Figura 4-3. Obra de toma</i>	45
<i>Figura 4-4. Vistas frontal y en planta de la obra de toma</i>	46
<i>Figura 4-5. Cárcamo de bombeo</i>	46
<i>Figura 4-6. Vista frontal y en planta Cárcamo de bombeo</i>	47
<i>Figura 4-7. Tanque de igualación</i>	47
<i>Figura 4-8. Vista frontal y en planta del tanque de igualación</i>	48
<i>Figura 4-9. Sedimentador secundario (Biodigestor)</i>	48
<i>Figura 4-10. Elementos del biodigestor autolimpiable rotoplas</i>	49
<i>Figura 4-11. Dimensiones del biodigestor autolimpiable rotoplas</i>	49
<i>Figura 4-12. Sistema CBR objeto de estudio de este trabajo</i>	50
<i>Figura 4-13. Elementos ubicados dentro de la caseta de la PTAR (CBR y sedimentador secundario)</i>	51
<i>Figura 4-14. Sedimentador secundario</i>	51
<i>Figura 4-15. Vistas frontal y en planta del sedimentador secundario</i>	52
<i>Figura 4-16. Cisterna de la PTAR</i>	52

<i>Figura 4-17. Vistas frontal y en planta de la cisterna de la PTAR</i>	53
<i>Figura 4-18. Vista en planta de los elementos de la PTAR de este estudio.</i>	54
<i>Figura 4-19. Vista superior de la PTAR. Adaptado de: Mata 2012</i>	55
<i>Figura 5-1. Metodología del estudio</i>	56
<i>Figura 6-1. Variación de la DBO5 en el efluente del CBR con tendencia lineal.</i>	72
<i>Figura 6-2. Variación de la DBO5 de entrada mediante la fórmula despejada de Popel contra DBO5 de salida</i>	72
<i>Figura 6-3. Variación de la eficiencia del CBR</i>	73
<i>Figura 6-4. Variación de la DBO de salida, DBO de entrada y DBO con la nueva eficiencia</i>	73
<i>Figura 6-5. Curva de gasto empírica que entra al CBR</i>	74
<i>Figura 6-6. Carga hidráulica del CBR y análisis</i>	75
<i>Figura 6-7. Carga orgánica del CBR y análisis</i>	75
<i>Figura 6-8. Tiempo de retención hidráulico del CBR y análisis</i>	76
<i>Figura 6-9. Porcentajes de la carga hidráulica</i>	76
<i>Figura 6-10. Porcentajes de la carga orgánica</i>	77
<i>Figura 6-11. Porcentajes del tiempo de retención hidráulico</i>	77
<i>Figura 6-12. Mediciones de las pruebas de ST con tendencia lineal</i>	81
<i>Figura 6-13. Mediciones de las pruebas de SST con tendencia lineal</i>	81

Índice de tablas

<i>Tabla 1-1: Parámetros de diseño para un CBR.</i>	30
<i>Tabla 3-1. Tipo de proceso y gasto tratado en la PTAR registradas en México.</i>	39
<i>Tabla 3-2. PTAR con sistemas CBR registradas en México.</i>	40
<i>Tabla 4-1. Elementos que conformar la PTAR de este trabajo</i>	45
<i>Tabla 5-1. Características típicas del agua residual por rango de población</i>	58
<i>Tabla 5-2. Características típicas del agua residual</i>	59
<i>Tabla 5-3. Medición de parámetros correspondientes a antes de la construcción de la PTAR</i>	59
<i>Tabla 5-4. Medición de parámetros correspondiente al periodo escolar 2012-2</i>	60
<i>Tabla 5-5. Medición de los parámetros de este estudio correspondientes al semestre 2013-1</i>	60
<i>Tabla 5-6. Aforos del edificio de la DIC y G</i>	61
<i>Tabla 5-7: Dotación mínima de agua potable</i>	61
<i>Tabla 5-8 Límites máximos permisibles de contaminantes.</i>	63
<i>Tabla 5-9. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos</i>	63
<i>Tabla 5-10. Límites máximos permisibles de características microbiológicas</i>	65
<i>Tabla 5-11. Límites máximos permisibles de características físicas</i>	65
<i>Tabla 5-12. Límites máximos permisibles de características químicas</i>	66
<i>Tabla 5-13. Rangos generales de niveles permitidos en descargas a cuerpos de agua, de México y E.U.</i>	67
<i>Tabla 5-14. Límites establecidos por la EPA para los parámetros de este trabajo</i>	67
<i>Tabla 6-1. Constante de degradación típica</i>	69
<i>Tabla 6-2. Pruebas de laboratorio para la DBO5 del sistema CBR</i>	71
<i>Tabla 6-3 Resultados más importantes.</i>	74
<i>Tabla 6-4. Parámetros considerados y rango funcionamiento adecuado para sistemas CBR</i>	75
<i>Tabla 6-5. Porcentajes de carga hidráulica</i>	76
<i>Tabla 6-6. Porcentajes de carga orgánica</i>	77
<i>Tabla 6-7. Porcentajes de tiempo de retención hidráulico</i>	77
<i>Tabla 6-8. Pruebas realizadas al efluente del CBR (ST y SST) y resultados</i>	80
<i>Tabla 6-9: Concentraciones de sólidos en el efluente del CBR</i>	81

Introducción

Durante la prestación del Servicio Social en el Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Facultad de Ingeniería, se realizó el monitoreo de las características del agua residual generada en el edificio de la División de Ingenierías Civil y Geomática, que es tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que se ubica al sur del edificio. El monitoreo consistió en la determinación de algunos parámetros de calidad del agua, específicamente sólidos suspendidos totales (SST) y demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días (DBO_5).

Objetivo

Evaluar el funcionamiento de una instalación de tratamiento de aguas residuales con base en el proceso de contactores biológicos rotatorios (CBR) que trata la descarga de un edificio de oficinas, y proponer en su caso, acciones para mejorar la calidad del efluente tratado.

Alcances y limitaciones

El propósito de este trabajo es realizar un análisis y evaluación del funcionamiento del proceso de CBR de la PTAR mencionada, así como proponer alternativas para el mejoramiento de los subsistemas de tratamiento preliminar, primario y secundario.

El sedimentador secundario no se incluye en el análisis por no estar operando por el momento, sin embargo, se menciona a lo largo de este trabajo para ubicar los procesos anteriores y explicar los problemas de funcionamiento del sistema CBR.

Los parámetros considerados para la evaluación se limitan a:

DBO_5 : demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días.

ST: sólidos totales

SST: sólidos suspendidos totales.

En el capítulo 1 se presentan los aspectos teóricos de los procesos biológicos de biomasa adherida.

En el capítulo 2 se resumen los aspectos históricos del proceso de CBR.

En el capítulo 3 se presentan los equipos actuales que se encuentran en el mercado global y sus tendencias, así como las PTAR que usan este proceso en la República Mexicana.

En el capítulo 4 contiene un breve resumen de los elementos que componen la PTAR del edificio de la División de Ingeniería Civil y Geomántica (DIC y G) y sus respectivos planos de planta y perfil.

En el capítulo 5 se incluye la evaluación de la planta, la metodología usada para este fin y la normatividad aplicable con la que fue comparada.

En el capítulo 6 se encuentran los resultados de las pruebas realizadas a lo largo del semestre 2013-1, obtención de parámetros importantes, representaciones gráficas y su análisis.

El capítulo final contiene la evaluación y determinación del cumplimiento de los objetivos de este trabajo.

Capítulo 1: Marco teórico

Se denomina proceso biológico a todas aquellas etapas que se dan en forma natural en los seres vivos y que influyen de alguna manera en el entorno y en ellos mismos. Estos procesos biológicos están conformados por una serie determinada de reacciones químicas que dan lugar a diversos tipos de transformaciones.

Un proceso biológico de tratamiento o depuración de aguas residuales es un sistema en el cual se mantiene un cultivo de microorganismos (biomasa) que se alimenta de las impurezas del agua residual (sustrato o alimento). Estas impurezas son la materia orgánica biodegradable, el amonio, el nitrato, el fosfato y otros contaminantes a menor concentración.

El lugar donde se pone en contacto la biomasa con el agua residual para llevar a cabo el tratamiento se denomina reactor biológico, o biorreactor, y puede ser de diferentes tipos. Hay que señalar que en la mayoría de los casos la biomasa se genera espontáneamente en el reactor biológico, a partir de pequeñas concentraciones de microorganismos presentes en el agua residual o en el aire, y de las reacciones biológicas que en el diseño y operación de la planta se procura favorecer.

En este capítulo se describen los principales procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales y se proporcionan ejemplos típicos de los más comunes.

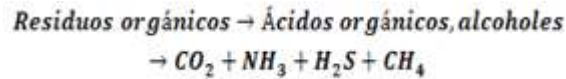
1.1. Procesos biológicos

Para el tratamiento de agua residual se distinguen dos grandes grupos de procesos biológicos, aerobios y anaerobios, los cuales se describen a continuación.

Procesos anaerobios

Estos procesos se efectúan en ausencia de oxígeno, y son realizados por dos grupos de bacterias heterótrofas, que en un proceso de licuefacción-gasificación convierten un 90% de la materia orgánica, primero en intermediarios y luego en metano (CH_4) y CO_2 gaseosos. Algunas veces se obtienen productos secundarios como el ácido sulfhídrico (H_2S), característico de malos olores.

La ecuación general que describe el proceso es:



Los anaerobios son procesos biológicos ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno. Es un proceso en el que pueden intervenir diferentes tipos de microorganismos pero que está dirigido principalmente por bacterias. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado *biogás*, formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%), susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Ello implica que sólo una pequeña fracción del residuo orgánico biodegradable es transformada en nuevas células, la mayor parte es convertida en metano, un gas combustible, lo que lo convierte en un producto final útil. Esto significa que se tiene una menor acumulación de lodo producido por el proceso de digestión anaerobia. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de retención hidráulica (TRH), por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos.

El proceso anaerobio es complejo e intervienen varios grupos de bacterias, tanto anaerobias estrictas como facultativas, en el que, a través de una serie de etapas y en ausencia de oxígeno, se desemboca fundamentalmente en la formación de metano y dióxido de carbono. Cada etapa del proceso la llevan a cabo grupos distintos de bacterias, que han de estar en perfecto equilibrio. El proceso de digestión puede ser clasificado en cuatro etapas principales íntimamente relacionadas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

La bacteria fermentadora realiza las dos primeras etapas de degradación de la materia orgánica (hidrólisis y acidogénesis). Un segundo grupo de bacterias, acetogénicas, sintetiza los productos de la acidogénesis, dando lugar principalmente al acetato entre otros compuestos como CO_2 y H_2 . La bacteria metanogénica convierte este acetato y el H_2 en metano, consumiendo CO_2 para ello. Ésta también transforma otros compuestos como metanol, monóxido de carbono y metilaminas, que son de menor importancia en la mayoría de los procesos de digestión anaerobia. Únicamente las bacterias acetogénicas y metanogénicas son estrictamente anaerobias, las hidrolíticas y acidogénicas se componen de bacterias facultativas y anaerobias. Las bacterias facultativas son aquellas que pueden vivir tanto en la presencia de oxígeno como en su ausencia.

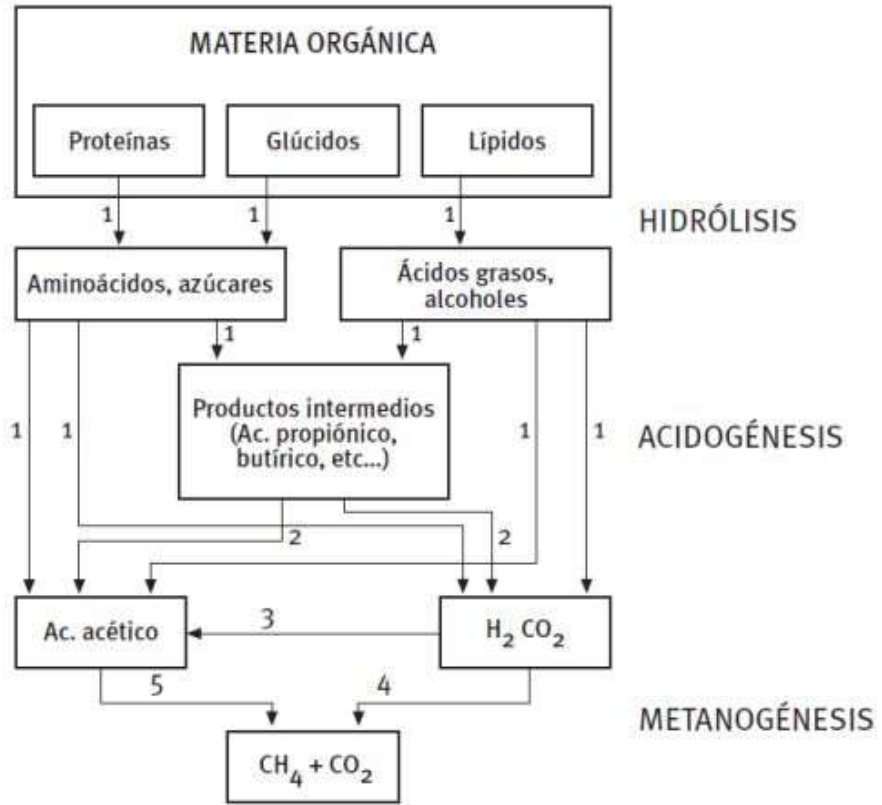


Figura 1-1. Proceso anaerobio. Fuente: cdn.biodisol.com

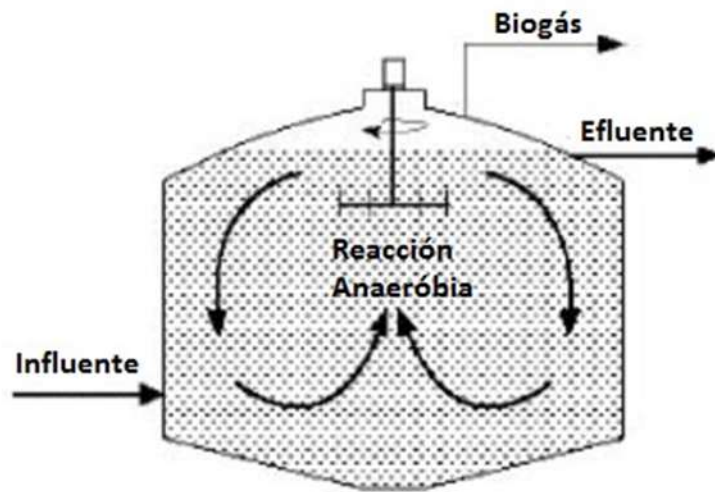


Figura 1-2. Reactor de digestión anaerobia. Fuente: (Biosol, Tecnologías de producción de biogás)

En términos generales podemos clasificar a los reactores anaerobios (Figura 1-2) en tres generaciones, las cuales se caracterizan porque en cada generación se reduce el tiempo de retención hidráulica (TRH) y mejora el contacto entre los lodos y sustratos generados, lo cual significa menores volúmenes de reactor, costos más bajos, sistemas más estables y de más fácil operación.

Reactores de primera generación: el tiempo de retención celular (TRC) es igual al TRH, por lo que se requieren TRH muy altos, existe un contacto inadecuado entre la biomasa y la materia orgánica. Algunos ejemplos de esta etapa son: Lagunas Anaerobias, Tanque Séptico, Tanque Imhoff.

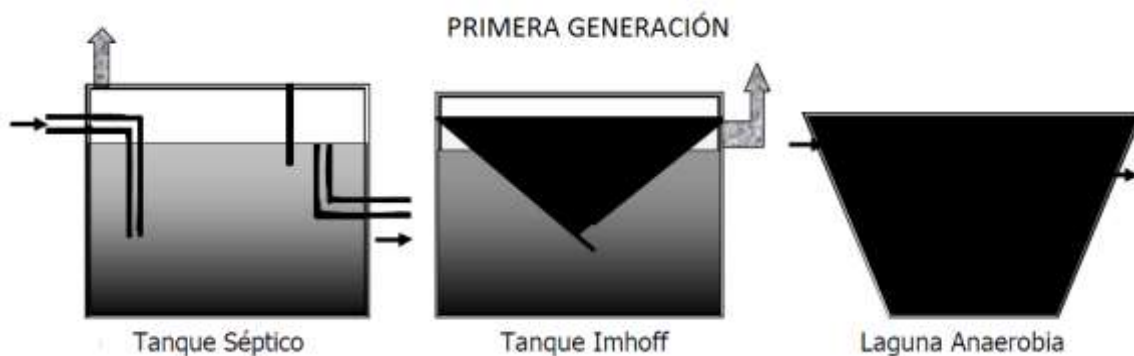


Figura 1-3. Reactores de primera generación. Adaptado de: www.ingenieroambiental.com

Reactores de segunda generación: Se caracterizan por tener mecanismos para retención de los lodos, separando TRC del TRH. Los dos mecanismos más aplicados son inmovilización de lodo por adhesión a material sólido con filtros anaerobios de flujo ascendente y descendente y separación líquido-sólido del efluente, con el retorno de los sólidos separados al reactor UASB, el cual usa un sedimentador interno.

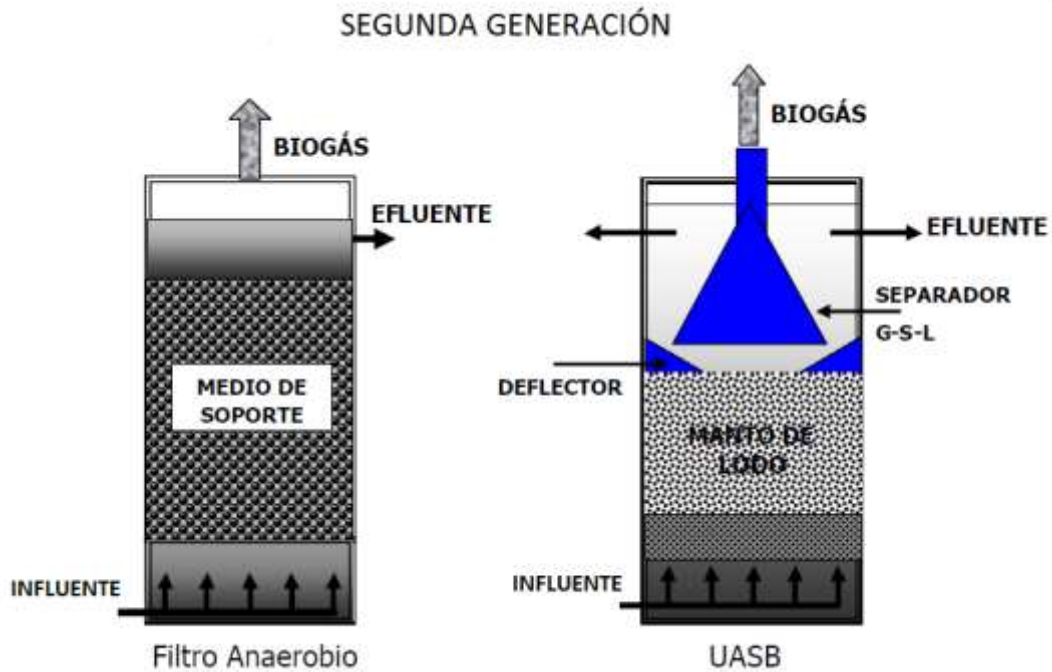


Figura 1-4. Reactores de segunda generación. Adaptado de: www.ingenieroambiental.com

Reactores de tercera generación: Para optimizar el contacto entre el sustrato y la biomasa, ésta se adhiere con partículas de arena, alúmina o plástico, las cuales se expanden, este proceso se encuentra en los reactores de lecho fluidizado o expandido.

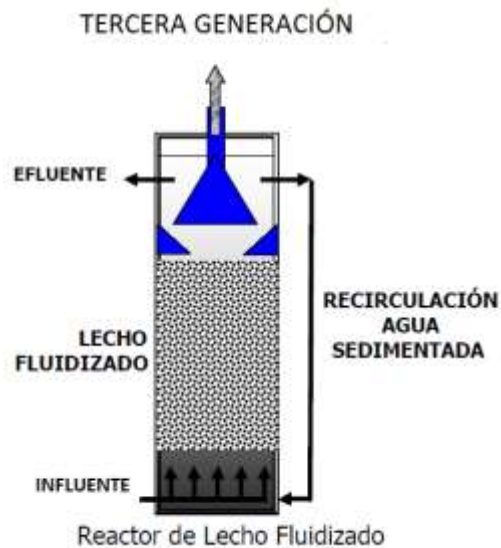
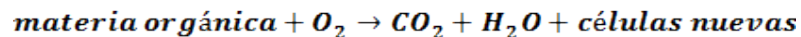


Figura 1-5. Reactores de tercera generación. Adaptado de: www.ingenieroambiental.com

Procesos aerobios

En los procesos aerobios, los microorganismos requieren de la presencia de oxígeno para sus funciones metabólicas y por lo tanto para la degradación de la contaminación orgánica. Existen procesos aerobios estrictos, que son aquellos que solamente pueden funcionar si hay oxígeno, y los procesos aerobios facultativos, que son los que pueden alternar con anaerobios, de acuerdo a la concentración de O_2 disponible.

De manera general, los procesos aerobios tienen la siguiente reacción:



Como se puede apreciar en la ecuación anterior, el metabolismo aerobio se encarga de catalizar moléculas más grandes en CO_2 y agua, fundamentalmente. Los diferentes grupos de microorganismos tienen metabolismos diferentes, y por lo tanto son capaces de catalizar una amplia gama de sustancias, aunque algunas veces se obtienen otros productos secundarios además de los mencionados.

Los principales microorganismos presentes en un proceso aerobio son, por lo general, los siguientes:

Bacterias: Constituyen el 95% de la biomasa (formadoras de flóculos, filamentosas, nitrificantes, etc.)

Hongos: Son poco comunes en los sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas. Su presencia en abundancia se asocia, por lo general, a condiciones de pH demasiado bajas. Pueden ser usados en procesos industriales.

Protozoos: Son heterótrofos, y se encuentran libremente en la naturaleza, son predadores de las bacterias, son: Flagelados, Rizópodos (Amebas), Ciliados (pedunculados, libre nadadores, libres reptantes, ductores, etc.).

Algas: Su importancia estriba, no tanto por su capacidad de depuración sino por su capacidad fotosintética, aportando oxígeno. Por ser autótrofas permiten el aumento de la materia orgánica sintetizando el carbono mineral.

Metazoos: Son animales pluricelulares, muy abundantes en los sistemas que emplean soporte fijo. Se alimentan de sustrato y de bacterias. (Rotíferos, Nemátodos, Oligoquetos, etc.).

Cuando las aguas residuales entran en una planta de tratamiento, se les somete a un pretratamiento en el que se retiran los sólidos gruesos de gran tamaño, así como las arenas y

grasas. A continuación, el agua pasa al denominado tratamiento primario, donde se eliminan sólidos en suspensión fácilmente sedimentables y algo de materia orgánica.

La materia orgánica que queda disuelta y en suspensión así como el resto de las partículas sólidas que no se han eliminado en los tratamientos anteriores, son eliminadas mediante los denominados *procesos biológicos de depuración aerobia*, que en la línea de aguas constituyen los tratamientos secundarios.

Se pueden definir los procesos biológicos de depuración aerobia, como aquellos realizados por determinado grupo de microorganismos (principalmente bacterias y protozoos) que, en presencia de oxígeno, actúan sobre la materia orgánica e inorgánica disuelta, suspendida y coloidal existente en el agua residual, transformándola en gases y materia celular, que puede separarse fácilmente mediante sedimentación. La unión de materia orgánica, bacterias y sustancias minerales forma los flóculos y el conjunto de flóculos se conoce como lodo biológico.

Los objetivos que persigue este tipo de tratamiento son la transformación de la materia orgánica y la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables. En el caso de algunas aguas residuales urbanas, también se persigue la eliminación de nitrógeno y de fósforo. Por último, se logra además la disminución de los microorganismos patógenos y fecales que habitan el agua residual.

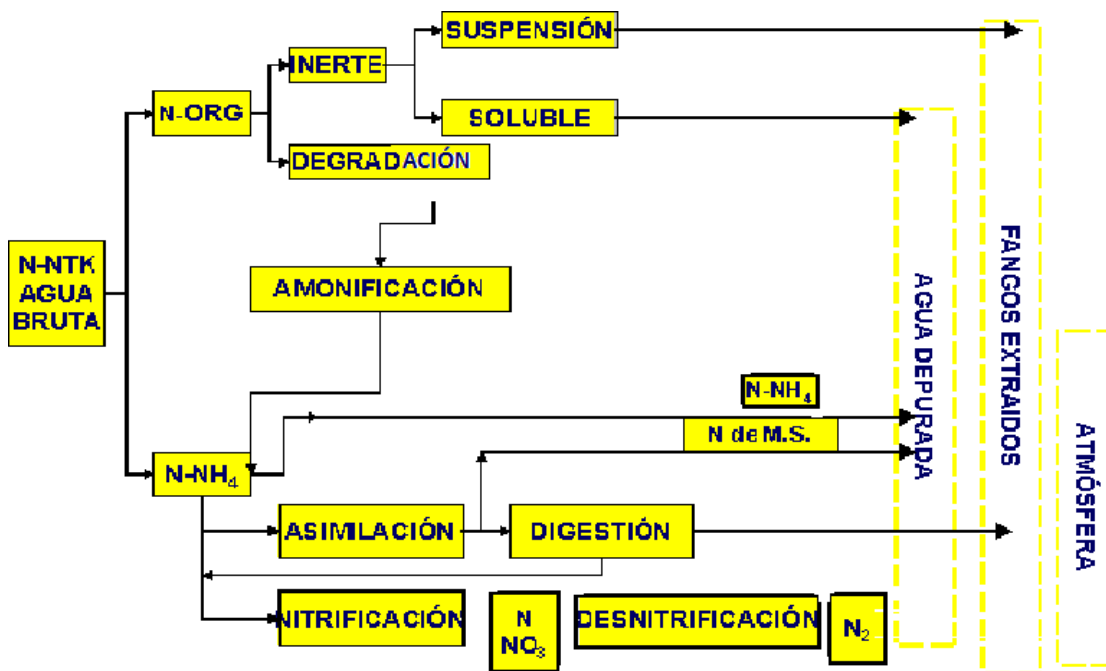


Figura 1-6. Proceso aerobio. Adaptado de: www.es.wikibooks.org.

Procesos biológicos de biomasa suspendida

Estos procesos de tratamiento se caracterizan por contener la materia biológica suspendida dentro de flóculos que flotan en la mayor parte del volumen del reactor o laguna en donde se realiza la reacción.

Lagunas

Las lagunas son un método común de tratamiento de efluentes en lugares donde existe suficiente área disponible. Las lagunas se clasifican con base en la naturaleza de su actividad biológica.

Lagunas facultativas: estas lagunas se caracterizan por ser aerobias en la superficie y anaerobias en el fondo debido a una estratificación por carga y temperatura. La capa superficial aerobia tendrá una variación diurna incrementando su contenido de oxígeno debido a la actividad fotosintética (algas), decreciendo en la noche. El lodo acumulado en el fondo es estabilizado mediante procesos anaerobios. La profundidad varía desde 0.9 hasta casi 2 m.

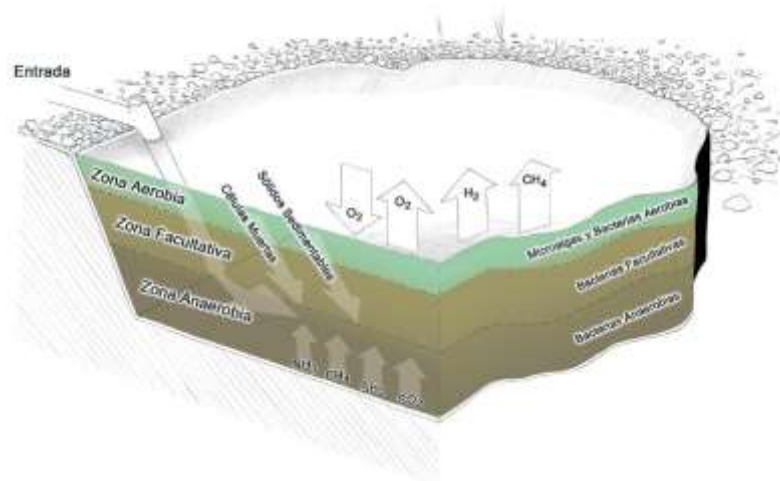


Figura 1-7. Esquema de una laguna facultativa. Fuente: www.depuranatura.blogspot.mx

Lagunas anaerobias: la carga en estas lagunas es tal que las condiciones anaerobias prevalecen en todo el volumen ya sea con una costra de lodos en la superficie o tapándola con algún elemento como plástico o un domo. La profundidad de la laguna se diseña para tener una mínima relación área superficial/volumen con el fin de tener una máxima retención de calor.

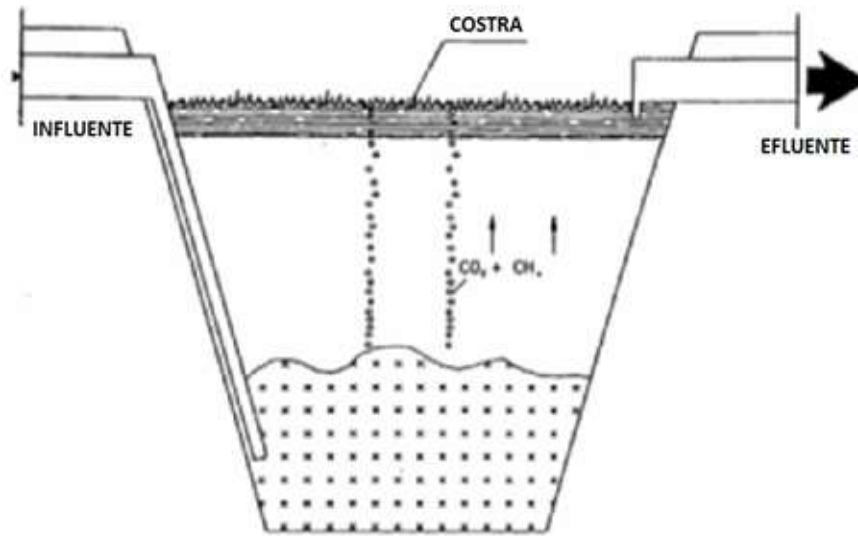


Figura 1-8. Esquema de una laguna anaerobia profunda. Adaptado: Reingeniería de la E.D.A.R. de Tarija (Bolivia)

Lagunas aeradas: El tiempo de retención hidráulica varía entre 2 a 15 días dependiendo de la eficiencia de remoción de DBO requerida. El oxígeno es suministrado por sistemas de aireación mecánica o difusores, lo cual, junto con una gran área superficial y turbulencia, genera una transferencia de oxígeno significativa por aireación superficial. La profundidad de las lagunas oscila entre 1.8 y 4.6 m.

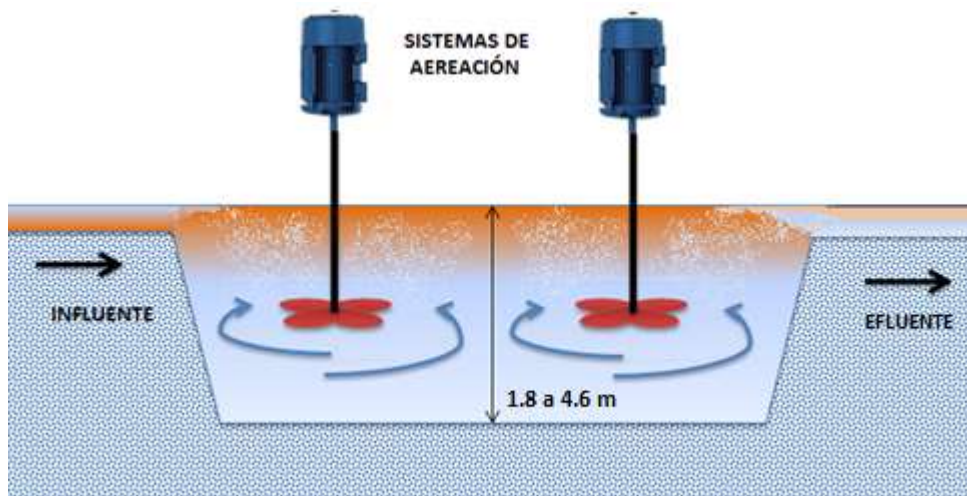


Figura 1-9. Esquema de una laguna aerada

Lodos Activados

Los lodos activados son un proceso aerobio consistente en un tanque de aireación donde un conjunto de microorganismos degrada biológicamente el material contaminante presente en el agua residual haciendo uso de oxígeno, convirtiéndolo mayormente a nuevas células bacterianas (60%), mientras que otra parte (40%) es liberada como energía, dióxido de carbono y agua. Del licor mezclado que ingresa al clarificador secundario, se separa la masa microbiana en forma de lodos por sedimentación. El agua clarificada es recogida en la parte superior del clarificador, mientras que parte del lodo del fondo se recircula al tanque de aireación con el fin de mantener la cantidad necesaria de biomasa dentro del sistema. La biomasa restante (lodo de exceso) es enviada para su tratamiento o manejo posterior.

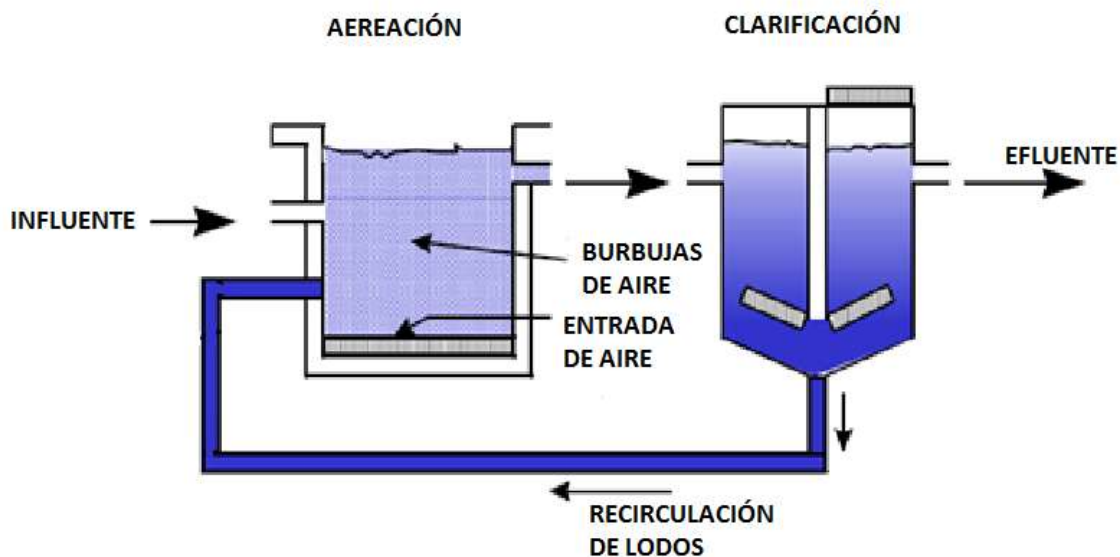


Figura 1-10. Representación del tratamiento de lodos activados. Adaptado de: www.mequipco.com

Procesos de biomasa adherida

El tratamiento de aguas residuales se puede efectuar en reactores de película biológica, poniendo en contacto dichas aguas con una población microbiana mixta, en forma de una película biológica adherida a la superficie de un medio sólido de soporte. En cualquier superficie en contacto con microorganismos donde se tengan los nutrientes necesarios, se desarrolla una capa biológicamente activa y en consecuencia, las películas biológicas adheridas constituyen una característica de todo tipo de reactor biológico. Los sistemas de películas adheridas se pueden considerar de dos tipos diferentes: sistemas estacionarios de

película de medio fijo, y sistemas de película de medio en movimiento. En ambos tipos de sistemas, el agua residual se mueve en relación con la película microbiana y el soporte sólido al que está adherida. En el primer caso, el agua residual pasa sobre el medio estacionario y en el segundo caso, el medio se mueve a través del líquido.

El oxígeno se disuelve en la superficie de la capa del líquido en movimiento y es transferido a través de la superficie de la capa microbiana. El oxígeno y los nutrientes del líquido se difunden hacia dentro de la película microbiana para ser metabolizados por la población microbiana adherida al medio. Las materias en suspensión y las coloidales presentes en el agua residual se aglomeran y adsorben también en la película microbiana.

Sistemas de medio fijo

En los sistemas de medio fijo, el medio sólido de soporte está dispuesto en forma de un lecho empacado a través del cual gotea el agua residual. Las superficies mojadas del medio de empaque desarrollan una película microbiana, y el agua residual fluye sobre la superficie del empaque en una delgada capa que está en contacto con la película microbiana por un lado y con la atmósfera por el otro. Uno de los ejemplos de este tratamiento es el filtro percolador.

Un filtro percolador opera bajo condiciones aerobias. Se rocía agua residual decantada sobre el filtro. Al pasar el agua por los poros del filtro, la materia orgánica se degrada por la biomasa que cubre el material del filtro.

El filtro percolador se llena con material de alta superficie específica, tal como piedra, grava, botellas de PVC trituradas, o material filtrante preformado especialmente. Preferiblemente debe ser un material con una superficie específica de entre 30 y 900 m²/m³. El agua residual entrante es rociada sobre el filtro con el uso de un rociador rotatorio. De esta manera, el material del filtro pasa por ciclos de saturación y de exposición al aire. Sin embargo, el oxígeno se reduce en la biomasa y las capas más internas pueden ser anóxicas o anaerobias. El filtro normalmente tiene de 1 a 3 m de profundidad, pero los filtros hechos con material plástico más ligero pueden ser de hasta 12 m de profundidad.

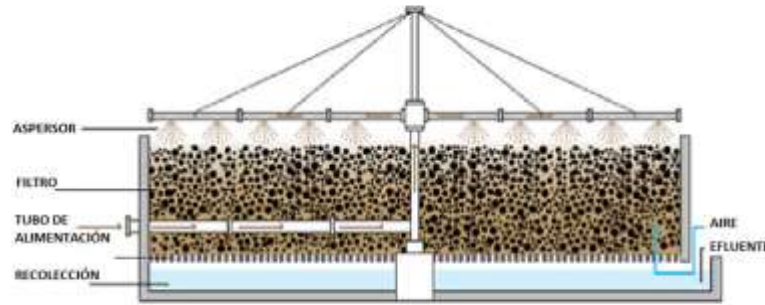


Figura 1-11. Imagen de un Filtro Percolador típico. Adaptado de: www.alianzaporelagua.org

Sistemas de medios en movimiento

En los sistemas de medios en movimiento, la película microbiana y el medio sólido de soporte a la que está adherida, se mueven a través del líquido que está bajo tratamiento. El sistema más comúnmente utilizado son los contactores biológicos rotatorios (CBR). En virtud de que este tipo de sistema es el objeto de esta tesis, en la siguiente sección se abordan las características del sistema de CBR.

1.2 Contactores biológicos rotatorios

Los CBR consisten en un proceso biológico aerobio que requiere contacto constante con el agua residual, la biomasa y el oxígeno del aire.

Físicamente son una serie de discos montados en un eje horizontal que giran a una velocidad pequeña, inferior a las 5 rpm, mediante un motor eléctrico, manteniendo entre el 35 y 40% de su superficie sumergida. Mientras los discos se encuentran rotando, alternan el contacto con el agua residual (donde se recogen los nutrientes necesarios para el crecimiento de la biomasa) y el aire (donde se satura de oxígeno y se desintegra la materia) promoviendo el proceso aerobio biológico que con el tiempo forma una película de microorganismos conocida como biopelícula que se establece en la superficie de los discos.

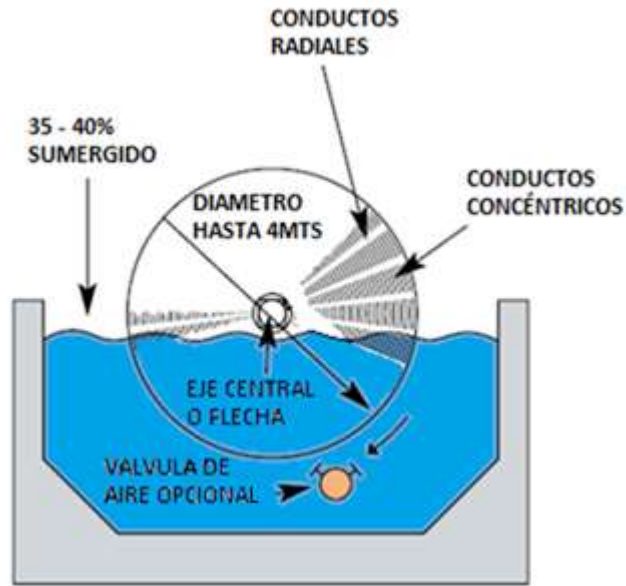


Figura 1-12. Proceso convencional de los CBR. Adaptado de: www.USFilter.com

Los CBR constan generalmente de 2 a 4 etapas, colocadas en confinamientos separados entre sí. Esta disposición, permite tener en cada etapa distintos espesores de biopelícula y provee al sistema de diversidad y flexibilidad; ya que en cada compartimiento el agua residual tiene unas características particulares en cuanto a la población y el tipo de microorganismos. Esta configuración permite trabajar con diferentes cargas superficiales, o volumétricas, e influye en el diseño del sistema de soporte de la biopelícula con diferentes cultivos de microorganismos en cada etapa, pudiéndose encontrar en las últimas etapas nitrificación creciente, o mejor oxidación y degradación de la materia orgánica. Asimismo esta reduce los efectos de los picos de carga que se registran en las estaciones de tratamiento de aguas residuales.

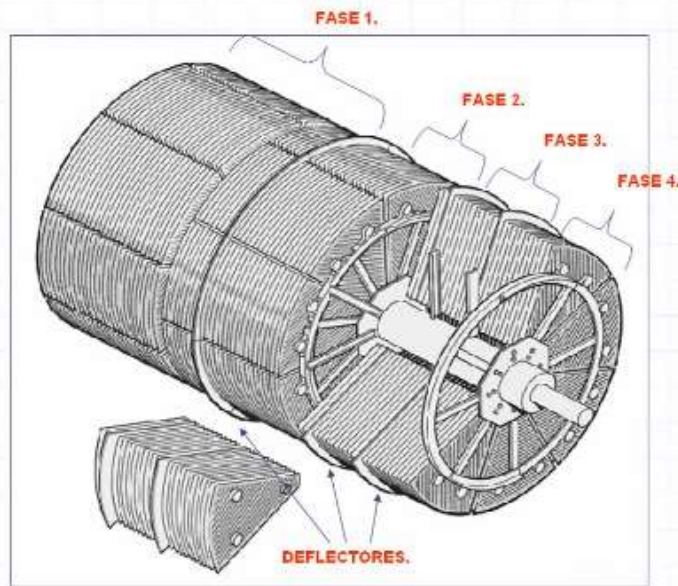


Figura 1-13. Fases de un CBR. Fuente: www.techuniversal.es

Los CBR tienen más ventajas que desventajas comparado con los procesos biológicos convencionales, ya que si un efluente puede ser tratado biológicamente, los CBR son mucho más eficientes que los sistemas que tienen película inmobilizada.

Algunas de las ventajas que presentan los CBR son el bajo consumo de energía y mantenimiento más sencillo.

Usando una configuración de sistemas anaerobio-aerobio, la producción de lodos es reducida comparada con un sistema convencional.

En vista de que es posible tener en cada etapa un cultivo biológico diferente, se cuenta con un grado adicional de flexibilidad en el proceso.

Puede conseguirse bastante nitrificación desarrollando cultivos de bacterias nitrificantes selectivas en las últimas etapas.

Los TRH son bajos, por lo tanto la concentración de biomasa en suspensión es pequeña.

La biomasa presenta en general buenas características de sedimentación con lo que se disminuye el costo de la clarificación, por lo tanto, no se necesita recirculación de biomasa.

Con relación a las tecnologías no convencionales, los CBR tienen ciertas desventajas como son:

Costo elevado de instalación.

Posibilidad de averías electromecánicas.

Explotación y mantenimiento más complejos.

Generación de lodos que deben estabilizarse (se simplifica con la combinación lagunas anaerobias-CBR).

Además de las desventajas mencionadas, los CBR no son efectivos cuando las aguas residuales contienen altas concentraciones de metales y ciertos pesticidas, herbicidas y compuestos orgánicos fuertemente clorados, debido a la inhibición de la actividad microbiana. En otros casos, como en el tratamiento de floculantes orgánicos volátiles, puede ser necesario el control de los gases desprendidos.

Fases de la biopelícula

El funcionamiento de los CBR se puede diferenciar en cuatro fases con base en los fenómenos que se producen:

I) En primer lugar el sustrato y el oxígeno se transportan del agua residual a la superficie de la biopelícula;

II) Después se transportan hacia el interior de la biopelícula por difusión;

III) Posteriormente se produce una oxidación del sustrato en el interior de la biopelícula;

IV) Más tarde, hay una eliminación de los productos de desecho, producidos en la tercera fase, vertiéndolos al agua residual situada en el depósito. Las poblaciones de microorganismos que se forman en cualquier etapa del proceso reflejan las condiciones ambientales y de carga de esa etapa; y

V) Una vez desprendida la porción de película bacteriana comienza en ese lugar el crecimiento de nueva biomasa, y así indefinidamente, regulándose el espesor de la biopelícula de forma natural.

La biomasa desprendida se separa del efluente depurado en la etapa de decantación, que sigue al tratamiento biológico, en la que, por gravedad, procede la separación de ambas.

Las aguas depuradas constituyen el efluente final del proceso, mientras que la biomasa decantada da lugar a los lodos, que precisan ser estabilizados y deshidratados, como pasos previos a su disposición.

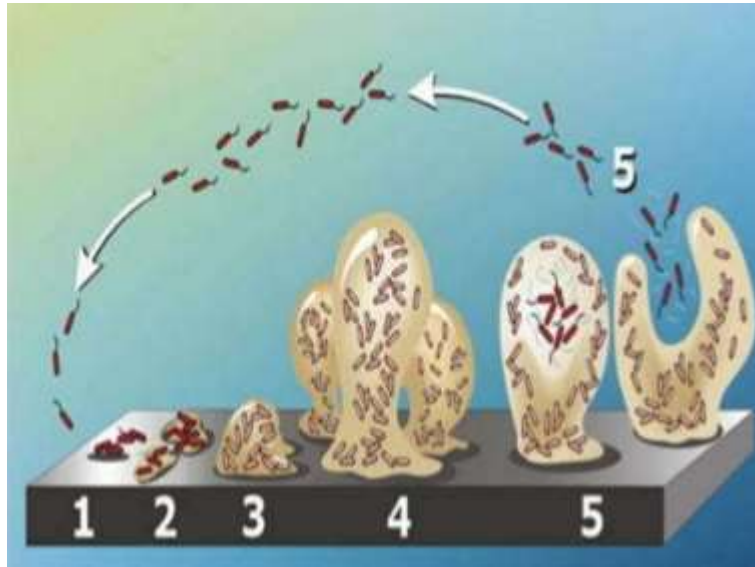


Figura 1-14. Fases de la biopelícula en los CBR. Fuente: biologiatecnologicaiti.blogspot.com

Consideraciones de diseño

En el diseño de los contactores biológicos rotatorios (CBR) se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Materiales de construcción y factores de forma.

Compartimentalización (diferentes cámaras o etapas).

Características del afluente y del efluente.

Criterios de carga.

Requerimientos de potencia.

Separación de sólidos suspendidos en afluente y efluente.

Materiales de construcción y factores de forma

Los sistemas RBC, al igual que todos los sistemas de tratamiento están sometidos a ambientes corrosivos. En grandes instalaciones se usa concreto reforzado resistente a la corrosión o cubiertos con materiales resistentes como plástico o fibra de vidrio. Cuando se usan materiales de plástico los sistemas están bajo techo, protegidos de la luz ultravioleta. La cubierta actúa también como medio para controlar el crecimiento de algas. En instalaciones

pequeñas se usa generalmente el acero inoxidable, y a nivel de laboratorio se prefiere el acero inoxidable por su resistencia y duración. Los discos son generalmente plásticos, siendo el material más empleado el polietileno de alta densidad. También se ha usado el poliestireno, el polipropileno y el PVC. En instalaciones a nivel del banco y de laboratorio se ha utilizado también el acero inoxidable, el cual presenta una superficie de fácil adherencia para los microorganismos.

La corrugación en la superficie de los discos aumenta el área disponible para el crecimiento de microorganismos y mejora la adherencia y estabilidad estructural del sistema.

Los mayores problemas operacionales encontrados se refieren a las fallas del eje, de los cojinetes, el rompimiento de los discos y de la estructura del soporte por el peso de la biopelícula acumulada y que dependiendo de la capacidad de adherencia de los discos y su tamaño son más o menos propensos a estas fallas.

Criterios de diseño según la cantidad y características del agua residual

Para el diseño de un sistema CBR o la selección de uno, la recomendación principal es tener un tratamiento previo ya sea aerobio o anaerobio de tal manera que elimine los SST para un mejor funcionamiento del CBR. Ahora bien, dentro de los criterios básicos se tienen las recomendaciones de las Normas Técnicas Complementarias para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas que sugiere lo siguiente:

EL volumen óptimo (Carga Hidráulica) de los tanques en los que se instalen los biodiscos será de $0.0049 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de medio. Un valor típico de la profundidad de agua es de 1.50 m, el cual permitirá sumergir el 40% del medio.

Otra forma de dimensionar los CBR como cualquier tratamiento, es mediante modelos matemáticos que simulan el proceso de tratamiento de las aguas residuales, en distintas condiciones ambientales y operacionales, se expresan mediante ecuaciones algebraicas y/o diferenciales.

Como en todo sistema existen variables de entrada y de salida. Un modelo queda representado mediante un conjunto de parámetros que se ajustan a los datos de entrada y de salida. En general, un modelo matemático se plantea de acuerdo con uno de los tres criterios siguientes:

1. La estructura del modelo se determina después de observar el comportamiento del sistema con base en el análisis estadístico de datos experimentales. No se necesita conocer los mecanismos internos del proceso, sino solamente la relación entre las variables de entrada y salida. Tales modelos que se expresan mediante nomogramas, curvas de diseño ó ecuaciones matemáticas, se denominan modelos empíricos o de caja negra.

Los modelos empíricos más difundidos de remoción de DBO₅ se dan a continuación:

Popel (1964) fue uno de los primeros en sugerir una relación matemática para el sistema CBR, relacionando la concentración de la DBO₅ efluente en la etapa *i* (*S_i*) con la DBO₅ influente (*S₀*), el área total de los biodiscos (*A*) y el gasto (*Q*).

$$A = \frac{0.022Q(S_0 - S_i)^{1.4}}{S_i^{0.4}}$$

$$S_0 = S_i + \left(\frac{AS * S_i^{0.4}}{0.022Q} \right)^{\frac{1}{1.4}}$$

Otra fórmula desarrollada por Edeline y Van de Venne (1979), es expresada en términos de la eficiencia (*E*) del sistema y carga orgánica (*CR*), por Edeline y Van de Venne (1979)

$$\frac{1}{E} \left(\frac{1}{E} - 1 \right)^{0.4} = 0.022 \frac{Q}{A} S_0$$

Donde:

$$E = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \quad \text{y} \quad \frac{Q}{A} S_0 \text{ es la carga orgánica } CO, \text{ que está expresada en g/m}^2/\text{día.}$$

Además, existen tablas donde podemos relacionar las principales variables que intervienen en el proceso de los CBR, como un ejemplo de esto tenemos las figuras 1-14 y 1-15, en la primera se relaciona la DBO₅ tanto soluble como total con la CH, para obtener la DBO₅. La segunda es similar solo que en vez de DBO₅ relaciona la concentración de nitrógeno amoniacal (NH₃N) con la CH, ambas graficas son para temperaturas superiores a 13 °C

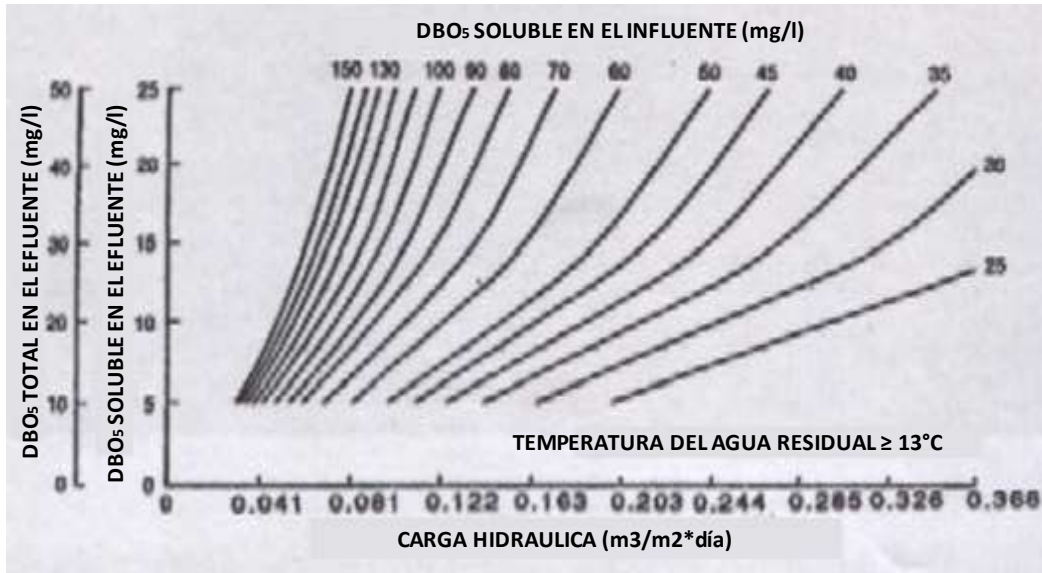


Figura 1-15. Curvas de diseño para remoción de DBO y DBO soluble en relación a la CH. Adaptado de: (Envirex, 1988)

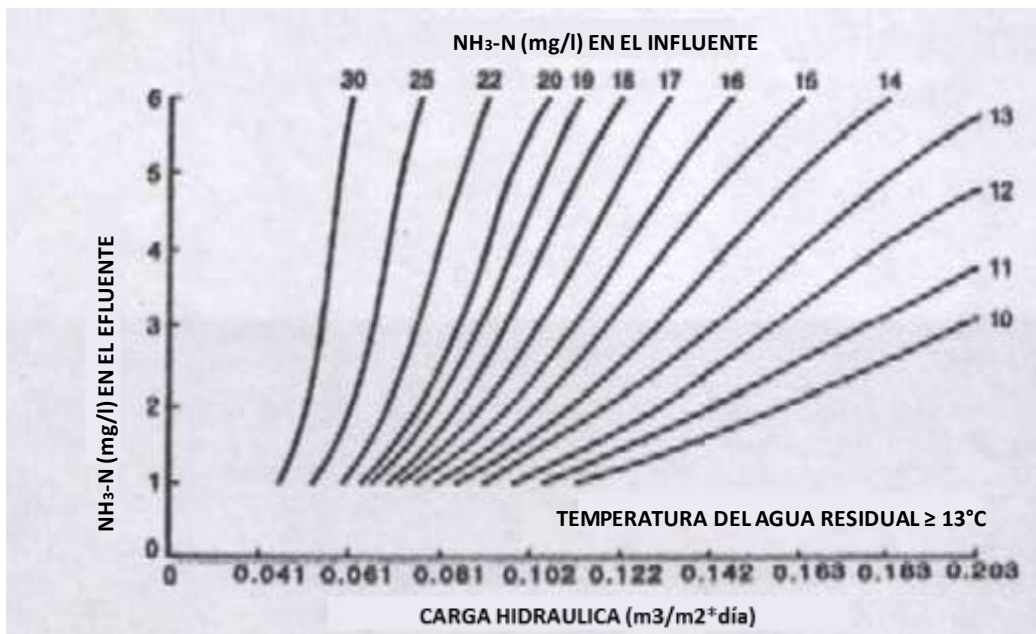


Figura 1-16. Curvas de Remoción de NH₃N en relación a la CH. Adaptado de: (Envirex, 1988)

2. El siguiente modelo se basa en el conocimiento teórico sobre el comportamiento del sistema, antes del análisis de los datos experimentales. El objetivo es la descomposición de un sistema complejo en los mecanismos básicos del proceso, descritos matemáticamente de acuerdo con las teorías correspondientes, por ejemplo las ecuaciones de conservación de la

masa o de crecimiento de la biomasa de acuerdo con las cinéticas de orden cero, de primer orden, de Monod, etc. Los modelos derivados de este análisis se denominan modelos descriptivos.

$$V \frac{db}{dt} = QS_0 - QS - K_v V \quad \text{y} \quad V \frac{db}{dt} = QS_0 - QS - K_c A$$

Donde:

S= Concentración del sustrato en el tanque (g/m³)

S₀= Concentración del sustrato en el influente (g/m³)

K_v = Constante de remoción de sustrato en el reactor (g/m³* día-1)

K_c = Constante de remoción de sustrato en el reactor (g/m²*día⁻¹)

V= Volumen del tanque (l)

A= Área total de los discos (m²)

Q= Gasto (m³/día)

Antonie (1976) Asumió un flujo continuo para cada etapa del sistema CBR. El modelo sugerido se basa en el tiempo de retención del fluido en el reactor (tr), similar a los modelos de flujo continuo usados en lodos activados.

$$S = \frac{S_0}{1 + k_v \frac{V}{Q}}$$

Donde:

k_v = Constante de la tasa de reacción de primer orden para la remoción de DBO₅ (día⁻¹)

V = Volumen del tanque (m³)

$\frac{V}{Q}$ = Θ , tiempo de retención hidráulica (día).

3. Por último tenemos modelos semiempíricos, que podría decirse son la mezcla de los dos primeros. La necesidad de estos modelos se debe a que en la mayoría de los casos es imposible que un modelo sea totalmente descriptivo, debido a la falta de conocimiento respecto a algunos detalles finos de los mecanismos del proceso, y en segundo lugar porque aunque se conocieran con precisión todos los mecanismos, la utilización de los mismos, volvería al modelo excesivamente complejo para las aplicaciones prácticas, de modo que podemos aplicar modelos de cinética de cualquier orden, con las observaciones físicas del comportamiento del sistema CBR y crear modelos muy particulares para cada caso, no obstante, para este estudio no podemos proponer un modelo de este estilo debido a las dificultades de monitoreo constante de parámetros como la variación de la temperatura, el pH, Q, y otros tantos a lo largo del día, así como el espesor y composición de la biopelícula, que serían determinantes para un modelo de este tipo.

No obstante también existe literatura que puede proveer parámetros base para guiarse en el diseño de un CBR sin sustituir el estudio previo de la caracterización del agua residual.

Tabla 1-1: Parámetros de diseño para un CBR.

Parametro	Unidad	Nivel de tratamiento		
		Remoción de DBO	Remoción de DBO con nitrificación	Nitrificación separada
<i>Carga hidraulica (CH)</i>	m ³ /m ² *d	0.08-0.16	0.03-0.08	0.04-0.08
<i>Carga organica (CO)</i>	g(sol)DBO/m ² *d	4.0-10.0	2.5-8.0	0.5-1.0
	g DBO/m ² *d	8.0-20.0	5.0-16.0	1.0-2.0
<i>Máxima carga en una etapa</i>	g(sol)DBO/m ² *d	12.0-15.0	12.0-15.0	
	g DBO/m ² *d	24.0-30.0	24.0-30.0	
<i>Carga de NH₃</i>	g N/m ² *d		0.75-1.5	
<i>Tiempo de retención hidraulico</i>	h	0.7-1.5	1.5-4.0	1.2-3.0
<i>DBO del efluente</i>	mg/l	15.0-30.0	7.0-15.0	7.0-15.0
<i>Efluente NH₄-N</i>	mg/l		< 2.0	1.0-2.0
<i>Para aguas residuales por encima de 13°C</i>				
<i>Sol= Soluble</i>				

Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004

Capítulo 2: Historia del sistema de CBR

Con el crecimiento experimentado por las ciudades durante el siglo XIX, fue evidente la necesidad del tratamiento de las aguas residuales. Los brotes de cólera y otras enfermedades en Londres llevaron a la construcción de drenajes más sofisticados y se impulsó el tratamiento de aguas tanto residuales como para el consumo humano, sin embargo, no se comprendía la naturaleza biológica del agua residual por lo que no se disponía de procesos muy elaborados y que fueran rentables a gran escala, sería hasta finales de ese siglo, con los descubrimientos de Pasteur que se desarrollarían modelos matemáticos para predecir el comportamiento de la materia orgánica y poder así diseñar sistemas que la consumieran como es el caso de los CBR.

2.1. Origen del proceso

Las dos primeras referencias son dos patentes. La primera de ellas concebida por Weigand en 1900, donde el medio de soporte giratorio estaba formado por planchas de madera y la segunda la desarrollada por Poujoulat en 1916 donde el medio estaba formado por un cilindro de material poroso que giraba sobre su eje horizontal. Siguiendo la línea así iniciada, distintos investigadores estudiaron el medio soporte giratorio. J. Doman, en 1929, informó sobre el desarrollo de un filtro de contacto que usaba placas de acero galvanizado sumergidas. Otra opción fue la rueda biológica patentada por A.T. Maltby poco antes de 1930, la unidad consiste en un grupo de ruedas parcialmente sumergidas que giran por el flujo de agua que circula por un canal.



Figura 2-1. Primeros sistemas CBR. Fuente: www.wastewaterlect2001.html

Los materiales del medio de soporte más utilizados durante este periodo preliminar fueron la madera y el hierro, que se deterioraban rápidamente por lo que ello supuso un freno al avance de estos CBR iniciales, hasta el principio de la década de los cincuenta, en que se comienza a investigar y desarrollar los medios soporte de material plástico.

2.2. Época moderna

La investigación y desarrollo de los medios de soporte de material plástico se lleva a cabo en dos diferentes líneas. En América, como medio innovador de relleno en lechos bacterianos. En Europa, comienzan a probarse discos de plástico con las mismas disposiciones utilizadas con acero galvanizado por Doman. Más tarde, investigaciones llevadas a cabo por Popel y Hartman usan sólo medios de poliestireno expandido que abren la puerta a la aplicación comercial.

La primera instalación comercial fue puesta en funcionamiento en 1960, y poco después el proceso comenzó a tener considerable interés en Europa.

En 1965, se evaluaron en la planta de tratamiento de Jones Island en Milwaukee (Wisconsin, USA) discos de metal de 1 metro de diámetro. Estas unidades fueron empleadas inicialmente para transferencia de oxígeno en un proceso de aireación prolongada, y ensayada sin recirculación de lodo y con biomasa adherida (como un contactor biológico). Para confirmar los resultados favorables de estas pruebas, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio usando agua residual sintética y discos de aluminio de 1 metro de diámetro. Después de conocer las actividades europeas, Allis-Chalmers consiguió, en 1968, licencia para producir y distribuir en USA los productos de los fabricantes alemanes. El proceso de tratamiento se registró con el nombre de Biodisco. La primera instalación comercial en USA se realizó en una pequeña fábrica de queso en 1969. En 1970, Allis Chalmers vendió su tecnología de CBR a Autotrol. En aquel tiempo, los discos de poliestireno no eran todavía competitivos con el proceso de lodos activos, principalmente debido al alto costo de los discos de poliestireno. Sin embargo, dos años después Autotrol anunció el desarrollo de un nuevo medio soporte construido con hojas de polietileno.

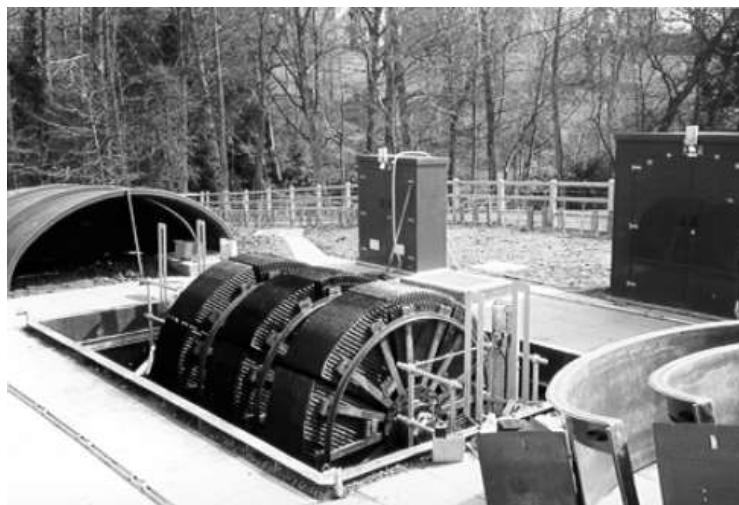


Figura 2-2. Sistema CBR descubierto de poliestireno. Fuente: www.sciencedirect.com

Así, También se aplicó el proceso CBR para nitrificación del agua residual. Weng y otros (1978), evalúan varios parámetros que afectan al funcionamiento del proceso y muestran que entre la carga del influente, el caudal, la velocidad rotacional de los discos, el TRH, superficie efectiva del disco y la superficie sumergida del disco, solamente la carga del influente, el caudal y la superficie efectiva del disco fueron importantes al determinar la eficiencia de la nitrificación.

En los años 1980-81 numerosos trabajos fueron publicados. Hitdlebaugh y Miller (1981), discuten los problemas operacionales del CBR. Dehkordi (1980) y Keihani (1980), describen los efectos de los metales pesados en el funcionamiento de los CBR. Spink (1980), describió el comportamiento del CBR en la provincia de Alberta, Canadá. Rushbrook y Wilke (1980), describieron un fácil tratamiento innovador en Hillsborough, N.H. que incluyó, digestión anaerobia con calentamiento solar y metano recuperado en el CBR.

La distribución de sólidos en un CBR fue estudiada por Munch y otros (1980). Sapinsky (1980), enfatizó la importancia de la conservación de la energía en el tratamiento de agua residual y citó las plantas de Hillsborough, N.H., Minneapolis y Chicago por su eficiente uso de la energía. También se estudiaron algunas modificaciones interesantes del proceso como fue alguna aplicación inusual de la tecnología del CBR en plantas convencionales de tratamiento. Así Given (1980), informa del tratamiento con CBR de aguas residuales diluidas. Huang y Bates (1980), comparan el tratamiento con CBR de agua residual de leche sintética usando aire y oxígeno puro. Tait y Friedman (1980), trataron un sistema de tratamiento anaerobio innovador usando CBR con aguas residuales de alta concentración carbonácea. Cheung y Krauth (1980), investigaron la fiabilidad de la sustitución de la sedimentación convencional por microfiltros en el CBR. Hoag (1980), evaluó el uso del CBR al tratar sobrenadante séptico coagulado con sulfato de alumina. El uso del CBR para tratamiento terciario continuó su desarrollo. Noss y Miller (1980), describen el uso del CBR para el

tratamiento secundario y recarbonatación después de la adición de pequeñas cantidades de cal para la eliminación de fósforo. Los efectos de la concentración de nitratos y período de retención sobre la desnitrificación en CBRs fue investigado por Cheung y Krauth (1980). Singhal (1980), describió la nitrificación en una planta de CBR avanzada en Cadillac, Michigan. La eficiencia energética de una planta de tratamiento de agua residual en Guelph, Ontario fue descrita por autor anónimo (1980), en la que por medio de un CBR se elimina DBO, nitrógeno amoniacal y fósforo seguido por un proceso de filtración.

La viabilidad del uso de los CBR para mejorar las plantas existentes fue analizada en varios estudios. Smith(1981), consideró el CBR como un elemento de tratamiento posterior del efluente del lecho bacteriano.

Otra área de actividad comprende el tratamiento de agua residual industrial, Chesler y Eskelund (1981), evaluaron el CBR para el tratamiento de agua residual de una fábrica de explosivos. Agua residual procedente de una mina ácida fue tratada en un estudio en una planta piloto prototipo llevada a cabo por Olem y Unz (1980), en Hollywood, PA. Las aguas domésticas fueron tratadas con un proceso innovador, que comprende un tanque aireado de equalización y un CBR, por Waggener y otros (1980). Los problemas causados por vertidos de aguas residuales industriales a la planta CBR de la ciudad de Monett, Missouri, equivalentes a 7 veces la de su población, fueron estudiados por Riddle (1980).

De 1982 en adelante, un gran número de trabajos se han publicado referentes al tratamiento de aguas residuales con CBR. Así los hay, desde los que desarrollan aspectos generales como el estado actual y las tendencias futuras de los CBR y casos de plantas de tratamiento de agua residual municipal o industrial, a otros más específicos, que presentan experiencias con innovaciones al sistema, su modelación, el estudio de sistemas en planta piloto y de campo y aspectos concretos de la biopelícula y biocinéticas.

Pike, E. B. (1985) hace una revisión general del uso del CBR para diversos tipos de vertidos y su comportamiento. Más tarde en 1986 Lin, S. D. evalúa los cambios en la DBO de un sistema CBR e indica las ventajas e inconvenientes del mismo.

Capítulo 3: Situación actual y tendencias en el uso del sistema CBR

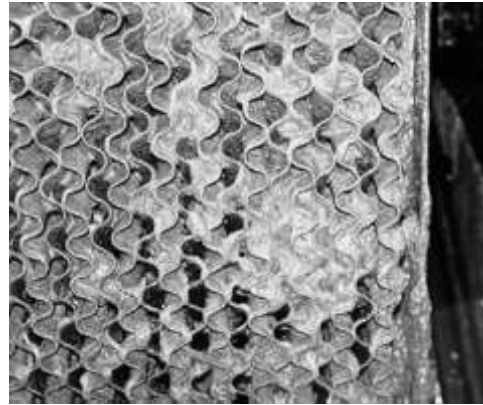
No obstante que es un sistema muy eficiente, el uso de sistemas CBR en México no está generalizado, optándose por otros sistemas más conocidos como lodos activados. Sin embargo, en países de primer mundo se dispone de mayor experiencia con el sistema, por lo que la tendencia es el empleo de CBR integrados en plantas paquete, diseñadas para pequeñas poblaciones y especializadas para una variedad de aguas residuales generadas por diferentes tipos de industrias.



Figura 3-1. Sistema CBR prefabricado. Fuente: www.spanish.alibaba.com

3.1 Situación internacional y tendencias

En general, la tendencia de los CBR es la modificación de los materiales con los que están fabricados los discos, empleando polímeros en los cuales la biopelícula pueda adherirse con mayor facilidad y genere un medio más propicio, además la maximización de la superficie de contacto, generando superficies geométricas o corrugadas para este fin.



Figuras 3-2 y 3-3. Superficie corrugada de los CBR. Fuente: Mechanical evolution-rotating bio contractor

Por otro lado, la capacidad de los CBR de funcionar en pequeña escala propicia la construcción de prototipos y modelos más pequeños, pero debido a que su eficiencia no es proporcional al tamaño, tampoco incentiva una amplia propagación de esta tecnología en grandes PTAR, además de que la construcción de prototipos más grandes genera problemas relacionados con el peso, el desprendimiento de la biopelícula y la ruptura de los discos debido al gran esfuerzo cortante al que son sometidos, por lo que es común encontrar estos sistemas en núcleos de población de 2000 a 5000 personas.



Figuras 3-4 a 3-7. PTAR compacta con sistema CBR incorporado en el mercado .Fuente: www.ambientum.com/revista/2002_05/BIODISCO1.asp

3.2. Situación en México

Según el Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación (CONAGUA, 2009), en la República Mexicana existen ocho plantas que cuentan con sistemas de tipo CBR o Biodiscos, que representa el 0.39% del total de las PTAR, con capacidad instalada para tratar el 0.66% del agua residual, pero cuya capacidad real es de 0.53%, es decir, 464.5 L/s. Se desconoce el número de plantas privadas existentes para el tratamiento de descargas individuales de edificios, fraccionamientos, etc., que cuenten con este sistema de tratamiento.

En la figura XX, se muestra el número de plantas municipales por tipo de proceso construidas en el país.

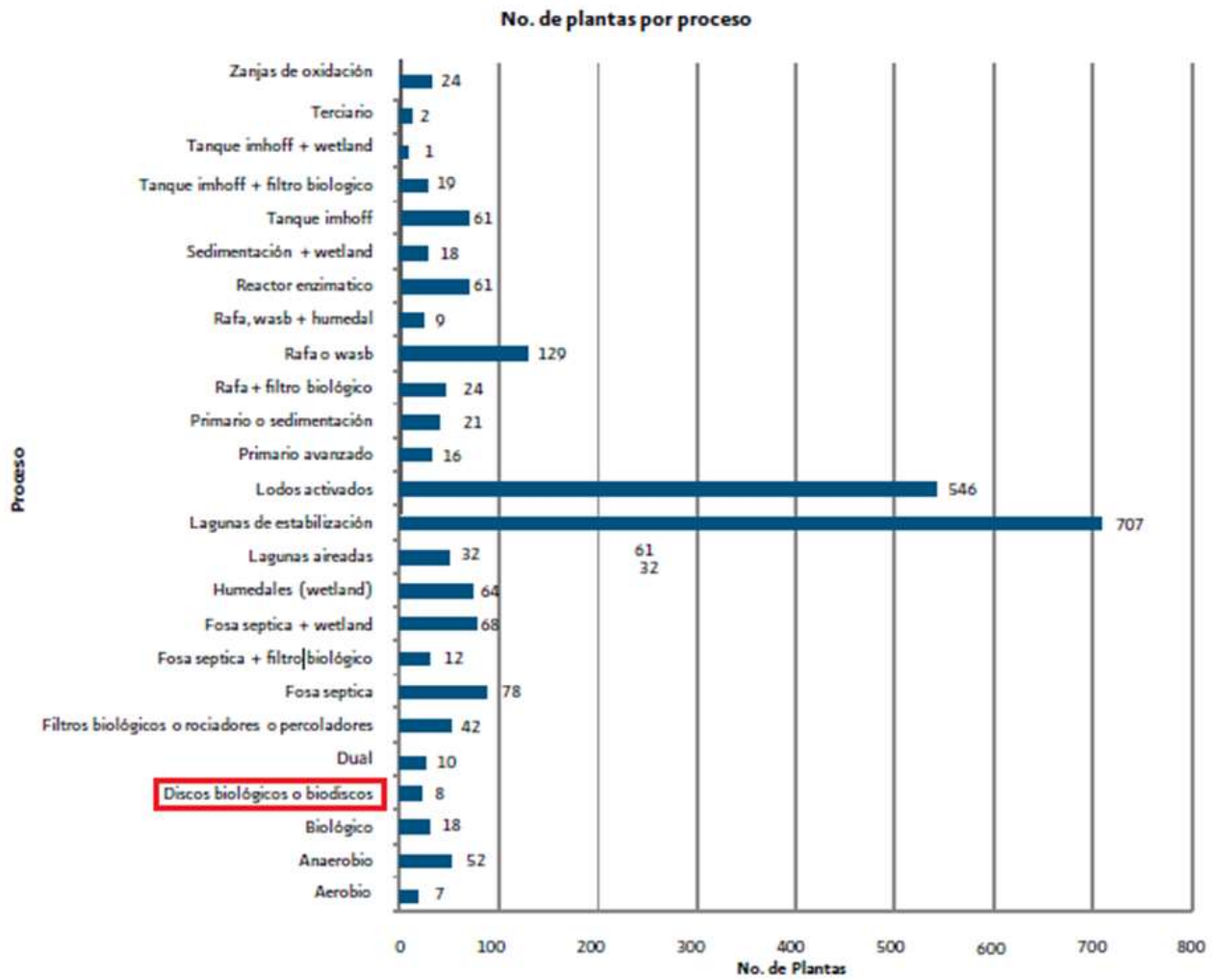


Figura 3-8. Número de PTAR con sistemas CBR en México. Adaptado de: CONAGUA, 2009

Tabla 3-1. Tipo de proceso y gasto tratado en la PTAR registradas en México

Proceso	Plantas		Capacidad instalada		Caudal tratado	
	No.	%	L/s	%	L/s	%
AEROBIO	7	0.34	311.5	0.26	134.6	0.15
ANAEROBIO	52	2.56	560.0	0.46	357.5	0.41
BIOLÓGICO	18	0.89	342.0	0.28	268.5	0.3
DISCOS BIOLÓGICOS O BIODISCOS	8	0.39	794.5	0.66	464.5	0.53
DUAL	10	0.49	4 676.0	3.87	4 175.6	4.74
FILTROS BIOLÓGICOS O ROCIADORES O PERCOLADORES	42	2.07	6 067.0	5.02	4 602.2	5.22
FOSA SÉPTICA	78	3.84	154.9	0.13	105.3	0.12
FOSA SÉPTICA + FILTRO BIOLÓGICO	12	0.59	30.6	0.030	16.7	0.02
FOSA SÉPTICA + WETLAND	68	3.35	162.6	0.13	93.3	0.11
HUMEDALES (WETLAND)	64	3.15	601.5	0.5	357.8	0.41
LAGUNAS AIREADAS	32	1.58	9 525.2	7.88	7 142.9	8.11
LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	707	34.84	19 837.5	16.41	13 738.1	15.59
LODOS ACTIVADOS	546	26.91	57 958.8	47.95	40 919.7	46.43
PRIMARIO AVANZADO	16	0.79	11 240.0	9.3	9 814.0	11.14
PRIMARIO O SEDIMENTACIÓN	21	1.03	2 787.2	2.31	1 598.6	1.81
RAFA + FILTRO BIOLÓGICO	24	1.18	135.3	0.11	79.0	0.09
RAFA O WASB	129	6.36	1 726.6	1.43	1 125.7	1.28
RAFA, WASB + HUMEDAL	9	0.44	60.7	0.05	41.6	0.05
REACTOR ENZIMÁTICO	61	3.01	143.5	0.12	109.6	0.12
SEDIMENTACIÓN + WETLAND	18	0.89	36.1	0.03	24.7	0.03
TANQUE IMHOFF	61	3.01	601.1	0.5	410.2	0.47
TANQUE IMHOFF + FILTRO BIOLÓGICO	19	0.94	80.3	0.07	36.5	0.04
TANQUE IMHOFF + WETLAND	1	0.05	80.0	0.07	80.0	0.09
TERCIARIO	2	0.1	75.0	0.06	66.0	0.07
ZANJAS DE OXIDACIÓN	24	1.18	2 872.9	2.38	2 364.7	2.68
Total nacional	2 029	100	120 861	100	88 127.1	100

Adaptado de: CONAGUA, 2009

La tabla 3-2 es una relación de las PTAR que cuentan con procesos de CBR, su ubicación, capacidad y caudal. Dos de las plantas dos están fuera de operación, que corresponden a la PTAR del zoológico de Guadalajara y en Noustari Yautepec por haberse colapsado los colectores que alimentaban a la planta.

Tabla 3-2. PTAR con sistemas CBR registradas en México.

Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad Instalada (l/s)	Caudal tratado (l/s)	Cuerpo receptor o reuso	Observaciones
GUADALAJARA	GUADALAJARA	COUNTRY CLUB	DUAL	50.0	44.0	RIEGO ÁREAS VERDES	LODOS ACTIVADOS
GUADALAJARA	GUADALAJARA	ZOOLOGICO DE GUADALAJARA A. C.	LODOS ACTIVADOS	20.0	20.0	RIEGO ÁREAS VERDES	DEJARON DE OPERAR LOS BIODISCOS
TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	TLAJOMULCO DE ZUÑIGA	FRACCIONAMINETO CAMICHINES	DISCOS BIOLOGICOS	7.0	6.0	RÍO YAUTEPEC	
CUERNAVACA	CUERNAVACA	TABACHINES ACAPANZINGO	DISCOS BIOLOGICOS	400.0	250.0	ARROYO CHAPULTEPEC	
EMILIANO ZAPATA	EMILIANO ZAPATA	NUSTAR	DISCOS BIOLOGICOS	15.0	1.0	ÁREAS VERDES	SE REPORTÓ EN 2008
YAUTEPEC	YAUTEPEC DE ZARAGOZA	YAUTEPEC	DISCOS BIOLOGICOS	160.0	15.0	RÍO YAUTEPEC	LOS COLECTORES QUE ALIMENTABAN A LA PLANTA ESTÁN COLAPSADOS
PUEBLA	HEROICA PUEBLA DE ZARAGOZA	PARQUE ECOLÓGICO	DISCOS BIOLOGICOS	80.0	80.0	RÍO ALSESECA/RIEGO ÁREAS VERDES	
GUADALUPE	GUADALUPE	EL SALERO	DISCOS BIOLOGICOS	12.0	12.0	CAMPO DE GOLF	TRATA AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES
ZACATECAS	ZACATECAS	EL ORITO	DISCOS BIOLOGICOS	120.0	100.0	ARROYO HACIENDAS	REINICIÓ OPERACIÓN POR AMPLIACIÓN EN 2009

Adaptado de: CONAGUA, 2009

Algunas plantas con sistemas CBR en México

PTAR de Acapantzingo

La PTAR de Acapantzingo, trata el 70 por ciento de las aguas de Cuernavaca, y representa un paso importante en el saneamiento de la cuenca del Río Apatlaco. Esta obra, que en el pasado quedó abandonada, tuvo una inversión de 252.9 millones de pesos, ahora su capacidad de tratamiento es de 750 litros por segundo y cumple con los estrictos estándares de calidad. Adicionalmente se construyeron 50 kilómetros de colectores.



Figura 3-9. PTAR de Acapantzingo Cuernavaca. Fuente: www.flickr.com/photos/gobiernomorelos

PTAR el Orito

La PTAR “El Orito” terminada en 2011, se construyó con inversión de la Federación y del Gobierno del Estado de Zacatecas, por un monto de 87 millones 213 mil pesos, de los cuales el gobierno federal aportó el 60 por ciento. La PTAR Poniente opera con el sistema de lodos activados convencionales y en su primer módulo procesa 160 litros por segundo, volumen equivalente al 17 % del total de aguas negras, producidas principalmente en la parte poniente de la capital del estado.



Figura 3-10. PTAR “el Orito” en el estado de Zacatecas.
Fuente: www.oem.com.mx/elsoldezacatecas/notas

PTAR de Cerro de Cerro del agua de Ciudad Universitaria.

Esta planta se diseñó a fines de los años 1970's y comenzó a operar en 1982, se diseñó para tratar un caudal de 40 l/s y una DBO_5 de diseño fue de 100 mg/l. En una PTAR común incluye solo un proceso biológico pero debido a que esta planta fue considerada para fines didácticos se construyó con 3, los cuáles son:

Lodos activados.

Sistema CBR.

Filtro percolador



Figura 3-11 PTAR de Cerro del Agua (CU). www.pumagua.unam.mx/calidad_agua.

Con el paso del tiempo y por causas desconocidas, el sistema CBR dejó de operar, esto debió ocurrir a mediados de los años 90's ya que no se incluye en el catálogo de PTAR de CONAGUA, no obstante, en un análisis anterior (Mantilla, 1987), se sabe que el biodisco reportaba una eficiencia del 88% en cuanto a remoción de DBO.

Las actuales condiciones de operación son diferentes de su diseño original, en cuanto a la DBO_5 tiene un promedio por arriba de 200 mg/l y gasto de operación es de 16 l/s. Además, está siendo objeto de modificaciones para instalar un desarenador al principio del tratamiento y una biomenbrana en el interior de un tanque de aireación.

Capítulo 4: Descripción de la planta de tratamiento de aguas residuales

El proyecto de la PTAR del edificio de la DIC y G comenzó con la idea de tratar las aguas generadas en el mismo por medio de un sistema funcional y didáctico, esta idea coincidió con el inicio del Programa de manejo, uso y reúso del agua en la UNAM (PUMAGUA) liderado por el Instituto de ingeniería, así mismo, con base en las acciones del PUMAGUA, a través de la Facultad de Ingeniería se perfilaron diferentes proyectos para los diferentes edificios de esta dependencia. En el caso del edificio de la DIC y G, el proyecto fue encomendado al Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.



Figura 4-1. Croquis de la ubicación de la PTAR del estudio.
Fuente: www.ingenieria.unam.mx

Las etapas del proyecto fueron las siguientes:

- 1) Evaluación de la calidad del agua en puntos de muestreo y descarga

- 2) Análisis de las condiciones de operación de los sistemas, prácticas y tecnologías actuales de uso, tratamiento y reúso, en su caso, o disposición final, de acuerdo con los objetivos del PUMAGUA.
- 3) Proposición de los dispositivos tecnológicos y prácticas adecuadas para el uso eficiente del agua.

El proyecto de la PTAR se derivó del inciso 3), y su planeación, diseño y construcción fueron realizados como tema de tesis de maestría (Mata, 2012), El proyecto incluyó el arranque de la planta de tratamiento, y en el presente trabajo se efectuó un diagnóstico de las condiciones actuales de operación.

4.1 En la figura 4-2 se muestra el diagrama de flujo del proyecto original de la PART.

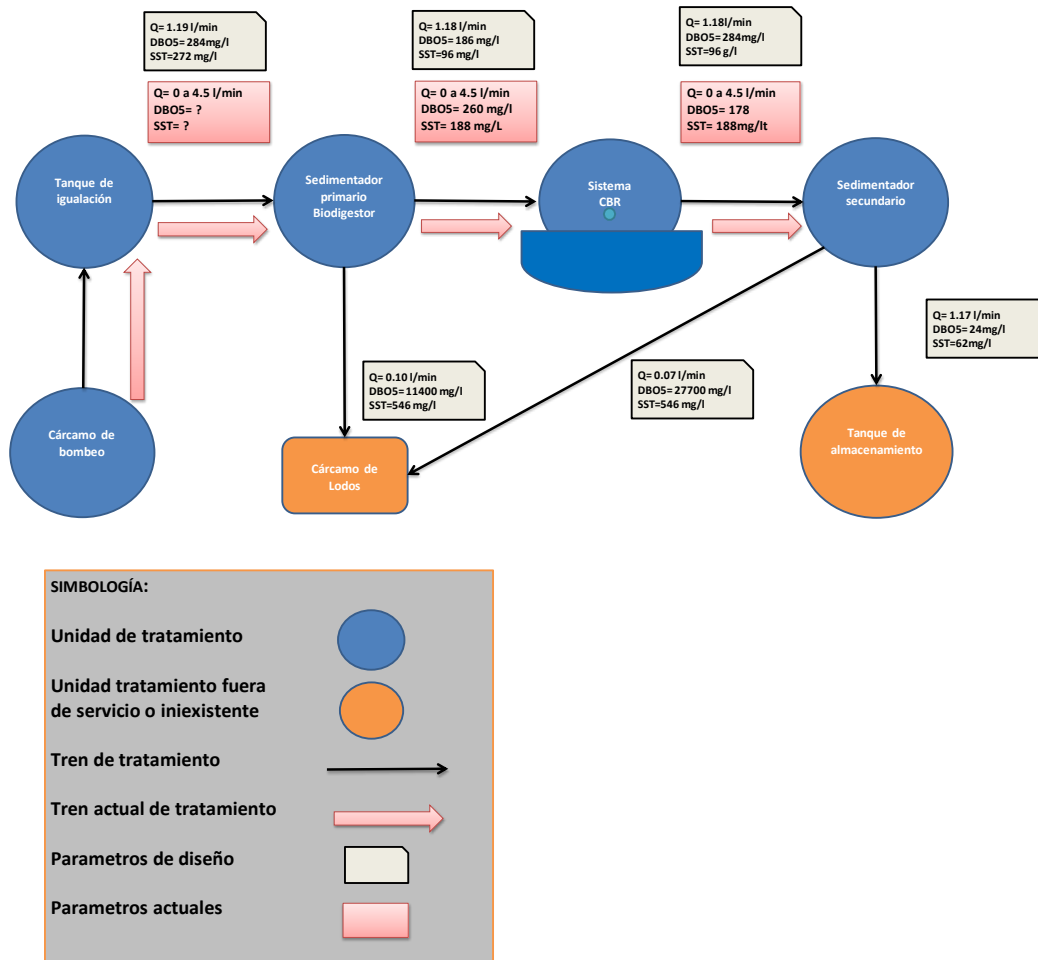


Figura 4-2. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento

Los parámetros actuales del funcionamiento de la planta así como la metodología usada para su determinación se abordan con detalle en el capítulo 6.

4.2 Elementos que conforman cada nivel de tratamiento

Tabla 4-1. Elementos que conforman la PTAR de este trabajo

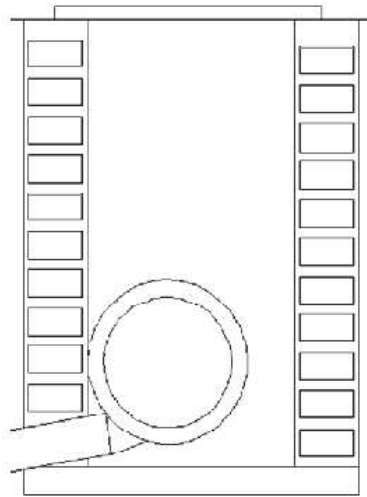
Tratamiento preliminar	Tratamiento primario	Tratamiento secundario
Obra de toma (Registro) Cárcamo de bombeo Tanque de igualación	Sedimentador primario (biodigestor)	Sistema CBR Sedimentador secundario

Obra de toma (Registro)

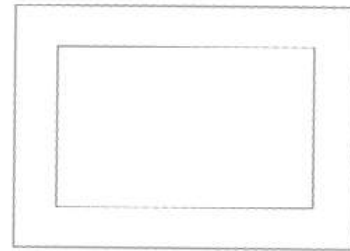
Es una obra de albañilería común de dimensiones 0.8x0.6m, con una profundidad de 1.4m, las paredes son de ladrillo rojo común y tapa de concreto, en el fondo del registro se colocó una obra de desvío para conducir las aguas residuales al cárcamo de bombeo.



4-3. Obra de toma



VISTA FRONTAL



VISTA EN PLANTA

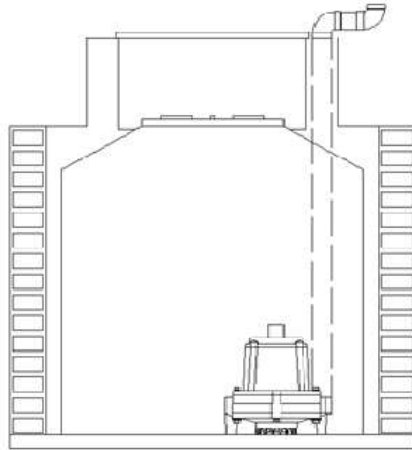
Vista 4-4. Vista frontal y en planta de la obra de toma



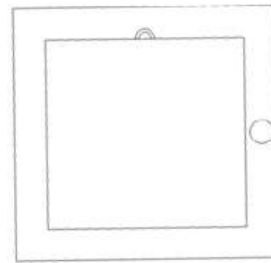
Figura 4-5. Cárcamo de bombeo

Cárcamo y equipo de bombeo

Consiste en un tanque de polietileno de alta densidad con capacidad de 600 litros instalado en una excavación de aproximadamente 1.30 metros de profundidad y 1.20 metros de lado, en la base del tanque está instalada una bomba de 1/3 HP que suministra un gasto de 100 litros por minuto aproximadamente. La operación de la bomba es por medio de electroniveles, los cuales fueron instalados en el cárcamo de bombeo y en el tanque de igualación. En caso de que el cárcamo de bombeo llegue a su máximo nivel máximo de llenado sin que la bomba opere, el agua pasa directamente a una tubería de demasías que conduce el agua al sitio de disposición final



VISTA FRONTAL



VISTA EN PLANTA

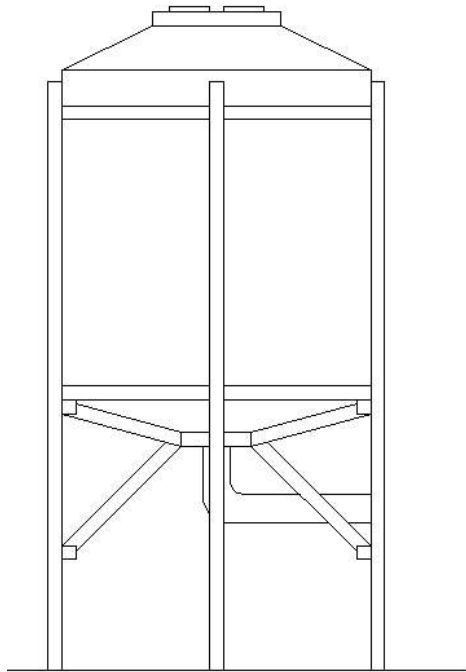
Figura 4-6. Vista frontal y en planta Cárcamo de bombeo

Tanque de igualación

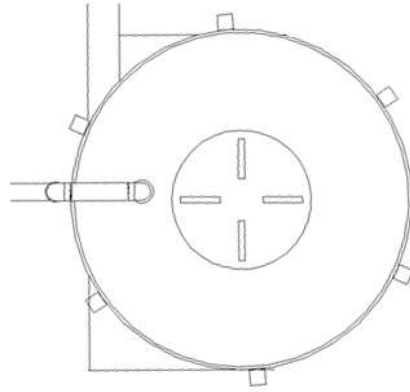
El tanque de igualación consta de un tanque de polietileno de alta densidad, cilíndrico, cuyo fondo tiene forma cónica invertida y una elevación de 80cm sobre el nivel del terreno para garantizar el flujo por gravedad en todo el sistema; su capacidad es de 1,100 litros, esta capacidad fue calculada con el método gráfico (Mata, 2012). El tanque esta soportado por una estructura de acero plantada al suelo por una base de concreto.



Figura 4-7. Tanque de igualación



VISTA FRONTAL



VISTA EN PLANTA

Figura 4-8. Vista frontal y en planta del tanque de igualación

Sedimentador primario (biodigestor)



Figura 4-9. Sedimentador secundario (Biodígestor)

Es un tanque prefabricado de 1300 litros con filtro de material plástico de desecho (PET), en el cual se desarrolla una reacción anaerobia que permite la degradación de la materia orgánica hasta en un 74% según el fabricante, sin embargo, para la PTAR, es usado solamente como sedimentador primario debido a que el TRH es bajo, además, teniendo en cuenta que es el sistema inmediatamente anterior al CBR, también se incluirá brevemente en el estudio.



Figura 4-10. Elementos del biodigestor autolimpiable rotoplas. Fuente: www.rotoplas.com

En la figura 4-11 se presentan las capacidades y dimensiones disponibles.

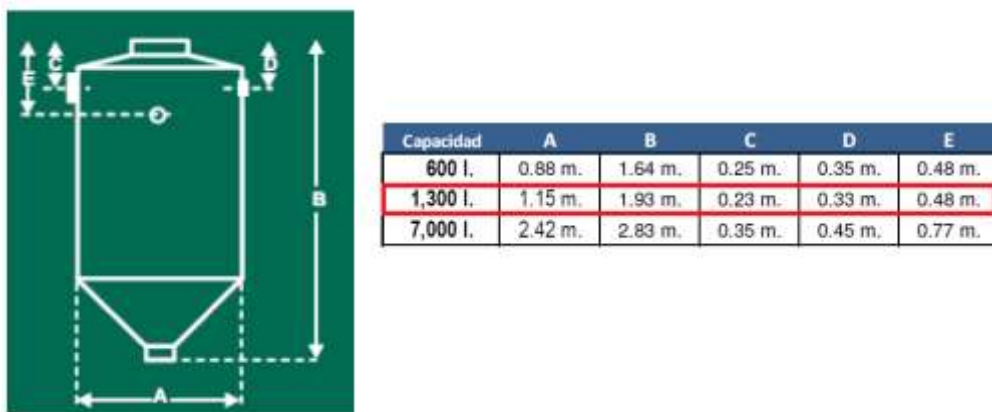


Figura 4-11. Dimensiones del biodigestor autolimpiable rotoplas. www.rotoplas.com

Sistema de contactores biológicos rotatorios (CBR)

El CBR utilizado para este estudio consiste en un tanque con un eje de acero que soporta un medio plástico corrugado. El eje tiene una rotación lenta y los medios plásticos se sumergen en un 35% aproximadamente dentro del nivel del agua residual. El eje está soportado por sobre los bordes del tanque por medio de baleros y está dividido en tres etapas; la primera con 18 discos y las otras dos etapas con 9 discos cada una. Además, está provisto de una cámara de alimentación donde se vierte el agua residual y por medio de cubetas ubicadas sobre los brazos sujetos al eje de rotación inicia el proceso biológico. Además se instaló una tubería para las demasías, con el fin de evitar el desbordamiento del agua y se aprovecha para hacer una recirculación hacia el cárcamo de bombeo para utilizarse los fines de semana, ya que el gasto descargado se reduce drásticamente.

Características:

Etapas: 3 con arreglo 2-1-1

Área superficial: 23m²

Relación volumen tanque/área superficial 0.005m³/m² (nominal) con biomasa.

Diámetro del disco: 0.5 metros

Número de discos: 18 la primera etapa y 9 cada una de las dos siguientes.

Longitud de cada etapa: 66cm 1ª etapa y 33cm cada una de las dos siguientes.

Revoluciones de la flecha: 7

Velocidad periférica media: 0.86 m/s

Motor: Westinghouse, 115 Volts, 0.25 H.P., monofásico.



Figura 4-12. Sistema CBR objeto de estudio de este trabajo

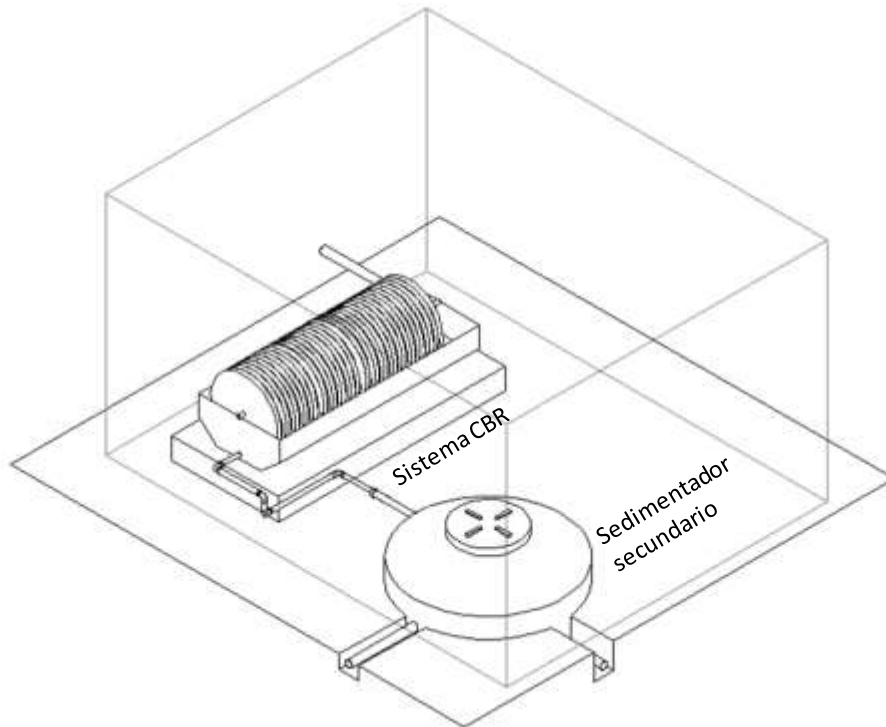


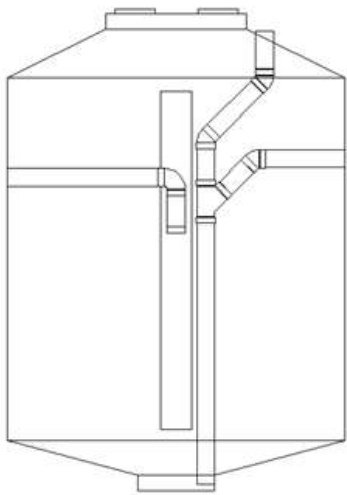
Figura 4-13. Elementos ubicados dentro de la caseta de la PTAR (CBR y Sedimentador secundario)

Sedimentador secundario

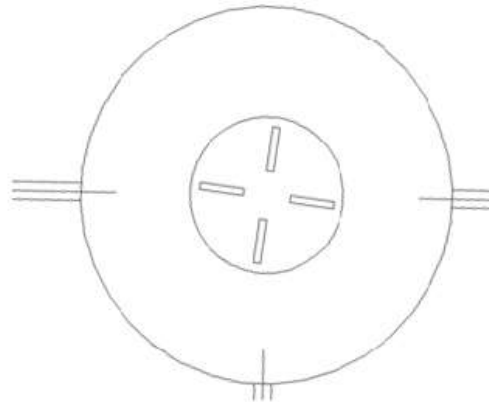
El tanque de sedimentación, semienterrado en una excavación de un metro de profundidad, consiste en una tolva de las mismas características que el tanque de igualación, a la cual se le adaptaron tubos y accesorios de PVC de entrada y salida de agua y lodos, está diseñado para eliminar alrededor del 20% tanto de DBO como de SST.



Figura 4-14: Sedimentador secundario



VISTA FRONTAL



VISTA EN PLANTA

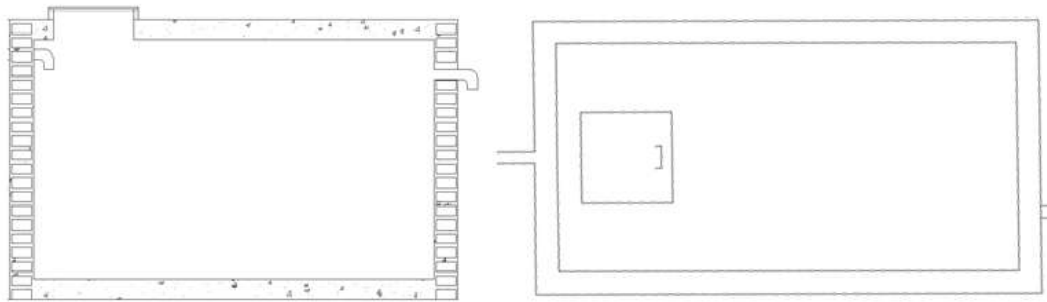
Figura 4-15: Vistas frontal y en planta del sedimentador secundario

Cisterna de agua tratada

Es un tanque de almacenamiento con capacidad de 2m^3 construido a base de muros de tabique con castillos, fondo y losa de concreto. Es importante mencionar que actualmente no está en uso.



Figura 4-16. Cisterna de la PTAR



VISTA FRONTAL

VISTA EN PLANTA

Figura 4-17. Vistas frontal y en planta de la cisterna de la PTAR

Es necesario analizar el funcionamiento de los elementos anteriores al sistema CBR ya que sus deficiencias repercuten directamente en las características del agua residual y el gasto que es tratado por el CBR, obteniéndose actualmente baja eficiencia.

Una de las características de los CBR es que requieren una entrada constante de nutrientes al sistema, lo que se traduce en un gasto constante, condición que no se ha podido lograr en la PTAR en estudio debido a que la tubería del efluente del tanque de igualación se obstruye constantemente. No obstante que se han intentado diferentes medidas de solución, no se ha logrado superar el problema.

Dado que el biodigestor tiene un gasto mayor al propuesto por el fabricante, la DBO del efluente todavía es alta, por lo que en temporadas de actividad académica se supera la DBO de diseño que el CBR puede tratar. Para superar esta condición, sería deseable que el biodigestor no solo funcione como sedimentador, sino que también reduzca los niveles de DBO con un mayor TRH.

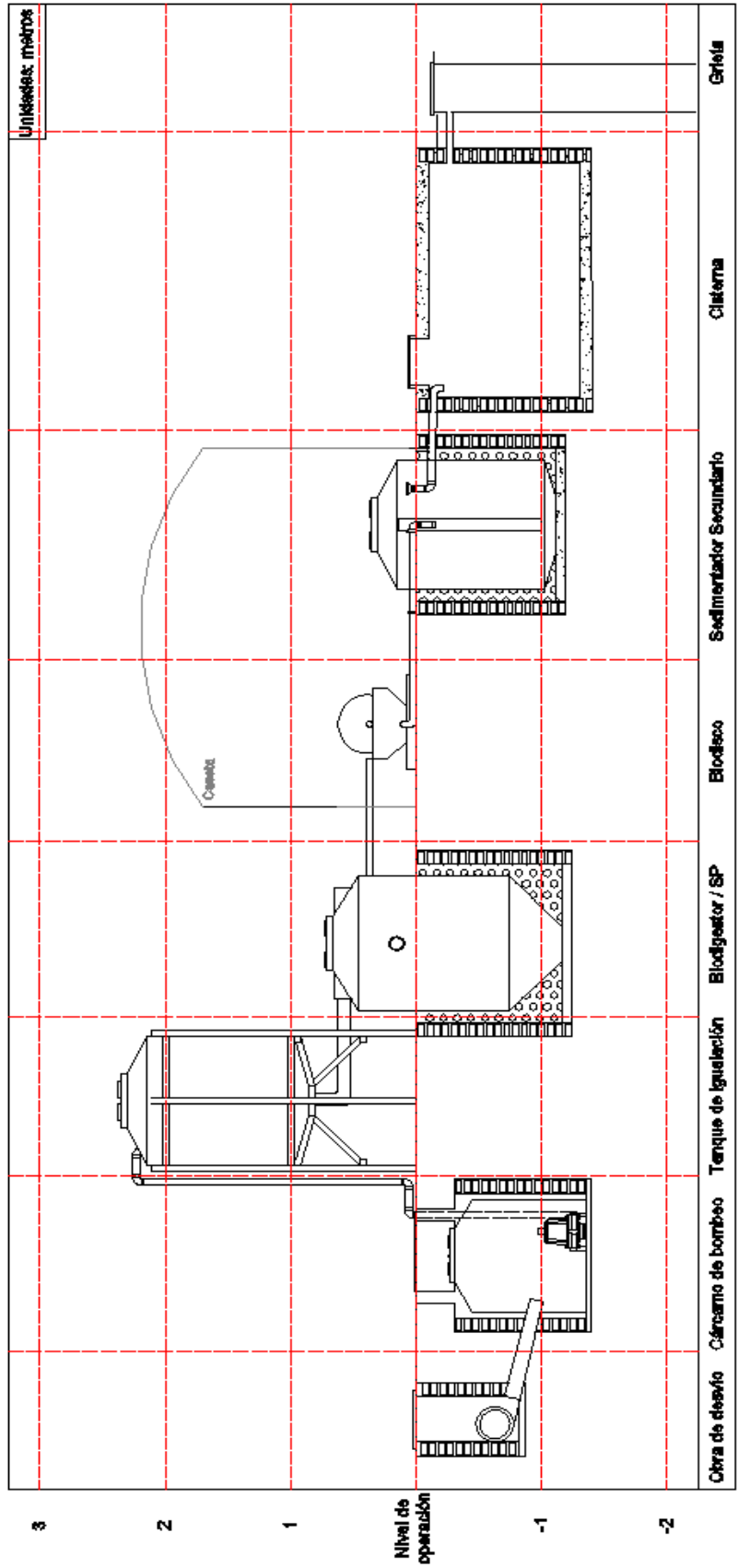


Figura 4-18. Vista frontal de los elementos de la PTAR de este estudio. Adaptado de: Mata 2012

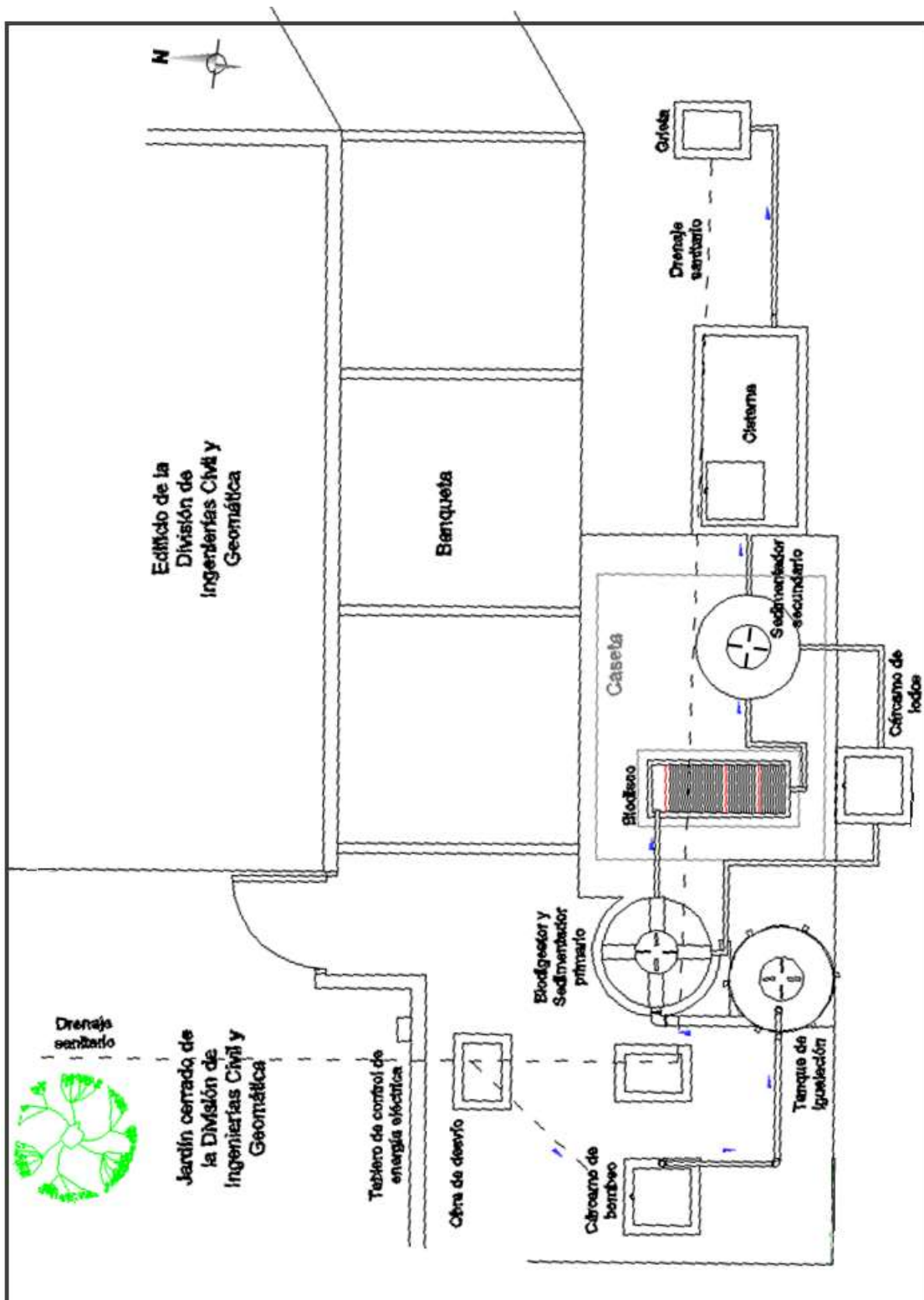


Figura 4-19. Vista en planta de la PTAR. Adaptado de: Mata 2012

Capítulo 5: Evaluación del funcionamiento del proceso CBR

Básicamente, el propósito de la presente tesis es comparar los parámetros de funcionamiento esperados en las etapas de planeación y diseño con los que se han presentado en la etapa de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales, tanto del influente como del efluente, y con base en esto concluir si el sistema tiene la eficiencia esperada o, en caso contrario, cuáles son los factores que merman su capacidad para proponer alternativas de mejoramiento.

5.1. Metodología

La metodología general de este estudio se muestra en el diagrama de flujo de la figura 5-1, cada uno de los puntos son explicados a continuación.

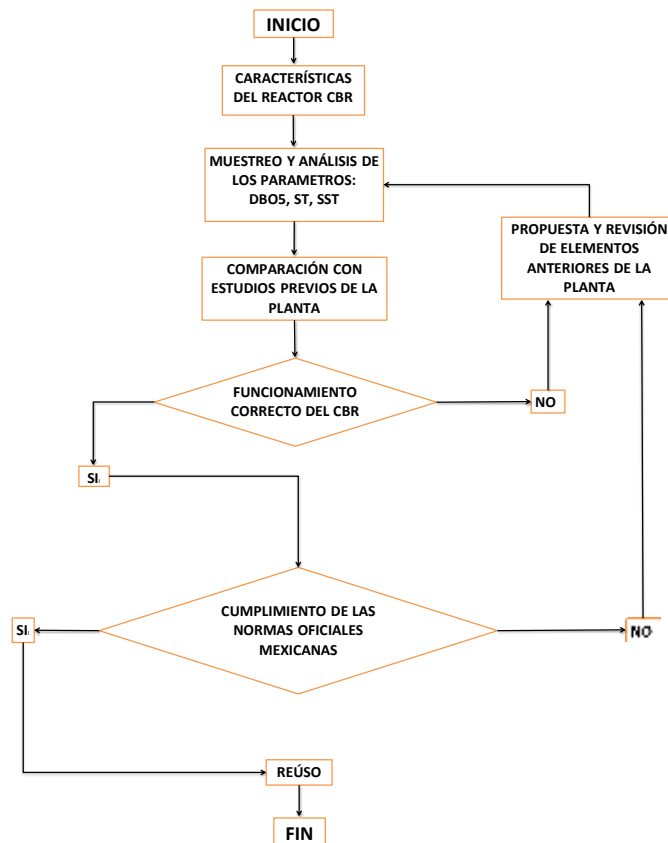


Figura 5-1. Metodología del estudio

1. En principio, se estudian las características técnicas y los límites del corazón de la PTAR y objeto de estudio de este trabajo, es decir el reactor CBR, estos datos se describieron en el capítulo anterior.
2. Sé realizó un muestreo regular del efluente y se obtuvieron los parámetros de mayor utilidad para el estudio, en este caso DBO₅, ST y SST, con esto, se obtuvo una idea general del comportamiento del sistema
3. Las características del CBR y los datos obtenidos una vez analizados y comparados con los estudios previos, se emplearon para emitir un juicio.

3.1 En caso de funcionar adecuadamente el proceso, la calidad del efluente se compararía con las siguientes normas oficiales mexicanas:

NOM-001-ECOL-1997

NOM-001-SEMARNAT-1996

Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-003-ECOL-1997

NOM-003-SEMARNAT-1997

21/SEP/98

Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público.

3.1.1 En caso de pasar los criterios se contemplara el reusó en base a un nuevo proyecto que proponga una alternativa viable para el mismo.

3.1.2 En caso de rebasar los niveles, volveremos a la etapa de análisis de los elementos de la planta, propuesta y modificación.

3.2 En caso de no funcionar adecuadamente el proceso de retornaría a la etapa de análisis de los elementos de la planta, propuesta y a su modificación.

5.2. Características del reactor

En el Capítulo 4 se describió el equipo de contactores biológicos rotatorios que opera en la PTAR, en resumen, sus características principales son:

Etapas: 3 con arreglo 2-1-1

Área superficial: 23m²

Relación volumen tanque/área superficial 0.005m³/m² (nominal) con biomasa.

Diámetro del disco: 0.5 metros

Número de discos: 18 la primera etapa y 9 cada una de las dos siguientes.

Longitud de cada etapa: 66cm 1ª etapa y 33cm cada una de las dos siguientes.

Revoluciones de la flecha: 7

Velocidad periférica media: 0.86 m/s

Motor: Westinghouse, 115 Volts, 0.25 H.P., monofásico

5.3. Caracterización del agua residual

En el presente trabajo los parámetros para evaluar el funcionamiento del proceso son la DBO₅, ST y SST, el primero es el más importante para el diseño de un CBR, teniendo en cuenta la diferencia entre el influente y el efluente. Se eligieron estos parámetros debido a ser de los más representativos en aguas residuales y haber sido temas importantes en la materia de tratamiento de aguas residuales impartida en la licenciatura.

La tabla 5-1 muestra la variación de las características del agua residual en función del tamaño de la población, se observa una estabilización para poblaciones muy grandes, esta tabla fue considerada para las poblaciones de la República Mexicana en los años setenta.

Tabla 5-1. Características típicas del agua residual por rango de población

Parametro	Rango de población, habitantes			
	2,500-10,000	10,000-20,000	20,000-50,000	50,000-100,000
DBO	264	299	254	301
DQO	698	719	609	430
S sedimentables (ml/l)	9	5	8	3
Grasas y aceites	56	44	65	96
N amoniacal	27	28	14	12
N orgánico	18	23	23	9
P PO4 total	20	25	16	29
Coliformes tot NMP/100	7x10 ⁷	733x10 ⁷	14x10 ⁷	107x10 ⁷
SST	286	309	233	167
SSV	184	202	246	109
SDT	1213	830	1032	820
SDV	184	202	246	109

Adaptado de: Secretaria de recursos hídricos (1975)

En la Tabla 5-2 se muestran los parámetros más comunes para las aguas residuales domésticas sin considerar el tamaño de población, además de ser los parámetros que con más frecuencia se hace referencia.

Tabla 5-2. Características típicas del agua residual.

Parámetro	Concentración mg L ⁻¹		
	Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (mg L ⁻¹)	350	720	1200
Disueltos totales	250	500	850
Sólidos en suspensión	100	220	350
Sólidos sedimentables	5	10	20
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	100	200	300
COT (mg L ⁻¹)	80	160	290
DQO (mg L ⁻¹)	250	500	1000
Nitrógeno total (N) (mg L ⁻¹)	20	40	85
orgánico	8	15	35
amoníaco libre	12	25	50
nitritos	0	0	0
nitratos	0	0	0
Fósforo total (P) (mg L ⁻¹)	4	8	15
orgánico	1	3	5
inorgánico	3	5	10
oxígeno disuelto	0,2	0,1	0
cloruros (mg L ⁻¹)	30	50	100
sulfato (mg L ⁻¹)	20	30	50
alcalinidad (CaCO ₃)	50	100	200
aceites y grasas (mg L ⁻¹)	50	100	150
coliformes totales NMP	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁷ - 10 ⁸	10 ⁷ - 10 ⁹
COVs (µg L ⁻¹)	< 100	100 - 400	> 400

Fuente: Metcalf & Eddy(2004)

La tabla 5-2, 5-3 y 5-4 se muestran los resultados obtenidos de las mediciones del agua residual del edificio de la DIC y G en 3 diferentes periodos, solo el primero corresponde a una medición única, los siguientes son un promedio de las mediciones realizadas en las fechas indicadas.

1. La primera medición corresponde a un periodo previo a la construcción de la planta, es importante mencionar que se desconocía la existencia de una fosa séptica que trataba el agua residual del edificio antes de su descarga a la grieta en el subsuelo.

Tabla 5-3. Medición de parámetros correspondientes a antes de la construcción de la PTAR

Fecha	DBO5 (mg/l)	SST (mg/l)
Agosto de 2010	284	272

2. La segunda medición incluida en los estudios previos de la etapa de planeación (Mata 2012), se hizo solamente para el influente del CBR y no de las aguas residuales

crudas, la metodología para la obtención fue básicamente la misma que la utilizada en este trabajo.

Tabla 5-4. Medición de parámetros correspondiente al periodo escolar 2012-2

Fecha	DBO (mg/l)		SST (mg/l)	
23/01/2012-27/03/2012	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente
	218	150	203	164

Fuente: Mata(2012)

3. La tercera medición corresponde a los resultados obtenidos por este estudio.

Tabla 5-5. Medición de los parámetros de este estudio correspondientes al semestre 2013-1

Fecha	DBO (mg/l)		SST (mg/l)	
22/08/2012-06/12/2012	Influyente	Efluente	Influyente	Efluente
	260	178	-----	188

Comparando los valores, se observa que las muestras de agua residual tienen una concentración fuerte y en aumento en cuanto a DBO y media en cuanto a sólidos.

5.4. Aforo

En el estudio previo para el diseño de esta planta (Mata, 2012), se realizó el aforo del agua residual generada por el edificio de la DIC y G; la primer medición, realizada en noviembre de 2010, se registró un gasto medio de 1,326 l/d, sin embargo, no se tenía en cuenta la construcción de un segundo piso que incrementaría el gasto. En noviembre del 2011 se realizó otro aforo, registrándose un gasto medio de 2,170 l/d, lo que representa un aumento del 63%. Más tarde se realizó una estimación mediante un censo de población; el resultado obtenido fue multiplicado por la dotación diaria y por el aporte de aguas residuales, obteniéndose un gasto superior a los anteriores, de 2400 l/d. A continuación se tiene la relación de los tres aforos.

Primer y segundo aforo

Al ser la tubería del edificio de la DIC y G de difícil acceso se optó por un método no convencional para el aforo, además como no se cuenta con un gasto constante, tampoco fue posible medir con métodos de flujo continuo, como vertedores o hélices, este método consistió en la utilización de una cubeta de 10 L de capacidad para captar el agua residual generada en el punto de descarga durante un minuto y medir su volumen, este estudio se

realizó a cada hora de las 7am a las 8pm, el primero durante 5 días y el segundo durante 3 días, ambos laborales. Por último los resultados obtenidos se multiplicaron por un factor de seguridad de 30%.

Tabla 5-6. Aforos del edificio de la DIC y G

Aforo	Fecha	Gasto (l/d)
1	Del 8 al 12 de Noviembre de 2010	1720
2	Del 28 al 30 de Noviembre de 2012	2170

Fuente: Mata (2012)

Tercer aforo

Se realizó mediante la estimación del personal laboral, ya que la población flotante (alumnos y otros), en teoría, no tienen acceso a los servicios sanitarios, sin embargo, esto ha resultado poco acertado debido a que no se consideran alumnos realizando servicio social o tesis que de alguna manera se han hecho con un duplicado de la llave del baño, o los cursos que se imparten en la mañana en la planta baja, ya que durante este periodo los sanitarios de esta planta permanecen abiertos a todo público. En conclusión se sabe que hay una media de 38 personas laborando, pero a las 11 am se presenta un máximo de 60 personas, por lo que este último dato fue considerado para el cálculo.

Tabla 5-7: Dotación mínima de agua potable

TIPOLOGÍA	DOTACIÓN
I. HABITACIONAL	
I.1 Vivienda de hasta 90 m ² construidos	150 l/hab./día
I.2 Vivienda mayor de 90 m ² construidos	200 l/hab./día
II. COMERCIAL	
II.1 Comercios	6 l/m ² /día
II.2 Mercados públicos y tian-guis	100 l/puesto/día
III. SERVICIOS	
III.1 Servicios administrativos y financieros	50 l/persona/día
III.1 Oficinas de cualquier tipo	
III.2 Servicios automotrices	100 l/trabajador/día

Adaptado de: Normas técnicas complementarias para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas (2004).

Generación de agua residual = No de personas * Dotación * Aporte

$$= 60 \text{ personas} * 50 \text{ l/persona/d} * 0.8 = \underline{2400 \text{ l/d}}$$

Este es el gasto es el que será tomado en cuenta para el estudio, no obstante, debido a la escasez de flujo en la noche y parte de la mañana, que a falta de un estudio más amplio y solo por observación, queda prácticamente seco por 12 horas, por lo tanto tendremos picos del doble de este gasto.

$$\frac{\left(2400 \frac{l}{d}\right)}{0.5} = 4800 \text{ l/d}$$

Entonces, para la determinación de la DBO₅ teórica o *So* del influente, esta gasto es el ideal, ya que representa una condición muy desfavorable in llegar a ser la crítica.

5.5. Normatividad aplicable

Para este estudio es necesario tener en cuenta que los límites máximos permisibles de contaminantes en aguas residuales tratadas son los establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas, que entre otras cosas establecen las características que deben tener las aguas residuales tratadas dependiendo del uso que se les dé posteriormente. Esto debido a que se pretende dar uso al agua tratada en servicios sanitarios, pero esta será una etapa posterior del proyecto de la PTAR que escapa del alcance de este estudio, las características del efluente para este propósito dependerán del cumplimiento de la NOM-NMX-003.

Por el momento el agua se dispone directamente en una grieta existente en el predio, pero en la NOM-001 no está considerado este tipo de descarga (Tabla 5-8). Así, una vez teniendo los resultados del análisis de la PTAR podremos afirmar si el proceso genera aguas aprovechables o en caso contrario, de poderse aprovechar proponer medidas que permitan alcanzar los parámetros deseados.

En la tabla 5-8 están los límites máximos obtenidos mediante un promedio mensual, de las aguas que se pueden reusar para servicios al público con contacto directo e indirecto. Las definiciones de qué se entiende por contacto directo e indirecto se incluyen en la norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997.

Reúso en servicios al público con contacto directo

El reúso se efectúa en actividades donde el público usuario á expuesto directamente o en contacto físico. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana se consideran los

siguientes reúsos: llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje y esquí; fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines.

Reúso en servicios al público con contacto indirecto u ocasional

El reúso se efectúa en a actividades donde el público en general a expuesto indirectamente o en contacto recreativo, barreras hidráulicas de seguridad y panteones.

Tabla 5-8 Límites máximos permisibles de contaminantes.

TIPO DE REUSO	PROMEDIO MENSUAL				
	Coliformes Fecales NMP/100 ml	Huevos de Helminto (h/l)	Grasas y Aceites mg/l	DBO ₅ mg/l	SST mg/l
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO DIRECTO	240	≤ 1	15	20	20
SERVICIOS AL PÚBLICO CON CONTACTO INDIRECTO U OCASIONAL	1,000	≤ 5	15	30	30

Adaptado de: Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997,

Tabla 5-9. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos

PARÁMETROS (miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES PARA CONTAMINANTES BÁSICOS																			
	RÍOS						EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				AGUAS COSTERAS				SUELO		HUMEDALES NATURALES (B)			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		ESTUARIOS (B)			Uso en riego agrícola (A)		
P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos Suspendidos Totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150

- (1) Instantáneo
(2) Muestra Simple Promedio Ponderado
(3) Ausente según el Método de Prueba definido en la NMX-AA-006.
P.D. = Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual;
N.A. = No es aplicable.
(A), (B) y (C): Tipo de Cuerpo Receptor según la Ley Federal de Derechos.

Tabla de límites máximos permitidos de contaminantes según su uso. Adaptado de: Norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-. 1996

Proyecto de norma ambiental sobre infiltración de aguas residuales en el D.F

Este proyecto de norma fue concebido para contrarrestar los problemas que actualmente sufren los acuíferos en nuestra ciudad, no ha sido aprobada por falta de voluntad política, ya que económicamente no resulta costeable inyectar al subsuelo agua casi potable, en el entendido de que el agua usada para este fin requeriría una calidad muy alta, pero socialmente, es una actividad impostergable que de hecho ya se realiza mas no está normada.

A continuación se incluyen extractos de esta norma, conocer sus alcances y objetivos, debido a que actualmente muchas aguas residuales tratadas son vertidas al subsuelo, incluyendo las de este estudio.

La presente norma está dirigida a regular la recarga artificial del acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México dentro del Distrito Federal, sin embargo, es claro que la limitación de esta actividad a este acuífero en particular obedece a delimitaciones jurisdiccionales, y que todos los subsistemas que integran el acuífero se encuentran interconectados, por lo que el agua fluye entre ellos sin fronteras, siendo recomendable aplicar una estrategia Metropolitana.

1. Objetivo

Proteger el acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y la salud de la población, regulando las actividades de recarga artificial por inyección directa de agua residual tratada, a través del establecimiento de:

a) Los valores permisibles de calidad del agua utilizada para la recarga artificial del acuífero, entendidos como condiciones particulares de descarga.

b) Un programa de actividades para el control y vigilancia de la calidad del agua utilizada antes y después de la recarga artificial del acuífero.

c) Los procedimientos administrativos a los que deberán estar sujetos los procesos de construcción y operación de los sistemas de recarga, para su autorización.

2. Campo de aplicación

Esta norma aplica a los sistemas de recarga artificial por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, que pretendan construirse u operarse en el Distrito Federal, así como a los que ya se encuentren en operación, ya sean públicos o privados, o de cualquier persona física o moral.

Límites máximos permisibles de calidad del agua

Este proyecto de norma considera características físico-químicas y microbiológicas, pero no biológicas simples como la DBO₅, tampoco considera una prueba general de contenido de sólidos, que son las que contempla este estudio, esto quizás se deba a que la norma está incompleta o por el contrario, que al medir factores más específicos como la cantidad de cierto metal u organismo en el agua obedece a niveles más estrictos en su calidad.

A continuación los parámetros considerados de la norma.

Tabla 5-10. Límites máximos permisibles de características microbiológicas

Característica	Límite máximo permisible
E. coli o coliformes fecales u organismos termotolerantes	Ausente
Enterovirus	Ausente
Estreptococos fecales	Ausente
Giardia lamblia	Ausente

Tabla 5-11. Límites máximos permisibles de características físicas

Característica	Límite máximo permisible
Color	15 unidades de color verdadero en la escala de platino - cobalto
Conductividad	No ser mayor en 15% al agua del acuífero.
Turbiedad	5 UTN

Tabla 5-12. Límites máximos permisibles de características químicas, unidades en mg/l.

Característica	Límite máximo permisible
Aluminio	0.2
Arsénico	0.025
Bario	0.7
Benceno	0.01
Boro	0.3
Cadmio	0.003
Carbono orgánico total	1.0
Cianuros	0.07
Cloro libre residual	0.0
Cloruros (como Cl)	250.00
Cloruro de vinilo	0.005
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
1,1-Dicloro etileno	0.030
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Estireno	0.02
Etilbenceno	0.3
Fenoles o compuestos fenólicos	0.3
Fluoruros	1.5
Fósforo	1.0
Hidrocarburos poliaromáticos HPA	0.0002
Hierro	0.3
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Metil terbutil éter	0.03
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	1.0
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.5
Percloroetileno o tetracloroetileno	0.040
pH	6.5 - 8.5
Plaguicidas clorados (ug/L):	
1,2-dibromo -3-cloropropano	1
2,4 D	30.00
Alacloro	20

El proyecto de norma considera los procedimientos y la frecuencia del muestreo, que son los mismos usados en normas ya existentes.

Normatividad de los Estados Unidos de América.

Es interesante conocer los límites de las características de las aguas residuales tratadas en un país desarrollado, ya que proporciona una idea de la organización que se tiene para el tratamiento de sus aguas en países tecnológicamente más avanzados, y compararlas con las leyes mexicanas, para denotar carencias o en su caso virtudes. En este caso, para Estados Unidos de América la agencia encargada de regular los límites en las descargas de aguas residuales es la EPA (Environmental Protection Agency: Agencia de Protección del Medio Ambiente) que es una agencia del gobierno federal de Estados Unidos encargada de proteger la salud humana y proteger el medio ambiente: aire, agua y suelo.

Dos diferencias claves existen entre ambas normativas, la primera, en México el criterio es el cuerpo de agua al que se pretende descargar, es decir, los límites van en función de qué tanto daño pueden generar las descargas en un determinado punto, en cambio, en E.U.A. el criterio es la industria o el lugar de donde procede la descarga, por ejemplo, la industria del caucho tendrá límites más estrictos que la ganadera, además de que se da por sentado el tratamiento de cualquier descarga generada.

La segunda diferencia es que los límites que se pueden encontrar en las características de los efluentes son más estrictos en el vecino país, sin embargo, tienden a ser más laxos en horas de poca descarga o en comunidades pequeñas, como ejemplo tenemos la DBO₅ y los SST.

Tabla 5-13. Rangos generales de niveles permitidos en descargas a cuerpos de agua, de México y E.U.

México		E.U.	
DBO ₅	SST	DBO ₅	SST
30 - 200	40 - 200	25 - 80	30 - 150

Unidades en mg/l, Adaptado de: SEMARNAT (1997); law.epa.gov.tw

La tabla 5-14 muestra los límites considerados por la EPA para efluentes generados en descargas de aguas residuales domésticas.

Tabla 5-14. Límites establecidos por la EPA para los parámetros de este trabajo

Tipo de efluentes	DBO₅	SST
Descargas humanas tratamiento nocturno	50	50
Sistemas de tratamiento generales	25	30
Aguas residuales comunitarias	30	30

Unidades en mg/l. Adaptado de: law.epa.gov.tw

Capítulo 6: Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras del influente y efluente del proceso CBR que se tomaron entre el 22 de agosto y el 6 de diciembre de 2012, de los parámetros SST y DBO_5 , y se analiza la eficiencia del tratamiento, con base en dichos resultados.

6.1. Procedimiento

Las pruebas correspondientes a DBO_5 se realizaron tres veces por semana, las de a sólidos totales (ST) y sólidos suspendidos totales (SST), dos veces por semana. La falta de algunas pruebas corresponde a días inhábiles o a indisponibilidad del equipo.

La metodología para la realización de estas pruebas y la normativa que cumplen, está detallada en el anexo 1.

6.2. Resultados y análisis de las pruebas de DBO_5

En esta sección se incluyen los resultados de la prueba de la DBO_5 así como las expresiones utilizadas para obtener los resultados y parámetros más importantes para su posterior análisis.

Expresiones usadas

La expresión utilizada para calcular la DBO_5 en función de las mediciones de oxígeno inicial y final es:

$$DBO_5 = \frac{OD_i - OD_f}{P}$$

DBO_5 = Demanda bioquímica de oxígeno a los 5 días (mg/l)

OD_i = Oxígeno disuelto inicial (mg/l)

OD_f = Oxígeno disuelto final (mg/l)

P: Fracción decimal de muestra usada en %

Para obtener la DBO última o “Lo” se utiliza la expresión:

$$L_o = \frac{DBO_t}{1 - e^{-kt}}$$

DBO_t = Demanda bioquímica de oxígeno a través del tiempo (mg/l)

L_o = Demanda bioquímica de oxígeno última (mg/l)

t = tiempo considerado en la prueba (días)

k = Constante de reacción de DBO, que para este caso se considera 0.30 según la tabla siguiente.

Tabla 6-1. Constante de degradación típica

Muestra	k (20°C) (día⁻¹)
Agua residual cruda	0.15 – 0.30
Agua residual bien tratada	0.05 – 0.10
Agua de un río contaminado	0.02 – 0.10

Adaptada de: Cesar E., Vazquez A , 2003.

Sustituyendo la expresión anterior se puede tener la DBO para cualquier periodo de tiempo.

$$DBO_t = L_o(1 - e^{-kt})$$

Para la determinación del Oxígeno disuelto de entrada “So”, se utiliza la ecuación propuesta por Popel descrita en el capítulo 1.2.

$$S_o = S_i + \left(\frac{AS * S_i^{0.4}}{0.022Q} \right)^{\frac{1}{1.4}}$$

Donde:

So = Oxígeno Disuelto en la entrada del CBR (g/m³)

S_i = DBO₅ en la salida del CBR en (g/m³)

A = Área total de los biodiscos que conforman el CBR (23 m²)

Q = Volumen aproximado que recibe el CBR (4.8 m³/día)

$$\eta = 100 * \frac{S_0 - S_1}{S_0}$$

Donde:

η = Eficiencia en %

S_0 = DBO₅ de entrada, teórica o experimental según sea el caso (mg/l)

S_1 = DBO₅ de salida experimental (mg/l)

Para el posterior análisis se tiene.

$$CH = \frac{Q}{A}$$

Donde:

CH = Carga hidráulica (m³/m²*día)

Q = Gasto (m³/día)

A = Área del biodisco (m²)

$$CO = \frac{Q \cdot S_0}{A}$$

Donde:

CO= Carga Orgánica (g DBO/m²*d)

Q = Gasto (m³/día)

S_0 = Concentración de la DBO del influente (g/m³)

A = Área del biodisco (m²)

$$\theta = \frac{Q}{Vol}$$

Donde:

θ = Tiempo de retención hidráulico

Q = Gasto (m³/h)

Vol = Volumen del CBR (0.115 m³)

Tabla 6-2. Pruebas de laboratorio para la DBO₅ del sistema CBR

EFLUENTE		Porcentaje de dilución 0.50%		Porcentaje de dilución 1.00%		Porcentaje de dilución 2.00%		Promedio DBO ₅	So Teórica	η Teórico					
Mes	Día	Millilitros de tiosulfato Inicial	Final	Millilitros de tiosulfato Inicial	Final	Millilitros de tiosulfato Inicial	Final								
AGOSTO	MIÉRCOLES	22	6.6	6.6	0	0.2	20	6.8	6.7	0.1	5	12.5	108.6	88.5	
AGOSTO	VIERNES	24	8	5.9	2.1	3.7	370	7.9	3.6	4.3	215	415	676.3	38.6	
AGOSTO	MIÉRCOLES	29	8.8	7.4	1.4	2.8	360	8.6	4.5	4.1	205	281.7	515.6	45.4	
AGOSTO	JUEVES	30	8.4	7.1	1.3	0.4	340	7.6	7.2	1.8	90	156.7	354.5	55.8	
AGOSTO	VIERNES	31	7.1	7	0.1	0.6	60	7.4	6.4	1	90	56.7	204.6	72.3	
SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES	5	9.1	8.9	0.2	1.9	190	8.4	6.5	7.3	0.3	15	161.7	361.3	55.2
SEPTIEMBRE	JUEVES	6	8	6.8	1.2	1.6	160	7.7	6.1	5	4.1	205	241.7	465.6	48.1
SEPTIEMBRE	VIERNES	7	6.8	6.6	0.2	1.7	170	7.1	5.6	1.5	75	128.3	315.2	59.3	
SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES	14	6.9	6.1	0.8	0.7	260	7	6.3	2.1	105	145	338.5	57.2	
SEPTIEMBRE	VIERNES	19	6.8	6.5	0.3	0.2	40	8.9	6.2	2.7	135	71.7	229.9	68.8	
SEPTIEMBRE	JUEVES	20	8.2	8	0.2	0.3	30	8.4	5.4	3	150	73.3	232.6	68.5	
SEPTIEMBRE	MIÉRCOLES	21	9.1	8.3	0.8	3.3	330	8.5	2.6	5.9	295	408.3	668.4	38.9	
SEPTIEMBRE	VIERNES	27	8.8	6.8	2	1.8	180	7.8	5.5	2.3	115	245	468.8	47.8	
OCTUBRE	MIÉRCOLES	3	8.7	6.4	2.3	1.2	120	8.6	6.4	2.2	110	210	450.7	49	
OCTUBRE	JUEVES	4	7.7	7.5	0.2	1	100	8.2	6.6	1.6	80	73.3	232.6	68.5	
OCTUBRE	VIERNES	5	7.5	6.8	0.7	0.4	40	9.1	4.8	4.3	215	131.7	319.9	58.8	
OCTUBRE	JUEVES	11	7.8	6.9	0.9	0.2	20	7.6	6.6	1	50	83.3	248.5	66.5	
OCTUBRE	VIERNES	26	9.8	8.9	0.9	0.7	70	9.1	8.9	0.2	10	86.7	253.7	65.8	
OCTUBRE	MIÉRCOLES	31	10.3	7.3	3	1.1	110	11.5	7.4	4.1	205	165	365.8	54.9	
NOVIEMBRE	MIÉRCOLES	7	11.6	9.8	1.8	0.6	60	10.5	9.9	0.6	30	150	345.4	56.6	
NOVIEMBRE	VIERNES	9	9.4	8.6	0.8	1.3	130	10.9	9.4	1.5	75	121.7	305.7	60.2	
NOVIEMBRE	MIÉRCOLES	13	8.4	8.2	0.2	4.4	440	11.1	7.4	3.7	185	221.7	440.1	49.6	
NOVIEMBRE	VIERNES	15	9.5	8.1	1.4	3.4	340	8.9	6.1	2.8	140	253.3	480.3	47.3	
NOVIEMBRE	MIÉRCOLES	20	7.8	7.8	0	0.1	280	8.2	8.1	1.8	90	126.7	312.8	59.5	
NOVIEMBRE	VIERNES	22	8.1	7.9	0.2	1.5	150	8.9	7.6	1.3	65	85	251.1	66.2	
NOVIEMBRE	MIÉRCOLES	27	8.9	7.4	1.5	2	200	7.2	5.5	1.7	85	221.7	440.1	49.6	
NOVIEMBRE	JUEVES	28	9	5.6	3.4	4.5	370	8.8	4.4	4.4	220	410	670.4	38.8	
NOVIEMBRE	VIERNES	29	7.1	6.6	0.5	3.1	310	9.4	4.5	4.9	245	311.7	552.4	43.6	
DICIEMBRE	MIÉRCOLES	2	9.2	5.3	3.9	3.5	780	8.7	5.2	3.6	180	436.7	701.8	37.8	
DICIEMBRE	JUEVES	4	9.4	5.8	3.6	3.2	320	8.1	6.5	1.6	80	373.3	626.8	40.4	

Promedios Totales:

DBO₅ mg/l 178.27 So mg/l 397.97 η % 55.25

INFLUENTE		Porcentaje de dilución 0.50%		Porcentaje de dilución 1.00%		Porcentaje de dilución 0.02%		Promedio DBO ₅	So Real	η Real						
Mes	Día	Millilitros de tiosulfato Inicial	Final	Millilitros de tiosulfato Inicial	Final	Millilitros de tiosulfato Inicial	Final									
NOVIEMBRE	MIÉRCOLES	27	8.3	5.4	2.9	580	8.5	5.3	3.2	320	7.2	3.1	205	368.333333	221.7	39.8
NOVIEMBRE	JUEVES	28	8.5	5.3	3.2	620	8.2	3.9	4.3	430	9	4.6	4.4	423.333333	410	3.1
NOVIEMBRE	VIERNES	29	8.5	5.8	2.7	540	8.1	4.8	3.3	330	7.7	4.4	3.3	345	311.7	9.7
DICIEMBRE	MIÉRCOLES	1	9	5.3	3.7	740	9.6	5.5	4.1	410	9.1	5.2	3.9	448.333333	436.7	2.6
DICIEMBRE	JUEVES	2	9.3	5.9	3.4	680	9.3	6.2	3.1	310	8.8	5.6	3.2	383.333333	373.3	2.6

Promedios Totales:

DBO₅ mg/l 393.7 So mg/l 350.7 η % 11.6

Mediante las pruebas realizadas podemos concluir que el CBR funciona con baja eficiencia debido a las causas ya mencionadas. Las gráficas de su comportamiento se muestran en las figuras 6-1 a 6-4.

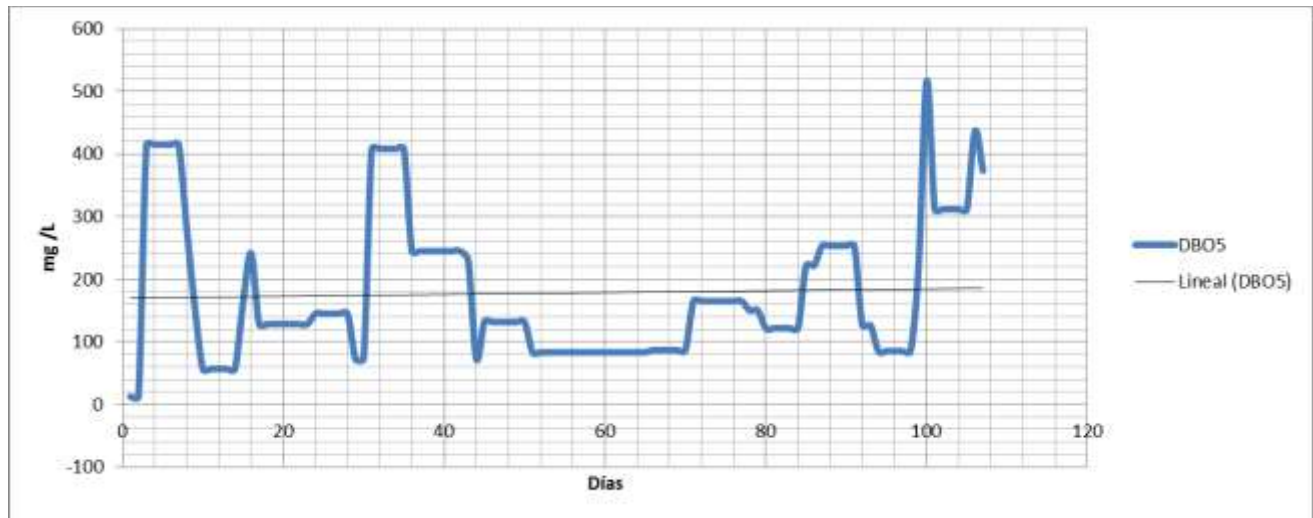


Figura 6-1. Variación de la DBO₅ en el efluente del CBR con tendencia lineal.

Con la ecuación de Popel tenemos un comportamiento hipotético del influente, el cual es muy representativo ya que ofrece amortiguamiento en los periodos de mejor eficiencia.

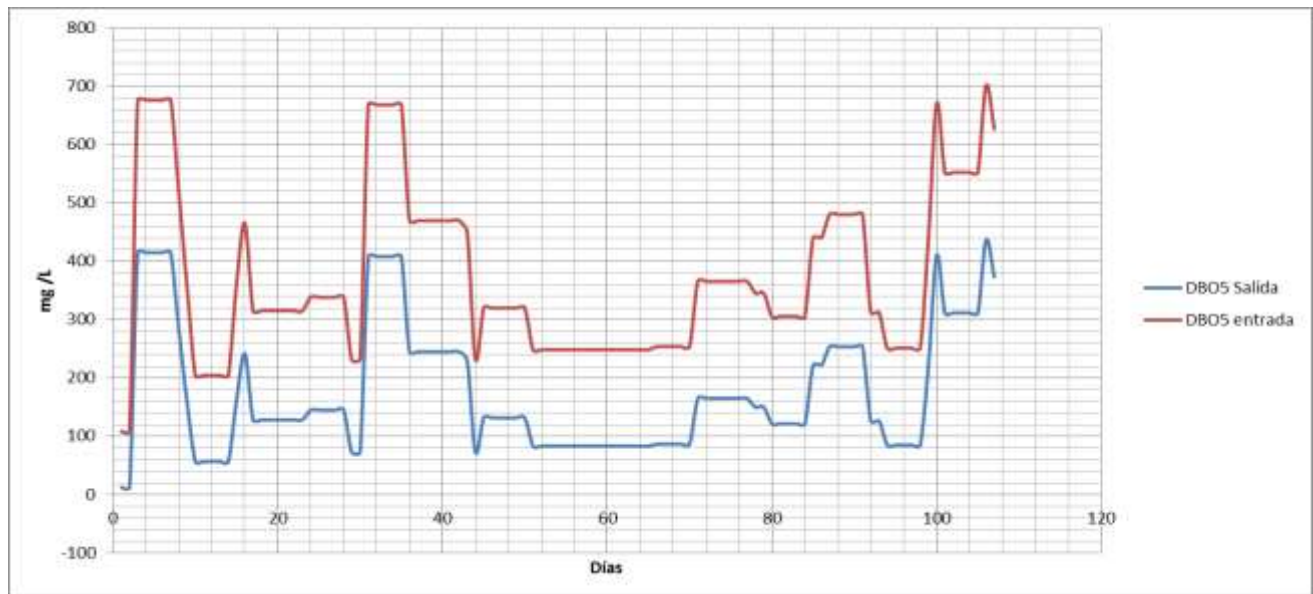


Figura 6-2. Variación de la DBO₅ de entrada mediante la fórmula despejada de Popel contra DBO₅ de salida

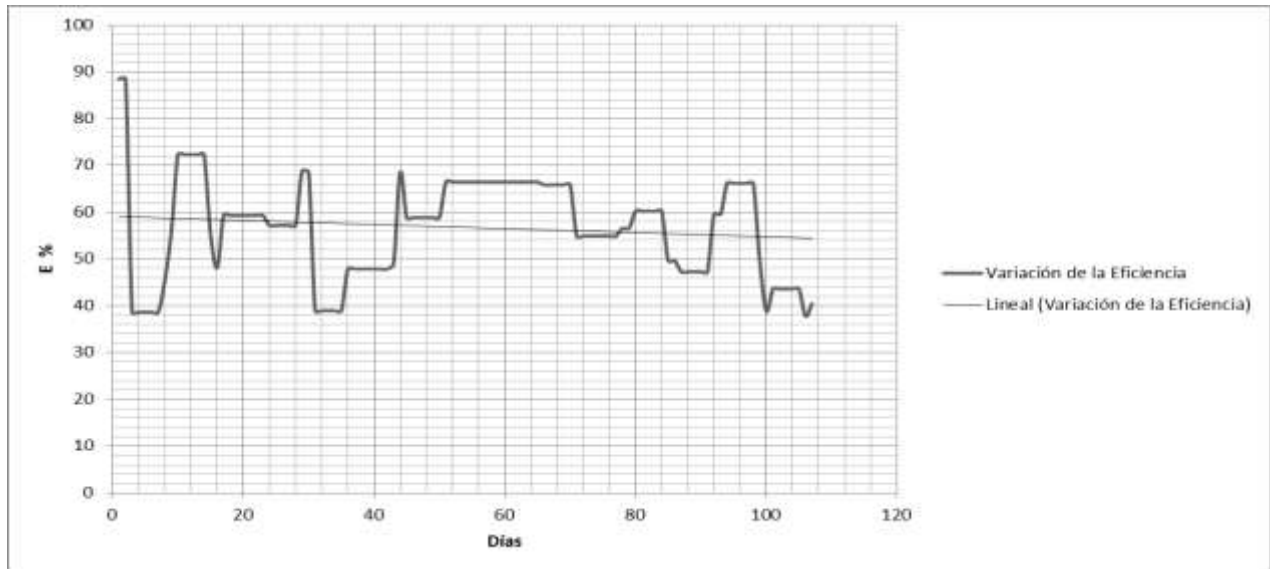


Figura 6-3. Variación de la eficiencia del CBR

Es curioso mencionar que el promedio de las eficiencias obtenidas mediante la ecuación de Monod y el valor real dan como resultado un valor muy cercano a la eficiencia total del estudio anterior.

$$\frac{55.25\% + 11.6\%}{2} = 33.43\%$$

La eficiencia de 33.43% esta graficada en la figura 6-4, en comparación con la eficiencia de entrada teórica y la de eficiencia de salida experimental. Para fines de este estudio, la eficiencia de 33.43% funciona para un comportamiento general pero no puntual.

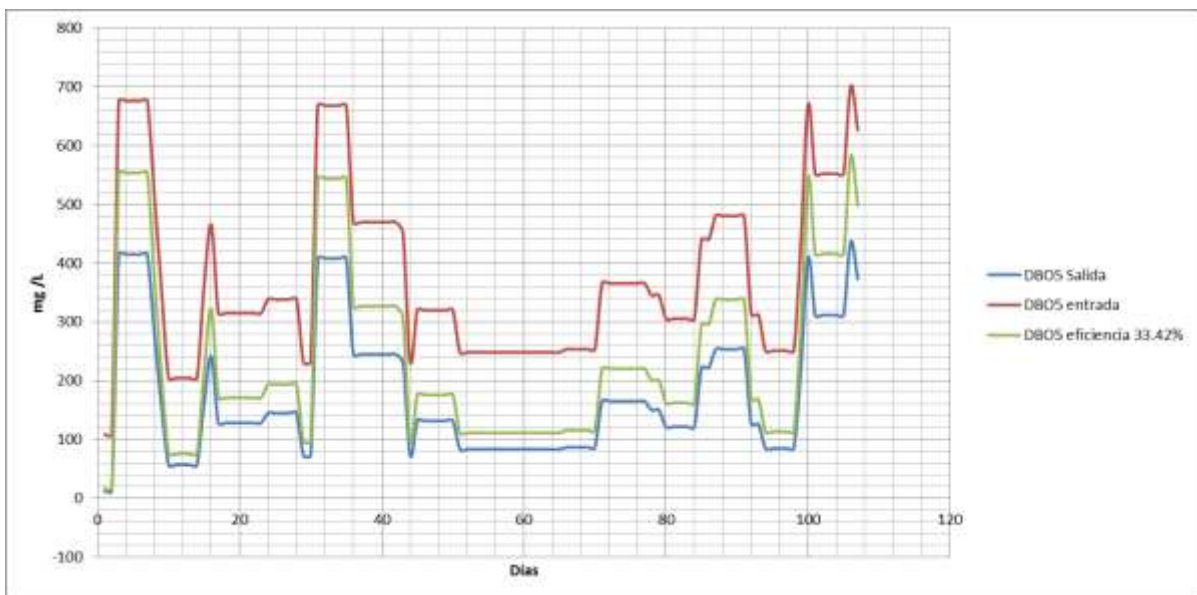


Figura 6-4. Variación de la DBO de salida, DBO de entrada y DBO con la nueva eficiencia

Resumen de resultados de la tabla 5-15

Tabla 6-3 resultados más importantes.

DBO influente		DBO Última (Lo)	
Media Teórica	397.9 (mg/l)	Influente	335.3 (mg/l)
Media Real	393.7 (mg/l)	Efluente	229.4 (mg/l)
Media Considerada	260.6 (mg/l)		
DBO efluente		Eficiencia	
Máxima	436.7 (mg/l)	Teórica	56.20%
Mínima	12.5 (mg/l)	Real	11.60%
Media	178.2 (mg/l)	Considerada	33.40%

El análisis de los resultados obtenidos se llevó a cabo mediante la comparación de tres parámetros representativos:

Carga hidráulica (CH)

Carga orgánica (CO)

Tiempo de retención (Θ)

Estos fueron obtenidos para el sistema CBR a través de las ecuaciones comentadas en el capítulo 6.2, utilizando la DBO₅ promedio del influente considerada que es de 260.6 (mg/l), y se variaron con un gasto cuya metodología se describe en el Anexo 2. Una vez obtenidas las variaciones de estos parámetros, se compararon con los contenidos en la tabla 6-4, así se definió que porcentaje del día estos criterios se cumplen, es decir, son recomendados, que porcentaje del día se cumplen al 50%, es decir, son aceptables, y que porcentaje no se cumplen.



Figura 6-5. Curva de gasto empírica que entra al CBR

Tabla 6-4. Parámetros considerados y rango de funcionamiento adecuado para sistemas CBR

Parametro	Nivel de tratamiento			
	Unidad	Remoción de DBO	Remoción de DBO con nitrificación	Nitrificación separada
Carga hidráulica (CH)	m^3/m^2*d	0.08-0.16	0.03-0.08	0.04-0.08
Carga orgánica (CO)	$g(sol)DBO/m^2*d$	4.0-10.0	2.5-8.0	0.5-1.0
	$g DBO/m^2*d$	8.0-20.0	5.0-16.0	1.0-2.0
Máxima carga en una etapa	$g(sol)DBO/m^2*d$	12.0-15.0	12.0-15.0	
	$g DBO/m^2*d$	24.0-30.0	24.0-30.0	
Carga de NH_3	$g N/m^2*d$		0.75-1.5	
Tiempo de retención hidráulico θ	h	0.7-1.5	1.5-4.0	1.2-3.0
DBO del efluente	mg/l	15.0-30.0	7.0-15.0	7.0-15.0
Efluente NH_4-N	mg/l		< 2.0	1.0-2.0

Para aguas residuales por encima de 13°C
Sol= Soluble

Adaptado de Metcalf & Eddy, 2004

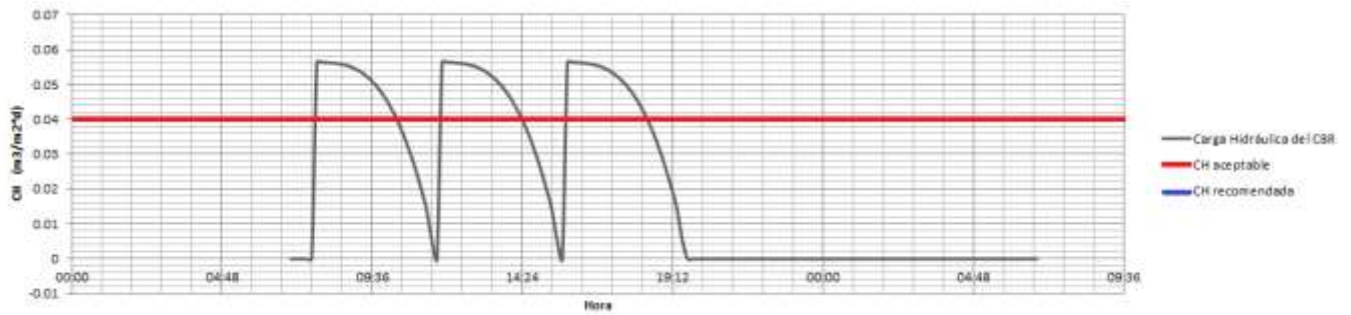


Figura 6-6. Carga hidráulica del CBR y análisis

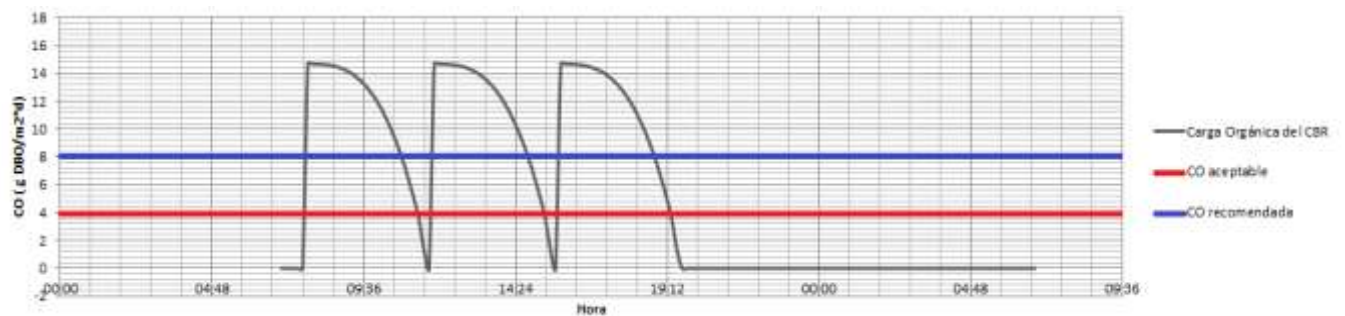


Figura 6-7. Carga orgánica del CBR y análisis

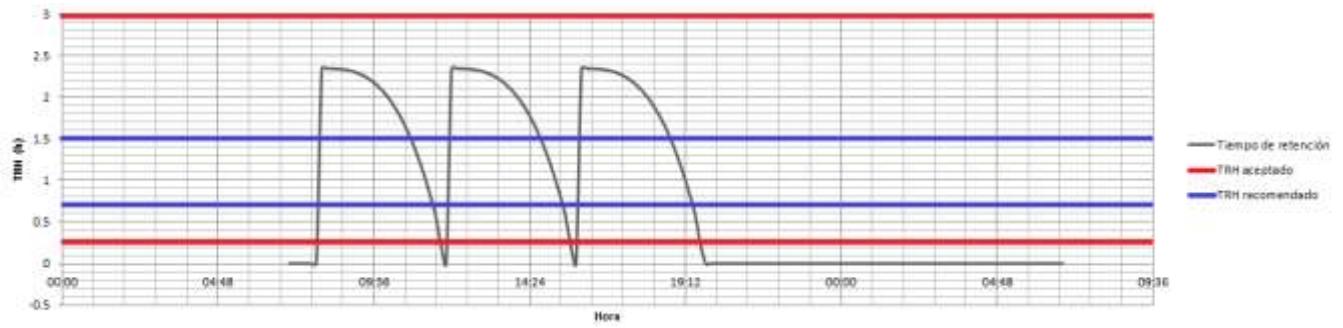


Figura 6-8. Tiempo de retención hidráulico del CBR y análisis

Resumen del estado de los parámetros mencionados a lo largo de un día común.

Carga hidráulica

Tabla 6-5. Porcentajes de carga hidráulica

	Horas	% de un día
Recomendada	0	0
Aceptable	6.5	24
No lo cumple	17.5	76

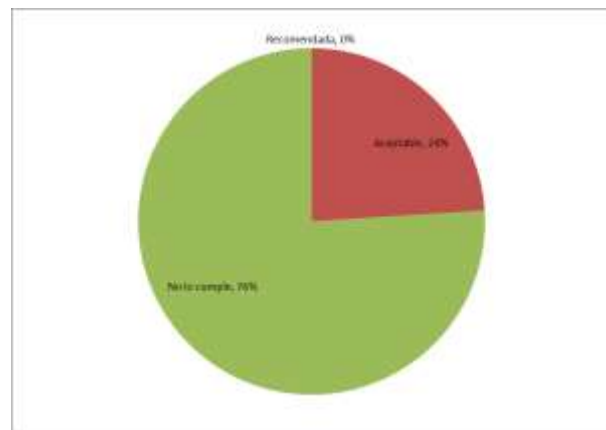


Figura 6-9. Porcentajes de la Carga hidráulica

Para la CH se observa que no cumple el criterio recomendado, solo 6 horas y media está en lo que se considera aceptable y el resto del día el CBR no tiene suficiente CH para operar correctamente.

Carga orgánica

Tabla 6-6. Porcentajes de Carga orgánica

	Horas	% de un día
Recomendada	9	39.5
Aceptable	2	8.3
No lo cumple	13	52.2

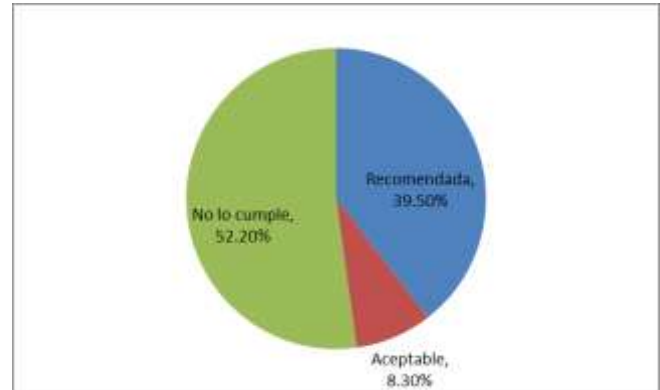


Figura 6-10. Porcentajes de la carga orgánica

En la CO tenemos un relativamente amplio periodo donde cumple la recomendación, alrededor de 9 horas y aceptable dos horas más, esto es de gran importancia ya que la CO depende directamente de la concentración de DBO del influente

Tiempo de retención hidráulica

Tabla 6-7. Porcentajes de tiempo de retención hidráulica

	Horas	% de un día
Recomendada	2.5	10.4
Aceptable	11	45.8
No lo cumple	10.5	56.2

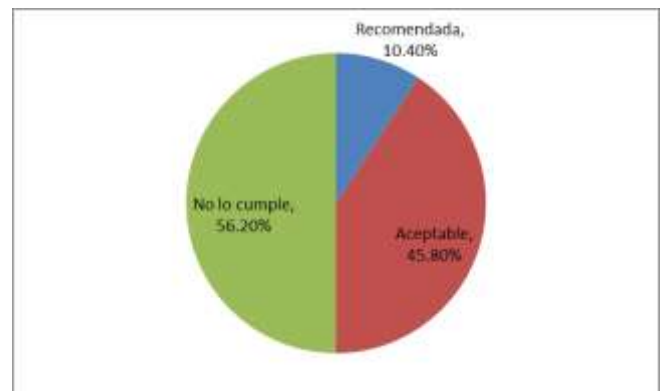


Figura 6-11. Porcentajes del tiempo de retención hidráulica

El TRH tiene un amplio periodo donde entra en el criterio de aceptable durante 11 horas, y no obstante que el CBR recibe flujo 12 horas al día, continúa funcionando con criterio aceptable una hora y media más.

Con base en los tres parámetros anteriores vemos que hay una relación con la eficiencia obtenida mediante la prueba de DBO₅, ya que el cumplimiento recomendado para ellos es similar, así también sabemos que de poder accionar la válvula durante todo el día o corregir el problema de taponamiento, tendríamos que los criterios cumplirían en más del 80% lo que repercutiría de la misma manera en la calidad del influente.

6.3 Resultados y análisis de las pruebas de sólidos (ST y SST)

Este capítulo contiene los datos obtenidos de las mediciones de las pruebas ya mencionadas, así como las expresiones utilizadas para obtener los resultados y parámetro más importantes.

Expresiones utilizadas para SST y ST:

$$SST = \frac{w_f - w_i}{V * P} \quad ST = \frac{w_f - w_i}{V * P}$$

Dónde:

SST: Sólidos suspendidos totales (mg/l)

ST: Sólidos totales (mg/l)

Wi: Peso del recipiente vacío (mg)

Wf: Peso de la muestra seco (mg)

V: Volumen de la muestra en ml (l)

P: Fracción decimal de muestra usada en (%)

Relación de los ST y SST con el sistema CBR

Tanto las pruebas de sólidos totales (ST), como de sólidos suspendidos totales (SST), son un parámetro de la concentración de materia sólida que contiene el agua residual. Para el diseño del CBR no se considera un límite como tal, debido a que el criterio básico es la prueba de DBO, el gasto y el tipo de contaminante, además, el sistema CBR no elimina los sólidos, sino que unos pocos sedimentan en el fondo del CBR, el TRH permite que algunos floculen, pero la mayoría de naturaleza orgánica, se incorporan a la biopelícula, por lo que los parámetros del influente son básicamente los mismos que los del efluente.

Si bien, tratándose de un agua residual doméstica, no es de relevancia los sólidos para los sistemas CBR, sí lo es para el elemento anterior de la planta de tratamiento (Biodigestor), así, con base en el estudio anterior se tienen los siguientes parámetros para los SST.

<i>Influente Biodigestor</i>	<i>Efluente Biodigestor</i>	<i>Influente CBR</i>	<i>Efluente CBR</i>
272 mg/l	164 mg/l	164 mg/l	164mg/l

Como se puede observar el CBR no elimina los sólidos, por lo que los datos del influente y el efluente son muy similares por lo que no de relevancia los datos del influente.

Los datos de la tabla se compararon con los obtenidos en este trabajo.

Tabla 6-8. Pruebas realizadas al efluente del CBR (ST y SST) y resultados

CRISOL SOLIDOS TOTALES (ST) V = 0.01 l				PESO DE LAS MUESTRAS (W)				FILTRO GOOCH SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST) V = 0.01 l				PESO DE LAS MUESTRAS (W)					
Mes	Día	Unidades	Concentración mg/l	g	Final (Wf)	g	Solidos (W)	Mes	Día	Unidades	Concentración mg/l	g	Final (f)	g	Solidos	mg	Concentración mg/l
AGOSTO	MIÉRCOLES	22	4184	36.2845	36.30542	0.02092	20.92	AGOSTO	LUNES	27	4184	25.14959	25.15128	0.00129	1.29	258	
AGOSTO	LUNES	27	1546	42.99993	43.00766	0.00773	7.73	AGOSTO	MARTES	28	1546	19.75144	19.75239	0.00095	0.95	190	
AGOSTO	MARTES	28	1695.4	43.86019	43.868667	0.008477	8.477	SEPTIEMBRE	LUNES	3	1695.4	18.82622	18.82711	0.00089	0.89	178	
SEPTIEMBRE	MARTES	18	830	43.82937	43.83352	0.00415	4.15	SEPTIEMBRE	MARTES	4	830	25.38416	25.38508	0.00092	0.92	184	
SEPTIEMBRE	LUNES	24	1318	36.28393	36.29052	0.00659	6.59	SEPTIEMBRE	LUNES	10	1318	18.89314	18.89381	0.00067	0.67	134	
SEPTIEMBRE	MARTES	25	1080	42.9989	43.0043	0.0054	5.4	SEPTIEMBRE	LUNES	24	1080	18.91835	18.91857	0.00022	0.22	44	
SEPTIEMBRE	MARTES	9	1958	47.9268	47.93659	0.00979	9.79	SEPTIEMBRE	MARTES	25	1958	19.7511	19.75148	0.00038	0.38	76	
SEPTIEMBRE	LUNES	15	1940	44.18202	44.19172	0.0097	9.7	OCTUBRE	MARTES	9	1940	18.80184	18.80299	0.00115	1.15	230	
SEPTIEMBRE	LUNES	29	1147.6	36.28316	36.288898	0.005738	5.738	OCTUBRE	LUNES	15	1147.6	25.35918	25.3608	0.00162	1.62	324	
OCTUBRE	MARTES	30	1224	42.9959	43.00202	0.00612	6.12	OCTUBRE	MARTES	16	1224	25.15079	25.15404	0.00325	3.25	650	
OCTUBRE	LUNES	5	1876	47.92146	47.93084	0.00938	9.38	OCTUBRE	LUNES	29	1876	19.77494	19.77501	7E-05	0.07	14	
OCTUBRE	MARTES	6	976	43.82502	43.8299	0.00488	4.88	OCTUBRE	MARTES	30	976	18.80182	18.80214	0.00032	0.32	64	
OCTUBRE	LUNES	12	1298	36.28296	36.28945	0.00649	6.49	NOVIEMBRE	LUNES	5	1298	18.89285	18.89429	0.00144	1.44	288	
OCTUBRE	MARTES	27	1254	43.82097	43.82724	0.00627	6.27	NOVIEMBRE	LUNES	12	1254	19.7503	19.75091	0.00061	0.61	122	
NOVIEMBRE	MARTES	4	986	47.91954	47.92447	0.00493	4.93	NOVIEMBRE	MARTES	27	986	18.80156	18.80252	0.00096	0.96	192	
								DICIEMBRE	MARTES	4		18.89138	18.89174	0.00036	0.36	72	

Promedio Semestral mg/l
1554.2

Promedio Semestral mg/l
188.75

De la tabla 6-8, se obtuvieron los siguientes resultados promedio

Tabla 6-9: Concentraciones de sólidos en el efluente del CBR

	<i>ST (mg/l)</i>	<i>SST (mg/l)</i>
Máximo	4184	650
Mínimo	834	14
Promedio	1542.2	188.6

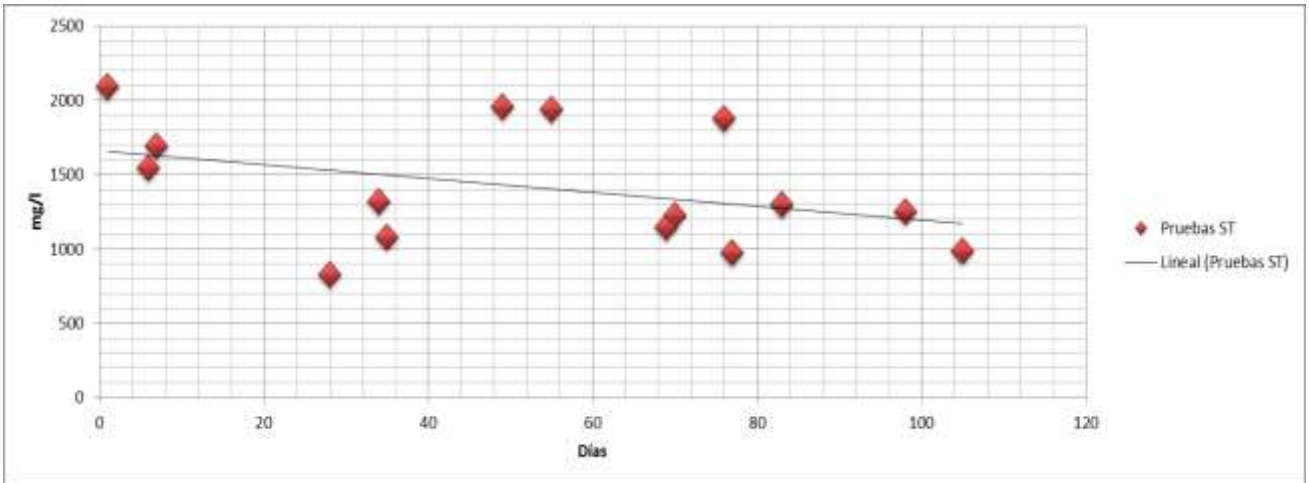


Figura 6-12. Mediciones de las pruebas de ST con tendencia lineal

En la gráfica se observa la fluctuación a lo largo del tiempo que pueden corresponder con el desprendimiento de la biopelícula, además de la tendencia a la baja que sugiere una estabilización del CBR.

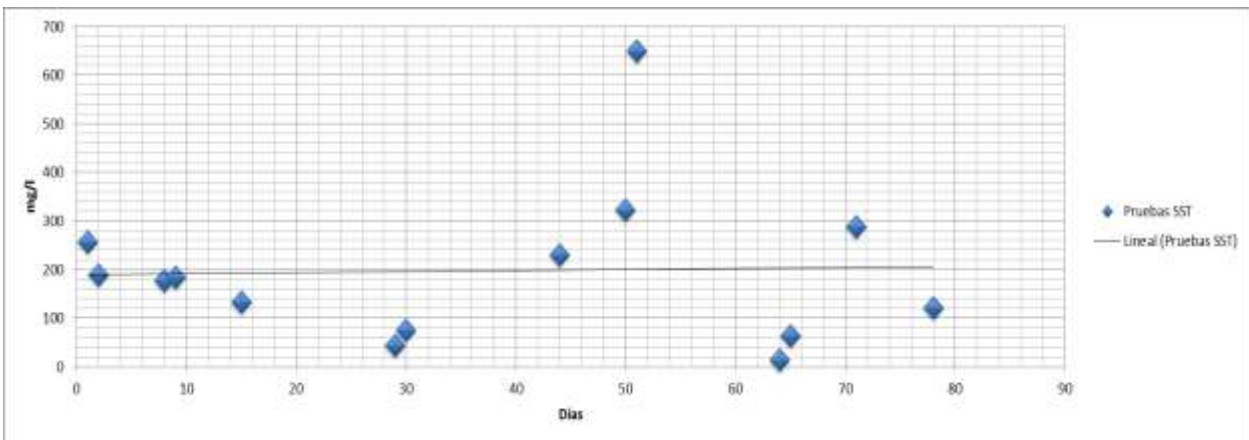


Figura 6-13. Mediciones de las pruebas de SST con tendencia lineal

Esta gráfica resulta diferente a la anterior con fluctuaciones mayores y con una ligera tendencia a la alza, esto indica que la relación con los ST no será lineal.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones generales

En comparación con los parámetros utilizados para el diseño original de la planta, los actuales se han modificado, tanto en cantidad como en calidad, por lo que el CBR no resulta suficiente para el gasto tratado.

El efluente del CBR aun siendo sujeto de un tratamiento secundario como el Sedimentador secundario de este caso, resulta insuficiente y no satisface la normatividad mexicana vigente, por lo que, por el momento no puede ser considerada para cualquier tipo de reúso.

Aun con las limitaciones de gasto continuo que posee el CBR posee la suficiente capacidad para tratar el influente con eficiencias mayores del 30%.

Conclusiones de los parámetros medidos

A lo largo del semestre se observan fluctuaciones en el sistema, propias de un gasto intermitente, no obstante se observó un incremento no solo en el gasto, sino en la concentración de los niveles de DBO en el agua residual, esto puede implicar una contaminación adicional desconocida o una concentración mayor de materia orgánica debida a la instalación de sistemas de ahorro de agua en los sanitarios.

Los parámetros de sólidos registraron un alza significativa en comparación con el estudio previo (Mata 2012), lo cual apoya el punto anterior, se tienen más gasto y menor calidad.

EL efluente únicamente cumple las características para reúso para descarga en ríos con uso de riego agrícola que marca la NOM-001-SEMARNAT-1996 que son:

$$DBO_5 = 200 \text{ mg/l} \quad \text{y} \quad SST = 150 \text{ mg/l}$$

Es de mencionar que el parámetro SST lo rebasa, pero el sedimentador secundario, de hecho reduce ambos criterios en alrededor del 20%, aun así, sigue estando muy lejos de la calidad buscada para reusar en los sistemas sanitarios.

Conclusiones de los objetivos.

En cuanto a la evaluación se ha cumplido a cabalidad, sin embargo, la evaluación no fue positiva por lo que el reúso no será posible a menos que se resuelva el problema de la válvula que alimenta al biodigestor.

Debido a que el muestreo ha determinado que el CBR no está recibiendo un influente con las características básicas necesarias la mayoría del tiempo para su correcto funcionamiento, se requiere un nuevo estudio y propuesta de los elementos inmediatamente anteriores, esto último se sale del estudio por lo que no será contemplado.

Anexos:

Anexo I : Metodología de las pruebas de laboratorio.

Los lineamientos y procedimientos con los que fueron realizadas las pruebas DBO₅, ST y SST, se basaron en las prácticas para laboratorio del Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, estas a su vez están basadas y cumplen con los procedimientos de los métodos estándar para la examinación del agua y aguas residuales (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater), para DBO₅ y Sólidos.

Prueba DBO₅

Uno de los ensayos más importantes para determinar la concentración de la materia orgánica de aguas y aguas residuales es el ensayo de DBO a cinco días. Esencialmente, la DBO es una medida de la cantidad de oxígeno utilizado por los microorganismos en la estabilización de la materia orgánica biodegradable, bajo condiciones aerobias, en un período de 5 días y a 20 °C. En aguas residuales domésticas, el valor de la DBO a 5 días representa en promedio un 65 a 70 % del total de la materia orgánica oxidable. Para las aguas residuales la DBO representa aproximadamente las dos terceras partes de la demanda que sería ejercida si se oxidara toda la materia orgánica por vía biológica.

Material

Reactivos

Agua de dilución
Agua destilada
Sulfato de Magnesio
Cloruro Férrico
Cloruro de Calcio
Solución amortiguadora
Sulfato Manganoso
Álcali – Yoduro – Nitruro
Ácido Sulfúrico concentrado
Tiosulfato de Sodio (0.025 N)
Almidón

Cristalería

Frascos Winkler 300ml (12)
Pipetas
Bureta y soporte universal
Probetas
Matraz Erlenmeyer 700ml

Equipo

Aireador
Incubadora
Parrilla agitadora

Procedimiento

La DBO_5 se obtiene como el cociente de la diferencia de oxígeno disuelto en el agua de muestra en el primer día (OD inicial) menos el oxígeno disuelto al quinto día (OD final), sobre el porcentaje de dilución (en forma decimal) al cual se realiza la prueba.

$$DBO_5 = \frac{OD_i - OD_f}{P}$$

Dónde:

OD_i : Oxígeno disuelto de la muestra diluida inmediatamente después de su preparación, en mg/L

OD_f : Oxígeno disuelto de la muestra después de cinco (5) días, en mg/L

P: Fracción decimal de muestra usada en decimales.

Para la preparación del agua de dilución se requiere airearla hasta la saturación y agregar 1ml de cada uno de los nutrientes (sulfato de magnesio, cloruro férrico, Cloruro de Calcio, solución amortiguadora) por cada litro de agua de dilución. En las pruebas realizadas preparamos 4 litros y medio de solución para estar holgados en los 12 frascos winkler utilizados.

A continuación se presentan los pasos numerados para realizar la totalidad de la prueba.

1. Para preparar la solución se aforan los 4.5 litros mencionados en un recipiente y se agregan:

4.5 ml de solución amortiguadora.

4.5 ml de Sulfato de Magnesio

4.5 ml de Cloruro de Calcio

4.5 ml de Cloruro Férrico.

2. Se mezcla perfectamente.

3. Instalar el aireador en el recipiente que contiene el agua destilada con nutrientes.

4. Con ayuda de una probeta, se agregan las cantidades correspondientes de la muestra de la PTAR según sea el caso.

Dilución al 0.5%	Dilución al 1%	Dilución al 2%
------------------	----------------	----------------

3.5 ml	7 ml	14 ml
696.5 ml de agua de dilución	693 ml de agua de dilución	686 ml de agua de dilución

5. Se llenan 2 frascos Winkler de con cada una de las diferentes diluciones, posteriormente se rotulan (con punto de muestreo, fecha, %de dilución). Para este caso son tres dilusiones por dos muestras por dos puntos de muestreo, es decir, doce frascos.

6. Se llevan la mitad de los frascos recién preparados a la incubadora a 20°C, para su análisis posterior.

7. Con los 6 frascos Winkler restantes se determinará el oxígeno disuelto inicial.

8. Con ayuda de una pipeta graduada, se agrega a cada frasco Winkler:

2ml de Sulfato Manganoso
2ml de Alkali-Yoduro-Nitruro

9. Posteriormente se tapa el frasco, se vierte el excedente y se mezcla invirtiéndolo constantemente.

10. Se espera a que sedimente el precipitado hasta el hombro de la botella, y se vuelve a mezclar.

11. Se añaden 2ml de Ácido Sulfúrico y se realiza el procedimiento anterior, tapar y mezclar. El precipitado se disolverá y el oxígeno quedará fijado.

12. Pasar el contenido de los frascos winkler a un matraz Erlenmeyer y realizar los siguientes procedimientos para cada una de las seis muestras.

13. Se agregan 2 gotas de Almidón que actuará como indicador.

14. Se llenar una bureta con tiosulfato de Sodio 0.025N hasta la marca de cero.

15. Se coloca el matraz en el agitador.

16. Se dosifica el tiosulfato de sodio hasta que la muestra regrese al color original, se cuantifica la cantidad necesaria de tiosulfato para el cambio de color.

La cantidad en ml de tiosulfato utilizado corresponde directamente a los mg/l de oxígeno disuelto en dicha muestra.

El valor obtenido con este procedimiento corresponde al valor de OD inicial, posteriormente se repite este procedimiento a los 5 días de incubación de las muestras para obtener el valor de OD final.

Sólidos:

Sólidos totales.

Se define como sólidos totales a la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103°C. El valor de los sólidos totales incluye material disuelto y no disuelto. Para su determinación, la muestra se evapora en una cápsula a peso constante previamente pesada, sobre un baño María, y luego se seca a 103 – 105 °C en un horno por una hora. El incremento de peso, sobre el peso inicial dividido entre el volumen de la muestra, representa el contenido de sólidos totales en mg/l.

Sólidos suspendidos totales.

También denominados residuo no filtrable o material no disuelto, son determinados por filtración a través de un filtro de asbesto o de fibra de vidrio, en un crisol Gooch previamente pesado. Se succiona el contenido de la muestra con el crisol con su contenido se seca a 103 – 105°C; el incremento de peso, sobre el peso inicial, representa el contenido de sólidos o residuo no filtrable.

Material

Cristalería y porcelana.

Matraz kitasato
Proveta 25 ml
Baso de precipitados 100ml
Capsula
Crisol gooch
Desecador

Equipo

Parrilla
Horno desecador
Bomba de vacío
Bascula electrónica
Pinzas

Procedimiento

1. Con anterioridad se desecan las cápsulas y los Crisoles gooch que se vayan a usar para que queden a peso constante, esto se logra mediante el calentado, colocación en el

deseCADador y posterior medici3n del peso, tantas veces como sea necesario, no se podr3 utilizar otro material el cual no se le haya dado este procedimiento.

2. Se precalienta el horno a la temperatura se3alada y se enciende la parrilla.
3. Se prepara un ba3o mar3a con el vaso de precipitados y la parrilla para despu3s colocar la c3psula tarada en este
4. Se aforan 5 ml de aguas residuales m3s 5ml de agua destilada en la probeta y se colocan en el ba3o mar3a, esta muestra permanecer3 all3 hasta que se haya evaporado completamente.
5. Una vez evaporada la muestra se pasa al horno.
6. Al matraz kitazato se le conecta la bomba de vac3o por el orificio exprofeso que posee, del lado de la boquilla se coloca el crisol gooch con el filtro incluido.
7. Se aforan otros 5ml de aguas residuales con 5ml de agua destilada.
8. Se enciende la bomba y se pasa la muestra por el matraz.
9. El crisol gooch ya con el residuo es enviado al horno.
10. Al terminar con el periodo de calentamiento, las muestras son colocadas en el deseCADador nuevamente hasta que est3n a temperatura ambiente, esto puede tardar una hora pero generalmente se espera hasta el d3a siguiente.
11. Se pesan en la b3scula electr3nica y se calcula su aumento con respecto al recipiente tarado.

Nota: Tanto la c3psula como el crisol son en todo momento manipulados por las pinzas met3licas para evitar en lo posible el contacto con la grasa y las impurezas de las manos.

Anexo 2: Metodología para la variación del gasto empírico en el sistema CBR

Las siguientes consideraciones son en su mayoría empíricas por lo que en todo caso son aproximadas, son objetivas en la medida de lo posible pero no son experimentales.

1. El aforo considerado es el mayor de 2400 l/día.
2. El flujo que va al biodigestor se taponea constantemente por lo que se requiere destapar mediante la apertura de una válvula, esta operación se realiza 3 veces al día cada 4 horas, comenzando a las 8 am.
3. El flujo del agua residual proveniente del tanque de regularización se detiene por taponamiento cada cuatro horas
4. EL máximo gasto es de 4.5 l/min y el mínimo de cero.
5. La reducción del flujo sigue un comportamiento de la ecuación de tercer grado:

$$Q = -\left(\frac{t}{6.9}\right)^3 + 45$$

Que es una ecuación empírica y relaciona el comportamiento supuesto de la gradual disminución del gasto donde:

t = Intervalos de 10 minutos.

Con las consideraciones anteriores se creara una curva de descarga que varíe cada 10 minutos

Referencias:

- Antonie, R. (1978) *Design Criteria for application of the Rotating Biological Contactor to domestic and industrial wastewater treatment*. Lieja, Bélgica
- Benefield, L. (1980). *Biological process design for wastewater treatment*. EUA: Prentice Hall
- Bezanilla, J. (1993). *Depuración de aguas residuales en un contactor biológico rotativo (RBC) con alternancia en el sentido del flujo*. Universidad de Cantabria.
- César, E., Vázquez, A. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. Fundación ICA, A.C.
- Chesler, P. & Eskelund, G. (1981). *Rotating Biological Contactors for Munitions Wastewater Treatment. Final Technical Report*. Army Mobility Equipment Research and Development Command. Fort Belvoir.
- Cheung, P., & Krauth, K. (1980); Investigation to Replace the Conventional Sedimentation Tank by a Microstrainer in the Rotating Disk System, *Water Res.*
- CONAGUA (2002). Proyecto de norma ambiental para el distrito federal PROY-NADF-003-AGUA-2002. *Establece las condiciones y requisitos para la recarga en el distrito federal por inyección directa de agua residual tratada al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México*. México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua. (2009). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: Alcantarillado sanitario*. México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- CONAGUA (2007) *Inventario Nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. México, D.F.: SEMARNAT.
- Dehkordi, F. (1980). *The Effect of Heavy Metal on the Performance of Rotating Biological Contactors (RBC)*. Oklahoma State University.
- Eckenfelder w, W., Van de Venne, L. (1989). *Industrial water pollution control*. Bezanilla Revilla.
- Edeline, F., Van de Venne, L. (1979) Cinétique de l' épuration dans les biodisques, *Trib. Cebedeau*.
- Hitdlebaugh, J., & Miller, R. (1981). *Operational problems with rotating biological contactors*. Control Fed, EUA.

- Hoag, G. (1980). *Rotating Biological Contactor Treatment of Aluminum Sulfate Coagulated Septage Supernatant*. University of Lowell.
- Huang, J., & Bates, V. (1980). *Comparative performance of rotating biological contactors using air and pure oxygen*. Water Pollut. Control Fed., Vol. 52. EUA.
- Mantilla, G. (1987). Análisis del diseño y la operación de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ciudad Universitaria. Facultad de Ingeniería (UNAM).
- Metcalf & Eddy. (2004). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*: McGraw Hill Companies.
- Munch, R., Hwang, C., & Lackie, T. (1980). *Wastewater Fractions Add to Total Treatment Picture*. Water and Sewage Works.
- Noss, C., & Miller, R. (1980). *Rotating biological contactor process for secondary treatment and recarbonation following low-level lime addition for phosphorus removal*. Final Report, Army Medical Bioengineering Research and Development Laboratory. Fort Detrick.
- Normas técnicas complementarias para el diseño y ejecución de obras e instalaciones hidráulicas*. 2007. México D.F.
- Opatken, E. (1982) *Rotating Biological Contactors second order kinetics Process 1st on Fixed film Biological Processes*. Kings Island, Ohio.
- Ordóñez, P. (2003). Estudio preliminar para el tratamiento de lixiviados en un reactor de Biodiscos. Universidad Nacional de Colombia.
- Rushbrook, E. & Wilke, D. (1980). *Energy Conservation and Alternative Energy Sources in Wastewater Treatment*. Journal Water Pollution Control Federation.
- Singhal, A. (1980); *Phosphorus and Nitrogen Removal at Cadillac*. Journal Water Pollution Control Federation.: Michigan, EUA.
- Smith, E. (1982). *Rotating Biological Contactors: History, Development and Summary of Case Pilot Study*. Marquette University.
- SEMARNAT. (1997). NOM-001-SEMARNAT-1996. *Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales*. Diario Oficial de la Federación.
- SEMARNAT. (1998). NOM-003-SEMARNAT-1997. *Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público*. Diario Oficial de la Federación.
- Waggener, J., Fitchugh, M., & Flann, C. (1980). *Innovative Approach to the Treatment of Dairy Wastewater with Rotating Biological Contactors*. 53rd Annual conference of the water

pollution control federation, proceedings of the industrial wastes symposium. Las Vegas, Nevada.

Weng, C., & Molog, A. (1974). *Nitrification in the Biological Fixed-Film Rotating Disk System*, Journal of the Water Pollution Control Federation.

Referencias en páginas web:

www.agua.unam.mx

www.alianzaporelagua.org

www.ambientum.com

www.cdn.biodisol.com

www.depuranatura.blogspot.mx

www.es.scribd.com

www.es.wikibooks.org

www.flickr.com

www.ingenieroambiental.com

www.ingenieroambiental.com

www.ingenieroambiental.com

www.law.epa.gov

www.mequipco.com

www.rotoplas.com

www.sciencedirect.com

www.techuniversal.es

www.USFilter.com

www.wastewaterlect2001.html