



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN UTILIZADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y REALIZACIÓN DE CASO PRÁCTICO

Gerson Jonatan Ramírez Bach

Asesorado por el Ing. Francisco Javier Quiñonez de la Cruz

Guatemala, octubre de 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES DE
CONSTRUCCIÓN UTILIZADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO
DE AGUAS RESIDUALES Y REALIZACIÓN DE CASO PRÁCTICO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

GERSON JONATAN RAMÍREZ BACH
ASESORADO POR EL ING. FRANCISCO JAVIER QUIÑONEZ DE LA CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Walter Salazar González
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES
DE CONSTRUCCIÓN UTILIZADOS EN PLANTAS DE
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y REALIZACIÓN DE
CASO PRÁCTICO,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil,
el 17 de abril de 2009.



GERSON JONATAN RAMIREZ BACH

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 06 de agosto de 2010

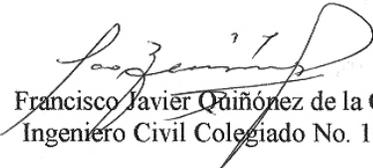
Ingeniero
José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales
Escuela de Ingeniería Civil

Ingeniero Ordóñez Morales:

Tengo el agrado de dirigirme a usted para informarle que he concluido con la revisión del trabajo de graduación "**Análisis del comportamiento de los materiales de construcción utilizados en plantas de tratamiento de aguas residuales y realización de caso práctico**", realizado por el estudiante universitario **Gerson Jonatan Ramírez Bach**, quien contó con mi asesoría.

Considero que el trabajo elaborado por el estudiante Ramírez Bach cumple con los requisitos exigidos, por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,


Francisco Javier Quiñónez de la Cruz
Ingeniero Civil Colegiado No. 1941

Cc archivo



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



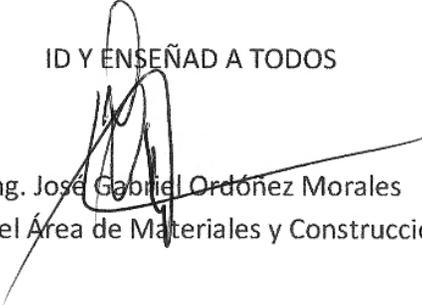
Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Guatemala

Estimado Ingeniero Montenegro.

Atentamente y por este medio, envío a usted, el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante Gerson Jonatan Ramírez Bach, titulado ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN UTILIZADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y REALIZACIÓN DE CASO PRÁCTICO.

Por lo que, habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos de ley del referido trabajo; y extendida la APROBACIÓN DEL MISMO, por parte del Asesor Ing. Francisco Javier Quiñónez de la Cruz y habiéndose efectuado todas las observaciones técnicas, el suscrito lo da por APROBADO, solicitándole darle el trámite respectivo.

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles

/bbdeb.

PROGRAMA DE
INGENIERIA CIVIL
ACREDITADO POR



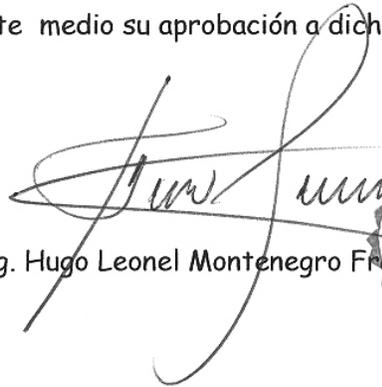


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Francisco Javier Quiñón de la Cruz y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. José Gabriel Ordóñez Morales, al trabajo de graduación del estudiante Gerson Jonatan Ramírez Bach, titulado ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN UTILIZADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y REALIZACIÓN DE CASO PRÁCTICO, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, octubre de 2010

/bbdeb.

Más de 130 Años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
De Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.328-2010

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN UTILIZADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES Y REALIZACIÓN DE CASO PRÁCTICO**, presentado por el estudiante universitario **Gerson Jonatan Ramírez Bach**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano



Guatemala, octubre de 2010

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

DIOS

Por haber estado conmigo durante todo el transcurso de mi carrera y por haberme ayudado a alcanzar esta meta dándome vida, fuerza y sabiduría.

MIS PADRES

Por su apoyo espiritual, moral y económico:

Oswaldo E. Ramírez De León y

Lidia Micaela Bach de Ramírez

MIS HERMANOS

Oswaldo Abimael Ramírez Bach

Jacob Isaac Ramírez Bach

MIS TÍOS Y TÍAS

En especial, a Samuel Abraham

Bach Carrillo

MIS PRIMOS Y PRIMAS

En especial, a Brenda Márquez

AGRADECIMIENTOS A:

Dios.

Mis Padres y mis hermanos.

Familiares, amigos y compañeros de estudio.

Ing. Francisco Javier Quiñonez, Inga. Soraya Martínez, Inga. Helen Ramírez,
Ing. Víctor Del Cid.

La Facultad de Ingeniería de la gloriosa y tricentenaria Universidad de San
Carlos de Guatemala

La Escuela de Ingeniería Civil

Ingenieros Docentes

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XVII
OBJETIVOS	XIX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. ALTERNATIVAS EXISTENTES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	1
1.1 Descripción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales	1
1.1.1 Aspectos generales	1
1.1.2 Obras de llegada	1
1.1.3 Tratamientos preliminares	3
1.1.3.1 Cribas	3
1.1.3.2 Desengrasadores	5
1.1.3.3 Desarenadores	6
1.1.3.4 Medidor y repartidor de caudal	6
1.1.4 Tratamiento primario	8
1.1.4.1 Tanques imhoff	8
1.1.4.2 Tanques de sedimentación	10
1.1.4.3 Tanques de flotación	12
1.1.5 Tratamiento secundario	13
1.1.5.1 Lagunas de estabilización	13
1.1.5.1.1 Lagunas aeróbicas	13

1.1.5.1.2	Lagunas aeradas	13
1.1.5.1.3	Lagunas facultativas	14
1.1.5.2	Proceso de lodos activados	15
1.1.5.2.1	Zanjas de oxidación	16
1.1.5.3	Filtros percoladores	17
1.1.5.4	Módulos rotatorios de contacto	18
1.1.6	Otros tipos de tratamiento	20
1.1.6.1	Tratamientos con plantas acuáticas	20
1.1.7	Tratamiento de lodos	21
1.1.7.1	Digestión anaeróbica	21
1.1.7.2	Lagunas de lodos	22
1.1.7.3	Aplicación de lodos sobre el terreno	24
1.1.7.4	Remoción de lodos de lagunas de estabilización	24
1.1.7.5	Lechos de secado	25

2. NORMAS DE DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN GUATEMALA 27

2.1	Normas para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales	27
2.1.1	Objeto	27
2.1.2	Alcance	27
2.1.3	Disposiciones específicas para diseños definitivos	28
2.1.3.1	Aspectos generales	28
2.1.3.2	Obras de llegada	30
2.1.3.3	Tratamientos preliminares	30
2.1.3.3.1	Cribas	31
2.1.3.3.2	Desengrasadores	32

2.1.3.3.3	Desarenadores	33
2.1.3.3.4	Medidor y repartidor de caudal	34
2.1.3.4	Tratamiento primario	35
2.1.3.4.1	Generalidades	35
2.1.3.4.2	Tanques imhoff	35
2.1.3.4.3	Tanques de sedimentación	37
2.1.3.4.4	Tanques de flotación	40
2.1.3.5	Tratamiento secundario	41
2.1.3.5.1	Lagunas de estabilización	41
2.1.3.5.1.1	Lagunas anaeróbicas	41
2.1.3.5.1.2	Lagunas aeradas	42
2.1.3.5.1.3	Lagunas facultativas	44
2.1.3.5.2	Procesos de lodos activados	47
2.1.3.5.2.1	Aspectos generales	47
2.1.3.5.2.2	Sedimentador secundario	51
2.1.3.5.2.3	Zanjas de oxidación	53
2.1.3.5.3	Filtros percoladores	55
2.1.3.5.4	Módulos rotatorios de contacto	57
2.1.3.6	Otros tipos de tratamiento	58
2.1.3.6.1	Tratamientos con plantas acuáticas	58
2.1.3.7	Tratamiento de lodos	59
2.1.3.7.1	Generalidades	59
2.1.3.7.2	Digestión anaeróbica	60
2.1.3.7.3	Lagunas de lodos	63
2.1.3.7.4	Aplicación de lodos sobre el terreno	64
2.1.3.7.5	Remoción de lodos de lagunas de estabilización	65
2.1.3.7.6	Lechos de secado	65

3.	EVALUACIÓN VISUAL DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EMPLEADOS EN DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMIENTO EN GUATEMALA	69
3.1	Descripción de las visitas	69
3.1.1	Generalidades	69
3.1.1.1	Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II	70
3.1.1.1.1	Materiales de construcción encontrados	73
3.1.1.1.2	Resultados de la inspección	75
3.1.1.2	Planta tratamiento de aguas residuales USAC	75
3.1.1.2.1	Materiales de construcción encontrados	78
3.1.1.2.2	Resultados de la inspección	80
3.1.1.3	Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff, colonia El Tesoro	81
3.1.1.3.1	Materiales de construcción encontrados	84
3.1.1.3.2	Resultados de la inspección	86
4.	DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS	87
4.1	Antecedentes	87
4.1.1	Características de sistemas de tratamiento Acuáticos	88

4.1.2	Historia	89
4.1.3	Restricciones climáticas	91
4.1.4	Poder de depuración de las plantas acuáticas	91
4.1.5	Esquema de funcionamiento	92
4.1.6	Generación de empleo sostenible	93
4.1.7	Ambiente sustentable	93
4.1.8	Educación ambiental	94
4.1.9	Usos frecuentes	94
4.2	Vegetación	94
4.2.1	Plantas flotantes	95
4.2.1.1	Jacinto de agua	96
4.2.1.2	Comalillo	100
4.2.1.3	Lenteja de agua	101
4.2.2	Plantas sumergidas	103
4.3	Criterios de diseño para sistemas de jacinto de agua	104
4.3.1	Tasas de carga orgánica	107
4.3.2	Tasa de carga hidráulica	108
4.3.3	Profundidad del agua	108
4.3.4	Manejo de la vegetación	109
4.3.5	Mosquitos y control de los mismos	111
4.3.6	Parámetros de diseño sugeridos	112
4.3.7	Manejo de lodos	113
4.4	Características físicas de los sistemas de tratamiento acuático	114
4.4.1	Configuraciones del sistema	114
4.4.2	Estructuras de entrada y salida	116
4.4.3	Aeración suplementaria	117
4.4.4	Operación y mantenimiento de la aeración	120
4.5	Expectativas de funcionamiento	120

4.5.1	Ecuaciones de diseño	120
4.5.1.1	Remoción de DBO_5	123
4.5.1.2	Efecto de la temperatura	124
4.5.2	Remoción de nitrógeno	124
4.5.3	Remoción de fósforo	125
4.6	Ejemplos de diseño	126
5.	CASO PRÁCTICO: CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS	137
5.1	Descripción del sistema por construir	137
5.2	Diseño del sistema	137
5.3	Elaboración del presupuesto del proyecto	141
5.4	Formulación del proyecto	143
5.4.1	Aspectos de mercado	143
5.4.2	Aspectos técnicos	143
5.4.3	Aspectos administrativos y legales	143
5.4.4	Aspectos de impacto ambiental	144
5.4.5	Aspectos financieros	145
5.4.6	Cronograma de ejecución	146
5.5	Metodología empleada en la construcción del sistema construido	147
5.6	Evaluación del funcionamiento del sistema construido	150
	CONCLUSIONES	159
	RECOMENDACIONES	161
	BIBLIOGRAFÍA	163

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Cajón de llegada, bypass, compuerta de admisión	2
2	Criba con abertura rectangular	3
3	Canal de transición hacia las cribas	4
4	Esquema, desengrasador por gravedad	5
5	Deflectores de caudal – desarenadores	6
6	Canal Parshall	7
7	Canal Palmer Bowlus	7
8	Vertedero de sección trapezoidal	8
9	Tanque Imhoff	9
10	Lecho de secado	10
11	Tanque de sedimentación rectangular	11
12	Tanque de sedimentación circular	11
13	Sistema de flotación por aire disuelto	12
14	Componentes de un sistema básico de lodos activados	15
15	Sistema típico de lodos activados con zanjas de oxidación	17
16	Filtro biológico	18
17	Contactador biológico rotativo	19
18	Estanque de depuración de plantas acuáticas	20
19	Digestores de alta y baja carga	22
20	Esquema de funcionamiento, planta piloto Aurora II	71
21	Fotografías de elementos principales de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II	72
22	Esquema de funcionamiento, planta de tratamiento de aguas residuales USAC	76

23 Fotografías de elementos de la planta de tratamiento de aguas residuales USAC	77
24 Esquema de funcionamiento, planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro zona 2 de Mixco	82
25 Fotografías de elementos de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro zona 2 de Mixco	83
26 Esquema de funcionamiento	92
27 Morfología del jacinto de agua	96
28 Lugares de vulnerabilidad en Guatemala para el crecimiento de jacinto agua en épocas heladas	99
29 Evolución de los patrones de flujo en la planta de San Diego California, Estados Unidos, estanques de tratamiento de jacinto de agua	115
30 Tubo múltiple para distribución o evacuación de flujo	116
31 Evolución del flujo del estanque 3 y configuraciones del sistema de aeración en la planta de San Diego California, Estados Unidos	118
32 Esquema para el modelado de un estanque de jacintos con <i>step feed</i> y reciclaje	121
33 Organigrama del proyecto	144
34 Toma de muestra de aguas residuales de origen doméstico	147
35 Análisis físico químico de aguas residuales de origen doméstico y/o desechos industriales	148
36 Construcción de estanque (1/2)	149
37 Construcción de estanque (2/2)	150
38 Estanque antes de llenarse completamente (Parte posterior)	151
39 Estado saludable de las plantas de jacinto	151
40 Divisorio entre tubería de entrada y plantas flotantes	152

41 Estanque con población de jacintos de agua adultos	153
42 Visibilidad de un objeto sumergido en la parte posterior del estanque	153
43 Aparición de dos especies de hojas en el sistema	154
44 Toma de la segunda muestra de aguas residuales	154
45 Segundo análisis físico químico de aguas residuales de origen doméstico y/o desechos industriales	156

TABLAS

I. Material cribado según la abertura de la criba	32
II. Recomendaciones para dimensionamiento de tanques imhoff	37
III. Criterios para eficiencias de remoción en tanques de sedimentación	39
IV. Datos para el cálculo del volumen de lodos primarios	39
V. Guía para el diseño de lagunas facultativas	45
VI. Parámetros para comprobación y dimensionamiento de tanques de aeración	48
VII. Parámetros adicionales a considerar en tanques de aeración	49
VIII. Densidades de energía en función de la relación p/a del tanque	50
IX. Parámetros de diseño para filtros percoladores	55
X. Tiempo de retención de sólidos según temperatura en el caso de que haya recuperación de gas	61
XI. Tiempo de retención de sólidos según temperatura en el caso de que no haya recuperación de gas	63
XII. Recomendaciones para comprobación de requisitos de área	67

XIII.	Características físicas y mecánicas de los materiales de la planta piloto Aurora II	73
XIV.	Ventajas y desventajas en el uso de los materiales de la planta piloto Aurora II	74
XV.	Características físicas y mecánicas de los materiales de la planta de tratamiento de aguas residuales USAC	78
XVI.	Ventajas y desventajas en el uso de los materiales de la planta de tratamiento de aguas residuales USAC	79
XVII.	Características físicas y mecánicas de los materiales de la planta de tratamiento de aguas residuales domesticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro	84
XVIII.	Ventajas y desventajas en el uso de los materiales de la planta de tratamiento de aguas residuales domesticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro	85
XIX.	Historia del uso de sistemas de tratamiento acuático (Planta utilizada: jacinto de agua, excepto las remarcadas)	90
XX.	Rendimiento de sistemas de lenteja de agua existentes en Estados Unidos	102
XXI.	Composición de la planta lenteja de agua	103
XXII.	Tipos de sistemas de jacinto de agua	106
XXIII.	Criterios de diseño para sistemas de jacinto de agua	107
XXIV.	Criterios de diseño para limpieza de efluentes con sistemas de tratamiento de lenteja de agua	112
XXV.	Frecuencia recomendada para limpieza de lodos en estanques de jacinto de agua	113
XXVI.	Criterios de diseño para estanques de jacinto modificados	122
XXVII.	Remoción de nitrógeno – Tratamiento terciario, jacinto de agua	125
XXVIII.	Presupuesto de proyecto	142
XXIX.	Cronograma de ejecución del proyecto	146

GLOSARIO

AERACIÓN

Proceso de transferencia de masa, generalmente referido a la transferencia de oxígeno del aire al agua por medios naturales (flujo natural, cascadas, etc.) o artificiales (agitación mecánica o difusión de aire comprimido).

AERACIÓN MECÁNICA

(1) La mezcla del contenido líquido de un tanque de aeración, laguna aerada o digestor aeróbico, para producir un contacto de la superficie del agua con la atmósfera. (2) La introducción de oxígeno del aire en un líquido por acción de un agitador mecánico.

AFLUENTE

Agua, agua residual u otro líquido que ingrese a un reservorio, planta de tratamiento o proceso de tratamiento.

BY-PASS

Conducto usado para desviar el agua residual de un proceso o planta de tratamiento en condiciones de emergencia o de mantenimiento correctivo.

CRITERIOS DE DISEÑO

(1) Normas o guías de ingeniería que especifican objetivos, resultados o límites que deben cumplirse en el diseño de un proceso, estructura o componente de un sistema. (2) Guías que especifican detalles de construcción y materiales.

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO)

Cantidad de oxígeno usado en la estabilización de la materia orgánica bajo condiciones de tiempo y temperatura especificadas (generalmente 5 días y 20 °C).

DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica (carbonácea) del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en una prueba que dura dos horas.

DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Término usado para significar la purificación o remoción de sustancias objetables de las aguas residuales, como por ejemplo DBO, DQO, bacterias, materiales tóxicos, etc. Se aplica al tratamiento de líquidos.

DUREZA	Energía que una muestra puede absorber antes de romperse.
EFLUENTE	Líquido que sale de un proceso de tratamiento.
IMPACTO AMBIENTAL	Cambio o consecuencia al ambiente que resulta de una acción específica o proyecto.
MANEJO DE AGUAS RESIDUALES	Conjunto de obras de recolección, tratamiento y disposición y acciones de operación, monitoreo, control y vigilancia en relación con aguas residuales.
OXÍGENO DISUELTO	Concentración de oxígeno disuelto medida en un líquido, por debajo de la saturación, normalmente expresada en mg/l.
PLANTA DE TRATAMIENTO	Conjunto de obras, facilidades y procesos en una planta de tratamiento de aguas residuales.

PLANTA PILOTO

En aguas residuales, planta de tratamiento a escala de laboratorio o técnica, que sirve para el estudio de la tratabilidad biológica de un desecho líquido o sea para la determinación de las constantes cinéticas y parámetros de diseño del proceso.

SSVTA

Sólidos en suspensión volátiles en el tanque de aeración.

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

Procesos de tratamiento en los cuales se intensifica la acción de los microorganismos para estabilizar la materia orgánica presente.

TRATAMIENTO PRELIMINAR

(1) Acondicionamiento de un desecho antes de ser descargado en el sistema de alcantarillado. (2) Procesos de tratamiento localizados antes del tratamiento primario (desmenuzado, cribas, desarenadores, etc.).

TRATAMIENTO PRIMARIO

Remoción de una considerable cantidad de materia en suspensión pero poco o nada de la materia disuelta.

TRATAMIENTO QUÍMICO

Tratamiento de aguas residuales en el cual se aplican compuestos químicos para obtener un resultado deseado, como: precipitación, coagulación, floculación, acondicionamiento de lodos, desinfección, etc.

TRATAMIENTO SECUNDARIO

(1) Nivel de tratamiento por encima de tratamiento primario en donde se alcanzan eficiencias de remoción de DBO y sólidos del orden del 85%. (2) Tratamiento biológico, generalmente lodos activados o filtros biológicos, con facilidades para manejo de lodos. Se aplica también a lagunas de estabilización con un alto grado de remoción.

TRATAMIENTO Terciario

Término que implica tratamiento adicional al secundario y que está siendo reemplazado por tratamiento avanzado de aguas residuales.

RESUMEN

Este trabajo de graduación fue realizado con el fin de evaluar el comportamiento de los materiales utilizados en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales después de estar en condiciones de uso.

Para la elaboración del capítulo uno, se recopiló información acerca de las distintas alternativas que existen para el tratamiento de aguas residuales, describiendo los sistemas y explicando su forma de funcionamiento. Se describen los elementos utilizados en obras de llegada, tratamientos preliminares, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento de lodos y tratamiento con plantas acuáticas.

El capítulo dos contiene un resumen de las normas de diseño para plantas de tratamiento de aguas residuales en Guatemala, las cuales fueron originalmente sintetizadas en el documento denominado Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales.

En el capítulo tres se describen las visitas realizadas a distintas plantas de tratamiento de aguas residuales de Guatemala, dichas visitas se planificaron con el fin de hacer una evaluación visual de los materiales de construcción encontrados en cada planta. Se hizo un recuento de los materiales que se emplearon para las construcciones, un análisis de las características físicas y mecánicas de dichos materiales, así como una enumeración de las ventajas y desventajas de la utilización de cada material.

El capítulo cuatro trata acerca del diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas, se detallan asuntos, tales como: los antecedentes existentes acerca del tema, los criterios de diseño, las características físicas de los sistemas de tratamiento acuático y las expectativas de funcionamiento.

El capítulo cinco describe el proyecto que se realizó, el cual fue acerca de la construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas para darle tratamiento a los desechos líquidos domésticos de una vivienda individual. Primeramente, se describe el sistema que se construyó, luego aparece el diseño del sistema, se incluyó el presupuesto y la formulación del proyecto, luego se describe paso a paso la metodología empleada en la construcción del sistema y por último, se presenta la evaluación del funcionamiento de dicho sistema.

OBJETIVOS

- **GENERAL**

Evaluar el comportamiento de los materiales utilizados en la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, después de estar en condiciones de uso.

- **ESPECÍFICOS**

1. Investigar acerca de cuáles son las distintas alternativas que existen para poder darle tratamiento a las aguas residuales.
2. Realizar una evaluación visual de los materiales de construcción empleados en diferentes plantas de tratamiento existentes en el País.
3. Investigar acerca del diseño y la construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas.
4. Construir un sistema de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas en una vivienda individual del interior de la república guatemalteca.
5. Evaluar el funcionamiento del sistema construido para tratar aguas residuales con plantas acuáticas.

INTRODUCCIÓN

En el interior de la república de Guatemala existen aún muchos lugares en donde las familias deben descargar aguas residuales domésticas en la parte trasera o delantera de sus casas, las cuales se conducen a flor de tierra hacia algún cuerpo receptor que por lo general es un río o lago. Esto causa malestar en dichas familias y en sus vecinos, ya que como consecuencia del problema se producen malos olores y las personas están propensas a contraer enfermedades infecciosas en la piel. Por otra parte, en el caso de que las aguas servidas lleguen a contaminar cualquier fuente de agua para consumo humano, las personas pueden llegar a contraer enfermedades de tipo gastrointestinal.

Como parte de su cultura y buena moral, el ingeniero civil debe actuar ante la problemática que las obras civiles puedan causar al ambiente y uno de los problemas que se ve con más frecuencia en nuestro país es el que se mencionó anteriormente, la descarga de aguas residuales domésticas sin tratar, en ríos y lagos.

El presente trabajo de graduación, como parte del esfuerzo para mejorar la calidad del medio ambiente, es un estudio del comportamiento de los materiales de construcción empleados en distintos tipos de plantas de tratamiento de aguas residuales, luego de haber estado funcionando durante un periodo determinado. Además, contiene la realización de una experiencia práctica que consiste en tratar las aguas servidas de una vivienda en el interior del país con el método de plantas acuáticas.

1. ALTERNATIVAS EXISTENTES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

1.1 Descripción de los sistemas de tratamiento de aguas residuales

1.1.1 Aspectos generales

El presente capítulo tiene el objeto de dar a conocer las distintas formas de tratar aguas residuales, así como, las partes en que se divide cada tratamiento, ya que las aguas residuales deben ser sometidas a varios tratamientos de depuración (establecidos por la entidad correspondiente del país o región) antes de ser descargadas en un cuerpo receptor (rio, lago, mar, etc.); generalmente dichos tratamientos se clasifican en tratamiento preliminar, tratamiento primario, tratamiento secundario y otros tipos de tratamiento. El tratamiento preliminar consiste en la retención de grasas, sólidos flotantes y arenas, el tratamiento primario consiste en la remoción de sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables para disminuir la carga del tratamiento secundario y el tratamiento secundario consiste en la remoción de DBO (Demanda bioquímica de oxígeno) y bacterias.

1.1.2 Obras de llegada

Las obras de llegada son el conjunto de instalaciones que se encuentran entre el punto de llegada del colector de aguas residuales (emisario) y los procesos de tratamiento. Una obra de llegada (figura 1) está compuesta por: Cajón de llegada, bypass, compuerta de admisión y estación de bombeo (no necesaria en todas las plantas de tratamiento) (Empresa).

Figura 1. Cajón de llegada, bypass, compuerta de admisión



Fuente: Empresa municipal de alcantarillado y saneamiento de Ecuador, Estructura de tratamiento preliminar.

La función principal de la estructura de llegada es actuar de cajón rompe presión al final del emisario principal y permitir un rebose de las aguas residuales por el bypass, mediante su cierre total o parcial en épocas de lluvia o en períodos de limpieza o mantenimiento y también asegurar de que en condiciones de lluvia no ingrese a la planta un caudal mayor al de diseño, correspondiente al máximo horario en tiempo seco. Sus principales características son:

- El cajón de llegada, así como el bypass están dimensionados para recibir y evacuar respectivamente el máximo caudal en tiempo húmedo para el periodo de diseño.
- En el cajón de llegada se tiene construida una pantalla tranquilizadora, con la finalidad de disipar la energía con la que llegan las aguas residuales por el emisario final.
- El caudal de diseño del cajón de llegada es el mismo que corresponde al caudal máximo de diseño del emisario final.
- El caudal máximo horario de aguas residuales en tiempo seco es el máximo que llegará para tratamiento.

1.1.3 Tratamientos preliminares

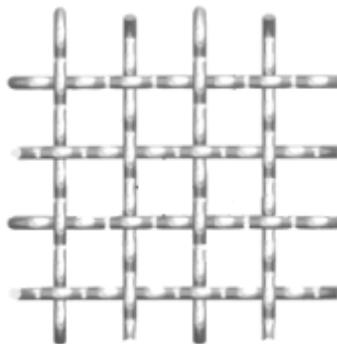
El tratamiento preliminar es aquel que se efectúa con la finalidad de retirar arenas, grasas y materiales sólidos flotantes del agua residual con el fin de proteger los dispositivos de tratamiento que forman parte del tratamiento posterior.

1.1.3.1 Cribas

Las cribas son un conjunto que consta de un marco, en el cual se monta una malla de alambre. La malla es una tela de alambre entretrejido con aberturas cuadradas (figura 2) o rectangulares de tamaño uniforme. La abertura de la malla es la separación libre entre los alambres que forman cada cuadro del tejido.

El marco es el componente que fija la malla para evitar su deformación y que puede ensamblarse con otro marco. La malla de las cribas debe estar entretrejida con alambre metálico que sea rígido y resistente a la corrosión(Quiminet).

Figura 2. Criba con abertura rectangular



Fuente: Quiminet, Información y negocios segundo a segundo, Tipos de cribas.

Las cribas se deben ubicar aguas abajo del cajón de llegada. Antes del ingreso a las cribas, las aguas residuales se conducen por un canal de transición (figura 3).

Figura 3. Canal de transición hacia las cribas



Fuente: Empresa municipal de alcantarillado y saneamiento de Ecuador, Estructura de tratamiento preliminar.

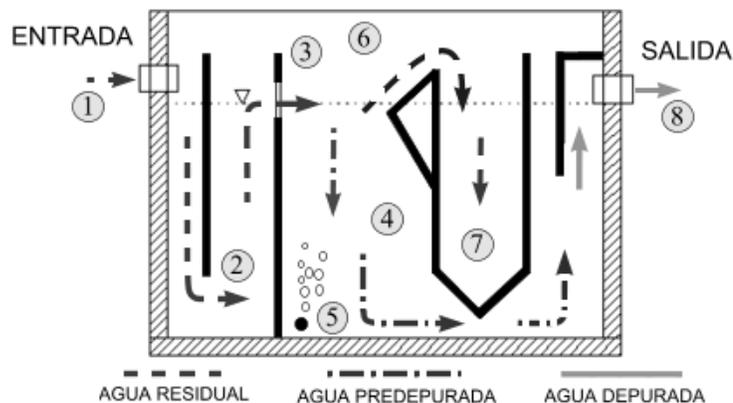
Los objetivos principales de las cribas son:

- Retener y evacuar desechos sólidos cuyo tamaño sea mayor a 20 milímetros.
- Evitar que desechos sólidos, por sus características y tamaño, interfieran con los procesos biológicos de tratamiento.

1.1.3.2 Desengrasadores

Los desengrasadores sirven para la separación de grasas en aguas residuales procedentes de cocinas, empresas hosteleras o de catering, establecimientos cárnicos, etc. La eliminación de grasas de aguas residuales reduce también la carga sustancial del agua residual. El desengrasador más común es el desengrasador de gravedad (figura 4), en el cual se efectúa la separación únicamente a base de las características físicas de las grasas (menor densidad que la del agua), que se hacen flotar en la superficie del agua residual para ser retenidas por la pared de retención y eliminadas manualmente. Si se usan desengrasadores de flotación, están en todo el volumen del agua residual que pasa por el separador. Las partículas de grasas se "recogen" mediante pequeñas burbujas de oxígeno, acumulándose en la superficie de la cual se quitan mecánicamente (Antošovský).

Figura 4. Esquema, desengrasador por gravedad



Fuente: ADOS Sekerka – Antošovský República Checa, Desengrasadores.

1. Entrada, 2. Depósito de decantación, 3. Pared de retención (rectificación), 4. Cámara de flotación, 5. Aireación, 6. Área para la eliminación de las partículas de grasas, 7. Depósito para las grasas retenidas, 8. Salida.

1.1.3.3 Desarenadores

Tienen por objeto separar del agua cruda la arena y partículas en suspensión gruesa, con el fin de evitar que se produzcan depósitos en las obras de conducción, proteger las bombas de la abrasión y evitar sobrecargas en los procesos posteriores de tratamiento. El desarenado (figura 5) se refiere normalmente a la remoción de las partículas superiores a 0.2 mm (Organización).

Figura 5. Deflectores de caudal – desarenadores

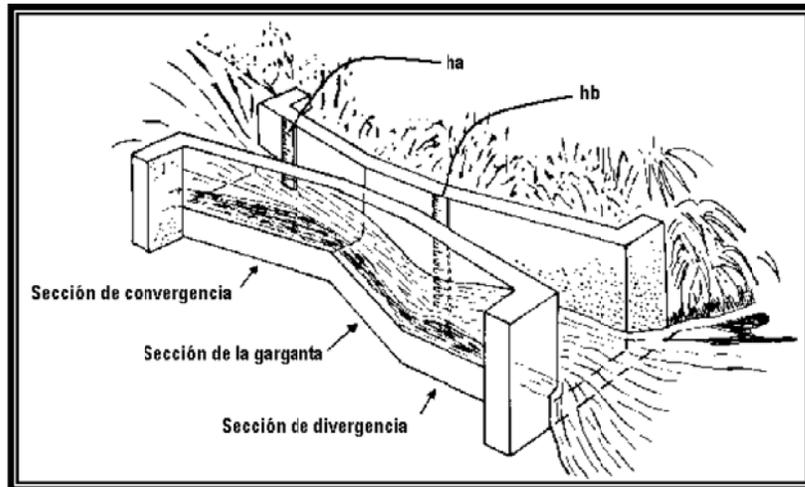


Fuente: Empresa municipal de alcantarillado y saneamiento de Ecuador, Estructura de tratamiento preliminar.

1.1.3.4 Medidor y repartidor de caudal

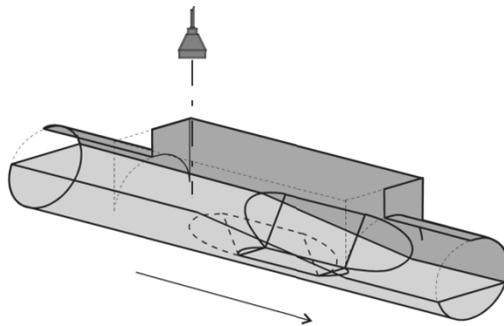
El medidor de caudal es el que debe estar ubicado después de las cribas y desarenadores, se permite que sea un canal abierto del tipo Parshall (figura 6) o Palmer Bowlus (figura 7).

Figura 6. Canal Parshall



Fuente: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua DES Ingenierías Arquitectura, UMSNH, Verificación experimental del funcionamiento de aforadores tipo Parshall.

Figura 7. Canal Palmer Bowlus



Fuente: MJK automatización A/S, Caudalímetro en canal abierto.

Luego de la medición del caudal se procede a repartirlo, permitiendo así la distribución del caudal en varias partes. Lo más común en la repartición del caudal es la utilización de vertederos (figura 8). Los vertederos pueden ser de sección triangular, cuadrada, rectangular, trapezoidal, etc. Para dividir un caudal en dos partes requeridas se deben instalar dos vertederos, uno a la par del otro, y ajustar las alturas hasta lograr el caudal deseado en cada uno de los vertederos(Lomas W.R.).

Figura 8. Vertedero de sección trapezoidal



Fuente: Saul A.J., Lomax W.R., Laboratory work in hydraulics.

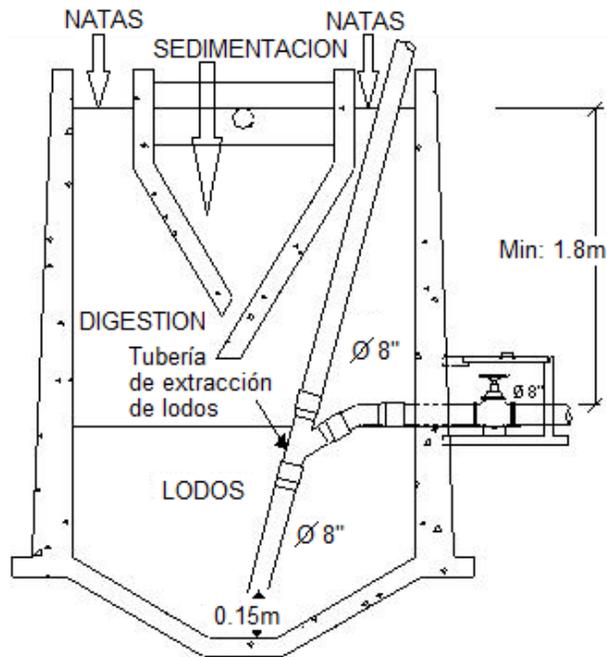
1.1.4 Tratamiento primario

Tratamiento que tiene por objeto remover sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, para disminuir la carga del tratamiento secundario.

1.1.4.1 Tanques Imhoff

El tanque imhoff (figura 9) es una unidad de tratamiento primario cuya finalidad es la remoción de sólidos suspendidos. Para comunidades de 5000 habitantes o menos, los tanques imhoff ofrecen ventajas para el tratamiento de aguas residuales domésticas, ya que integran la sedimentación del agua y la digestión de los lodos sedimentados en la misma unidad, por ese motivo también se les llama tanques de doble cámara. Los tanques Imhoff tienen una operación muy simple y no requiere de partes mecánicas; sin embargo, para su uso concreto es necesario que las aguas residuales pasen por los procesos de tratamiento preliminar de cribado y remoción de arena(Organización panamericana de la salud).

Figura 9. Tanque Imhoff



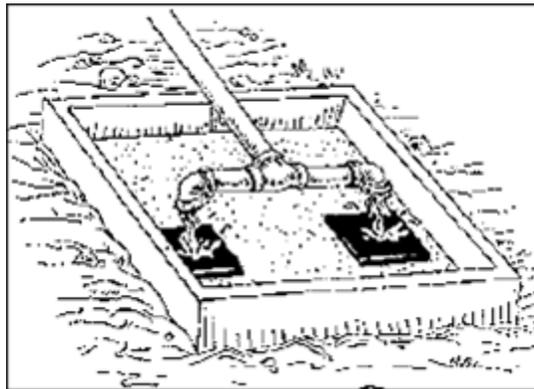
Fuente: Organización Panamericana de la Salud, Especificaciones técnicas para la construcción de tanque séptico, tanque Imhoff y laguna de estabilización. Pág. 18

El tanque Imhoff puede ser de forma rectangular o circular y se divide en tres compartimentos: cámara de sedimentación, cámara de digestión de lodos y área de ventilación y acumulación de natas.

Durante la operación, las aguas residuales fluyen a través de la cámara de sedimentación, donde se remueven gran parte de los sólidos sedimentables, estos resbalan por las paredes inclinadas del fondo de la cámara de sedimentación pasando a la cámara de digestión a través de la ranura con traslape existente en el fondo del sedimentador. El traslape tiene la función de impedir que los gases o partículas suspendidas de sólidos, producto de la digestión, interfieran en el proceso de la sedimentación. Los gases y partículas ascendentes, que inevitablemente se producen en el proceso de digestión, son desviados hacia la cámara de natas o área de ventilación.

Los lodos acumulados en el digestor se extraen periódicamente y se conducen a lechos de secado (figura 10), en donde el contenido de humedad se reduce por infiltración, después de lo cual se retiran y se dispone de ellos enterrándolos o pueden ser utilizados para mejoramiento de los suelos.

Figura 10. Lecho de secado

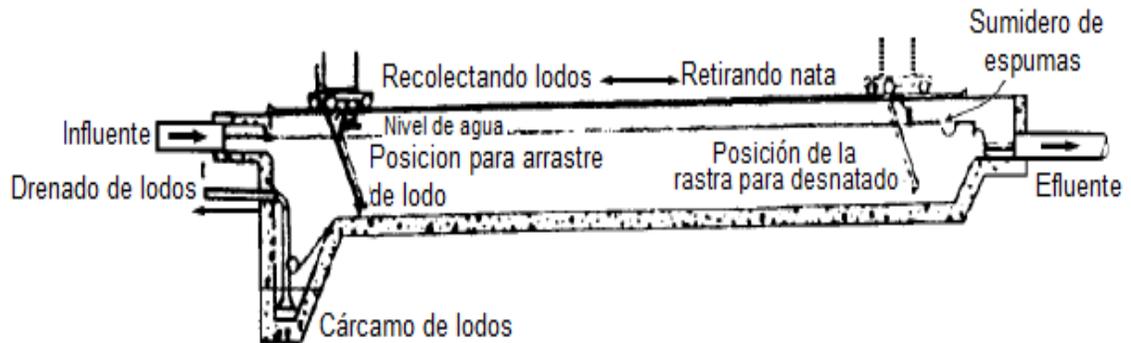


Fuente: Organización Panamericana de la Salud, Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización. Pág. 20

1.1.4.2 Tanques de sedimentación

La sedimentación primaria puede llevarse a cabo en tanques rectangulares alargados o en tanques circulares. En los tanques rectangulares la espuma se retira utilizando unas rastras de lodo (figura 11) que, de manera alternada, después de recorrer el tanque por el fondo, regresan a su punto de partida recorriendo la superficie del agua, lo que se aprovecha, como se dijo, para remover la espuma. El material flotante se desplaza de esta manera hasta un sitio donde se colecta, ubicado a cierta distancia hacia atrás del vertedor del efluente, y allí es retirado al pasar sobre un vertedor de espuma o por medio de una rastra transversal (Valdez y Vásquez).

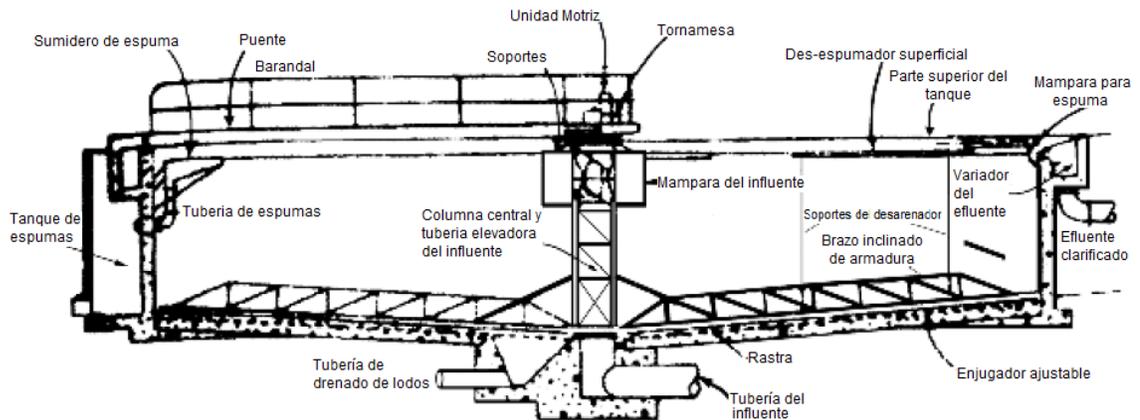
Figura 11. Tanque de sedimentación rectangular



Fuente: Enrique César, Valdez y Alba, Vásquez González, Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Pág. 41

Por su parte, los tanques circulares (figura 12) cuentan con un brazo desnatador que está unido a la rastra de lodos.

Figura 12. Tanque de sedimentación circular



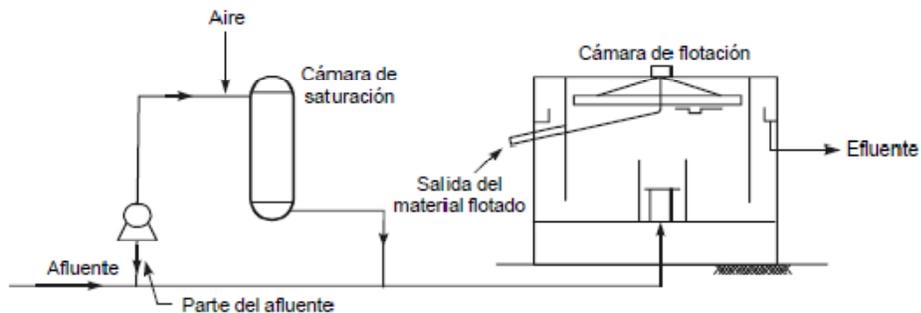
Fuente: Enrique César, Valdez y Alba, Vásquez González, Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales. Pág. 41

1.1.4.3 Tanques de flotación

En la flotación interviene la diferencia entre la masa volumétrica de los sólidos y la del líquido en que se encuentran en suspensión. Sin embargo, contrariamente a lo que ocurre en la decantación, este proceso de separación sólido-líquido únicamente se aplica a partículas que tienen una masa volumétrica real (flotación natural) o aparente (flotación provocada) inferior a la del líquido que la contiene.

En la flotación provocada (figura 13) se aprovecha la capacidad que tienen ciertas partículas sólidas o líquidas para unirse a burbujas de gas (generalmente, aire) y formar conjuntos partícula-gas menos densos que el líquido que constituye la fase dispersa (Zabel).

Figura 13. Sistema de flotación por aire disuelto



Fuente: De Vargas, Lidia, Flotación. Pág. 71

La resultante de las fuerzas (gravedad, empuje de Arquímedes, fuerza de resistencia) conduce a un desplazamiento ascendente de los conjuntos partícula-gas que se concentran en la superficie libre del líquido. Para que sea factible la flotación de partículas sólidas o líquidas (figura 13) más densas que el líquido, es preciso que la adherencia de las partículas a las burbujas de gas sea mayor que la tendencia a establecer un contacto entre las partículas y el líquido.

1.1.5 Tratamiento secundario

1.1.5.1 Lagunas de estabilización

Se le denomina de esta forma a todos los tipos de lagunas que describe a un estanque en el cual se descarga aguas residuales con el fin de estabilizar la materia orgánica y eliminar bacterias(Varón).

1.1.5.1.1 Lagunas anaeróbicas

Por lo general, estas unidades (lagunas anaeróbicas o anaerobias) tienen una profundidad de 2-5 m y reciben cargas orgánicas volumétricas mayores a 100 g DBO5/m³ d. Estas altas cargas orgánicas producen condiciones anaeróbicas estrictas (oxígeno disuelto ausente) en todo el volumen de la laguna. En términos generales, las lagunas anaeróbicas funcionan como tanques sépticos abiertos y trabajan extremadamente bien en climas calientes. Una laguna anaeróbica bien diseñada puede alcanzar remociones de DBO5 alrededor del 60% a temperaturas de 20 °C. Un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 1 día es suficiente para aguas residuales con una DBO5 de hasta 300 mg/l y temperaturas superiores a 20 °C. La remoción de materia orgánica en laguna anaerobia es gobernada por los mismos mecanismos que ocurren en cualquier reactor anaeróbico.

1.1.5.1.2 Lagunas aeradas

Las primeras experiencias con lagunas aeradas fueron llevadas a cabo en 1957 pero no fue sino hasta los primeros años de la década del 60 que las lagunas aeradas comenzaron a ganar aceptación.

Después del tratamiento preliminar las aguas residuales entran en las lagunas aeradas, las mismas que constituyen las primeras unidades de tratamiento biológico y sus funciones básicas son:

- Asimilar la materia orgánica soluble en un período de retención relativamente corto, pero suficiente para un porcentaje de reducción de la DBO del orden del 90%.
- Mantener condiciones aeróbicas, para la asimilación del material soluble en biomasa, permitiendo así la separación de sólidos y reducción de la carga orgánica hasta un nivel adecuado en las siguientes lagunas.
- Reducir el conteo bacteriano en la medida de su capacidad.

Los taludes de estas lagunas se recubren con hormigón lanzado con armadura metálica, con mezcla asfáltica en las juntas de las losetas para así evitar posibles infiltraciones, así como el crecimiento de vegetación. La impermeabilización del fondo de las lagunas se realiza en base a arcilla compactada.

1.1.5.1.3 Lagunas facultativas

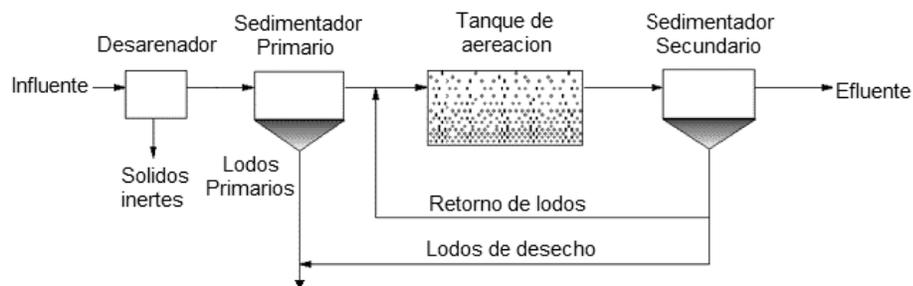
Estas lagunas pueden ser de dos tipos: lagunas facultativas primarias que reciben aguas residuales crudas y laguna facultativas secundarias que reciben aguas sedimentadas de la etapa primaria (usualmente el efluente de una laguna anaeróbica). Las lagunas facultativas son diseñadas para remoción de DBO5 con base en una baja carga orgánica superficial que permita el desarrollo de una población de algas activa. De esta forma, las algas generan el oxígeno requerido por las bacterias heterotróficas para remover la DBO5 soluble. Una población saludable de algas le confiere un color verde oscuro a la columna de agua. Las lagunas facultativas pueden tornarse ocasionalmente rojas o rosadas debido a la presencia de bacterias fotosintéticas púrpuras oxidantes del sulfuro.

1.1.5.2 Proceso de lodos activados

Un proceso de lodo activado es un tratamiento biológico en el cual se agita y airea una mezcla de agua de desecho y un lodo de microorganismos, y de la cual los sólidos se remueven y recirculan posteriormente al proceso de aireación, según se requiera. La aireación puede impedir que las aguas de desecho se vuelvan sépticas en uno de los tanques subsiguientes de sedimentación. Pero si las aguas de desecho se mezclan con lodo previamente aerado y luego se vuelve a aerar, como se hace con los métodos de tratamiento de aguas de desecho utilizando lodo activado, la efectividad de la aireación se mejora mucho.

En una sistema convencional de lodo activado (figura 14), las aguas de desecho que entran pasan primero por un tanque de sedimentación primaria. Se añade lodo activado al efluente del tanque, generalmente en la relación de 1 parte de lodo por 3 o 4 partes de aguas negras decantadas, en volumen, y la mezcla pasa a un tanque de aireación. En el tanque, el aire atmosférico se mezcla con el líquido por agitación mecánica o se difunde aire comprimido dentro del fluido mediante diversos dispositivos; placas filtrantes, tubos de filtro, eyectores y chorros (College).

Figura 14. Componentes de un sistema básico de lodos activados



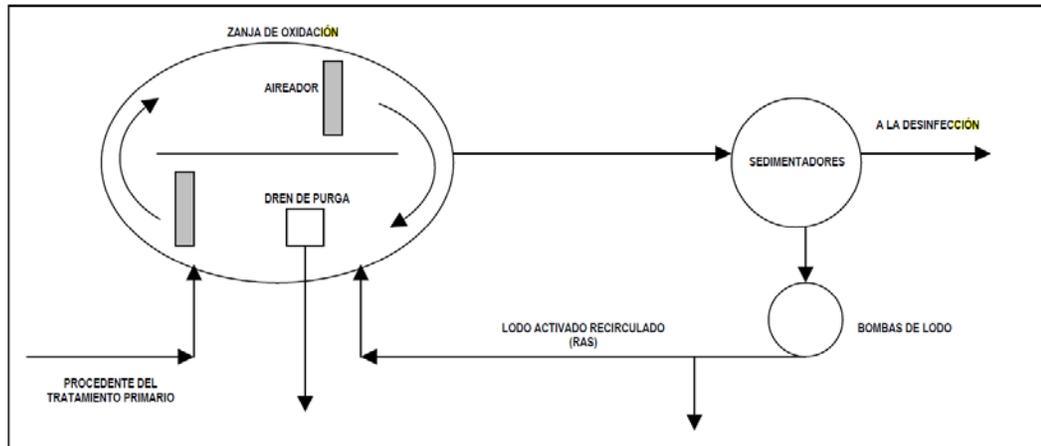
Fuente: Technical Learning College, Activated sludge. Pág. 68

Con cualquiera de los métodos de mezcla de aire y líquido, se pone a las aguas negras en íntimo contacto con los microorganismos contenidos en el lodo. En los primeros 15 a 45 minutos, el lodo absorbe los sólidos en suspensión y los coloides. Según se absorbe la materia orgánica, tiene lugar la oxidación biológica. Los organismos presentes en el lodo descomponen los compuestos de nitrógeno orgánico y destruyen los carbohidratos. El proceso avanza rápidamente al principio y luego decae gradualmente en las próximas 2 a 5 horas. Después continúa con un ritmo casi uniforme durante varias horas. En general el periodo de aeración dura de 6 a 8 horas más. El efluente del tanque de aireación pasa a un tanque de sedimentación secundaria, donde se retiene el fluido, en general de 1 1/2 a dos horas para decantar el lodo. Una parte del lodo del tanque de sedimentación final se regresa para la recirculación con las aguas negras de entrada. No debe retenerse el lodo en el tanque.

1.1.5.2.1 Zanjas de oxidación

Una zanja de oxidación es una modificación del sistema biológico de tratamiento con lodos activados que utiliza un tiempo extenso de retención de sólidos (*solids retention times*, SRT) para la remoción de compuestos orgánicos biodegradables. Los sistemas de tratamiento típicos con zanjas de oxidación (figura 15) tienen una configuración de anillo, óvalo o tanque en forma de herradura dentro de los cuales se encuentran uno o múltiples canales. Por esta razón las zanjas de oxidación se denominan comúnmente como *reactores de tipo carrusel*. Aireadores montados en forma vertical u horizontal proporcionan la circulación del agua, la transferencia de oxígeno y la aireación en las zanjas. El agua que fluye por las zanjas de oxidación es aireada y mezclada con lodo recirculado del sedimentador secundario(U. S. Agency).

Figura 15. Sistema típico de lodos activados con zanjas de oxidación



Fuente: United States Environmental Protection Agency, Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, Zanjas de oxidación.

Los tratamientos primarios tales como rejillas y desarenadores normalmente preceden a las zanjas de oxidación. Algunas veces se incluye sedimentación primaria antes de las zanjas, pero este no es el diseño típico. Se pueden necesitar filtros terciarios después de la sedimentación dependiendo de los requisitos de descarga del efluente. La desinfección es requerida y puede necesitarse re-aireación antes de la descarga final.

1.1.5.3 Filtros percoladores

Denominados también como filtros biológicos (figura 16) o filtros de lecho bacteriano de contacto. El proceso en la filtración biológica puede definirse como un sistema de lechos de distintos materiales sobre los cuales se vierten de una manera continua o intermitente las aguas residuales. Al percolar por el lecho de material granular las aguas residuales entran en contacto con las películas de limo biológico que crecen sobre la superficie del material.

En el lecho se mantienen condiciones aeróbicas mediante el flujo de aire a través del lecho, el cual es inducido por los gradientes de temperatura existentes entre temperatura del aire en el lecho y la temperatura ambiental(Montoya).

Figura 16. Filtro biológico



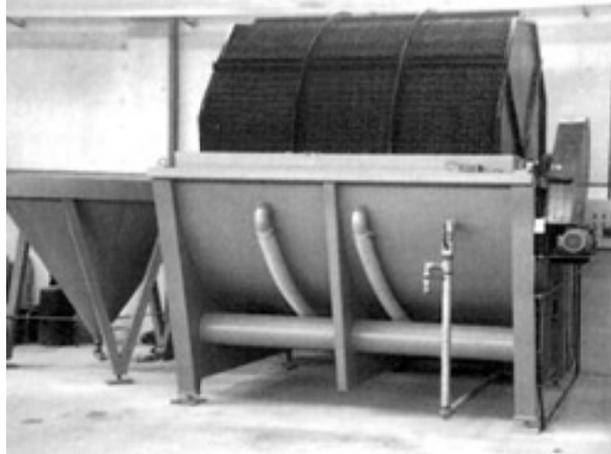
Fuente: Planta piloto ERIS Guatemala.

A medida que las aguas residuales y el aire fluyen a través del lecho, el limo biológico hace uso de ellos para obtener de los compuestos orgánicos la energía necesaria para sus procesos vivientes, material y energía para sintetizar nueva masa celular, en oxígeno necesario para las reacciones de oxidación bioquímica y los nutrientes indispensables para la síntesis celular.

1.1.5.4 Módulos Rotatorios de contacto

También conocidos como Contactores Biológicos Rotativos (CBR) o también Reactores Biológicos Rotativos de Contacto (del inglés RBC, *Rotating Biological Contactor*). Un CBR (figura 17) es un sistema de tratamiento de depuración de aguas residuales que consiste en baterías de discos (discos colocados en paralelo para formar un cilindro) de diversos materiales que se van sumergiendo secuencial y parcialmente (un 40 % del diámetro) por medio de la rotación sobre su propio eje.

Figura 17. Contactor biológico rotativo



Fuente: INTERTRAMP S.L. Tratamiento y depuración.

Debido a la rotación se origina una fase de inmersión en contacto directo con el líquido y una de aeración (fase emergida). En la primera fase (inmersión) la colonia bacteriana procedente del agua residual se adhiere a la superficie del cilindro, mientras que en la segunda (aeración) absorbe el oxígeno del aire, necesario para que se dé el efecto depurador del sistema. A estos sistemas se les conoce habitualmente por Biodiscos.

Los biodiscos giran a baja velocidad (específicamente a una velocidad menor de 5 rpm) alrededor de su eje perpendicular a todos ellos, se les consideran un sistema de biomasa fija, pues los microorganismos responsables de la depuración trabajan (mayoritariamente) adheridos a los discos que están fabricados en diversos materiales plásticos que los hacen fuertes y ligeros (Cisneros y Miralles).

1.1.6 Otros tipos de tratamiento

1.1.6.1 Tratamientos con plantas acuáticas

El poder de purificación de las plantas acuáticas en el tratamiento de las aguas residuales, ha sido demostrado a través de experiencias prácticas (figura 18) en diversos países con el propósito de lograr un ambiente limpio y equilibrado.

Figura 18. Estanque de depuración de plantas acuáticas



Fuente: Defensas del Caribe C.A. Sistema de tratamiento con plantas acuáticas.

Utilizando una energía limpia como lo es la solar, las plantas acuáticas producen oxígeno a través del proceso de fotosíntesis. Una parte de ese oxígeno es enviado al agua, lo que permite el desarrollo de microorganismos aerobios activos que realizan el proceso de digestión de las materias orgánicas, la oxidación de las sustancias con mal olor y la destrucción de patógenos. Las sales minerales que resultan de la digestión de la materia orgánica, sirven de fertilizante para las plantas y favorecen su rápido crecimiento(C.A.).

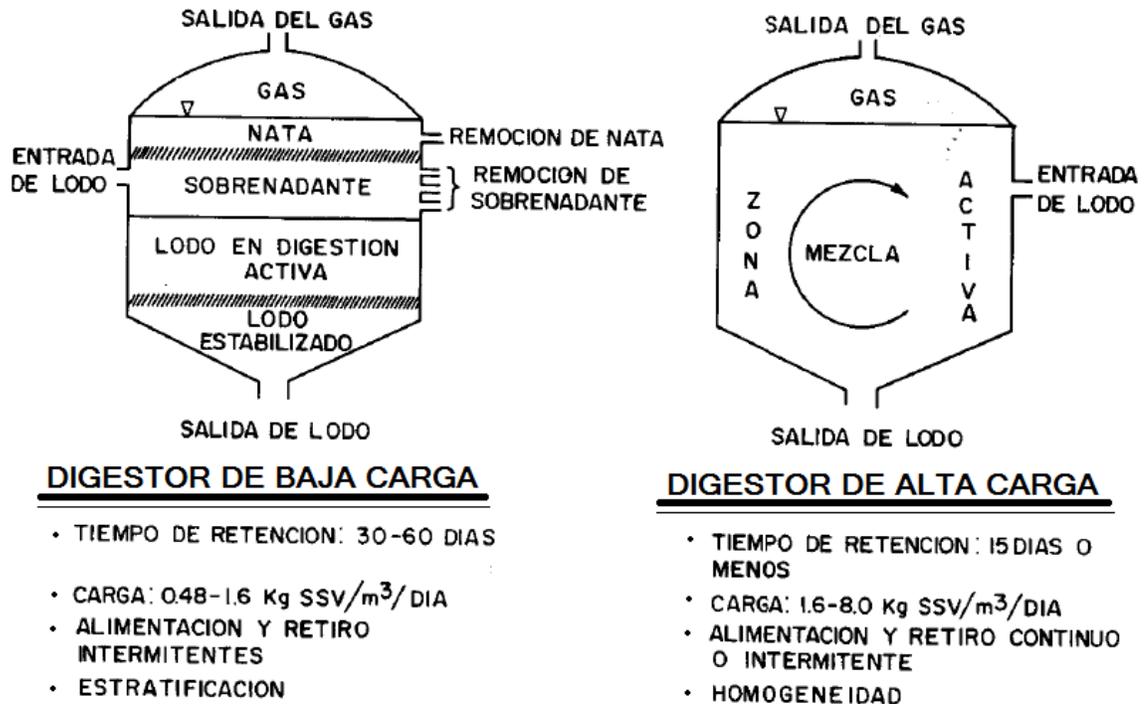
1.1.7 Tratamiento de lodos

1.1.7.1 Digestión anaeróbica

Durante los últimos cincuenta años se ha ganado una gran cantidad de conocimientos sobre el proceso de digestión anaeróbica. Estos conocimientos han sido obtenidos no sólo de investigaciones de laboratorios con digestores de botella, sino también de records de operación de digestores en plantas de tratamiento. El propósito principal es la transformación del lodo a un estado estable en el cual no esté sujeto a descomposición biológica posterior, que no cree situaciones peligrosas o molestas al disponerse en el medio ambiente y que pueda ser deshidratado y secado rápidamente. En el proceso de digestión anaeróbica, la materia orgánica contenida en la mezcla de lodos primarios y secundarios se convierte en metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) principalmente.

El proceso se lleva a cabo en un reactor completamente cerrado. Los lodos se introducen en el reactor de forma continua o intermitente, y permanecen dentro de estos tanques durante períodos de tiempo considerables. El lodo estabilizado que se extrae del proceso tiene un bajo contenido de materia orgánica y de microorganismos patógenos vivos. Los tipos de digestores más empleados son los de alta y baja carga (figura 19). En el proceso de digestión de baja carga, no se suele mezclar el contenido del digestor, y los tiempos de retención varían entre 30 y 60 días.

Figura 19. Digestores de alta y baja carga



Fuente: Fabián, Yáñez, Digestión anaeróbica de lodos. Pág. 25

En los procesos de digestión de alta carga el contenido del digestor se calienta y mezcla completamente. El lodo se mezcla mediante recirculación de gas, mezcladores mecánicos, bombeo o mezcladores con tubos de aspiración, y se calienta para optimizar la velocidad de digestión. El tiempo de retención generalmente es menor a 15 días(Yáñez).

1.1.7.2 Lagunas de lodos

Las lagunas de lodos son otra forma de estabilizar los lodos primarios y secundarios provenientes de una planta de tratamiento. Se entiende por estabilización de lodos a, la reducción de la presencia de patógenos, la eliminación de olores desagradables y la reducción o eliminación de su potencial de putrefacción.

El enlagueamiento es hasta hoy el método más popular de disposición de lodo, no sólo en países en desarrollo, sino también en los Estados Unidos, Inglaterra, Alemania, Francia y otros países desarrollados. Es empleado con gran frecuencia para lodos industriales. Las lagunas pueden ser empleadas como una fase intermediaria del proceso de tratamiento del lodo o como disposición final. Debido al hecho de que las lagunas son un proceso simple y económico, su uso es muy adecuado para el tratamiento en países en desarrollo. Las lagunas pueden ser clasificadas en tres tipos: 1) Lagunas para espesamiento, almacenaje y digestión. 2) Lagunas de secado. 3) Lagunas de depósito permanente. El primer tipo es destinado a substituir temporalmente los equipos de desaguado, almacenaje o digestión por ocasión de sobrecargas, accidentes o reforma de unidades de la planta; pueden también ser utilizadas con ventaja en lugar de esas unidades convencionales, las cuales desde el diseño ya no serían previstas o aplazadas para una oportunidad futura.

Cuando son empleadas como sustituto, deben ser previstas unidades múltiples y dispositivos para dejar trasbordar el líquido sobrenadante y reconducirlo a la entrada de la planta. La digestión en lagunas puede presentar problemas graves de olores insoportables y constituir criaderos de moscas. Terminada la digestión el lodo puede ser transferido para lechos de secado o dejado en la propia laguna.

Cuando las lagunas son empleadas para el secado en lugar de lechos de arena, éstas pueden ser vaciadas y rellenadas en intervalos de tiempo bien largos, a veces de varios años. El lodo posiblemente no seca hasta menos del 70% de humedad pero en ese estado puede ser removido por equipos de terraplén. Removido el contenido, este lodo seco puede ser empleado en actividades agrícolas o ser transportado más lejos.

Las lagunas o los rellenos del que el lodo no es sacado nunca, con capacidad para 5, 10 o más años, constituyen uno de los procesos más económicos para la disposición final del lodo. Muchas plantas, grandes y pequeñas, emplean esa técnica. Obviamente son requeridas áreas extensas de bajo costo para justificar esta práctica en comparación con los procesos convencionales(Yáñez).

1.1.7.3 Aplicación de lodos sobre el terreno

Cuando se habla de la disposición de lodos en el terreno para uso agrícola se conoce en rigor que el lodo solo tiene propiedades fertilizantes cuando es aplicado sobre el suelo en estado fresco, es decir sin digestión previa, porque de otra manera pierde una gran cantidad de nutrientes, especialmente nitrógeno. Esta práctica sólo es empleada excepcionalmente, debido a problemas sanitarios y estéticos.

El lodo digerido, sin embargo, tiene propiedades de acondicionamiento en el suelo, haciendo que quede apropiado para el desarrollo de microorganismos y macro-organismos útiles para el crecimiento de las especies vegetales. Aumenta la permeabilidad de suelos excesivamente arcillosos y puede ser empleado para recuperar tierras arenosas, áridas o desérticas. Tiene también un débil efecto fertilizante(Hess).

1.1.7.4 Remoción de lodos de lagunas de estabilización

La geometría de las lagunas de estabilización es de gran importancia ya que de ella depende el grado de dispersión del flujo. Es de interés para el investigador y el operador tomar en cuenta la acumulación de lodos, la frecuencia de su remoción y el efecto de los mismos en el comportamiento de los reactores.

Las lagunas de estabilización son sedimentadores sobredimensionados. Por consiguiente, en las lagunas primarias es retenido casi el 100% de los sólidos sedimentables. En las lagunas de estabilización no se lleva a cabo un proceso de floculación biológica como el que ocurre con los lodos activados y los biofiltros. Por consiguiente no ocurre una sedimentación secundaria. Esto hace que la acumulación de lodos en lagunas con grado superior al primario sea despreciable para fines prácticos.

Deberá investigarse para cada área geográfica en que se esté trabajando, el volumen de lodo acumulado en las lagunas primarias. Como referencia se indica que este volumen está entre 150 y 200 l/hab x año de acumulación de lodo húmedo. Cuando llega el momento de remover los lodos (de acuerdo con lo previsto en el diseño, y tomando en cuenta que debe haber más de una laguna primaria) se procede a drenar y secar la laguna que se va a limpiar, con lo cual el volumen seco del lodo llega a ser menor (del orden de 50 l/hab x año). Para esta última operación debe aprovecharse la estación seca o estiaje (Sáenz).

1.1.7.5 Lechos de secado

El proceso de deshidratación más antiguo y más sencillo es el que usa lechos rectangulares poco profundos con fondos porosos arriba de una red de drenaje subterráneo. Los lechos se dividen en áreas convencionales con paredes bajas. El lodo se pasa a los lechos hasta que la profundidad es de 125 a 250 mm; la deshidratación tiene lugar debido al drenaje de las capas inferiores y a la evaporación de la superficie bajo la acción del sol y el viento. La pasta se agrieta a medida que se seca, lo que permite mayor evaporación y el escape del agua de lluvia de la superficie. En buenas condiciones, el contenido de sólidos que se obtiene es casi del 25% en unas cuantas semanas; en climas templados un período más común es de 2 meses.

Se obtienen mejores resultados con la aplicación frecuente de capas de lodos poco profundas e intervalos más largos. La remoción del lodo seco se hace manualmente en plantas pequeñas pero en otros lados se tiene que instalar una planta mecánica para el levantamiento de los lodos. Según datos recabados, el terreno que se requiere para el lodo de agua residual es 0,25 m cuadrados por persona. Este gran requerimiento hace difícil que los lechos de secado sean factibles a menos que se disponga de terreno a bajo costo. En muchas circunstancias se utiliza alguna forma de deshidratado mecánico, para el cual las necesidades de terreno son mínimas y cuyo rendimiento no es afectado por el clima(S.A.).

2. NORMAS DE DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN GUATEMALA

Las disposiciones presentadas en este capítulo fueron establecidas por la Organización Panamericana de la Salud, Programa de desarrollo tecnológico en el campo del tratamiento de aguas residuales en Guatemala y representan una síntesis del documento denominado “Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, Borrador para discusión” (Yáñez Cossio).

2.1 Normas para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales

2.1.1 Objeto

El objetivo principal de estas normas es proporcionar un conjunto de criterios básicos de diseño para el desarrollo de proyectos de tratamiento de aguas residuales a los niveles preliminar, básico y definitivo. La población objeto de este documento es tanto el profesional de una entidad que tiene que desarrollar términos de referencia para la contratación de estudios y fiscalizar el desarrollo de los mismos, como el consultor a quien se ha encargado la conducción de dichos trabajos.

2.1.2 Alcance

Las presentes normas están relacionadas con los procesos convencionales y facilidades que conforman una planta de tratamiento de aguas residuales, tanto para tratamiento de aguas residuales domésticas como industriales, previa a su descarga al cuerpo receptor.

En el caso de desechos líquidos industriales se dan disposiciones que deben cumplirse antes de su descarga al sistema de alcantarillado sanitario, para tratamiento conjunto. Se dan disposiciones específicas para el tratamiento no convencional con plantas acuáticas. No se dan disposiciones para el caso de tratamientos terciarios y avanzados. Se excluyen disposiciones para diseño de interceptores y emisarios subfluviales y submarinos.

2.1.3 Disposiciones específicas para diseños definitivos

2.1.3.1 Aspectos generales

En ningún caso se diseñará la descarga de desechos crudos a un cuerpo receptor. El tratamiento mínimo que deberán recibir las aguas residuales domésticas antes de su descarga a ríos es lagunas de estabilización y en caso de ser más económico, tratamiento primario. En el caso de ciudades cuyo sistema de intercepción de aguas residuales tiene reboses del alcantarillado combinado, el diseño del sistema de tratamiento deberá ser sujeto de un cuidadoso análisis para justificar el dimensionamiento de los procesos de la planta para condiciones por encima del promedio, sin embargo, el caudal de diseño de las obras de llegada y tratamientos preliminares será el máximo horario.

Para el diseño definitivo de la planta de tratamiento se recogerá la siguiente información básica:

- Levantamiento topográfico detallado de la zona en donde se ubicarán las unidades de tratamiento.
- Estudios de desarrollo urbano y/o agrícola que puedan existir en la zona escogida para el tratamiento.

- Datos geológicos y geotécnicos necesarios para el diseño estructural y de las unidades, incluyendo datos sobre el nivel freático.
- Datos hidrológicos del cuerpo receptor, incluyendo niveles máximos de inundación, para posibles obras de protección.
- Datos climáticos de la zona.
- Disponibilidad y confiabilidad del servicio de energía eléctrica.

El producto del diseño definitivo de una planta de tratamiento de aguas residuales consistirá en una serie de planos y documentos. El juego de planos del proyecto deberá contener por lo menos lo siguiente:

- Planimetría general de la obra, ubicación y planos de replanteo.
- Diseños hidráulico-satinarios de todos los procesos e interconexiones entre procesos, los cuales comprenden planos, perfiles y demás detalles constructivos.
- Planos estructurales, mecánicos, eléctricos y arquitectónicos.
- Planos de obras generales como: obras de protección, caminos, arreglos interiores, etc.

Los documentos a presentarse comprenden:

- Memoria técnica del proyecto, la misma que debe incluir el dimensionamiento de los procesos de tratamiento de la planta, el presupuesto referencial y fórmula de reajuste de precios.
- Las especificaciones técnicas para la construcción.
- La presentación de un manual preliminar de operación y mantenimiento será obligatoria para las plantas convencionales que requieran operadores calificados.

2.1.3.2 Obras de llegada

Las obras de llegada a la planta de tratamiento son el conjunto de facilidades ubicadas entre el punto de llegada del interceptor y los procesos de tratamiento preliminar. En términos generales dichas obras deben dimensionarse para el caudal máximo instantáneo del interceptor y comprobarse para que no exista septicidad (períodos de retención mayores a 4 horas) en condiciones de funcionamiento correspondiente a los caudales mínimos del primer año de operación. Se deberá proyectar un cajón de llegada del interceptor con facilidades para romper la presión de llegada y uniformizar velocidades. Inmediatamente después del cajón de llegada se ubicarán las facilidades de bypass de la planta. La existencia, tamaño y condiciones de diseño de estas facilidades serán debidamente justificados teniendo en cuenta los tipos de procesos de la planta y sobre todo el funcionamiento en condiciones de mantenimiento correctivo de uno o varios de los procesos. Para lagunas de estabilización se podrán proyectar estas facilidades para los períodos de secado y remoción de lodos en las lagunas primarias, los mismos que tienen una duración no mayor a tres meses. El fondo del canal de las obras de llegada es generalmente de 10 a 15 cm. Más bajo que la solera del emisario.

2.1.3.3 Tratamientos preliminares

Las unidades de tratamiento preliminar que se pueden utilizar en el tratamiento de aguas residuales son: cribas medias, desarenadores, desengrasadores, medidor y repartidores de caudal. En estas unidades se evitará al máximo el uso de dispositivos mecanizados como trituradores y desintegradores.

2.1.3.3.1 Cribas

Las cribas tienen la finalidad de proteger las bombas y otras unidades de la planta contra el atascamiento por sólidos gruesos y material fibroso. Aún en los procesos de pretratamiento y de tratamiento más simples como las lagunas, son indispensables para impedir la obstrucción de vertederos, facilidades de división de flujo y la formación de natas, de modo que deben utilizarse en toda planta de tratamiento. Se diseñaran preferiblemente cribas de limpieza manual, cuando las cantidades de material cribado sean manejables por dos turnos de cuadrillas de dos operadores.

El diseño de los canales se efectuará para las condiciones de caudal máximo horario, pudiendo considerarse las siguientes alternativas: a) tres canales de igual dimensión, de los cuales dos tendrán cribas y el uno servirá de bypass en caso de emergencia o mantenimiento correctivo. En este caso dos de los tres canales tendrán la capacidad para conducir el máximo horario y b) dos canales con cribas dimensionados para el caudal máximo horario del final del período de diseño, pasando por una sola unidad. En este caso se asume que una de las unidades está fuera de operación.

Para el diseño de las cribas de rejillas se tomarán en cuenta ciertas recomendaciones tales como que el espaciamiento entre barras varía entre 25 y 50 mm. Para ciudades con un sistema inadecuado de recolección de basura se recomienda un espaciamiento no mayor a 25 mm debido a que se arroja una gran cantidad de basura al sistema de alcantarillado. Las dimensiones y espaciamiento entre barras se escogerán de modo que la velocidad del canal antes de y a través de las barras sea adecuada. La velocidad a través de las barras limpias debe mantenerse entre 0.4 y 0.75 m/s (basado en el caudal medio). Las velocidades deben determinarse para los caudales, mínimo, medio y máximo.

Determinadas las dimensiones se procederá a calcular la velocidad del canal antes de las barras, la misma que debe mantenerse entre 0.3 y 0.6 m/s, siendo 0.45 m/s un valor comúnmente utilizado. El ángulo de inclinación de las barras será entre 44 y 60 grados con respecto a la horizontal. En general la cantidad de material retenido en las cribas con aberturas del orden de 25mm está comprendido entre 0.015 y 0.030 litros por m³ de agua residual. Para otras aberturas se determinará la cantidad de material cribado de acuerdo con el cuadro que se indica a continuación:

Tabla I. Material cribado según la abertura de la criba

Abertura, mm	Cantidad, l/m ³
20	0.038
25	0.023
35	0.012
40	0.009

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 31

Para facilitar la instalación y el mantenimiento en las cribas de limpieza manual, las rejas serán instaladas en guías laterales con perfiles metálicos en “U”, descansando en el fondo sobre un perfil “L” o sobre un tope formado por una pequeña grada de hormigón.

2.1.3.3.2 Desengrasadores

Los desengrasadores son tanques de permanencia corta en los cuales se permite flotar a la superficie las partículas con gravedad específica menor que la del agua. Estos tanques se deben usar en los casos de presencia de desechos industriales con grandes cantidades de aceites y grasas.

Para la remoción de aceites animales o minerales (hidrocarburos), con una densidad de alrededor de 0.8 kg/l, se debe proveer una permanencia de 3 minutos en las pequeñas unidades (de hasta 10 l/s), de 4 minutos en las unidades de tamaño mediano (de 10 a 20 l/s) y de 5 minutos en las unidades de mayor tamaño. Los desengrasadores son generalmente de forma rectangular, con una relación largo/ancho de 1.8 a 1.0. En muchos casos se emplea el diseño con un ancho creciente hacia la salida y el fondo debe ser inclinado hacia la salida, para evitar la acumulación de arena.

2.1.3.3.3 Desarenadores

Se proyectarán desarenadores con la finalidad de proteger a las unidades que están aguas abajo contra la acumulación de arena, detritos y otros materiales inertes y también a las bombas contra desgaste. La inclusión de desarenadores es obligatoria y también a las bombas contra desgaste. A inclusión de desarenadores es obligatoria en las plantas que tienen sedimentadores y digestores. Para sistemas de lagunas de estabilización el uso de desarenadores es opcional y podrán no ser empleados, dejando espacio adicional para la acumulación de arena en el fondo. Los desarenadores serán preferiblemente de limpieza manual, sin incorporar mecanismos, excepto en el caso de desarenadores para instalaciones grandes. Según el mecanismo de remoción los desarenadores pueden ser a gravedad y de flujo helicoidal. Los primeros a su vez son de flujo horizontal y pueden ser diseñados como canales de forma alargada o de sección cuadrada. Los desarenadores de flujo horizontal serán diseñados para remover partículas de diámetro medio igual o superior a 0.2 mm. La relación entre el largo y la altura de agua debe ser como mínimo 25. La altura de agua y borde libre debe comprobarse para el caudal máximo horario.

El control de la velocidad para diferentes tirantes de agua se efectuará con la instalación de un vertedero a la salida del desarenador. Este puede ser del tipo proporcional (sutro), trapezoidal o una canaleta para medición de flujo (parshall o palmer bowlus). Se deben proveer dos unidades como mínimo. Los desarenadores de limpieza hidráulica no son recomendables a menos que se diseñen facilidades adicionales para el secado de la arena (estanques o lagunas).

2.1.3.3.4 Medidor y repartidores de caudal

Después de las cribas y desarenadores se debe incluir en forma obligatoria un medidor de caudal en canal abierto, pudiendo ser del tipo Parshall o Palmer Bowlus. El propósito de esta facilidad es proveer datos históricos sobre el caudal y sus variaciones, para desarrollar criterios de diseño para futuras ampliaciones y para evaluación del funcionamiento de los procesos de tratamiento. No se recomienda la instalación de vertederos, ya que se llenan de arena y obstruyen con material flotante. El medidor de caudal debe incluir facilidades para la instalación de un limnógrafo, recomendándose el de acción mecánica, con cuerda o mecanismo de relojería. Este mecanismo debe estar instalado en una caseta debidamente protegido. Las estructuras de repartición de caudal deben permitir la distribución de los caudales (considerando todas sus variaciones) en varias partes en el caso de tratamiento convencional y en proporción a las áreas de las unidades primarias, en el caso de lagunas de estabilización. En general estas facilidades no deben permitir la acumulación de arena. Los repartidores pueden ser de a) vertedero con contracciones o vertedero sumergido, para el caso de instalaciones permanentes. b) Cámara de repartición de entrada central hacia arriba, con vertederos circular o cuadrado. c) Repartidor con tabiques en régimen crítico, el mismo que se halla ubicado en canales.

2.1.3.4 Tratamiento primario

2.1.3.4.1 Generalidades

El objetivo del tratamiento primario es la remoción de sólidos orgánicos e inorgánicos sedimentables, para disminuir la carga del tratamiento biológico, en caso de ser necesario. Los sólidos removidos en el proceso tienen que ser procesados antes de su disposición final, siendo los más usados los procesos de digestión anaeróbica y lechos de secado. Los procesos de tratamiento primarios para las aguas residuales pueden ser: tanques Imhoff, tanques de sedimentación y tanques de flotación.

2.1.3.4.2 Tanques Imhoff

Son tanques de sedimentación primaria en los cuales se incorpora la digestión de lodos en el compartimiento localizado en la parte inferior. Para el diseño de la zona de sedimentación se considerará un volumen mínimo de 1500 l., utilizando los siguientes criterios:

- Se determinará el área requerida para el proceso con una carga superficial de $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$.
- El período de retención nominal será entre 1 a 1.5 horas. Del producto de la carga superficial y el período de retención se obtendrá la profundidad.
- Alternativamente se dimensionará la cámara de decantación con una tasa de 30 litros por habitante.
- El fondo del tanque será de sección transversal en forma de V y la pendiente de los lados, hacia la arista central será del 67% al 80%.
- En la arista central se dejará una abertura para el paso de los sólidos de 0.15 a 0.20 m.
- El borde libre será entre 0.30 a 0.60 m.

Para el diseño del compartimiento de almacenamiento y digestión de lodos (zona de digestión) se considerará un volumen mínimo de 3000 l., utilizando los siguientes criterios:

- El compartimiento será dimensionado para almacenar lodos durante un período de 60 días, al cabo del cual se considera completa la digestión. Para el efecto se determinará la cantidad de sólidos en suspensión removida, en forma similar que para un sedimentador primario. El volumen se determinará considerando la destrucción del 50% de sólidos volátiles, con una densidad de 1.05kg/l y un contenido promedio de sólidos del 12.5% (al peso).
- Alternativamente se determinará el volumen del compartimiento de lodos considerando un espacio de 60 litros por habitante.
- El fondo del compartimiento tendrá la forma de un tronco de pirámide, cuyas paredes tendrán una inclinación de 30 a 45 grados con respecto a la horizontal.

Para el diseño de la superficie libre entre las paredes del digestor y las del sedimentador (zona de espumas) se considerará un volumen mínimo de 1500 l., usando los siguientes criterios:

- El espaciamiento libre será de 0.60 m como mínimo.
- La superficie libre total será por lo menos 20% y preferiblemente 30% del área total del compartimiento de digestión.
- Alternativamente se determinará el volumen de la zona de espumas usando una tasa de 30 litros por habitante.

Las facilidades para remoción de lodos digeridos deben ser diseñadas en forma similar que para sedimentadores primarios, considerando que los lodos son retirados para secado en forma intermitente. Para el efecto se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El diámetro mínimo de las tuberías de remoción de lodos será de 20 cm.
- La tubería de remoción de lodos debe estar 15 cm sobre el fondo.
- Para remoción hidráulica del lodo se requiere por lo menos una carga hidrostática de 1.5m.

Para dimensionamiento de tanques Imhoff circulares, pueden considerarse las siguientes recomendaciones en lo que tienen relación con el diámetro:

Tabla II. Recomendaciones para dimensionamiento de tanques Imhoff

Población contribuyente (hab)	Diámetro (m)
250	2.5 - 3.5
500	3.0 - 4.0
750	3.5 - 4.5
1000	4.0 - 5.0
1500	5.0 - 6.0
2000	6.0 - 7.0
2500	7.0 - 8.0

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 34

2.1.3.4.3 Tanques de sedimentación

Los tanques de sedimentación pequeños deben ser proyectados sin equipos mecánicos. La forma de ellos puede ser rectangular (con varias tolvas de lodos) y circular o cuadrado (con un diámetro máximo de 3.6 m y una tolva de lodos central, como en el caso de los sedimentadores tipo Dormund).

En estos casos la inclinación de las paredes de las tolvas de lodos será de por lo menos 60 grados con respecto a la horizontal. La remoción de lodos es por lo general hidrostática y no requiere de equipos. Los parámetros de diseño son similares a los de sedimentadores con equipos. Los parámetros de diseño de tanques de sedimentación primaria y sus eficiencias deben idealmente ser determinados experimentalmente. Cuando se diseñen tanques convencionales de sedimentación primaria sin datos experimentales se utilizarán los siguientes criterios de diseño:

- Los canales de repartición y entrada a los tanques deben ser diseñados para el caudal máximo horario.
- Los requisitos de área deben determinarse usando cargas superficiales entre 30 y 60 m²/d basado en el caudal medio de diseño, lo cual corresponde a una velocidad de sedimentación de 1.25 a 2.5 m/h.
- El período de retención nominal será entre 1.5 a 2.5 horas (recomendable <2 horas), basado en el caudal medio de diseño.
- La profundidad se obtiene del producto de los dos parámetros antes indicados y debe estar entre 3 y 3.5 m. (recomendable 3m.).
- La relación largo/ancho debe estar entre 3 y 10 (recomendable 4) y la relación largo/profundidad debe ser igual o menor que 30.
- La carga hidráulica en los vertederos será de 125 a 500 m³/d por metro lineal (recomendable 250), basado en el caudal de diseño.
- Cuando no se disponga de datos experimentales, se usarán los criterios de la siguiente tabla para determinar las eficiencias de remoción del proceso:

Tabla III. Criterios para eficiencias de remoción en tanques de sedimentación

Periodo de retención nominal, h.	Porcentajes de remoción recomendados			
	DBO 100-200 mg/l		DBO 200-300 mg/l	
	DBO	SS*	DBO	SS*
0.5	16	32	19	35
1.0	23	45	26	50
1.5	30	50	32	56
2.0	33	53	36	60
3.0	37	58	40	64
4.0	40	60	42	66
6.0	41	61	43	68

* SS= Sólidos en suspensión totales.

Fuente: Fabián Yánez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 35

El volumen de lodos primarios debe calcularse para las condiciones de operación de cada cinco años y para el final del período de diseño (con el caudal medio de diseño), con las remociones de sólidos del proceso y los siguientes datos:

Tabla IV. Datos para el cálculo del volumen de lodos primarios

Tipo de lodo primario	Gravedad específica	Conc. de sólidos %	
		Rango	Recomendado
Con alcantarillado sanitario	1.03	4 - 12	6.0
Con alcantarillado combinado	1.05	4 - 12	6.5
Con lodo activado de exceso	1.03	3 - 10	4.0

Fuente: Fabián Yánez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 35

El volumen de la tolva de lodos se debe comprobar para almacenamiento de los lodos durante el tiempo de fuera de funcionamiento del ciclo. La velocidad en la tubería de salida del lodo primario debe ser por lo menos 0.9 m/s.

El mecanismo de barrido de lodos de tanques rectangulares tendrá una velocidad entre 0.6 y 1.2 m/min., para evitar la formación de corrientes mezcladoras. Las características de tanques circulares de sedimentación serán las siguientes: a) Profundidad: de 3 a 5 m. b) Diámetro: de 3.6 a 60 m (recomendable de 12 a 45 m). c) Pendiente de fondo: de 6% a 16% (recomendable 8%).

El mecanismo de barrido de lodos de tanques circulares tendrá una velocidad de rotación de 1 a 3 revoluciones por hora, siendo 2 un valor recomendable. Se deberá diseñar un sistema de recolección de natas, las que deben recogerse en un pozo especial, para transporte desde allí hasta el proceso de digestión. La pendiente mínima de la tolva de lodos será 1.7 vertical a 1.0 horizontal. En el caso de sedimentadores rectangulares, cuando la tolva sea demasiado ancha, se deberá proveer un barredor transversal desde el extremo hasta el punto de extracción de lodos.

2.1.3.4.4 Tanques de flotación

El proceso de flotación se usa en aguas residuales para remover partículas finas en suspensión y de baja densidad, usando el aire como agente de flotación. Una vez que los sólidos han sido elevados a la superficie del líquido, son removidos en una operación de desnatado. El proceso requiere un mayor grado de mecanización que aquel de los tanques convencionales de sedimentación, por lo cual su uso será restringido a casos especiales (principalmente para desechos industriales) en los cuales el proyectista haya justificado ante la Entidad Responsable (a determinarse) la selección de este sistema.

2.1.3.5 Tratamiento secundario

2.1.3.5.1 Lagunas de estabilización

Se entiende por lagunas de estabilización a estanques construidos de tierra, de profundidad reducida (<5m), diseñados para el tratamiento de aguas residuales, por medio de la interacción de la biomasa (algas, bacterias, protozoarios, etc.), la materia orgánica del desecho y otros procesos naturales (sub modelos hidráulicos y factores físicos, químicos y meteorológicos). La finalidad de este proceso es de entregar un efluente de características múltiples establecidas (DBO, DQO, OD, SS, algas, nutrientes, parásitos, enterobacterias, coliformes, etc.). En los cuatro títulos que siguen se dan normas para los tipos de lagunas indicadas considerándolas como unidades independientes.

2.1.3.5.1.1 Lagunas anaeróbicas

Las lagunas anaeróbicas son generalmente empleadas como primera unidad de un sistema, en casos en donde la disponibilidad de terreno es limitada o para el tratamiento de desechos domésticos con altas concentraciones y desechos industriales, en cuyo caso pueden darse varias unidades anaeróbicas en serie. Debido a las altas cargas que soportan este tipo de unidades de tratamiento y a las reducidas eficiencias, se hace necesario el tratamiento posterior, generalmente por unidades de lagunas facultativas en serie, para alcanzar el grado de tratamiento requerido. Para este caso se debe comprobar que la laguna facultativa secundaria no tenga una carga orgánica por encima del límite (ver lagunas facultativas). No existe un criterio generalizado para dimensionamiento de lagunas anaeróbicas, debido a que los criterios de diseño varían considerablemente, por lo cual el proyectista está en libertad de seleccionar uno de los métodos o correlaciones existentes.

Alternativamente se pueden usar las siguientes recomendaciones para temperaturas de alrededor de 20 grados centígrados:

- Carga orgánica volumétrica: 300 g DBO/(m³d), si el factor de olores no es de consideración se podrá incrementar a 400 g DBO/(m³d).
- Período de retención nominal alrededor de 5 días.
- Profundidad entre 2.5 y 5 m.
- Eficiencia de remoción de DBO: 50%

Se deberán diseñar un número mínimo de dos unidades en paralelo para permitir la operación en una de las unidades mientras se remueve el lodo de la otra. La acumulación de lodo se calculará con un aporte de 40 l/(Hab.año), determinándose el año de limpieza de las lagunas, al alcanzar el 50% del tirante de agua.

2.1.3.5.1.2 Lagunas aeradas

Las lagunas aeradas son generalmente empleadas como primera unidad de un sistema, en casos en donde la disponibilidad de terreno es limitada o para el tratamiento de desechos domésticos con altas concentraciones y desechos industriales. Estas lagunas son muy empleadas en climas fríos. Se distinguen los siguientes tipos de lagunas aeradas: Lagunas aeradas de mezcla completa: las mismas que mantienen la biomasa en suspensión, con una alta densidad de energía instalada (>15 W/m³). Son consideradas como un proceso incipiente de lodos activados sin separación y recirculación de lodos y la presencia de algas no es aparente. En este tipo de lagunas la profundidad varía entre 3 y 5 m. y el período de retención entre 2 y 7 días. Para estas unidades es recomendable el uso de aeradores de baja velocidad de rotación. Este es el único caso de laguna aerada para el cual existe una metodología de dimensionamiento. El uso de lagunas aeradas en serie no es recomendado.

Lagunas aeradas facultativas: las cuales mantienen la biomasa en suspensión parcial, con una densidad de energía instalada menor que las anteriores (de 1 a 4 W/m³, recomendable 2 W/m³). Este tipo de laguna presenta signos de acumulación de lodos, observándose frecuentemente la aparición de burbujas de gas de gran tamaño en la superficie, por efecto de la digestión de lodos en el fondo. En este tipo de lagunas los períodos de retención varían entre 7 y 20 días (variación promedio entre 10 y 15 días) y las profundidades son por lo menos 1.5 m. En climas cálidos y con buena iluminación se observa un apreciable crecimiento de algas en la superficie de la laguna.

Laguna facultativa con agitación mecánica: la cual es exclusivamente aplicable a unidades sobrecargadas del tipo facultativo en climas cálidos. Tienen una baja densidad de energía instalada (del orden de 0.1 W/m³), la misma que sirve para vencer los efectos adversos de la estratificación termal, en ausencia del viento. Las condiciones de diseño en estas unidades son las de lagunas facultativas. El uso de los aeradores puede ser intermitente.

Lagunas de oxidación aeradas: empleadas generalmente en climas con cuatro estaciones. La fuente de oxígeno es principalmente la fotosíntesis y en el invierno es suplementada por aeración con difusión de aire comprimido en el fondo. Como el diseño se efectúa para condiciones de invierno, las cargas de diseño son generalmente bajas (del orden de 50 kg DBO/(Ha.d)), las condiciones de diseño en estas unidades son las de lagunas facultativas, con una profundidad reducida del orden de 1 a 1.5 m.

Para el diseño de lagunas aeradas de mezcla completa se observarán las siguientes recomendaciones:

- Los criterios de diseño para el proceso deben idealmente ser determinados a través de experimentación.

- Alternativamente se dimensionará la laguna aerada para la eficiencia de remoción de DBO soluble establecida en condiciones de invierno con una constante de degradación de alrededor de 0.025 (l/(mg/l Xv.d) a 20 grados centígrados, en donde Xv es la concentración de sólidos volátiles activos en la laguna.
- En caso de que se pueda absorber la remoción de DBO con lagunas secundarias, se adoptará un período de retención alrededor de 2 días, determinándose la calidad del efluente y el nivel de sólidos en la laguna.
- Los requisitos de oxígeno del proceso (para síntesis y respiración endógena) se determinarán para condiciones de verano. Estos serán corregidos a condiciones estándar, por temperatura y elevación, en forma similar a la detallada en la sección de lodos activados.

Se seleccionará el tipo de aerador más conveniente, prefiriéndose los aeradores mecánicos superficiales, de acuerdo con sus características, velocidad de rotación, rendimiento y costo. La capacidad de energía requerida e instalada se determinarán seleccionando un número par de aeradores de igual tamaño y eficiencias especificadas.

2.1.3.5.1.3 Lagunas facultativas

Según la definición de este tipo de lagunas, sus características principales son el comensalismo entre algas y bacterias en el estrato superior y la descomposición anaeróbica de los sólidos sedimentados en el fondo. Por consiguiente, su ubicación como unidad de tratamiento en un sistema de lagunas puede ser:

- Como laguna primaria única (caso de climas fríos en los cuales la carga de diseño es tan baja que permite una adecuada remoción de bacterias) o seguida de una laguna secundaria y/o terciaria (normalmente referida como laguna de maduración).

- Como una unidad secundaria después de lagunas anaeróbicas o aeradas, para cumplir el propósito de procesar sus efluentes a un grado mayor.

Los criterios de diseño en los que se refiere a temperaturas y mortalidad de bacterias se deben determinar en forma experimental, alternativamente y en caso de no ser posible la experimentación, se podrán usar los siguientes criterios:

- La temperatura de diseño será la promedio del mes más frío (temperatura del agua), determinada a través de correlaciones de las temperaturas del aire-agua.
- En caso de no existir esos datos, se determinará la temperatura del agua restando de la temperatura del aire un valor que será justificado debidamente ante la Entidad Responsable, el mismo que depende de las condiciones meteorológicas del lugar. Para instalaciones en Guatemala de características similares a los casos en donde se han procesado datos meteorológicos e implementado la modelación de temperaturas, se puede llenar una tabla con el siguiente encabezado como guía para diseño de lagunas:

Tabla V. Guía para el diseño de lagunas facultativas

Ciudad	Mes más frío	Temperaturas, (°C)		
		Aire	Agua	Incremento

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 41

En donde no existan datos se usará la temperatura del aire del mes más frío para diseño. El coeficiente de mortalidad bacteriana (neto) será adoptado entre 0.8 y 1.6 (l/d), para 20 °C, se recomienda un valor alrededor de 1.0.

La carga máxima que se puede aplicar a una laguna facultativa sin que se torne anaeróbica ha sido determinada a través de mediciones de amoníaco y confirmada a través de mediciones de clorofila y puede estimarse mediante la siguiente correlación:

$$CS_m = 357.4 * 1.085^{T-20} \quad \text{En donde:}$$

CS_m es la carga superficial máxima en Kg DBO/(Ha.d) y

T es la temperatura del agua mínima mensual en °C.

Alternativamente cuando no se pueda determinar la temperatura del agua, se podrá estimar la carga máxima, mediante la siguiente correlación:

$$CS_m = 400.6 * 1.0993^{T_{ai}-20} \quad \text{En donde:}$$

CS_m es la carga superficial máxima en Kg DBO/(Ha.d) y

T_{ai} es la temperatura del aire del mes más frío en °C.

Para evitar el crecimiento de plantas acuáticas con raíces en el fondo, la profundidad de las lagunas deben estar por encima de 1.2 m. La profundidad varía entre 1.5 y 2.5 m., la profundidad mínima recomendada es de 1.5 m. Para el diseño de una laguna facultativa primaria, el proyectista deberá proveer una altura adicional para acumulación de lodos entre períodos de limpieza de alrededor de 10 años. Esta altura adicional es generalmente del orden de 0.3 m. y deberá ser determinada calculando la disminución del volumen por concepto de digestión anaeróbica en el fondo. Para lagunas facultativas primarias se debe determinar los volúmenes de lodo acumulado teniendo en cuenta un 80% de remoción de sólidos en suspensión en el efluente, con una reducción del 50% de sólidos volátiles por digestión anaeróbica, una densidad del lodo de 1.05 Kg/l y un contenido de sólidos del 10% al peso. Con estos datos se debe determinar la frecuencia de remoción de lodo en la instalación.

La remoción de la materia orgánica (DBO) es el aspecto en el que existe más divergencia, por lo cual el proyectista está en libertad de utilizar cualquiera de los modelos clásicos o correlaciones de carga, para determinar la concentración en el efluente. El uso de una de las metodologías debe estar debidamente sustentado, con indicación de la forma en que se determina la concentración de DBO removida, se debe tener en cuenta que la carga de DBO removida es la diferencia entre la DBO total del afluente y la DBO soluble del efluente. Para lagunas en serie se debe tomar en consideración que en la laguna primaria (en la cual se remueven los sólidos o la gran mayoría de la biomasa) se produce la gran mayoría de la remoción de la materia orgánica. La concentración de DBO en las lagunas siguientes permanece errática, producto de la influencia de las poblaciones de algas de cada unidad.

2.1.3.5.2 Procesos de lodos activados

2.1.3.5.2.1 Aspectos generales

En el presente capítulo se norman aspectos comunes tanto al proceso convencional de lodos activados como a todas sus variaciones, incluyendo el proceso de aeración prolongada (y zanjas de oxidación). Para efectos de las presentes normas se consideran opciones utilizables, todas aquellas que tengan una eficiencia de remoción de la DBO igual ó mayor al 85%. Entre las posibles variaciones se podrá seleccionar la aeración prolongada por zanjas de oxidación, en razón a su bajo costo. Para el diseño de cualquier variante del proceso de lodos activados, se tendrán en consideración las siguientes disposiciones generales:

- Los criterios fundamentales del proceso como: edad de lodos, requisitos de oxígeno, producción de lodo, eficiencia y densidad de la biomasa, deberán ser determinados idealmente en forma experimental.

- Para efectos de la eficiencia se considera al proceso de lodos activados conjuntamente con el Sedimentador secundario o el efluente líquido separado de la biomasa.
- El diseño del tanque de aeración se efectúa para las condiciones de caudal medio: El proceso deberá estar en capacidad de entregar la calidad establecida para el efluente en las condiciones del mes más frío.

Para el tanque de aeración se comprobarán los valores de los parámetros indicados abajo y en caso de no haberse efectuado estudios de tratabilidad se podrá usar para dimensionamiento, uno o varios de los siguientes parámetros:

Tabla VI. Parámetros para comprobación y dimensionamiento de tanques de aeración

TIPO DE PROCESO	Retención nominal "h"	Edad de lodos "d"	Carga volumétrica Kg DBO/m³
Convencional	4 - 8	4 - 15	0.3 - 0.6
Aeración decreciente	4 - 8	4 - 15	0.3 - 0.6
Aeración escalonada	3 - 5	4 - 15	0.6 - 0.9
Alta capacidad	1 - 2	2 - 4	1.1 - 3.0
Aeración prolongada	16 - 36	20 - 30	0.2 - 0.3
Mezcla completa	3 - 5	4 - 15	0.8 - 2.0
Zanja de oxidación	20 - 36	30 - 40	0.2 - 0.3

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 47

Adicionalmente, se deberán tener en consideración los siguientes parámetros:

Tabla VII. Parámetros adicionales a considerar en tanques de aeración

TIPO DE PROCESO	Remoción de DBO %	SSTA kg/m ³	Kg DBO	% de retorno
			Kg SSVTA.d	
Convencional	85 - 95	1.5 - 3	0.2 - 0.4	25 - 50
Aeración decreciente	85 - 95	1.5 - 3	0.2 - 0.4	25 - 50
Aeración escalonada	85 - 95	2.0 - 4	0.2 - 0.4	25 - 50
Alta capacidad	80 - 90	3.0 - 5	0.4 - 1.5	30 - 100
Aeración prolongada	90 - 95	3.0 - 6	0.05-0.15	100 - 300
Mezcla completa	85 - 95	3.0 - 6	0.2 - 0.6	25 - 100
Zanja de oxidación	90 - 95	3.0 - 6	0.05-0.10	100 - 150

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 47

Para plantas de tamaño pequeño y mediano se preferirán los sistemas de aeración mecánica superficial. Los sistemas de difusión de aire comprimido serán considerados como alternativa solamente para plantas de gran tamaño. En todo caso la selección del tipo de aerador será debidamente justificada técnica y económicamente. Para sistemas de aeración mecánica se observarán las siguientes disposiciones:

- La capacidad instalada de energía para aeración se determinará relacionando los requisitos de oxígeno del proceso (kg O₂/d) al rendimiento del aerador seleccionado (kg O₂/KWh), ambos en condiciones estándar, con la respectiva corrección pro eficiencia en el motor y reductor. El número de motores será par y de igual tamaño, con una capacidad igual a la de fabricación estándar.
- Se debe asegurar que el rendimiento de los aeradores haya sido determinado en un tanque con agua limpia y una densidad de energía entre 30 y 50 W/m³. Los rendimientos están normalmente expresados en kg O₂/KWh y las siguientes condiciones:
 - Nivel del mar.
 - Cero por ciento de saturación.

- Temperatura de 20 °C.
- El conjunto motor-reductor debe ser escogido para un régimen de funcionamiento de 24 horas. Se recomienda un factor de servicio de 1.0 para el motor y de 2.0 sobre la potencia nominal del motor, para el reductor.
- El rotor de aeración debe ser de acero inoxidable, pulido con abrasión de arena para dar un acabado tipo metal blanco, recubierto con pintura anticorrosiva y terminado con dos manos de material epóxico anticorrosivo y dos manos de esmalte epóxico.
- La capacidad instalada al eje, será la anteriormente determinada, pero sin las eficiencias del motor y reductor de velocidad.
- La densidad de energía (W/m^3) se determinará relacionando la capacidad instalada al eje, con el volumen de cada tanque de aeración. La densidad debe estar seleccionada para permitir una velocidad de circulación del licor mezclado, de modo que no se produzca la sedimentación de sólidos, lo cual depende tanto del volumen como de la forma del tanque. Para mantener velocidades entre 25 y 30 cm/seg se recomiendan las siguientes densidades (en W/m^3):

Tabla VIII. Densidades de energía en función de la relación p/a del tanque

Volumen del tanque, m^3	Densidad de energía (W/m^3)		
	Relación profundidad:ancho		
	1:2.5	1:3	1:4
200	40	26	19
500	25	16	12
1000	17	12	8
2000	12	8	6

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 49

Para sistemas con difusión de aire comprimido se procederá en forma similar, pero teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones: a) para la selección del rendimiento se deben tomar en cuenta los siguientes factores: el tipo de difusor (burbuja fina o gruesa), las constantes características de cada difusor, el rendimiento de cada unidad de aeración, el flujo de aire en condiciones estándar, la eficiencia de absorción de cada difusor, la localización del difusor y la profundidad del líquido y el ancho del tanque. b) La potencia instalada del compresor será determinada considerando la carga sobre el difusor más pérdidas de carga por flujo de aire a través de las tuberías y accesorios. La capacidad instalada será 1.5 veces la capacidad nominal.

2.1.3.5.2.2 Sedimentador secundario

El sedimentador secundario es parte intrínseca del proceso de lodos activados (en funcionamiento continuo) y cumple la doble función de clarificar el licor mezclado para descarga del efluente final y de concentrar el lodo activado (biomasa) para su retorno al proceso. Para asegurar que los clarificadores finales cumplan con esta función de espesadores, se debe proveer suficiente área para que los sólidos sean aplicados a una tasa inferior o igual a la tasa de la cual son retirados del fondo del tanque. Por consiguiente el diseño de un Sedimentador secundario debe considerar que los sólidos aplicados son transportados al fondo por medio de dos mecanismos: sedimentación por gravedad y transporte global debido al retiro del lodo del fondo del tanque. Los criterios de diseño para sedimentadores secundarios deben idealmente ser determinados experimentalmente a través de pruebas de sedimentación. En ausencia de pruebas de sedimentación, el proyectista frecuentemente se ve forzado a usar cargas (hidráulica o de sólidos) para el dimensionamiento de estos tanques. En estos casos se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El diseño se debe efectuar para caudales máximos, por cuanto se pierde una gran cantidad de sólidos si se excede la carga de diseño.
- Se recomienda efectuar un cálculo de ruteo de flujo a través de los procesos anteriores, con el fin de determinar cómo se reduce la influencia del caudal de pico.
- Para todas las variaciones del proceso de lodos activados (excluyendo aeración prolongada) se recomiendan los siguientes parámetros:
 - Carga hidráulica (Q medio), m/d 16-23
 - Carga hidráulica (Q máx), m/d 40-48
 - Carga de sólidos (Q medio),kg/(m²h) 3-6
 - Carga de sólidos (Q máx),kg/(m²h) 9
 - Profundidad, m 3.5- 5
- Para sedimentadores secundarios después de aeración prolongada se recomienda los siguientes parámetros:
 - Carga hidráulica (Q medio), m/d 8-16
 - Carga hidráulica (Q máx), m/d 24-32
 - Carga de sólidos (Q medio),kg/(m²h) 1-5
 - Carga de sólidos (Q máx),kg/(m²h) 7
 - Profundidad, m 3.5- 5
- Las cargas hidráulicas anteriormente indicadas están basadas en el caudal del líquido sin considerar la recirculación, puesto que la misma es retirada del fondo al mismo tiempo y no tiene influencia.

Para zanjas de oxidación se admite el diseño de la zanja con sedimentador secundario incorporado, para lo cual el proyectista deberá justificar debidamente los criterios de diseño.

2.1.3.5.2.3 Zanjias de oxidación

Las zanjias de oxidación son aplicables a pequeñas y grandes comunidades y constituyen una forma especial de aeración prolongada con bajos costos de instalación por cuanto no es necesario el uso de decantación primaria y el lodo estabilizado en el proceso puede ser desaguado directamente en lechos de secado. Este tipo de tratamiento es, además de simple operación, capaz de absorber variaciones bruscas de carga. Dadas las características del proceso, su eficiencia de tratamiento es más alta que en las demás variantes del proceso de lodos activados, normalmente en los siguientes intervalos:

- DBO entre el 95 y 98%.
- DQO entre el 90 y 95%.
- Nitrificación sobre el 95%.

Los criterios de diseño para zanjias de oxidación son los mismos que para lodos activados en lo que se refiere a parámetros de diseño del reactor y Sedimentador secundario y requisitos de oxígeno. En el presente capítulo se dan recomendaciones adicionales propias de este proceso de tratamiento.

Para instalaciones de hasta 12,000 habitantes equivalentes de diseño se pueden diseñar zanjias de tipo convencional, con rotores horizontales. Para este caso se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- La forma de la zanja convencional es ovalada, con un simple tabique no soportante en la mitad. Para una adecuada distribución de las líneas de flujo, se recomienda la instalación de por lo menos dos tabiques semicirculares localizados en los extremos, a 1/3 del ancho del canal.

- El rotor horizontal a seleccionarse debe ser de tales características que permita la circulación del líquido con una velocidad de por lo menos 25 cm/seg. En este caso la profundidad de la zanja no deberá ser mayor que 1.5 m, para una adecuada transferencia de momento. No es necesario la profundización del canal debajo de la zona de aeración.
- Los rotores son cuerpos cilíndricos de varios tipos, apoyados en cajas de rodamiento a sus extremos, por lo cual su longitud depende de la estructura y estabilidad de cada modelo. Para rotores de longitud mayor a 3.0 m. se recomienda en uso de apoyos intermedios. Los apoyos en los extremos deben tener obligatoriamente cajas de rodets autoalineantes, capaces de absorber las deflexiones del rotor sin causar problemas mecánicos.
- El procedimiento normal es diseñar primero el vertedero de salida de la zanja y determinar el intervalo de inmersiones del rotor, para las diferentes condiciones de operación.
- Para instalaciones de hasta 20l/s se puede considerar el uso de zanjas de operación intermitente, sin sedimentadores secundarios. En este caso se debe proveer almacenamiento del desecho por un período de hasta 2 horas, ya sea en el interceptor ó en una zanja accesoria.
- El conjunto motor-reductor debe ser escogido de tal manera que la velocidad de rotación sea entre 60 y 110 RPM y que la velocidad periférica del rotor sea alrededor de 2.5 m/s.

Para instalaciones mayores que 12,000 habitantes se deberá considerar obligatoriamente la zanja de oxidación profunda (reactor de flujo orbital) con aeradores de eje vertical y de baja velocidad de rotación. Estos aeradores tienen la característica de transferir momento a la masa líquida en forma eficiente de modo que imparten una velocidad adecuada y un flujo del tipo helicoidal.

2.1.3.5.3 Filtros percoladores

Los filtros percoladores deberán diseñarse de modo que se reduzca al mínimo la utilización de equipos mecánicos. Para ello se preferirá las opciones de utilizar lechos de piedra, distribución del efluente primario (tratado en tanques Imhoff) por medio de boquillas, sedimentadores secundarios sin mecanismos de barrido (con tolvas de lodos) y retorno del lodo secundario al tratamiento primario. El tratamiento previo a los filtros percoladores será: Cribas, desarenadores y sedimentación primaria (convencional o con tanques Imhoff). Los filtros podrán ser de alta o baja carga, para lo cual se tendrán en consideración los siguientes parámetros de diseño:

Tabla IX. Parámetros de diseño para filtros percoladores

Parámetro	Tipo de carga	
	Baja	Alta
Carga hidráulica, m ³ /d	1-4	10-14
Carga orgánica, Kg DBO/(m ³ d)	0.08-0.32	0.32-1.00
Profundidad (lecho de piedra), m	1.5-3.0	1.0-2.0
Profundidad (medio plástico), m		Hasta 12m.
Razón de recirculación	0	1-2

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 54

En los filtros de baja carga la dosificación debe efectuarse por medio de sifones, con un intervalo de dosificaciones de 5 minutos. Para los filtros de alta carga la dosificación es continua por efecto de la recirculación y en caso de usarse sifones, el intervalo de dosificaciones será inferior a 15 seg. Se utilizará cualquier sistema de distribución que garantice la repartición uniforme del efluente primario sobre la superficie del medio de contacto, evitándose la mecanización innecesaria.

Cuando se use boquillas fijas, se las ubicará en los vértices de triángulos equiláteros que cubran toda la superficie del filtro. El dimensionamiento de los conductos de distribución dependerá de si la distribución es intermitente o continua. Se permitirá cualquier medio de contacto que promueva el desarrollo de la mayor cantidad de biopelícula y que permita la libre circulación del líquido y del aire, sin producirse obstrucciones. El medio de contacto deberá tener una superficie externa mínima de 40 m^2 por m^3 de lecho. Cuando se utilicen piedras pequeñas el tamaño mínimo será de 25 mm. y el máximo de 75 mm. Para piedras grandes su tamaño oscilará entre 10 y 12 cm. Se diseñará un sistema de ventilación de modo que exista una circulación natural del aire, por diferencia de temperatura a través del sistema de drenaje y a través del lecho de contacto. El sistema de drenaje deberá cumplir con las siguientes recomendaciones:

- Los canales trabajaran con su sección transversal a no más del 50%.
- Deben ubicarse pozos de ventilación en los extremos del canal central.
- En caso de filtros de gran superficie deben diseñarse pozos de ventilación en la periferia de la unidad. La superficie abierta de estos pozos será de 1 m^2 por cada 250 m^2 de superficie de lecho.
- El área total de las aberturas en el tope del sistema de drenaje no debe ser menor al 15% del área total del filtro.
- En filtros de baja carga sin recirculación, el sistema de drenaje deberá diseñarse de modo que se pueda inundar el lecho, con la finalidad de controlar el desarrollo de insectos.

Se deben diseñar obligatoriamente facilidades de sedimentación secundaria. El propósito de estas unidades es de separar la biomasa producida en el filtro. El diseño es similar al de sedimentadores primarios con la excepción de que la carga de diseño es basada en el flujo de la planta más el flujo de recirculación. La carga superficial recomendada debe estar por debajo de $48 \text{ m}^3/\text{d}$ basada en el caudal máximo.

2.1.3.5.4 Módulos rotatorios de contacto

Son unidades que tienen un medio de contacto colocado en módulos cilíndricos que rotan alrededor de su eje. Los módulos generalmente están sumergidos hasta un 40% de su diámetro de modo que al rotar permiten que la biopelícula se ponga en contacto alternadamente con el afluente primario y con el aire. Las condiciones de aplicación de este proceso son similares a las de filtros biológicos en lo que se refiere a eficiencias. Para impedir la obstrucción con arena y material flotante se debe incluir cribas (con una separación entre barras menor a la normal) y desarenadores. Debido a que la velocidad de rotación de los módulos no es suficiente para mantener los sólidos en suspensión, este proceso debe estar precedido de tratamiento primario. Los módulos rotatorios pueden tener los siguientes medios de contacto:

- Discos de madera, material plástico o metal ubicados en forma paralela de modo que provean una alta superficie de contacto para el desarrollo de la biopelícula.
- Cestas de alambre de forma cilíndrica llenas de esferas de material liviano (vg. bolas de poliuretano).

Se dará preferencia a los módulos de fabricación nacional y a aquellos cuyo mecanismo de rotación pueda recibir mantenimiento local, puesto que los módulos importados tienen un elevado costo. Para diseño de estas unidades se deben observar las siguientes recomendaciones: Carga hidráulica entre 0.08 y 0.16 m/d, la velocidad periférica de rotación para aguas servidas municipales debe mantenerse alrededor de 0.3 m/s, el volumen mínimo de las unidades debe ser de 4.88 litros por cada m² de superficie de contacto. para módulos en serie se utilizará un mínimo de cuatro unidades.

El efluente de los módulos debe tratarse en un Sedimentador secundario, para separación de la biomasa. Los criterios de diseño de esta unidad son similares a los del Sedimentador secundario de filtros biológicos.

2.1.3.6 Otros tipos de tratamiento

2.1.3.6.1 Tratamientos con plantas acuáticas

Aunque hay abundante bibliografía sobre el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales, existen varios aspectos aún no resueltos que limitan la aplicación de estos sistemas de tratamiento, por lo cual el proyectista deberá justificar cuidadosamente la selección de estos procesos, teniendo en consideración los lineamientos que se dan a continuación. La tecnología del uso de plantas flotantes (principalmente la *Eichhornia Crassipes*), para mejorar la calidad de efluentes de lagunas de estabilización y otros procesos de tratamiento, es aplicable para climas cálidos como los de la costa y oriente ecuatorianos. Para climas más fríos los requisitos de área se incrementan considerablemente. El uso de plantas flotantes no es aplicable a lagunas tratando desechos crudos, debido a que las lagunas son diseñadas de formas especiales incompatibles con las requeridas por unidades primarias para una adecuada remoción de sólidos. El uso de plantas emergentes en combinación con filtros arenosos o de piedra se debe considerar todavía en una etapa de desarrollo y no constituyen una alternativa confiable hasta que se contesten preguntas sobre aspectos claves como: remoción de bacterias y parásitos y de operación ante condiciones variables. En caso de utilizarse plantas acuáticas flotantes como la *Eichhornia Crassipes*, se deben diseñar lagunas de forma alargada para facilitar la cosecha de las plantas.

El proyectista debe considerar que en condiciones climáticas similares a las de la costa ecuatoriana se producen entre 200 y 250 kg/(Ha-d) (peso seco), o sea entre 4 y 5 toneladas/(Ha-d) de plantas con un 95% de humedad. La disposición de esta gran cantidad de material pone una seria barrera en el uso de este sistema. El proyectista deberá justificar cuidadosamente el uso de por lo menos los siguientes criterios:

- Tasa de aplicación hidráulica.
- Forma y dimensiones de la laguna de plantas flotantes.
- Remoción de compuestos orgánicos y de bacterias.
- Forma de procesamiento y disposición de las plantas.

2.1.3.7 Tratamiento de lodos

2.1.3.7.1 Generalidades

Para proceder al diseño de facilidades de tratamiento de lodos, se realizará un inventario de producción de lodos en los procesos de tratamiento de la planta, debiéndose tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El inventario se realizará para condiciones de caudales y concentraciones medias y temperaturas correspondientes al mes más caliente.
- Para lodos primarios se determinará el volumen y masa de sólidos en suspensión totales y volátiles.
- Para procesos de tratamiento biológico como los de lodos activados y filtros biológicos se determinará la masa de lodos biológicos producidos por síntesis de la materia orgánica menos la cantidad destruida por respiración endógena.

- En los procesos de lodos activados con descarga de lodos directamente desde el tanque de aeración, se determinará el volumen de lodo producido a partir del parámetro de la edad de lodos. En este caso la concentración del lodo de exceso es la misma que la del tanque de aeración.
- En los procesos de lodos activados con descarga del lodo de exceso antes del tanque de aeración, se determinará el volumen de lodo producido a partir de la concentración del lodo re-circulado del fondo del Sedimentador secundario.

2.1.3.7.2 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso de tratamiento de lodos que tiene por objeto la estabilización, reducción de volumen e inactivación de organismos patógenos de lodos. El lodo ya estabilizado puede ser procesado sin problemas de malos olores. Para efectos de las presentes normas, se considerará el proceso de digestión anaeróbica forzosamente para los siguientes casos:

- Para lodo de plantas primarias.
- Para lodo primario y secundario de plantas de tratamiento con filtros biológicos.
- Para lodo primario y secundario de plantas de lodos activados (exceptuando los casos de plantas de aeración prolongada).

Para casos en los cuales se desea recuperar el gas del proceso, se diseñará un proceso de digestión de dos etapas, teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

- El volumen del digestor de la primera etapa se determinará adoptando una carga entre 1.6 y 8.0 kg SSV/(m³d), las mismas que corresponden a valores de tasas alta. Para las condiciones de la costa y el oriente se usarán cargas más altas y para instalaciones en la sierra se usarán cargas más bajas.
- El contenido de sólidos en el lodo tiene gran influencia en el tiempo de retención de sólidos. Se comprobará el tiempo de retención de sólidos en la primera etapa, de acuerdo con los valores que se indican y si es del caso se procederá a reajustar la carga:

Tabla X. Tiempo de retención de sólidos según temperatura en el caso de que haya recuperación de gas

Temperatura °C	Tiempo de Retención (d)
18	28
24	20
30	14
35	10
40	10

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 63

- La primera etapa será diseñada sin calentamiento, pero se considerará mezcla intermitente por medio de una bomba centrífuga de impulsor abierto. El digestor de la primera etapa será de hormigón, con cubierta fija.
- El volumen de la segunda etapa será igual al de la primera. El digestor de la segunda etapa tendrá una cubierta flotante, diseñada para mantener una presión uniforme del gas, por efecto del peso de la cubierta y peso adicional requerido.
La cubierta será instalada descansando sobre topes de hormigón dimensionados para resistir el esfuerzo cortante.

- Adicionalmente, el digestor de segunda etapa deberá tener facilidades de rebose y para remoción del sobrenadante en por lo menos tres niveles superiores. El sobrenadante será retornado a los procesos de tratamiento.
- Otros detalles a considerarse en el diseño de digestores son:
 - La forma de los tanques puede ser ovalada, circular o cuadrada.
 - El fondo de los digestores cilíndricos debe tener una pendiente hacia el centro de por lo menos 1:6. El lodo digerido es retirado del fondo del tanque, al centro.
 - La profundidad varía entre 6 y 14 m. Para tanques cilíndricos de 15 a 18 m. de diámetro capacidad generalmente se especifican profundidades alrededor de 10 m.
 - Los digestores deben tener facilidades de limpieza y mantenimiento. Se recomienda la instalación de un pozo de inspección central.
- El proyectista deberá justificar el diseño de las facilidades de recuperación de gas, teniendo en consideración por lo menos los siguientes aspectos:
 - Facilidades de medición de gas.
 - Trampas de llamas y otros sistemas de seguridad.
 - Almacenamiento de gas.
 - Manómetros, trampas de gotas y quemadores de gas.

Para casos en los cuales no se desea recuperar el gas del proceso, se diseñará un proceso de digestión abierto de una etapa, teniendo en cuenta que:

- El volumen del digestor se determinará adoptando una carga entre 0.4 y 1.6 Kg SSV/(m³d), las mismas que corresponden a valores de tasas bajas. Para las condiciones de la costa y el oriente se usarán cargas más bajas.

- El contenido de sólidos en el lodo tiene gran influencia en el tiempo de retención de sólidos. Se comprobará el tiempo de retención de sólidos, de acuerdo con los valores que se indican y si es del caso se procederá a reajustar la carga:

Tabla XI. Tiempo de retención de sólidos según temperatura en el caso de que no haya recuperación de gas

Temperatura °C	Tiempo de Retención (d)
20	47
25	37
30	33
35	24
40	23

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 64

- Los digestores abiertos pueden ser de forma de tanque circular o cuadrado o en forma de laguna de lodos.

2.1.3.7.3 Lagunas de lodos

Las lagunas de lodos pueden emplearse como digestores o para almacenamiento. Su profundidad generalmente varía entre 3 y 5 m. y su superficie se determinará con el uso de una carga superficial entre 0.1 y 0.25 kg SSV/(m³d). Para evitar la presencia de malos olores se deben usar cargas hacia el lado bajo. Los requisitos de volumen para una laguna para digestión de lodos se determinan con los parámetros anteriormente indicados para digestores de baja carga. Las facilidades de lagunas de lodos deben diseñarse teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Los diques y fondo de estas lagunas son preferiblemente diseñadas con recubrimiento de losetas de hormigón.
- Los taludes de los diques pueden ser de mayor pendiente que para lagunas de estabilización. El fondo de las mismas debe tener pendiente hacia una tolva central.
- Se deben incluir facilidades para remoción del lodo diferido en el fondo y del sobrenadante, en por lo menos tres niveles superiores.
- Al igual que en lagunas de estabilización, se deben incluir facilidades para limpieza, circulación de vehículos, rampas de acceso, etc.

2.1.3.7.4 Aplicación de lodos sobre el terreno

Los lodos estabilizados provenientes del proceso de zanjas de oxidación y de digestión anaeróbica tienen un valor como abono y podrán ser aplicados en estado líquido directamente sobre el terreno, siempre que se haya removido por lo menos el 55% de los sólidos volátiles suspendidos. Para el efecto se escogerán sitios ubicados a por lo menos 500 m. de la vivienda más cercana. El terreno deberá estar protegido contra la escorrentía de guas de lluvia y no deberá tener acceso al público. El terreno deberá tener una pendiente inferior al 6% y su suelo deberá tener una tasa de infiltración entre 1 y 6 cm/h., estar bien drenado, de composición química alcalina o neutra, debe ser profundo y de textura fina y con un nivel freático ubicado a por lo menos 10 m. de profundidad. En la misma forma que para la disposición de aguas residuales sobre el terreno se deberá tener en cuenta que para un adecuado diseño, el proyectista deberá buscar una cuidadosa interacción con los sectores: agrícola, de suelos y económico, en la determinación de por lo menos los siguientes aspectos:

- Concentración de metales pesados en los lodos y compatibilidad con los niveles máximos permisibles.
- Cantidad de cationes en los lodos y capacidad de intercambio iónico.

- Tipos de cultivos y formas de riego, etc.

2.1.3.7.5 Remoción de lodos de lagunas de estabilización

Para remoción de lodos de lagunas primarias, se procederá al drenado (evacuación de las aguas) mediante el uso de sifones (tubos de succión). Las lagunas deberán drenarse hasta alcanzar el mínimo nivel, en estas condiciones el lodo quedará expuesto al ambiente. La operación de secado debe escogerse en la estación seca y tiene una duración no mayor a dos meses. Durante esta operación el agua residual debe idealmente tratarse sobrecargando una batería paralela. El lodo del fondo debe dejarse secar a la intemperie. El mecanismo de secado es exclusivamente por evaporación y su duración depende de las condiciones ambientales, principalmente de la temperatura. En condiciones de climas cálidos y templados, el lodo de una laguna se seca en períodos entre 4 y 6 semanas, formando grietas en forma similar a la de lechos de secado. Una vez que se ha logrado un contenido de sólidos de alrededor del 35%, el lodo es manejable y puede ser removido en forma manual o con la ayuda de equipo pesado. Para instalaciones grandes es recomendable la remoción de lodo con cargadores frontales y volquetas. El lodo seco debe almacenarse en pilas de hasta 2 m. de altura previo a su uso como abono. Los lodos secos tienen gran demanda como abono y solamente en el caso de no ser factible el uso agrícola, se debe proceder a su disposición idealmente en relleno sanitario de la ciudad.

2.1.3.7.6 Lechos de secado

Los lechos de secado son generalmente el método más simple y económico de deshidratación de lodos estabilizados aeróbicamente (zanjas de oxidación) o anaeróbicamente (digestión anaeróbica).

Previo al dimensionamiento de los lechos se calculará la masa y volumen de lodos estabilizados, por año. En el caso de zanjas de oxidación el contenido de sólidos en el lodo es conocido. En el caso de lodos digeridos anaeróbicamente, se determinará la masa de lodos considerando una reducción de sólidos volátiles entre el 50 y 55%. La gravedad específica de los lodos digeridos varía entre 1.03 y 1.04. Si bien el contenido de sólidos en el lodo digerido depende del tipo de lodo, los siguientes valores se dan como guía:

- Para lodo primario digerido: de 8 a 12% de sólidos.
- Para lodo de procesos biológicos incluido lodo primario: de 6 al 10% de sólidos.

Los requisitos de área de lechos de secado se determinan adoptando una profundidad de aplicación entre 20 y 30 cm y calculando el número de aplicaciones por año. Para el efecto se deben tener en cuenta los siguientes períodos de operación:

- Período de aplicación: 4 a 6 horas.
- Período de secado: entre 3 y 4 semanas para climas cálidos y entre 4 y 6 semanas para climas más fríos.
- Período de remoción del lodo seco: entre 1 y 2 semanas para instalaciones con limpieza manual (dependiendo de la forma de los lechos) y entre 1 y 2 días para instalaciones pavimentadas en las cuales se puede empujar el lodo seco, con un tractor pequeño.
- Período de preparación y mantenimiento: de 1 a 2 días por aplicación para lechos de arena. Un día por aplicación para lechos con ladrillos (con juntas de arena) y una semana por año para lecho pavimentados con drenaje central.

Adicionalmente se comprobarán los requisitos de área teniendo en cuenta las siguientes recomendaciones:

Tabla XII. Recomendaciones para comprobación de requisitos de área

Tipo de lodo	Kg sólidos/(m ² año)
Primario	120-200
Primario y filtros percoladores	100-160
Primario y lodos activados	60-100
Zanjas de oxidación	110-200

Fuente: Fabián Yáñez Cossio, Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales. Pág. 66

En relación con detalles de diseño de lechos de secado, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Los tanques pueden ser construidos de mampostería, de concreto o de tierra (con diques), de una profundidad total de 30 a 40 cm. El ancho de los lechos es generalmente entre 3 y 6 m. pero para instalaciones grandes puede sobrepasar los 10 m.
- El medio de drenaje no es de importancia en relación con el secado, ya que el mecanismo de secado es casi exclusivamente por evaporación, sin embargo sirve para drenar agua de lluvia cuando los lechos están fuera de operación. Este medio generalmente es de 0.3 m. de espesor y debe tener los siguientes componentes.
 - El medio de soporte recomendado está constituido por una capa de 15 cm formada por ladrillos colocados sobre el medio filtrante, con una separación de 2 a 3 cm llena de arena. La arena es el medio filtrante y debe tener un tamaño efectivo de 0.3 a 1.3 mm y un coeficiente de uniformidad menor que 5.

- Debajo de la arena se debe colocar un estrato de grava graduada entre 1.6 y 51 mm (1/16" y 2"), de 0.20 m. de espesor.
 - Los drenes deben estar constituidos por tubos de 100 mm. colocados debajo de la grava, en pequeñas zanjas.
-
- Alternativamente se pueden diseñar lechos pavimentados con losas de hormigón o losetas prefabricadas, con una pendiente de 1.5% hacia un canal central de drenaje. La forma de estos lechos es de 5 a 15 m de ancho, por 20 a 45 m. de largo.
 - Para cada lecho se debe proveer una tubería de descarga con su respectiva válvula de compuerta y loseta en el fondo, para impedir la destrucción del lecho.

3. EVALUACIÓN VISUAL DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN EMPLEADOS EN DIFERENTES PLANTAS DE TRATAMIENTO EN GUATEMALA

3.1 Descripción de las visitas

Con el fin de hacer un análisis de los materiales de construcción que a lo largo del tiempo han sido utilizados en las plantas de tratamiento de aguas residuales en Guatemala, se realizaron visitas a distintas plantas de tratamiento, en cada una de las cuales se hizo el recuento de los materiales que se emplearon para las construcciones, haciendo un análisis de las características físicas y mecánicas de los mismos, así como una enumeración de las ventajas y desventajas en la utilización de cada material.

3.1.1 Generalidades

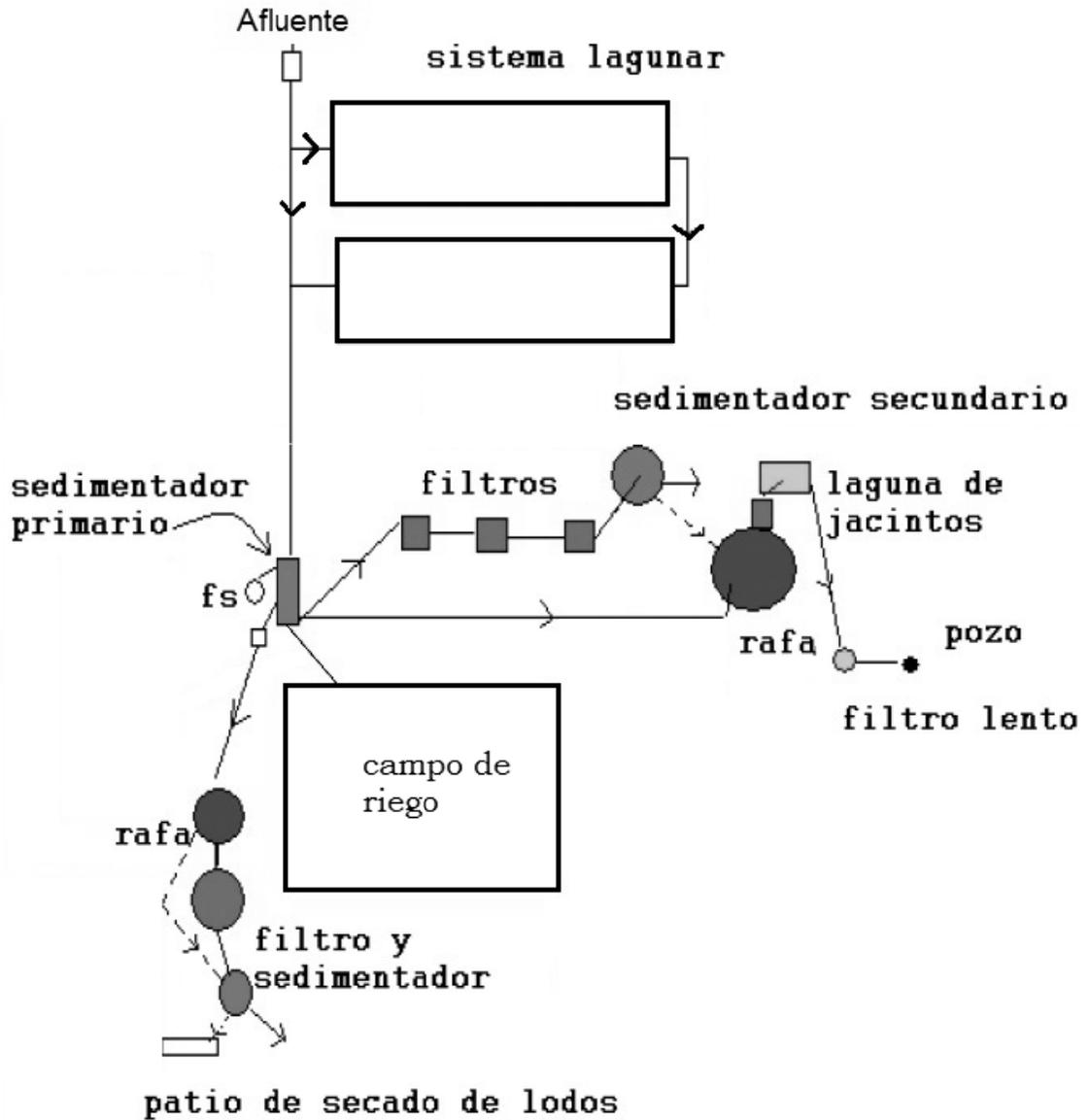
Las visitas técnicas a cualquier proyecto de la ingeniería se realizan con el propósito de que se comprenda de mejor manera lo que dice la teoría, esto por medio del acercamiento y la interacción con la forma práctica de hacer las cosas. Es por eso que el presente capítulo describe todo acerca de las visitas realizadas a las plantas de tratamiento de aguas residuales siguientes: Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulico ERIS, Planta de tratamiento de aguas residuales USAC, y Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro zona 2 de Mixco.

3.1.1.1 Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II

La planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II fue diseñada para tratar las aguas residuales de la colonia que lleva su nombre (Aurora II), se ubica al suroeste de dicha colonia, exactamente en: diagonal 26 final, 20-56, zona13 ciudad de Guatemala. La planta colinda al sur y al este con barrancos y su altitud varía entre 1502 a 1455 msnm. Tiene como objetivo docente dar al estudiante la oportunidad de efectuar sus propios ensayos en las diferentes unidades, observar las ventajas y desventajas de los procesos aplicados, su posibilidad de aplicación en la región, desde el punto de vista técnico, económico, de operación y de mantenimiento y capacitar operadores. Los objetivos de investigación de la planta son: obtención de parámetros de diseño aplicables a nuestro medio, obtener experiencias prácticas de funcionamiento, obtención de costos de construcción y mantenimiento, ensayar diversos sistemas de tratamiento, ensayar la remoción de parámetros específicos, ensayar la reutilización de las aguas residuales, ensayos diversos sobre aprovechamientos hidrológicos, obtención de datos hidrológicos y aplicaciones hidrológicas.

El esquema de funcionamiento de la planta (figura 20) está integrado por un sistema de dos lagunas de estabilización, sedimentador primario, el efluente del sedimentador primario es repartido en cuatro direcciones: 1) (Tratamiento con plástico de polietileno) Reactor anaeróbico de flujo ascendente, filtro percolador, sedimentador secundario y patio de secado de lodos. 2) Campo de riego 3) (Tratamiento con filtros hechos de materiales de construcción convencionales como cemento, arena, pedrín, block) Filtros biológicos, sedimentador secundario, laguna de jacintos de agua y filtro lento. 4) Reactor anaeróbico de flujo ascendente, laguna de jacintos de agua y filtro lento. Las fotografías de los elementos mencionados anteriormente se muestran en la figura 21.

Figura 20. Esquema de funcionamiento, planta piloto Aurora II



Fuente: Arturo Pazos Sosa, Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II.

Figura 21. Fotografías de elementos principales de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II



Fuente: Planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II.

Esta planta piloto ha sido operada en forma continua desde 1974 por ERIS, el proyecto original se realizó con fondos de la OMS y el gobierno federal Suizo. En la actualidad se logra su sostenimiento debido a que requiere un mantenimiento mínimo, se reutiliza el agua y se realizan otras actividades para completar los costos.

3.1.1.1.1 Materiales de construcción encontrados

Tabla XIII. Características físicas y mecánicas de los materiales de la planta piloto Aurora II

Elemento y material	Características físicas	Características mecánicas
Canales de concreto reforzado para el transporte del flujo.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Sedimentador primario de concreto reforzado.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Tanque rafa, filtro percolador y sedimentador secundario de plástico de polietileno.	Impermeabilidad, durabilidad y manejabilidad.	Flexibilidad, dureza y resistencia a tensión paralela a las fibras.
Filtro biológico, tanque rafa y sedimentador secundario de concreto reforzado.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Laguna de jacintos de agua con recubrimiento de concreto reforzado.	Impermeabilidad, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos provocados por el empuje del agua.
Filtro lento de concreto.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad	Resistencia esfuerzos de compresión.

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2010).

Tabla XIV. Ventajas y desventajas en el uso de los materiales de la planta piloto Aurora II

Elemento y material	Ventajas	Desventajas
Canales de concreto reforzado para el transporte del flujo.	No requiere de mantenimientos costosos, se pueden construir elementos de cualquier forma deseada.	Sufre pequeños cambios volumétricos, luego del fraguado se convierte en un elemento fijo.
Sedimentador primario de concreto reforzado.	No requiere de mantenimientos costosos, se pueden construir elementos de cualquier forma deseada.	Sufre pequeños cambios volumétricos, luego del fraguado se convierte en un elemento fijo.
Tanque rafa, filtro percolador y sedimentador secundario de plástico de polietileno.	Son elementos movibles, pueden llegar a durar más de 35 años, no necesitan mantenimiento complicado, son elementos livianos.	Requieren una inversión inicial mayor que los elementos de materiales de construcción convencionales. No resiste temperaturas exageradamente altas.
Filtro biológico, tanque rafa y sedimentador secundario de concreto reforzado.	No requiere de mantenimientos costosos, se pueden construir elementos de cualquier forma deseada.	Sufre pequeños cambios volumétricos, luego del fraguado se convierte en un elemento fijo.
Laguna de jacintos de agua con recubrimiento de concreto reforzado.	Se evita la permeabilidad y la vulnerabilidad a fallas como grietas, derrumbes por lavado, adhesión pobre al suelo original, etc.	En lugares de extrema pobreza, usar éste revestimiento podría llegar a ser costoso comparado con el uso de un revestimiento como el suelo cemento.
Filtro lento de concreto.	No requiere mantenimientos difíciles de realizar ni costosos.	Es un material frágil que resiste poca tensión, torsión y flexión.

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2010).

3.1.1.1.2 Resultados de la inspección

La planta piloto aurora II fue construida con fines educativos e investigativos, por lo cual integra diversos métodos de tratamiento de aguas residuales los cuales son evaluados y estudiados para incrementar la cantidad de información que se tiene de experiencias prácticas para tratamientos en Guatemala. Entre los diversos métodos, el sistema económico que se puede implementar en el interior de la república debido al tipo de materiales y mantenimiento mínimo que necesita es un sistema de, sedimentador primario, filtros biológicos, sedimentador secundario y si los requerimientos del efluente son más estrictos, se puede incluir un estanque con plantas flotantes como el jacinto de agua. Los distintos tipos de materiales que se encontraron se encuentran en buenas condiciones y continúan cumpliendo con el período de diseño para el cual fueron planificados.

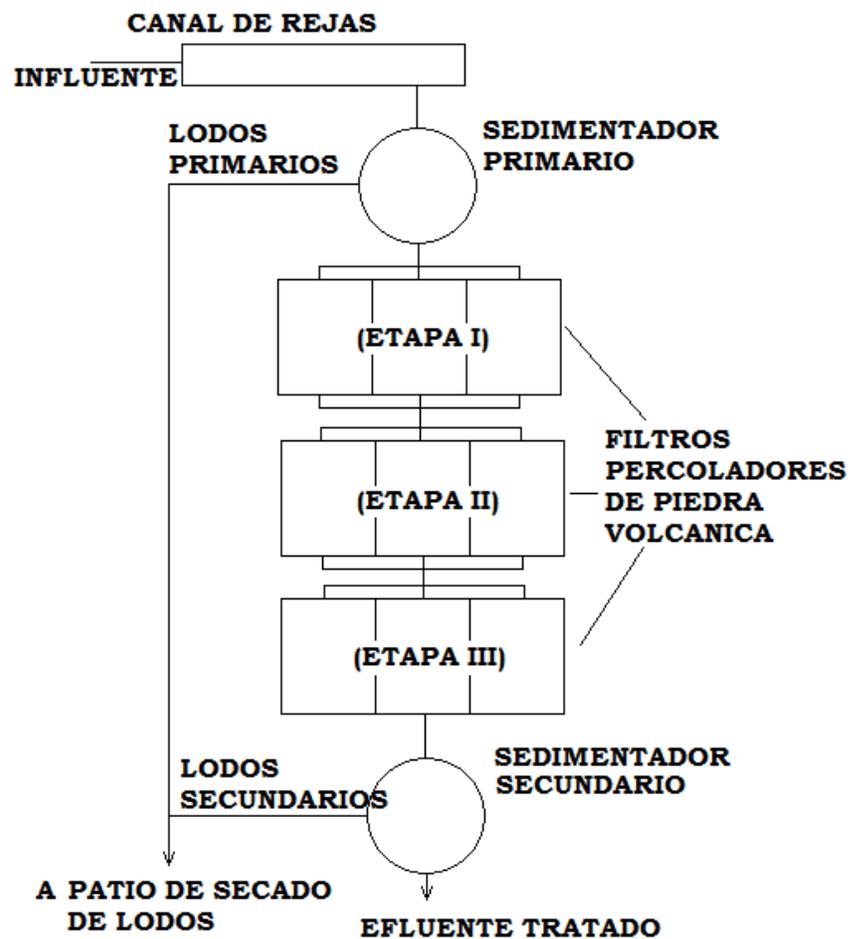
3.1.1.2 Planta tratamiento de aguas residuales USAC

La planta piloto de tratamiento de aguas residuales USAC fue diseñada para tratar las aguas residuales de la universidad con dicho nombre (Universidad de San Carlos de Guatemala) que se ubica en la zona 12 de la ciudad capital de Guatemala. Tiene como objetivo docente dar a los estudiantes de diferentes facultades la oportunidad de efectuar visitas técnicas para observar una manera eficiente de tratar aguas residuales fomentando en ellos la importancia de cuidar el ambiente y no devolverle aguas residuales sin tratar.

El objetivo técnico de la planta es el tratamiento de las aguas residuales por medio de filtros percoladores para cumplir con la responsabilidad ética, moral y ambiental que una institución educativa debe tener. Se tiene planeada la reutilización del efluente tratado en riego de campos.

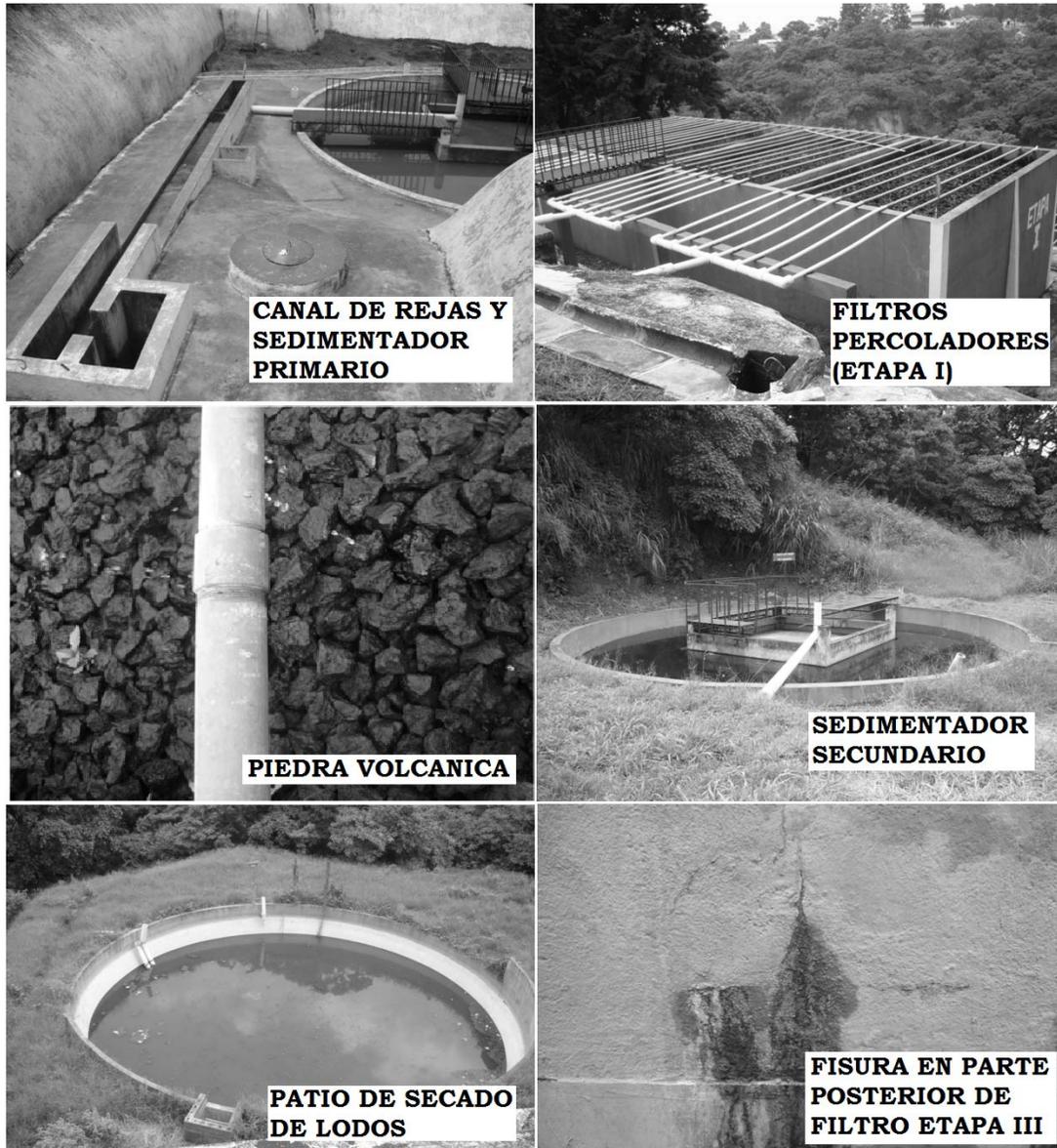
El esquema de funcionamiento de la planta (figura 22) está integrado por un sistema de pretratamiento por cribado (rejas), sedimentador primario, tres etapas de filtros percoladores de piedra volcánica y sedimentador secundario. Los lodos primarios y secundarios se trasladan hacia el patio de secado de lodos el cual es limpiado en la época seca del año. Toda la planta de tratamiento trabaja por gravedad ya que la topografía del terreno lo permite. Las fotografías de los elementos mencionados anteriormente se muestran en la figura 23.

Figura 22. Esquema de funcionamiento, planta de tratamiento de aguas residuales USAC



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2010).

Figura 23. Fotografías de elementos de la planta de tratamiento de aguas residuales USAC



Fuente: Planta de tratamiento de aguas residuales USAC.

Esta planta se mantiene en operación debido a que requiere un mantenimiento mínimo, del cual se hace cargo la misma Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC).

3.1.1.2.1 Materiales de construcción encontrados

Tabla XV. Características físicas y mecánicas de los materiales de la planta de tratamiento de aguas residuales USAC

Elemento y material	Características físicas	Características mecánicas
Canal para rejas, de concreto reforzado.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Rejas para cribado, de acero corrugado.	Trabajabilidad y ductilidad	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Sedimentador primario de concreto reforzado.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Filtros percoladores de mampostería (block) confinada recubierta.	Impermeabilidad, ductilidad.	Resistencia a cargas laterales y axiales.
Relleno de filtros de piedra volcánica.	Permeabilidad, bajo peso volumétrico.	Resistencia a esfuerzos provocados por compresión.
Tubería HG para distribución de flujo sobre los filtros percoladores.	Resistencia a la corrosión, durabilidad.	Resistencia mecánica elevada (abrasión, tensión, compresión, torsión).
Tubería PVC para distribución de flujo entre los elementos de la planta.	Resistencia a la oxidación y corrosión, elevada tolerancia a sustancias alcalinas y ácidas.	Resistencia a la abrasión, intemperie, torsión, impacto, aplastamiento y tensión.
Sedimentador secundario y patio de secado de lodos de concreto reforzado.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2010).

Tabla XVI. Ventajas y desventajas en el uso de los materiales de la planta de tratamiento de aguas residuales USAC

Elemento y material	Ventajas	Desventajas
Canal para rejas, de concreto reforzado.	No requiere de mantenimientos costosos, se pueden construir elementos de cualquier forma deseada.	Sufre pequeños cambios volumétricos, luego del fraguado se convierte en un elemento fijo.
Rejas para cribado, de acero corrugado.	Se pueden construir elementos de diferentes formas con el uso de soldadura.	Si no se recubre con alguna clase de pintura, se vuelve vulnerable a la corrosión.
Sedimentador primario de concreto reforzado.	No requiere de mantenimientos costosos, se puede construir de la forma y tamaño que se necesite.	Sufre pequeños cambios volumétricos, luego del fraguado se convierte en un elemento fijo.
Filtros percoladores de mampostería (block) confinada recubierta.	Resulta más económico que un filtro con paredes de losas de concreto reforzado.	Elementos fijos que pueden llegar a presentar fisuras o pueden fallar a la hora de que se dé un sismo.
Relleno de filtros de piedra volcánica.	Tiene un mayor porcentaje de aire que la piedra triturada, lo que permite la filtración de las aguas residuales.	Puede ser más difícil de conseguir que la piedra triturada.
Tubería HG para distribución de flujo sobre filtros.	No necesita mantenimientos costosos ni complicados.	Esta tubería es más costosa y más pesada que la tubería PVC.
Tubería PVC para distribución de flujo entre los elementos de la planta.	Material liviano, fácil de transportar y colocar, vida útil mayor a 50 años en condiciones normales de uso.	No resiste temperaturas exageradamente altas, es más costosa que colocar tubería de concreto.
Sedimentador secundario y patio de secado de lodos de concreto reforzado.	No requiere de mantenimientos costosos, se puede construir de la forma y tamaño que se necesite.	Sufre pequeños cambios volumétricos, luego del fraguado se convierte en un elemento fijo.

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2010).

3.1.1.2.2 Resultados de la inspección

La planta de tratamiento de aguas residuales USAC fue construida con el fin de tratar las aguas residuales provenientes del alcantarillado de la Universidad que lleva el mismo nombre, Universidad San Carlos de Guatemala, en la planta se permite la visita de estudiantes y catedráticos para contribuir con objetivos docentes. La utilización de los filtros percoladores que componen esta planta y que son los elementos principales de tratamiento es un método muy eficiente ya que se requiere de mantenimiento mínimo dentro del cual podemos mencionar limpieza manual de rejas, limpieza de filtros por medio de descargas instantáneas de caudales en cada parte de los filtros y limpieza del patio de secado de lodos en la época seca del año. Se debe tomar en cuenta que es conveniente contar un área de terreno suficientemente inclinada para evitar gastos de bombeo entre cada etapa de los filtros ya que en un terreno inclinado se puede hacer que el sistema trabaje por gravedad. Los materiales encontrados se encuentran en buenas condiciones, con excepción de la parte posterior del filtro percolador de la etapa III el cual presenta pequeñas fisuras las cuales no afectan en la depuración de las aguas residuales. Ya que los filtros están contruidos de muros de mampostería confinada, el problema mencionado anteriormente se puede solucionar aplicando un recubrimiento nuevo en el área en donde se encuentran las fisuras con el fin de impermeabilizar el filtro.

3.1.1.3 Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff, colonia El Tesoro

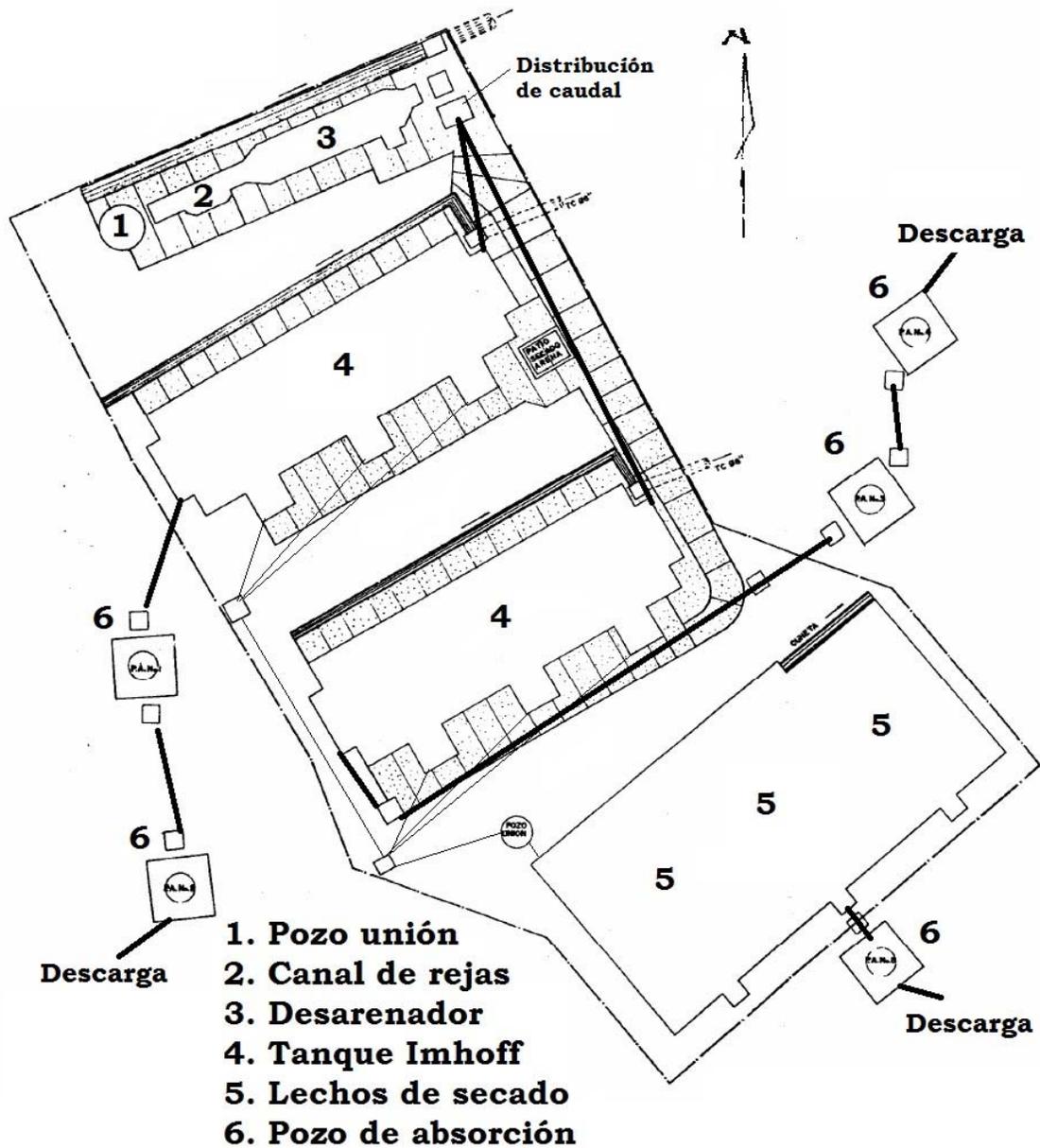
La colonia El Tesoro no contaba con sistema de alcantarillado, hasta que en 1998 la municipalidad de Mixco y el Instituto de Fomento Municipal -INFOM- desarrollaron el proyecto denominado “Alcantarillado sanitario, alcantarillado pluvial y planta de tratamiento de aguas residuales, de la colonia El Tesoro, Mixco”

La población trataba sus aguas residuales de forma individual en fosas sépticas y pozos de absorción, en algunos casos los pobladores conectaban sus aguas residuales a las calles y las mismas corrían a flor de tierra, provocando la proliferación de enfermedades.

Esta planta se mantiene en operación debido a que requiere un mantenimiento mínimo, del cual se hace cargo la municipalidad de Mixco, dicha municipalidad es la entidad encargada de contratar empleados para dar mantenimiento a la planta y para cuidar el área en la cual está situada la misma.

El esquema de funcionamiento de la planta (figura 24) está integrado por caja disipadora y distribuidora de demasías, canal de rejillas, desarenador, caja distribuidora de caudal, 2 tanques Imhoff, 3 lechos de secado de lodos y 5 pozos de absorción. Toda la planta de tratamiento trabaja por gravedad ya que la topografía del terreno lo permite. Las fotografías de los elementos mencionados anteriormente se muestran en la figura 25.

Figura 24. Esquema de funcionamiento, planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro zona 2 de Mixco



Fuente: Rubén Alexander Girón Morales, Consideraciones ambientales para plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando tanques Imhoff en la colonia El Tesoro, Mixco. Pág. 173

Figura 25. Fotografías de elementos de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro zona 2 de Mixco



Fuente: Planta de tratamiento de aguas residuales domesticas de tanques Imhoff, colonia El Tesoro zona 2 de Mixco.

3.1.1.3.1 Materiales de construcción encontrados

Tabla XVII. Características físicas y mecánicas de los materiales de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro

Elemento y material	Características físicas	Características mecánicas
Pozo unión de mampostería confinada recubierta.	Impermeabilidad, ductilidad.	Resistencia a cargas laterales y axiales.
Canal de rejas de concreto reforzado.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Rejas para cribado, de acero corrugado.	Trabajabilidad y ductilidad	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Desarenador de Concreto reforzado.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Caja distribuidora de caudal de mampostería confinada recubierta.	Impermeabilidad, ductilidad.	Resistencia a cargas laterales y axiales.
Tanque Imhoff de concreto reforzado.	Impermeabilidad, resistencia al ataque de sulfatos, durabilidad.	Resistencia a esfuerzos de tensión, compresión y flexión.
Tubería PVC para extracción de lodos y desfogue de agua tratada.	Resistencia a la oxidación y corrosión, elevada tolerancia a sustancias alcalinas y ácidas.	Resistencia a la abrasión, intemperie, torsión, impacto, aplastamiento y tensión.
Lechos de secado de ladrillos de barro cocido.	Trabajabilidad, capacidad para rápida disipación de la humedad, capacidad de secado.	Alta resistencia a compresión.

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2010).

Tabla XVIII. Ventajas y desventajas en el uso de los materiales de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro

Elemento y material	Ventajas	Desventajas
Pozo unión de mampostería confinada recubierta.	Resulta más económico que un pozo con paredes de losas de concreto reforzado.	Elementos fijos que pueden llegar a presentar fisuras o pueden fallar a la hora de que se dé un sismo.
Canal de rejas de concreto reforzado.	No requiere de mantenimientos costosos, se pueden construir elementos de cualquier forma deseada.	Sufre pequeños cambios volumétricos, luego del fraguado se convierte en un elemento fijo.
Rejas para cribado, de acero corrugado.	Se pueden construir elementos de diferentes formas con el uso de soldadura.	Si no se recubre con alguna clase de pintura, se vuelve vulnerable a la corrosión.
Desarenador de Concreto reforzado.	No requiere de mantenimientos costosos, se pueden construir elementos de cualquier forma deseada.	Sufre pequeños cambios volumétricos, luego del fraguado se convierte en un elemento fijo.
Caja distribuidora de caudal de mampostería confinada recubierta.	Resulta más económica que una caja con paredes de losas de concreto reforzado.	Elementos fijos que con el paso del tiempo pueden llegar a presentar fisuras, si se deteriora el recubrimiento se pierde la impermeabilidad.
Tanque Imhoff de concreto reforzado.	No requiere de mantenimientos costosos, se pueden construir elementos de cualquier forma deseada.	Sufre pequeños cambios volumétricos, luego del fraguado se convierte en un elemento fijo.
Tubería PVC para extracción de lodos y desfogue de agua tratada.	Material liviano, fácil de transportar y colocar, vida útil mayor a 50 años en condiciones normales de uso.	No resiste temperaturas exageradamente altas, es más costosa que colocar tubería de concreto.
Lechos de secado de ladrillos de barro cocido.	Larga vida útil, con el paso del tiempo sus propiedades se mantienen inalterables.	El precio de los ladrillos es un poco elevado.

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2010).

3.1.1.3.2 Resultados de la inspección

La planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de tanques Imhoff de la colonia El Tesoro se construyó para darle tratamiento primario a las aguas residuales del 100% de sus viviendas. Continúa en funcionamiento desde que se construyó durante los años 1998 – 2000. A diez años de haberse puesto en funcionamiento se observa que los materiales de los que están hechos cada uno de los elementos de la planta siguen cumpliendo con el propósito para el cual fueron diseñados y construidos. Los elementos más vulnerables a fallar, por su vida útil que es aproximadamente de 10 años, son las válvulas de compuerta, sin embargo, éstas continúan trabajando a la perfección en la regulación hidráulica de la extracción de lodos digeridos.

4. DISEÑO DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS

4.1 Antecedentes

Los sistemas de plantas acuáticas son sistemas construidos y proyectados con el fin de tratar aguas residuales de origen industrial o doméstico utilizando plantas acuáticas. Se diseñan para alcanzar un objetivo específico de tratamiento de las aguas residuales. Los sistemas de plantas acuáticas pueden ser divididos en dos categorías:

- Sistemas con plantas acuáticas flotantes tales como jacinto de agua, lenteja de agua, comalillo;
- Sistemas con plantas acuáticas sumergidas tales como lucheillo, milhojas acuáticas, y berro o berros.

Hasta hace no mucho tiempo, la mayoría de los sistemas de plantas acuáticas flotantes han sido los sistemas de jacinto de agua. En los Estados Unidos puede ser encontrado el uso del jacinto de agua para tratar aguas residuales en experimentos a escala en Texas y en el laboratorio de los investigadores de la NASA en la estación experimental de la bahía de San Luis en Mississippi, los primeros de dichos experimentos se llevaron a cabo a principios de los años setenta. Desde entonces los jacintos de agua han sido usados en una variedad de sistemas experimentales y a gran escala para tratar aguas residuales. Sin embargo, el uso del jacinto de agua ha sido limitado a regiones geográficas de clima cálido debido a la sensibilidad del jacinto de agua a condiciones heladas.

Los sistemas de jacinto de agua han sido más comúnmente usados para remover algas de los efluentes de estanques de oxidación o para remoción de nutrientes después del tratamiento secundario. Desde que se dio una conferencia de sistemas de acuicultura para el tratamiento de aguas residuales en el campus Davis de la universidad de California en septiembre de 1979, datos adicionales han sido acumulados en el uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales.

Desde 1970, los sistemas de tratamiento acuático han sido usados exitosamente en una variedad de aplicaciones de tratamiento incluyendo secundario, secundario avanzado y tratamiento terciario. Sin embargo, la mayoría de los datos de funcionamiento reportados en la literatura para estos sistemas han sido de observación en lugar de cuantitativos. Tiempo de retención hidráulica, tasa de carga hidráulica y tasa de carga orgánica son de los parámetros más comunes usados y necesitados para dimensionar los sistemas de plantas acuáticas.

4.1.1 Características de sistemas de tratamiento acuáticos

Los sistemas de tratamiento acuáticos consisten en uno o más estanques poco profundos en los cuales una o más especies de plantas vasculares tolerantes al agua tales como jacintos de agua o lentejas de agua son cultivadas. Las pequeñas profundidades y la presencia de macrófitas acuáticas en lugar de algas son la mayor diferencia entre sistemas de tratamiento acuáticos y las lagunas de estabilización. La presencia de plantas es de gran significancia práctica porque el efluente de sistemas acuáticos es de más alta calidad que el efluente de sistemas de lagunas de estabilización para tiempos de retención iguales o menores. Lo anterior es cierto, particularmente cuando los sistemas acuáticos son colocados después de sistemas que proveen más que tratamiento primario.

En sistemas acuáticos, las aguas residuales son tratadas principalmente por metabolismo bacteriano y sedimentación física, como es el caso de los sistemas convencionales de filtros biológicos. Las plantas acuáticas realizan muy poco tratamiento real ya que su función es proveer componentes del ambiente acuático que mejoran la capacidad de tratamiento de las aguas residuales y mejoran la fiabilidad de ese ambiente.

4.1.2 Historia

Las evaluaciones generales del uso del jacinto de agua y otras plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales, incluyendo la lenteja de agua, son presentadas más adelante. Las localidades de varios análisis a escala piloto y a gran escala que han sido significativas en los métodos de desarrollo y datos de funcionamiento para sistemas de tratamiento acuático en los Estados Unidos son presentadas en la tabla XIX. Los sistemas en Mississippi y Texas trataron las aguas residuales provenientes de lagunas facultativas. Un efluente primario fue el agua residual que sirvió de influente para los sistemas de Walt Disney World, San Diego, y Hercules. Las otras locaciones presentadas en la tabla XIX recibieron un efluente secundario en su sistema de plantas acuáticas flotantes.

Tabla XIX. Historia del uso de sistemas de tratamiento acuático (Planta utilizada: jacinto de agua, excepto las remarcadas)

Localidad	Escala	Objetivo	Fecha	Condición
Universidad de Florida	Experimental	Investigación	1964-74	Finalizada
Bahía de San Luis, MS ^a	Gran escala	T. Secundario	1976	Funcionando
Lucedale, MS	Gran escala	T. Secundario	1970s	Abandonada
Orange Grove, MS	Gran escala	T. Secundario	1970s	Abandonada
Cedar Lake (Biloxi), MS ^b	Gran escala	T. Secundario	1979	Funcionando
Williamson Creek, TX	Piloto	T. Secundario	1975	Abandonada
Austin-Hornsby, TX	Piloto/G. E.	T. Secundario	1970s	Funcionando
Alamo-San Juan, TX	Gran escala	T. Secundario	1970s	Abandonada
San Benito, TX	Gran escala	T. Secundario	1976	Funcionando
Río Hondo, TX	Gran escala	T. Secundario	1970s	Abandonada
Lakeland, FL	Gran escala	T. Terciario	1977	Funcionando
Walt Disney World, FL	Piloto	T. Secundario	1978	Finalizada
Coral Springs, FL	Gran escala	T. Terciario	1978	Abandonada
Orlando, FL	Gran escala	T. Terciario	1985	Funcionando
University of California Davis, CA	Experimental	Investigación	1978-83	Finalizada
Hercules, CA	Gran escala	Sec. Avanzado	1980-81	Abandonada
Roseville, CA	Piloto	Nitrificación	1981	Abandonada
San Diego, CA	Piloto	Sec. Avanzado	1981	Funcionando

^aEl hielo mató a los jacintos de agua; ahora se usan comalillos y lenteja de agua

^bLenteja de agua

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 48

Desde 1978, las investigaciones en el sistema de Walt Disney World en Florida han sido dirigidas hacia un sistema integrado incluyendo: 1) tratamiento de aguas residuales con acuicultura para satisfacer estándares federales, de estado y locales, 2) manejo de biomasa para alcanzar rendimientos óptimos, y 3) digestión anaeróbica de la vegetación acuática cosechada para producir metano para la recuperación de energía.

4.1.3 Restricciones climáticas

Los sistemas de jacinto de agua que son usados actualmente para tratar aguas residuales en los Estados Unidos están ubicados en lugares de clima cálido de los estados del sur de ese país. La temperatura óptima del agua para el crecimiento del jacinto de agua es de 21 °C a 30 °C (70 – 86 °F). Temperaturas del aire de -3 °C (26 °F) por 12 horas destruirían las hojas de la planta y la exposición a -5 °C (23 °F) por 48 horas mataría la planta por completo.

Si un sistema de jacinto de agua fuera a ser usado en climas más fríos, sería necesario albergar el sistema en un invernadero y mantener la temperatura en el rango óptimo. Basándose en la limitada disponibilidad de datos, sería poco económico intentar desarrollar un sistema de tratamiento de aguas residuales de jacinto de agua en regiones frías. La lenteja de agua es más tolerante al frío que el jacinto de agua y puede ser cultivada a temperaturas tan bajas como 7 °C (45 °F)(U. E. Agency).

4.1.4 Poder de depuración de las plantas acuáticas

El poder de depuración de las plantas acuáticas en el tratamiento de las aguas servidas de uso doméstico e Industrial ha sido demostrado a través de experiencias prácticas en diversos países con el propósito de lograr un ambiente limpio y equilibrado. Utilizando la energía solar, las plantas acuáticas producen oxígeno a través del proceso de fotosíntesis. Una parte de ese oxígeno es enviado al agua, lo que permite el desarrollo de microorganismos aerobios activos que realizan el proceso de digestión de las materias orgánicas, la oxidación de las sustancias malolientes y la destrucción de patógenos.

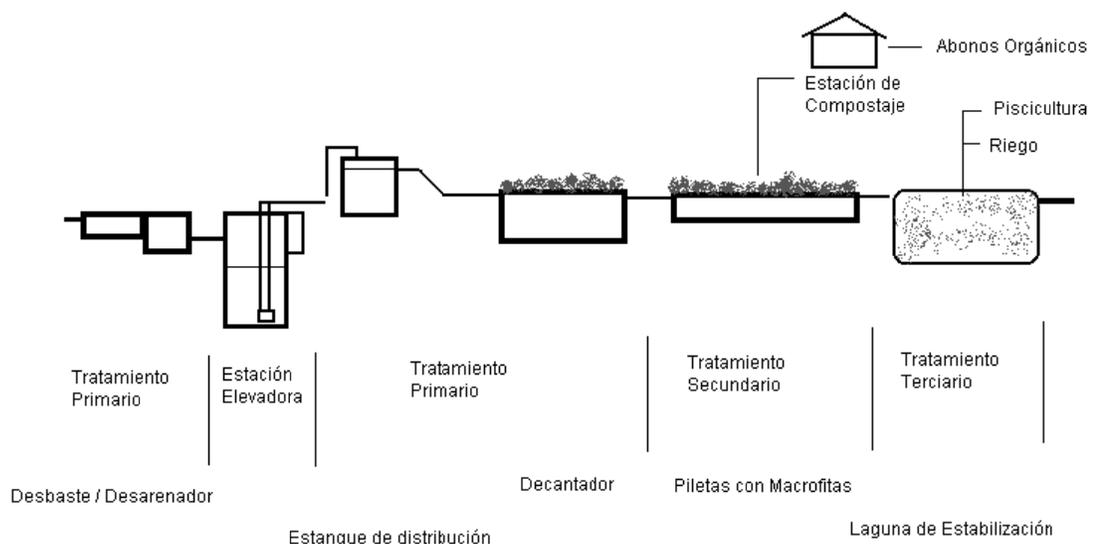
Las sales minerales que resultan de la digestión de la materia orgánica, sirven de fertilizante para las plantas y favorecen su rápido crecimiento, debiendo cosecharlas periódicamente. Las condiciones de vida estables que se obtienen en el sistema favorecen el desarrollo de las cadenas alimenticias que permiten la depuración del agua.

4.1.5 Esquema de funcionamiento

El esquema de funcionamiento (figura 26) de los sistemas de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas no está estrictamente restringido y depende principalmente de las condiciones del lugar en donde se van a tratar las aguas residuales, las condiciones económicas, el grado de contaminación que tengan las aguas residuales a tratar, el grado de depuración que exija la ley para descargar aguas residuales tratadas en cuerpos receptores y la disponibilidad de terreno para construir los estanques.

Figura 26. Esquema de funcionamiento

ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUATICAS



Fuente: Defensas del Caribe C.A. Sistema de tratamiento con plantas acuáticas.

4.1.6 Generación de empleo sostenible

En los proyectos de gestión comunitaria se procura el desarrollo sustentable y debido a esto las comunidades se organizan a través de microempresas para producir:

- Abonos orgánicos.
- Viveros forestales y ornamentales.
- Piscicultura.
- Granjas avícolas y porcinas.
- Biogás

El mantenimiento y operación del sistema debe ser realizado por la comunidad organizada descargando de ese gasto a los entes públicos.

4.1.7 Ambiente sustentable

Con el uso de los sistemas de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas se obtiene la integración del manejo de los desechos sólidos y líquidos para mantener un ambiente sustentable, en un entorno paisajístico. Con un sistema adecuado, el agua efluente cumple con los más altos estándares de calidad pudiéndose utilizar en riego de áreas verdes y cultivos agrícolas así como en piscicultura. La atracción de las diversas especies de aves indicaría el restablecimiento de la biodiversidad al entrar en funcionamiento el sistema.

4.1.8 Educación ambiental

Es parte de la educación ambiental promover entre los jóvenes estudiantes de la comunidad en la que se ponga en práctica el uso de un sistema de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas el aprendizaje práctico de las ciencias naturales, de los efectos de la fotosíntesis, la importancia para los ecosistemas de la cadena alimentaria y de la preservación del medio ambiente como fuente vital para las futuras generaciones. Los niños y jóvenes deberían participar en las campañas de educación ambiental con el fin de dar a conocer la importancia de la misma a sus familiares y amigos.

4.1.9 Usos frecuentes

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas se pueden utilizar y se han utilizado con más frecuencia en localidades como aeropuertos, centros urbanos, hoteles y centros turísticos, ciudades y poblaciones, instalaciones militares, barrios y urbanizaciones, viviendas individuales e industrias(C.A.).

4.2 Vegetación

Las plantas acuáticas tienen los mismos requerimientos nutricionales básicos que las plantas que crecen en tierra y son influenciadas por muchos de los mismos factores ambientales. Las respuestas de tratamiento en un sistema de plantas acuáticas se deben a que la presencia de las plantas en el sistema acuático altera el ambiente físico de los sistemas. Las raíces de la planta jacinto de agua actúan como un substrato viviente para organismos microbianos adheridos, las cuáles proporcionan un grado de tratamiento significativo.

4.2.1 Plantas flotantes

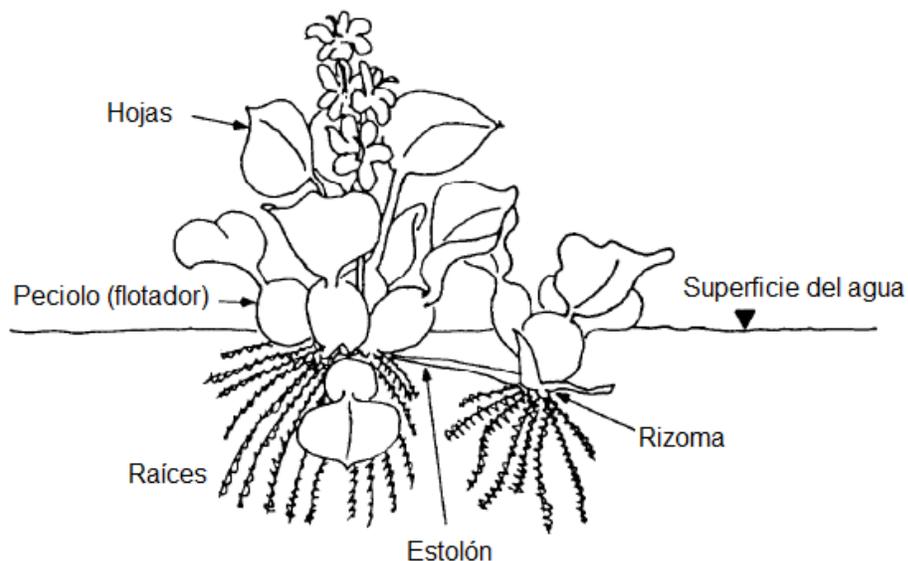
Las plantas flotantes tienen sus partes fotosintéticas a la altura, o un poco arriba de la altura de la superficie del agua con sus raíces extendiéndose hacia abajo, en la columna de agua. En la fotosíntesis, las plantas acuáticas flotantes usan el oxígeno de la atmósfera y el dióxido de carbono. Los nutrientes son tomados desde la columna de agua por medio de las raíces. Esas raíces son un excelente medio para la filtración/absorción de sólidos suspendidos y el crecimiento de bacterias que ayudan en la digestión de las materias orgánicas. El desarrollo de las raíces está en función de la disponibilidad de nutrientes en el agua y de la demanda de nutrientes de la planta. Por eso, en la práctica, la densidad y la profundidad del tratamiento serán afectadas por el grado de contaminación que tenga el influente y por factores que afectan la tasa de crecimiento de la planta tales como la temperatura y la siega.

Con las plantas acuáticas, la penetración de la luz del sol dentro del agua se reduce y la transferencia de gas entre la atmósfera y el agua es restringida. Como consecuencia, las plantas flotantes tienden a guardar las aguas residuales casi libres de algas en un ambiente anaeróbico o casi anaeróbico dependiendo de los parámetros de diseño tales como, tasa de carga de DBO_5 , tiempo de retención y las especies y densidad de las plantas en la superficie del agua. Una observación de interés es que un poco del oxígeno molecular producido por los tejidos fotosintéticos es transferido a las raíces y puede guardar la zona de las raíces trabajando aeróbicamente debido al metabolismo de los microorganismos, aunque el agua de los alrededores trabaje anaeróbicamente.

4.2.1.1 Jacinto de agua

La planta jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) es una planta acuática vascular perenne, de agua dulce de hojas verdes erguidas, redondas y brillantes y espigas de flores lavanda (figura 27). Los pecíolos de la planta son esponjosos con muchos espacios de aire y contribuyen a la flotabilidad de la planta. Cuando se siembran en agua residual, estas plantas crecen entre 0.5 y 1.2 metros, medidos desde la parte superior de su flor hasta la punta de la raíz. Se reproducen lateralmente hasta cubrir la superficie del agua y luego, el crecimiento vertical incrementa. Los jacintos de agua son unas plantas fotosintéticas muy productivas, su rápido crecimiento es un problema serio en muchas vías fluviales de flujo lento. Estos mismos atributos se convierten en una ventaja cuando se usan en un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Figura 27. Morfología del jacinto de agua



Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 50

En los Estados Unidos, esta planta es ampliamente distribuida en Alabama, California, Florida, Mississippi, Luisiana y Texas. Luego de varios años de uso de medidas de control físicas y químicas caras, el problema de propagación del jacinto de agua ha sido generalmente reducido a niveles manejables por medio del uso del gorgojo de jacinto (*Neochetina eichhomiae* y *N. bruchi*) y del ácaro de jacinto (*Orthogalumna terebrantis*). Ambos agentes de control biológico fueron importados de Sur América, lugar de origen del jacinto de agua. Probablemente el ácaro fue introducido accidentalmente junto con las plantas originales de jacinto de agua en Nueva Orleans y Luisiana, en 1884. Estos agentes de control biológico han reducido las poblaciones de la planta de jacinto de agua a niveles tan manejables que el jacinto ya no es considerado un asunto de propagación importante para el mantenimiento de vías fluviales abiertas.

El jacinto de agua es una macrófita acuática de crecimiento rápido y es clasificada como la número ocho en el top 10 mundial de las hierbas de crecimiento rápido. Se reproduce principalmente por propagación vegetativa, pero las semillas pueden ser una fuente clave de re infestación una vez que la planta madre haya sido removida. El jacinto de agua también desarrolla un extenso manto de hojas, el cual puede proporcionarle una buena ventaja competitiva sobre otras plantas acuáticas flotantes creciendo en el mismo sistema. El crecimiento del jacinto de agua es influenciado por: 1) Eficiencia de la planta para utilizar la energía solar, 2) composición de nutrientes del agua, 3) métodos de cultivo, y 4) factores ambientales.

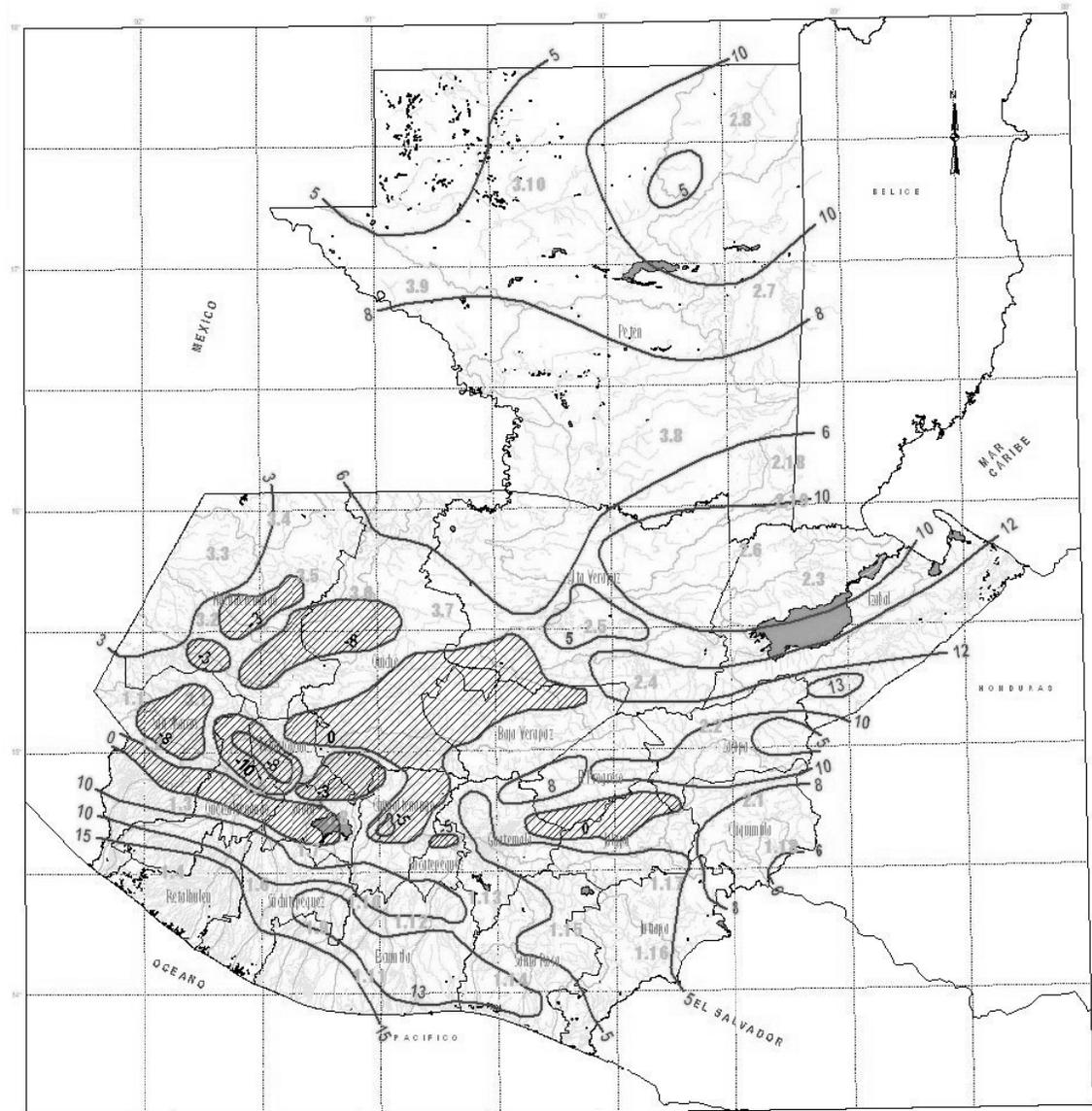
Existen dos métodos para describir el crecimiento de la planta. El primero es el reporte del porcentaje de la superficie del estanque cubierta sobre un período. El segundo método es más útil y es el de reportar la densidad de la planta en unidades de masa de planta mojada por unidad de superficie.

Bajo condiciones normales, el jacinto de agua puede cubrir ligeramente la superficie del agua a una densidad relativamente baja (10 kg/m^2 [2.0 lb/pie^2] peso mojado). Puede alcanzar una densidad máxima de 50 kg/m^2 (10.0 lb/pie^2), peso mojado, antes de que el crecimiento se detenga.

Como en otros procesos biológicos, las tasas de crecimiento en los sistemas de jacinto de agua dependen de la temperatura. La temperatura de ambos, agua y aire, es importante en la evaluación de la vitalidad de la planta. Se reporta que los jacintos de agua sobreviven a una exposición de 24 horas a temperaturas entre -0.5 y $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($31 - 33 \text{ }^\circ\text{F}$) pero mueren a temperaturas entre -7 y $-6 \text{ }^\circ\text{C}$ ($19 - 21 \text{ }^\circ\text{F}$) y no se pueden establecer en regiones donde la temperatura de invierno promedia $1 \text{ }^\circ\text{C}$ ($34 \text{ }^\circ\text{F}$). Su crecimiento es rápido en temperaturas de 20 a 30°C ($68 - 86 \text{ }^\circ\text{F}$) y casi se detiene en temperaturas de 8 a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ($46 - 59 \text{ }^\circ\text{F}$). En los Estados Unidos las áreas adecuadas para el crecimiento del jacinto de agua incluyen el sur de California, Arizona, Texas, Mississippi, Alabama, Georgia y Florida(U. E. Agency).

Los lugares en Guatemala en donde el jacinto de agua podría morir en las épocas más heladas se muestran en la figura 28. Las isotermas que aparecen en el mapa están en grados centígrados y representan la temperatura mínima absoluta anual de Guatemala y fueron elaboradas con datos correspondientes al período de los años 1928 – 2003. Dichas isotermas se basan en observaciones de la red meteorológica nacional y para la elaboración de las mismas fueron utilizadas 62 estaciones climatológicas, de las cuales 44 son estaciones principales y 18 estaciones auxiliares.

Figura 28. Lugares de vulnerabilidad en Guatemala para el crecimiento de jacinto agua en épocas heladas



Lugares vulnerables en Guatemala para el crecimiento del jacinto.

Fuente: Mapa: Instituto nacional de sismología, vulcanología, meteorología e hidrología. Departamento de investigación y servicios meteorológicos. Sombreado: Fuente propia.

El diseñador es el que decidirá cuales son las áreas adecuadas en las que se pueden establecer sistemas de jacinto de agua en Guatemala justificando la decisión en base a las temperaturas a las que el jacinto de agua muere, deja de crecer y crece rápidamente.

Los sistemas de jacinto de agua pueden ser usados para corregir problemas de crecimiento de algas en lagunas de oxidación. El uso del jacinto en verano es una solución técnicamente factible solo para algunos sistemas rurales que experimenten problemas de descarga con un alto nivel de SS (proveniente de algas).

4.2.1.2 Comalillo

El comalillo (*Hydrocotyle umbellata*) no es una planta flotante libre, ya que tiende a entrelazarse y crecer horizontalmente y a altas densidades la planta tiende a crecer verticalmente. A diferencia del jacinto, el área fotosintética de las hojas del comalillo es pequeña y en posiciones densas, el rendimiento es reducido significativamente como consecuencia de la sombra auto producida. Esta planta presenta tasas de crecimiento mayores a 10 g/m-d. Aunque las tasas de absorción de nitrógeno y fosforo del jacinto de agua disminuyen bruscamente durante el invierno, la absorción de nutrientes del comalillo permanece constante durante todo el año. La absorción de nitrógeno y fósforo durante los meses de invierno es mayor para el comalillo que para el jacinto.

Aunque los rendimientos de biomasa anual del comalillo son más bajos que los del jacinto de agua, el comalillo ofrece un gran potencial como una planta de época fría que puede ser integrada a los sistemas de producción de biomasa del jacinto de agua.

4.2.1.3 Lenteja de agua

La lenteja de agua es una planta de agua dulce pequeña y verde con hojas de uno a pocos milímetros de ancho. Las plantas *Lemna* y *Spirodela* tienen una raíz corta, usualmente miden menos de 10 mm. Las plantas lenteja de agua, *lemna*, *spirodela*, y *Wolffia*, son plantas que se han puesto a prueba para conocer su capacidad de remover agentes contaminantes o han sido usadas en sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Las lentejas de agua son las más simples y pequeñas de las plantas florecientes y tienen una de las tasas de reproducción más rápidas. Una pequeña célula en la hoja se divide y produce una nueva hoja, cada hoja es capaz de producir al menos 10-20 más durante su ciclo de vida. Se cree que la lenteja de agua puede crecer 30% más rápido que el jacinto de agua. La planta está compuesta esencialmente por células metabólicamente activas con muy poca fibra estructural.

El rendimiento de algunos sistemas de lenteja de agua existentes se resume en la tabla XX. Los sistemas de lenteja de agua son desarrollados por medio de los procedimientos de diseño para lagunas facultativas. El efluente de un sistema cubierto por lentejas de agua debería tener mejor depuración que el efluente de un sistema de lagunas facultativas convencional para DBO₅, SS y remoción de nitrógeno.

Tabla XX. Rendimiento de sistemas de lenteja de agua existentes en Estados Unidos

Lugar	Influente	DBO ₅ ,mg/L		SST, mg/L		P (m)	TRH (días)
		I	E	I	E		
Biloxi, MS	E de laguna facultativa. ^a	30	15	155	12	2.4	21
Collins, MS	E de laguna facultativa.	33	13	36	13	0.4	7
Sleep Eye.	E de laguna facultativa.	420	18	364	34	1.5	70
Wilton, AR	E de laguna facultativa. ^b	-	6.5	-	7.4	2.7	0.7
NSTL, MS	E de tratamiento aerobio	35.5	3.0	47.7	11.5	0.4	8

^a : Laguna parcialmente aerada.

^b : Tiempo de retención hidráulica teórico para estanque de lenteja de agua.

I: Influyente

E: Efluente

P: profundidad

TRH: tiempo de retención hidráulica

DBO : Demanda bioquímica de oxígeno

SST : Sólidos en suspensión totales

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 52

Es probable que el efluente de un sistema de lenteja de agua sea anaeróbico y pueda necesitar post aeración. La ventaja de los sistemas de lenteja de agua sobre una laguna facultativa similar es que en los sistemas de lenteja de agua existe una concentración más baja de algas en el efluente. Esto debido a la sombra en el agua generada por el tejido de la lenteja en la superficie.

La lenteja de agua, al igual que el jacinto, contiene aproximadamente un 95% de agua, la composición del tejido de la planta se resume en la tabla XXI. La lenteja contiene al menos, tanta proteína, grasa, nitrógeno y fósforo como el jacinto. El valor de la lenteja como fuente de alimento para una gran variedad de aves y animales ha sido confirmado por varios estudios nutricionales.

Tabla XXI. Composición de la planta lenteja de agua

Componente	Porcentaje de peso seco	
	Rango	Promedio
Proteína cruda	32.7 – 44.7	38.7
Grasa	3.0 – 6.7	4.9
Fibra	7.3 – 13.5	9.4
Ceniza	12.0 – 20.3	15.0
Carbohidratos	--	35.0
NTK (nitrógeno total kjeldal)	4.59 – 7.15	5.91
Fósforo	0.5 – 0.7	0.6

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 52

Las plantas flotantes que no son de gran tamaño, en particular la lenteja de agua, son sensibles al viento y se pueden marchitar en derivas hacia el lado del sotavento del estanque. La redistribución de las plantas requiere labor manual. Si las derivas no son redistribuidas, puede resultar una eficiencia de tratamiento reducida debido al cubrimiento incompleto de la superficie de agua del estanque. Una cantidad muy grande de plantas en descomposición puede conllevar a la producción de malos olores.

4.2.2 Plantas sumergidas

Las plantas sumergidas están, ya sea suspendidas en la columna de agua o enraizadas en el fondo de los sedimentos. Típicamente, sus partes fotosintéticas están en la columna de agua, pero ciertas especies vasculares pueden crecer hacia donde están sus partes fotosintéticas o simplemente debajo de la superficie del agua.

El potencial del uso de las plantas acuáticas sumergidas para tratamiento de efluentes primarios o secundarios se ve severamente limitado por su tendencia a ser cubiertas por la sombra de algas y su sensibilidad a condiciones anaeróbicas. El mecanismo por el cual las plantas sumergidas son capaces de remover amoníaco de la columna de agua está relacionado con sus procesos fotosintéticos los cuales remueven dióxido de carbono del agua con el fin de esparcir en la atmosfera el pH y el amoníaco en estado gaseoso. El gas amoníaco es la forma más toxica del nitrógeno para los peces. Dicho mecanismo es en parte concerniente con las poblaciones saludables del pez mosquito, el cual es generalmente estimulado en estanques de tratamiento acuático para el control de los mosquitos.

Por la noche estas plantas utilizan oxigeno (respiran) en competencia con el pez mosquito. Generalmente se considera que esta categoría de planta no tendrá un amplio uso en sistemas acuáticos debido a su pronunciado efecto diurno en el ambiente acuático, la tendencia a ser sombreadas por las molestas algas y la sensibilidad a condiciones anaeróbicas. No se conoce ningún sistema a escala piloto o a escala normal que esté utilizando plantas sumergidas y por lo tanto, el presente documento no se extiende más en este tema.

4.3 Criterios de diseño para sistemas de jacinto de agua

Los sistemas de jacinto de agua representan la mayoría de los sistemas de plantas acuáticas que han sido construidos. La carga orgánica es un parámetro clave en el diseño y operación de sistemas de jacintos de agua. En base al OD (oxígeno disuelto) y al método de dar aeración a un estanque se pueden describir tres tipos de sistemas de jacinto.

Los sistemas aeróbicos de jacinto sin aeración suplementaria producirán tratamiento secundario o remoción de nutrientes dependiendo de la tasa de carga orgánica. Este tipo de sistema es el más común de los sistemas de jacinto ya construidos. Entre sus ventajas esta la poca presencia de mosquitos y olores.

Para una localidad de un sistema en la cual no se puedan tolerar mosquitos ni olores, se requeriría un sistema aeróbico con aeración suplementaria. La ventaja que se suma a un sistema como este es que, con aeración, es posible aceptar una mayor carga orgánica y que se necesita menor área de terreno para el sistema.

La tercera configuración para un sistema de jacintos es operar dicho sistema bajo una alta carga orgánica. El propósito es obtener un tratamiento secundario, y esos sistemas son capaces de producir tratamiento consistente sin aeración bajo una alta carga orgánica. Entre las desventajas de dicha configuración podemos mencionar que se incrementa la población de mosquitos y que existe potencial para la generación de olores. Los primeros sistemas creados en *Disney World*, Estados Unidos, fueron de este tipo (en este documento se denominan como facultativo/anaeróbico). Los sistemas de tipo facultativo/anaeróbico no están siendo diseñados en la actualidad porque se ha reconocido que las tasas de carga orgánica de más de 100 kg/ (Ha-d) producen resultados consistentes sin las desventajas de las cargas altas. Las características de estos sistemas se resumen en las tablas XXII y XXIII.

Tabla XXII. Tipos de sistemas de jacinto de agua

Tipo	Propósito	Carga típica de DBO₅ kg/(ha-d)	Ventajas	Desventajas
Aeróbico Sin aeración	Tratamiento Secundario	40 – 80	Mosquitos y olores limitados.	Más área requerida, la cosecha puede ser más difícil (depende de la configuración de los estanques).
Aeróbico Sin aeración	Remoción de nutrientes	10 – 40	Mosquitos y olores limitados. Remoción de nutrientes.	Más área requerida, la cosecha puede ser más difícil (depende de la configuración de los estanques).
Aeróbico Aerado.	Tratamiento Secundario Avanzado	150 – 300	No mosquitos ni olores, tasas de CO más altas y área reducida.	Cosechas adicionales requeridas, energía suplementaria requerida.
Facultativo/ Anaeróbico*	Tratamiento Secundario	220 – 400	Tasas de CO más altas y área reducida.	Aumento en la población de mosquitos, y malos olores.

* Adecuado únicamente en lugares donde los olores y los mosquitos no sean un problema.

CO: Carga orgánica.

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 53

Tabla XXIII. Criterios de diseño para sistemas de jacinto de agua

Factor	Tipo de sistema de jacinto de agua		
	Aeróbico sin aeración	Aeróbico sin aeración	Aeróbico aerado
Grado de tratamiento del Influyente	Cribado o sedimentado.	Secundario	Cribado o sedimentado.
DBO ₅ , inicial (mg/L)	130 – 180	30	130 – 180
Carga de DBO ₅ (kg/(ha-d))	40 – 80	10 – 40	150 – 300
Efluente esperado	Efluente secundario	Remoción de nutrientes	Secundario avanzado
DBO ₅ (mg/L)	< 30	<10	<15
SS (mg/L)	< 30	<10	<15
NT (mg/L)	<15	<5	<15
Profundidad (m)	0.5 – 0.8	0.6 – 0.9	0.9 – 1.4
Tiempo de retención (días)	10 – 36	6 – 18	4 – 8
Carga Hidráulica (m ³ /(Ha-d))	> 200 Típicamente: 200-600	<800	550 – 1000 (se ha utilizado 1000 con éxito)
Frecuencia de la cosecha	Anual	Dos veces por mes	Mensual

SS: sólidos en suspensión

NT: nitrógeno total

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 53

4.3.1 Tasas de carga orgánica

Las tasas de carga de DBO₅ para sistemas de jacinto de agua pueden variar desde 10 hasta 300 kg/ (Ha-d) (tabla XXIII). Para obtener un efluente primario, en *Disney World*, los estanques recibieron cargas de 55 a 440 kg/ (Ha-d) sin problemas significantes de olor excepto en las cargas más altas. El promedio de las cargas en el sistema completo sin aeración no debería exceder 100 kg/ (Ha-d).

4.3.2 Tasa de carga hidráulica

La tasa de carga hidráulica, expresada en unidades de $\text{m}^3/(\text{ha-d})$, es el volumen de agua residual aplicado por día dividido dentro de la superficie de área del sistema acuático. Las tasas de carga hidráulica aplicadas a instalaciones de jacinto de agua han variado desde 240 hasta 3570 $\text{m}^3/(\text{ha-d})$ cuando se han tratado efluentes domésticos. Para objetivos de tratamiento secundario (DBO_5 y $\text{SS} < 30 \text{ mg/L}$), la tasa de carga hidráulica está típicamente entre 200 y 600 $\text{m}^3/(\text{ha-d})$. Para tratamiento secundario avanzado con aeración suplementaria, las tasas de carga hidráulica de 1000 $\text{m}^3/(\text{ha-d})$ han sido utilizadas exitosamente. Sin embargo, las tasas de carga orgánica serán las que por lo general, controlarán la carga hidráulica.

4.3.3 Profundidad del agua

La profundidad recomendada para estanques de jacinto es 0.4 – 1.8 metros, muchos investigadores recomiendan utilizar una profundidad de 0.9 m. El asunto crítico es proveer una profundidad adecuada para que el sistema de raíces penetre a través de la mayoría del líquido fluyendo por el estanque de jacintos. Algunas veces se recomienda una profundidad mayor para el estanque final en una serie de estanques de jacinto ya que las raíces del jacinto crecen más (en longitud hacia abajo) cuando encuentran pocos nutrientes presentes en el agua. Del proyecto de San Diego (con aeración) se concluye que es recomendable una profundidad entre 1.07 y 1.37 m. Para sistemas de lenteja de agua se han utilizado con éxito profundidades entre 1.5 y 2.5 metros.

4.3.4 Manejo de la vegetación

La literatura de jacintos de agua como un proceso de tratamiento de aguas residuales contiene varias especulaciones acerca del manejo de las cosechas de dicha planta. Compostaje, digestión anaeróbica para la producción de metano y la fermentación para obtener alcohol son técnicas propuestas como un medio para recuperar parcialmente los gastos del tratamiento de las aguas residuales. Estas técnicas de digestión pueden haberse usado en cualquier operación a gran escala, sin embargo, es poco probable que un sistema de tratamiento de aguas residuales típico y pequeño alcance el punto de equilibrio económico solo de la producción del gas metano.

La necesidad de realizar la cosecha depende de los objetivos de calidad del agua para el proyecto, de las tasas de crecimiento de las plantas y de los efectos de los depredadores tales como los gorgojos. La cosecha de las plantas acuáticas es necesaria para mantener un cultivo que absorba los nutrientes en una forma metabólicamente alta. Por ejemplo, la cosecha frecuente de los jacintos (cada tres o cuatro semanas) se practica en Florida para alcanzar la remoción de nutrientes. La remoción de nitrógeno y fósforo se alcanza solamente con cosechar frecuente la planta. En áreas en donde los gorgojos son una amenaza para las poblaciones saludables de jacintos, se pueden realizar cosechas selectivas para guardar las plantas de ser infectadas. El Estado de Texas recomienda que anualmente se seque y limpie cada estanque del sistema en vez de una cosecha regular de las plantas. La cosecha de la lenteja de agua para remoción de nutrientes puede requerir frecuencias de al menos una semana durante periodos cálidos.

Las plantas cosechadas son típicamente secadas y enterradas. El proceso de secado puede ser una fuente significativa de olores. En Guatemala se hizo una investigación acerca de la factibilidad de realizar el proceso de compostaje para la laguna de jacintos de agua de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales Aurora II de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos. Las dimensiones de largo x ancho x profundidad de la laguna son 6m x 3.7m x 0.9m, la relación largo/ancho no coincide con las especificaciones para el diseño de sistemas acuáticos de jacinto de agua ya que la laguna no es el único elemento que trata las aguas residuales de dicha planta sino que está dentro del sistema compuesto por lagunas de estabilización, sedimentador primario, filtros biológicos, sedimentador secundario, laguna de jacintos de agua y pozo de absorción.

Después de que se realizaron los análisis de producción de biomasa y las pruebas necesarias de compostaje del jacinto producido en la laguna de la planta piloto Aurora II, se concluye que el jacinto puede ser aprovechado para la producción de abono orgánico, ya que posee propiedades y requerimientos necesarios de compostaje para la aplicación en los suelos o cultivos. El proceso de compostaje puede durar de 2 a 3 meses dependiendo de la cantidad de Jacinto que se procese; sin embargo como un parámetro se puede establecer que los 18.20 Kg al mes que se producen en cada octavo de la laguna mencionada anteriormente pueden completar su proceso de descomposición en 2 meses. Durante el proceso de compostaje se produce una pérdida del orden del 30 % del volumen inicial de residuos y un 70 -75 % del peso original, debido a los procesos bioquímicos y a la manipulación del materia.

La aplicación del compostaje por medio del Jacinto acuático de la planta Aurora II, sí puede utilizarse como abono orgánico para las plantas ya que durante la investigación se observó una diferencia del 35% en el crecimiento de las diferentes muestras (tomados bajo el mismo tiempo de inicio) entre la aplicación del compostaje de Jacinto y la no aplicación del mismo (solo suelo, sin abono alguno).

4.3.5 Mosquitos y control de los mismos

El objetivo de controlar los mosquitos es suprimir la población de los mismos bajo el nivel crítico requerido para evitar transmisión de enfermedades o evitar molestias en las personas que viven en los alrededores. Entre las estrategias que pueden ser utilizadas para controlar la población de mosquitos podemos mencionar: 1) poblar los estanques de jacinto con pez mosquito (*Gambusia affinis*). 2) realizar un pretratamiento más efectivo para reducir la carga orgánica total en el sistema acuático y así ayudar a mantener condiciones aeróbicas. 3) utilizar *step feed* (alimentar el estanque con agua residual en varios puntos a lo largo de mismo) para alimentar el estanque y reciclar el flujo (conducir el efluente de nuevo a la parte inicial del estanque). 4) realizar la cosecha con más frecuencia. 5) aplicar agentes de control artificiales. 6) difusión de oxígeno (con equipo de aeración).

El control efectivo de mosquitos está basado en dos parámetros operacionales bastante complicados: el mantenimiento del OD a 1mg/L y la realización frecuente de la cosecha para hacer menos espesa la población de los jacintos de agua. En la planta de San Diego se ha empleado aeración suplementaria para mantener este objetivo.

En muchas partes de los Estados Unidos, el aumento de mosquitos en sistemas de tratamiento acuático puede ser un factor crítico para determinar si el uso de tales sistemas pueda ser permitido. Los peces utilizados para el control de mosquitos (típicamente *gambusia affinis*) morirían en condiciones anaeróbicas causadas por cualquier sobrecarga orgánica en los estanques. Además de la dificultad de los peces para sobrevivir, los mosquitos se pueden desarrollar en sistemas de jacinto densos cuando se ha permitido que las plantas crezcan muy juntas. En el cuerpo de la planta se forman pequeñas burbujas de agua que son accesibles para las larvas del mosquito pero no para los peces.

4.3.6 Parámetros de diseño sugeridos

Los parámetros de diseño utilizados para dimensionar sistemas acuáticos incluyen tiempo de retención hidráulica, tasa de carga orgánica, y con menos frecuencia, tasa de carga de nitrógeno. Los criterios de diseño para limpieza de efluentes utilizando lenteja de agua en lagunas facultativas se resumen en la tabla XXIV

Tabla XXIV. Criterios de diseño para limpieza de efluentes con sistemas de tratamiento de lenteja de agua

Factor	Tratamiento secundario
Agua residual inicial	Efluente de laguna facultativa
Carga de DBO ₅ , kg/(Ha-d)	22 – 28
Carga hidráulica, m ³ /(Ha-d)	< 50
Profundidad del agua, m	1.5 – 2.0
Tiempo de retención hidráulica, días	15 – 25
Temperatura del agua, °C	> 7
Frecuencia de cosecha	Mensual

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 54

4.3.7 Manejo de lodos

El lodo está comprendido por los sólidos del agua residual y por los desechos descompuestos de la planta. Los lodos deben ser removidos eventualmente de los estanques del sistema de plantas acuáticas. Las cantidades de lodo que se acumulan, se estimó en la planta Williamson Creek, Texas, que fueron de 1.5 a $8 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ de lodo/ m^3 de agua residual tratada. Para lagunas de estabilización primarias convencionales la cantidad de lodo que se acumula es de $1.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ de lodo/ m^3 de agua residual tratada. Generalmente, la tasa de acumulación de lodo en un estanque que contiene jacintos de agua está en función del pretratamiento proveído. Se dispone de muy poca información con respecto a la acumulación de lodos en estanques con plantas acuáticas. Se ha sugerido que la frecuencia de limpieza de estanques de jacinto se base en el grado de tratamiento y en la frecuencia de la cosecha de la planta. En la tabla XXV se muestran las frecuencias de limpieza sugeridas.

Tabla XXV. Frecuencia recomendada para limpieza de lodos en estanques de jacinto de agua

Tipo de estanque	Frecuencia de limpieza
Estanques primarios en sistemas de alta tasa poco profundos	Anual
Estanques secundarios	2-3 años
Estanques terciarios	2-3 años
Estanques secundarios profundos (regularmente cosechados)	5 años
Estanques secundarios (irregularmente cosechados)	Anual
Sistemas utilizados solo temporalmente	Anual

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 54

4.4 Características físicas de los sistemas de tratamiento acuático

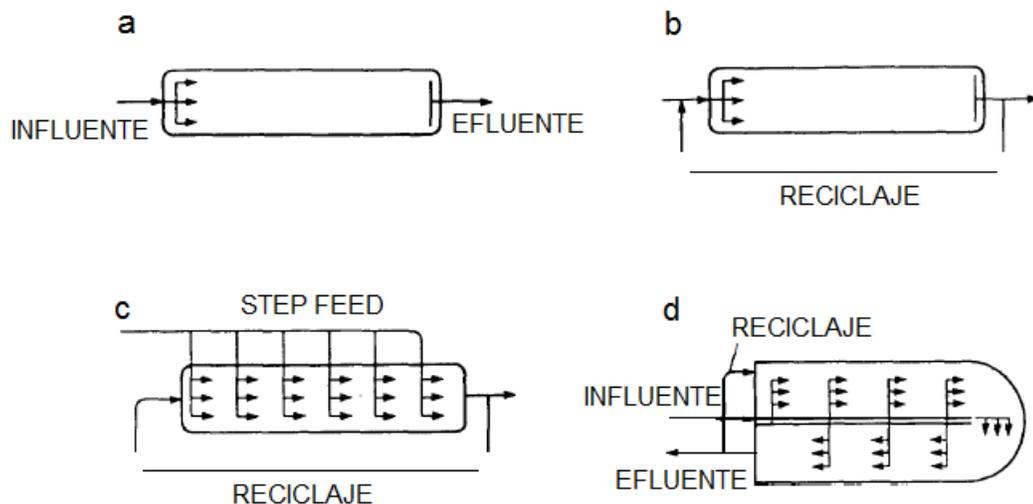
4.4.1 Configuraciones del sistema

La mayoría de los primeros sistemas de jacinto involucraban estanques rectangulares operados en serie, con similitud a lagunas de estabilización. Canales largos y estrechos fueron los utilizados en las investigaciones de la planta de Disney World en Florida. El proyecto de acuicultura de San Diego, por ejemplo, es un proyecto de jacinto de agua a escala piloto que recibe un efluente primario y realiza tratamiento para obtener un efluente secundario. La configuración actual de este sistema a implicado resolver problemas anteriores de olores de sulfuro de hidrógeno, y presencia de larvas de mosquitos en los estanques. La solución a los problemas anteriores se refleja en la configuración única del sistema y en el sistema de distribución del influente.

Experiencias de las primeras operaciones en las instalaciones de San Diego indicaron que los olores de sulfuro de hidrógeno y las larvas de mosquitos fueron un problema. Por causa del ambiente urbano en el que está ubicada la planta piloto, ésta tenía requerimientos estrictos de que no debía existir ningún mal olor ni larvas de mosquitos. Soluciones iniciales incluyeron cargas orgánicas más bajas y reciclar el flujo del efluente (trasladándolo hacia la parte inicial del estanque como influente) para diluirlo y distribuir la carga orgánica a lo largo del estanque. Esta solución fue exitosa parcialmente y las tasas de carga orgánica debían permanecer bajas para prevenir condiciones anaeróbicas en el tramo inicial del estanque. Una serie de ensayos de concentración de DBO_5 a lo largo del estanque indicó que la mayoría de la remoción de DBO_5 ocurría en los primeros 15 metros del total de 120 metros de la longitud del estanque.

La configuración para los sistemas más reciente involucra el reciclamiento del efluente y la utilización de *step feed* (alimentar el estanque en diversos puntos a lo largo del mismo) en ocho puntos separadas aproximadamente 15 metros a lo largo del estanque. La aeración suplementaria también se ha convertido en una parte regular de la configuración del estanque. La evolución de los experimentos en sistemas de distribución que han resultado en la elección de *step feed* con reciclaje se muestran en la figura 29. El reciclaje y el *step feed* deberían ser utilizados como herramientas operacionales de control de la carga orgánica en el estanque. Con estas herramientas y un estanque con alta relación largo/ancho (>10:1), el operador puede controlar el proceso de tratamiento para obtener el mejor funcionamiento. El patrón C representa el sistema actual de San Diego y el patrón D representa el esquema de reciclado para instalaciones futuras. El diseño del patrón D acorta las líneas de reciclado y las líneas del *step feed*.

Figura 29. Evolución de los patrones de flujo en la planta de San Diego California Estados Unidos, estanques de tratamiento de jacinto de agua



a) Flujo original, b) Flujo con reciclaje c) *step feed* con reciclaje d) *step feed* con reciclaje en estanque en U.

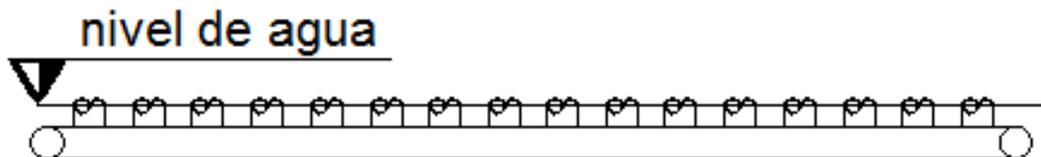
Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 56

4.4.2 Estructuras de entrada y salida

Usualmente se diseñan estanques rectangulares poco profundos con una alta relación largo/ancho para sistemas de tratamiento acuático con el fin de reducir el potencial de recorrido corto y simplificar las operaciones de siega o cosecha. El uso de deflectores y tubos múltiples para la distribución del influente ayuda a maximizar el tiempo de retención. Sistemas de tubos múltiples en la entrada de los estanques y entradas múltiples a lo largo del estanque (*step feed*) también pueden ser utilizadas efectivamente para reciclar el efluente tratado con el fin de reducir las concentraciones de los componentes del agua residual al inicio de los estanques.

La utilización de un tubo múltiple (figura 30) colocado transversalmente al final del estanque mantendría una velocidad baja en dicho tubo, lo cual sirve para mantener condiciones tranquilas de flujo cerca de la salida. Si se planean profundidades de operación variables, debería ser posible remover efluente a una distancia de 0.3m debajo de la superficie en el punto en el cual la altura de operación es la menos profunda.

Figura 30. Tubo múltiple para distribución ó evacuación de flujo



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2010).

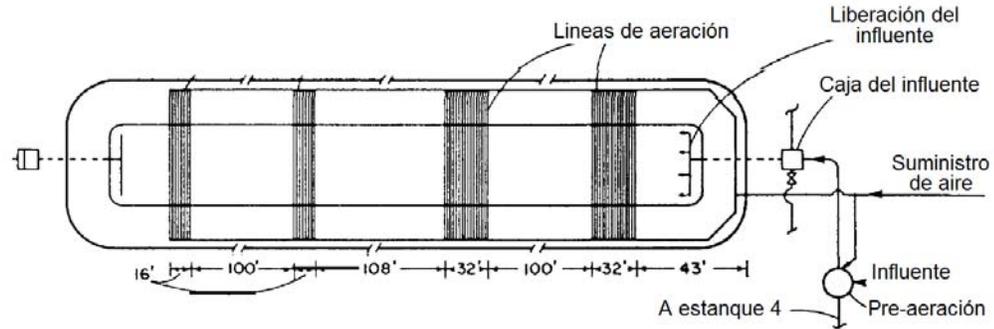
4.4.3 Aeración suplementaria

La necesidad de aeración se deriva de las restricciones para controlar los olores y los mosquitos. La aeración de los estanques ayuda a mantener el OD arriba de 1 mg/L en el sistema, lo cual es beneficioso para el pez mosquito y además la aeración minimiza la producción del gas H₂S. Una configuración exitosa del sistema de aeración en San Diego utiliza difusores de burbujas finas.

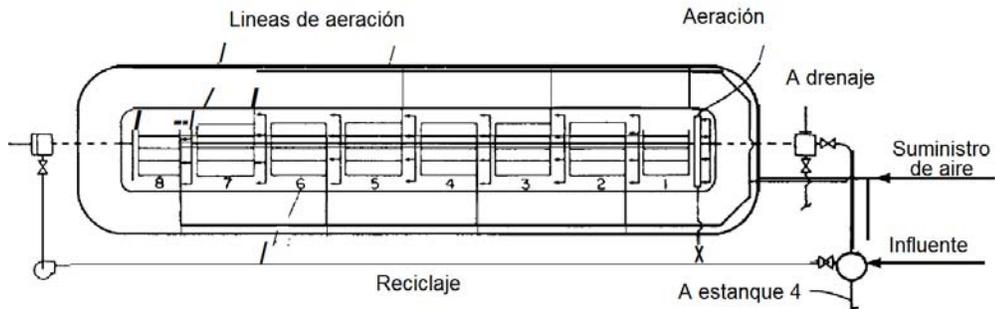
Dichos difusores hacen que los niveles del OD estén entre 0.5 y 1.0 mg/L arriba de los niveles producidos por difusores de burbujas ordinarios en estanques configurados similarmente con la misma carga de DBO₅ (figura 31). Durante las horas del día un sistema automatizado hace encender y apagar el ciclo para mantener el OD > 1 mg/L. Cuando los jacintos de agua se activan fotosintéticamente, transportan oxígeno a sus raíces y al mismo tiempo a los microbios adheridos a las mismas. Este proceso disminuye la necesidad de aeración suplementaria y los costos de energía asociados a la misma.

Figura 31. Evolución del flujo del estanque 3 y configuraciones del sistema de aeración en la planta de San Diego California Estados Unidos

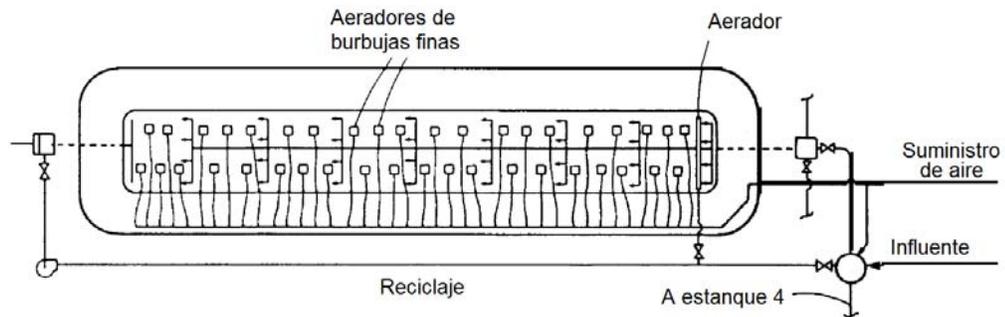
a. En operación de mayo 84' a abril 86'



b. En operación de mayo 86' a octubre 87'



c. En operación de noviembre 87' hasta la fecha



a) Flujo original con difusión de aire por tubería, b) *Step feed* con reciclaje y sistema de aeración con difusores ordinarios c) *step feed* con reciclaje y sistema de aeración de burbujas finas.

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 57

Un método interesante de aeración suplementaria existente es el riego por espray. En este método, el agua residual es reciclada por medio del espray sobre los jacintos. Esta técnica se cita a menudo para el control del hielo en climas donde las temperaturas de invierno son marginales para los jacintos. Usualmente se utiliza un sistema de reciclaje por espray en el cual las plantas sean tolerantes a la temperatura para que funcione como un filtro biológico viviente.

El proyecto de San Diego experimentó con riego por espray para aeración suplementaria y encontró aeración efectiva y menor población de larvas de mosquitos. La población menor de vectores probablemente se debió a la alteración de la interfaz agua/aire por el efecto simulado de lluvia durante la noche ya que es por la noche cuando los mosquitos se reproducen activamente.

Un efecto negativo importante en la utilización de espray en el proyecto de San Diego estuvo relacionado con la salud de las plantas de jacinto. Las plantas en dicho proyecto, a las cuales se les aplicaba el agua reciclada por espray empezaron a mostrarse cargadas y amarillentas mientras que a las que no se les aplicaba, florecieron. La salud de las plantas se mejoró por medio de la limitación de rociar las plantas en el periodo de la noche. Aunque el riego por espray efectivamente incrementa los niveles de OD, y limita el crecimiento de las poblaciones de larvas de mosquitos, asuntos sobre el incremento de los SDT (Sólidos disueltos totales) debido a la evaporación excesiva y el costo del bombeo, tienden a minimizar el valor de este alcance.

4.4.4 Operación y mantenimiento de la aeración

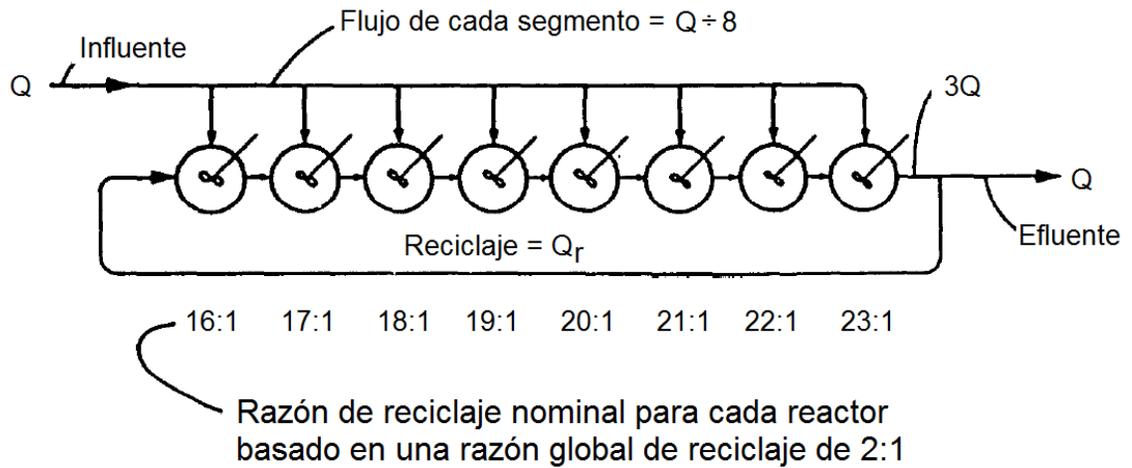
El OD (oxígeno disuelto) debería ser medido al menos dos veces al día. El objetivo debería ser mantener un promedio de la concentración del OD de 1-2 mg/L a lo largo del estanque. Si el OD cae por debajo de 1 mg/L, se debería adicionar más aeración, o se debería reducir el flujo del influente hasta que se dé la recuperación del estanque. Esta operación puede ser automatizada y optimizada con sondas para OD. Difusores de burbujas finos pueden desarrollar una acumulación de limo biológico espeso después de varios meses de operación, especialmente si la aeración es intermitente. Una limpieza mensual de los estanques con un cepillo puede ser efectiva al menos para controlar temporalmente el crecimiento de limo biológico.

4.5 Expectativas de funcionamiento

4.5.1 Ecuaciones de diseño

En el proyecto de San Diego se examinó los resultados de una serie de ensayos para determinar la tasa máxima de carga orgánica permisible y las razones óptimas de reciclaje. Basándose en dichos resultados de los ensayos del proyecto de acuicultura de San Diego se concluyó que el sistema modificado con alimentación *step feed* podía ser modelado como una serie de tanques reactores de circulación (figura 32). Los criterios de diseño para el sistema de jacintos original y para el sistema de jacintos modificado con alimentación *step feed* y reciclaje se resumen en la tabla XXVI.

Figura 32. Esquema para el modelado de un estanque de jacintos con *step feed* y reciclaje



Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 70

Tabla XXVI. Criterios de diseño para estanques de jacinto modificados

Ítem	Estanque original	Estanque modificado
Configuración del estanque Sección transversal Esquema de flujo	Trapezoidal En una dirección	Trapezoidal Step feed con reciclaje ^a
Dimensiones para estanques Longitud máx., m Ancho de la base, m Pendientes de los lados Altura máx., m Ancho superior a 1.5m de altura	122 3.55 2:1 1.22	122 3.66 2:1 1.52 9.76
Área superficial, ha A 1.07m de altura A 1.22m de altura A 1.37m de altura	0.097	0.097 0.105 0.113
Operación y proceso de diseño Carga de DBO ₅ (DBO ₅ /DQO=0.45), kg/(ha-d) Q influente por estanque, m ³ /d Profundidad de operación, m Razón de reciclaje Flujo de aire máx./aerador, m ³ /min OD en estanque, mg/L	123 ^b 0.98 Variable 0	359 ^b 313 1.37 ^c 2:1 0.028 1.2
Efluente esperado, mg/L (%del tiempo) DBO ₅ SS		120 (90) ≤10 (50) ≤25 (90) 11.0(50)

^aBasado en un estanque en U con alimentación step feed (figura 29d).

^bBasado en una relación DBO₅/DQO de aproximadamente 0.7.

^cTentativamente basado en las conclusiones de ensayos de profundidad.

^aUtilización de un sistema de aeración (figura 31c).

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 67

4.5.1.1 Remoción de DBO₅

El estado constante de balance para el primer reactor en la serie de ocho reactores asumiendo una remoción de DBO₅ de primer orden es:

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} \quad (\text{Ecuación 4-1})$$

$$0 = Q_r(C_8) + 0.125Q(C_0) - (Q_r + 0.125Q)(C_1) - k_T(C_1)V_1 \quad (\text{Ecuación 4-2})$$

Donde,

Q_r = flujo de reciclaje, m³/d

C_8 = Concentración de DBO₅ en el efluente del reactor número 8 en serie, mg/L = $C_0/23$ (ver figura 32)

$0.125Q$ = influente en cada celda individual ($Q/8$), m³/d

C_0 = Concentración de DBO₅ en el influente, mg/L

C_1 = Concentración de DBO₅ en el efluente del reactor número 1 en serie, mg/L = $C_0/16$ (ver figura 32)

k_T = Tasa de reacción de primer orden constante a una temperatura T, d⁻¹

V_1 = Volumen del primer reactor en serie, m³

El valor estimado de k_T a ser usado en la ecuación 4-2 es de 1.95 d⁻¹ a 20 °C. Un aspecto importante del sistema de reciclaje es que la razón de reciclaje es de 16:1 para el primer reactor en serie y de 23:1 para el último reactor en serie. Si el flujo de reciclaje se mezclara directamente con el influente antes de ser aplicado al estanque, la razón de reciclaje sería de 2:1. La diferencia entre estos dos modos de operación es significativa con respecto al funcionamiento del estanque.

4.5.1.2 Efecto de la temperatura

Basándose en los resultados del programa de ensayos diarios, el valor del coeficiente temperatura, θ , en la siguiente ecuación se estima que es aproximadamente 1.06.

$$k_T = k_{20} \theta^{(T - 20)} \quad (\text{Ecuación 4-3}); \quad \text{Donde,}$$

θ = Coeficiente de temperatura deducido empíricamente.

T = Temperatura de operación del agua, °C.

4.5.2 Remoción de nitrógeno

La remoción de nitrógeno por el consumo de las plantas solo puede ser lograda si las plantas son cosechadas. El nitrato producido por medio de la nitrificación es removido por la desnitrificación y el consumo de las plantas. En el pasado, ha habido algunas preguntas acerca de que si la nitrificación o el consumo de las plantas es el principal mecanismo de conversión ($\text{NH}_4\text{-N}$) amoníaco-nitrógeno que finalmente conduce a la remoción de nitrógeno. Basándose en datos recopilados de evaluaciones de sistemas de tratamiento de jacintos de agua existentes, se concluyó que la nitrificación seguida por la desnitrificación es el principal mecanismo de remoción de nitrógeno. Se concluyó también que el principal mecanismo de remoción de nitrógeno fue el consumo de las plantas, únicamente en los casos en los que los sistemas de jacinto de agua recibieron bajas cargas de nitrógeno y siega significativa.

Se ha analizado la remoción de nitrógeno para 54 puntos de estudio incluyendo localidades en Coral Springs Florida, Williamson Creek, MS; y la Universidad de Florida, los resultados se presentan en la tabla XXVII como el % esperado de remoción de nitrógeno en función de la tasa de carga superficial.

Tabla XXVII. Remoción de nitrógeno – Tratamiento terciario, jacinto de agua

Carga hidráulica, m³/(Ha-d)	Reducción total de nitrógeno, %
9350	10-35
4675	20-55
2340	37-75
1560	50-90
1170	65-90
≤ 935	70-90

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency. Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Pág. 58

4.5.3 Remoción de fósforo

La remoción de fósforo por medio de sistemas de macrófitas acuáticas se da debido al consumo de las plantas, la inmovilización microbiana en el tejido de las plantas que se descomponen, la retención por los sedimentos subyacentes y la precipitación en la columna de agua. Puesto que el fósforo es retenido por el sistema, la remoción final del sistema se alcanza por medio de la siega o cosecha de las plantas y el dragado de los sedimentos.

El consumo de fósforo en los pantanos de Florida promedió 11% con señales de extracción neta de fosforo durante el invierno. Se estudió la productividad del crecimiento de los jacintos de agua con varias fuentes de nitrógeno. La relación óptima de nitrógeno/fósforo (N/P) en el medio acuático debería ser 2.3 a 5 para alcanzar los máximos rendimientos para la producción de biomasa. Este rango ideal puede ser usado para estimar si el nitrógeno o fósforo está limitando el crecimiento de los jacintos de agua en el ambiente de un estanque en particular.

Se encontró en un estudio que la remoción de fósforo (P) por precipitación/absorción en sistemas acuáticos sin involucrar la siega de las plantas es de aproximadamente 2 kg P/(Ha-d). El fósforo puede ser removido previamente a aplicar el agua residual a un sistema acuático por medio de una adición química y la reacción de la precipitación. La precipitación puede ser el método con mayor beneficio para la remoción dependiendo del grado de remoción de fósforo requerido(U. E. Agency).

4.6 Ejemplos de diseño

Los dos ejemplos siguientes indican como pueden ser aplicados los criterios de diseño del presente capítulo.

Problema 1: diseñe un sistema de jacinto de agua para producir un efluente secundario, el influente a tratar es un flujo de agua residual municipal con pretratamiento de cribado(U. E. Agency).

Asumir:

Caudal de diseño = 730 m³/d

DBO₅ = 240 mg/L

SS = 250 mg/L

NT = 20 mg/L

FT = 10 mg/L (fósforo total)

Temperatura crítica de invierno > 20 °C.

Requerimientos del efluente:

DBO₅ < 30 mg/L

SS < 30 mg/L

Solución:

1. Determine la carga de DBO₅:

$$\text{DBO}_5 = 240 \text{ mg/L} = 0.240 \text{ Kg/m}^3$$

$$\begin{aligned}\text{Carga de DBO}_5 &= (Q_{\text{diario}})(\text{DBO}_5) \\ &= (730 \text{ m}^3/\text{d})(0.24 \text{ kg/m}^3) = 175 \text{ kg/d}\end{aligned}$$

2. Determine el área superficial requerida basándose en los criterios de la Tabla XXII:

Tipo de sistema: aeróbico sin aeración (suplementaria).

Propósito: tratamiento secundario.

Carga típica de DBO_5 ($\text{Kg}/(\text{Ha-d})$): entre 40 y 80

Asumir carga típica de DBO_5 a utilizar = 50 $\text{kg}/(\text{Ha-d})$ para todo el sistema.

$$\begin{aligned}\text{Área total} &= (\text{Carga orgánica diaria})/(\text{Carga típica de DBO}_5 \text{ asumida}) \\ &= (175 \text{ kg/d})/(50 \text{ kg}/(\text{Ha-d})) = 3.5 \text{ Ha}\end{aligned}$$

Asumiendo carga típica de DBO_5 para los estanques primarios = 100 $\text{kg}/(\text{Ha-d})$.

$$\text{Área de estanques primarios} = 175 / 100 = 1.75 \text{ Ha}$$

3. Utilice dos estanques primarios, cada uno con un área de 0.88 ha; con relación largo: ancho ($L:W$) = 3:1, las dimensiones de la superficie de agua serán:

$$3W = L$$

$$W = L/3$$

$$\begin{aligned}\text{Área de estanques primarios} &= L * W &= L(L/3) &= L^2/3 \\ (0.88 \text{ Ha})(10,000 \text{ m}^2/\text{Ha}) & &= &= L^2/3 \\ 8,800 \text{ m}^2 & &= &= L^2/3\end{aligned}$$

$$L = 163\text{m}$$

$$W = 163/3 = 54\text{m}$$

4. Divida el área requerida restante (3.5 ha – 1.75 ha = 1.75 ha) en dos sets de dos estanques (cuatro estanques de 0.44 ha cada uno) para producir un sistema total con dos sets paralelos, de tres estanques cada uno.

$$\begin{aligned} \text{Área de estanques finales} &= L * W &&= L(L/3) = L^2/3 \\ (0.44 \text{ Ha})(10,000 \text{ m}^2/\text{Ha}) & &&= L^2/3 \\ 4,400 \text{ m}^2 & &&= L^2/3 \end{aligned}$$

$$L = 115 \text{ m}$$

$$W = 115/3 = 38 \text{ m}$$

5. Permitir 0.5 m para el almacenaje de lodos y asuma una profundidad “efectiva” de 1.2m para el tratamiento; profundidad total del estanque = 1.7 m. Para las cuatro paredes de los estanques utilice pendientes de 3H:1V y utilice la ecuación siguiente para determinar el volumen de tratamiento.

$$V = [A_1 + A_2 + \sqrt{(A_1 A_2)}] * d/3$$

(Volumen de una pirámide truncada de base rectangular).

Donde, $A_1 = \text{Área del espejo de agua} = LW$

$A_2 = \text{Área del fondo del estanque} = (L-2sd)(W-2sd)$

L = Largo del estanque

W = Ancho del estanque

s = Factor de pendiente (ej. 3H:1V , s=3)

d = Profundidad efectiva del estanque.

Estanques primarios:

$$A_1 = 164 \times 54 = 8802 \text{ m}^2$$

$$A_2 = (163 - 2 \times 3 \times 1.2)(54 - 2 \times 3 \times 1.2) = 7291.44 \text{ m}^2$$

$$d = 1.2 \text{ m}$$

$$V = (8802 + 7291.44 + \sqrt{(8802 \times 7291.44)}) \times 1.2/3 = 9642 \text{ m}^3$$

Estanques finales:

$$A_1 = 115 \times 38 = 4370 \text{ m}^2$$

$$A_2 = (115 - 2 \times 3 \times 1.2)(38 - 2 \times 3 \times 1.2) = 3320.24 \text{ m}^2$$

$$d = 1.2 \text{ m}$$

$$V = (4370 + 3320.24 + \sqrt{(4370 \times 3320.24)}) \times 1.2/3 = 4600 \text{ m}^3$$

6. Determine el tiempo de retención hidráulica en la zona “efectiva” de tratamiento:

Estanques iniciales:

$$t = (2)(9642 \text{ m}^3)/(730 \text{ m}^3/\text{d}) = 26 \text{ días}$$

Estanques finales:

$$t = (4)(4600 \text{ m}^3)/(730 \text{ m}^3/\text{d}) = 25 \text{ días}$$

Tiempo total de retención = 26 + 25 = 51 días, OK.

7. Chequear la carga hidráulica:

$$\begin{aligned} \text{Carga hidráulica} &= (Q_{\text{dis}})/(A_{\text{total de la superficie}}) \\ &= (730 \text{ m}^3/\text{d})/(3.5 \text{ ha}) \\ &= 209 \text{ m}^3/(\text{Ha-d}) > 200 \text{ m}^3/(\text{Ha-d}), \text{ OK.} \end{aligned}$$

8. Estime la remoción de nitrógeno con los datos de la tabla XXVII para asegurarse de que el nitrógeno presente es suficiente para mantener un crecimiento de las plantas flotantes en los estanques finales y para determinar la frecuencia de cosecha.

$$\text{Carga hidráulica} = 209 \text{ m}^3/(\text{Ha-d})$$

De la Tabla XXVII, se predice esencialmente el 90% de remoción de nitrógeno a una carga hidráulica $< 935 \text{ m}^3/(\text{Ha-d})$. Ya que se predice el 90% de remoción, y sabiendo que el nitrógeno total en el influente es de 20mg/L es razonable esperar aproximadamente 2mg/L de nitrógeno en el efluente final. Debido a que el nitrógeno no estará a los niveles de crecimiento óptimo en este sistema se sugiere realizar la cosecha anualmente. Con el fin de distribuir el agua residual no tratada en el influente, se recomienda colocar a la entrada de cada estanque primario un dispositivo (tubo múltiple, tubo agujerado, etc.) para esparcir el agua residual a lo ancho de los mismos.

Problema 2: diseñe un sistema de jacinto de agua aerado con reciclaje para producir efluente secundario en una localidad en donde se tiene un área limitada(U. E. Agency).

Asumir:

$$\text{Caudal de diseño} = 730 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{DBO}_5 = 240 \text{ mg/L}$$

$$\text{SS} = 250 \text{ mg/L}$$

$$\text{NT} = 20 \text{ mg/L}$$

$$\text{FT} = 10 \text{ mg/L (fósforo total)}$$

$$\text{Temperatura del agua en el invierno} = 20 \text{ }^\circ\text{C.}$$

Requerimientos del efluente:

$DBO_5 < 30 \text{ mg/L}$

$SS < 30 \text{ mg/L}$

Asumir que la superficie de agua se mantendrá cubierta por las plantas en un 80%, y también que se realizará una rutina de cosecha (siega) mensual.

Solución:

1. Ya que el área del lugar es limitada, no se dispone de espacio para estanques de tratamiento preliminar. Utilice un tanque Imhoff para tratamiento primario y aeración suplementaria en los estanques de jacinto para minimizar los requerimientos de área. El tanque Imhoff tiene la ventaja para este flujo relativamente pequeño de que la digestión separada de lodos no es requerida.
2. Diseño del tanque Imhoff.

Criterios típicos:

Tiempo de retención de sedimentación = 2hrs.

Carga superficial = $24 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

Carga hidráulica sobre el vertedero = $600 \text{ m}^3/(\text{m} \cdot \text{d})$

Área superficial para la cámara de natas = 20 % del total de la superficie

Volumen para la digestión de lodos = $0.1 \text{ m}^3 / \text{habitante}$, de la población servida, ó aproximadamente 33% del total del volumen del tanque.

Área de sedimentación mínima requerida

$$= (730 \text{ m}^3/\text{d}) / (24 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})) = 30.4 \text{ m}^2$$

Área superficial requerida para natas

$$= (0.2)(30.4 \text{ m}^2) = 6.1 \text{ m}^2$$

Total de área superficial requerida

= área de sedimentación + área de natas

$$= 30.4 + 6.1 = 36.5 \text{ m}^2$$

Un tanque típico para este problema podría tener 7.5 metros de longitud y 5 metros de ancho. En este caso la cámara de sedimentación central puede ser de 4m de ancho con canales abiertos de cada lado de aproximadamente 0.5m para la acumulación de natas y ventilación de los gases, y así obtener el total de 5m de ancho del tanque. El fondo de paredes inclinadas con ranura (paredes del fondo con pendiente de 5:4) tendría que tener aproximadamente 3m de profundidad para proveer las 2 hrs necesarias del tiempo de retención. La profundidad total del tanque podría ser de 6m o 7m.

Un tanque Imhoff con mantenimiento apropiado puede alcanzar aproximadamente 47% de remoción de DBO_5 y más de un 60% de remoción de SS. Asumiendo que no habrá pérdida de nitrógeno o fosforo el efluente primario para este ejemplo sería:

$$\text{DBO}_5 = (240 \text{ mg/L})(0.53) = 127 \text{ mg/L}$$

$$\text{SS} = (250 \text{ mg/L})(0.40) = 100 \text{ mg/L}$$

$$\text{NT} = 20 \text{ mg/L}$$

$$\text{FT} = 10 \text{ mg/L (fósforo total)}$$

3. La carga de DBO_5 en el sistema de estanques de jacinto sería:

$$\begin{aligned} \text{CO} &= (127 \text{ mg/L})(730 \text{ m}^3/\text{d})(10^3 \text{ L/m}^3)(1 \text{ kg}/10^6 \text{ mg}) \\ &= 92.7 \text{ kg/d} \end{aligned}$$

4. Determine el volumen del sistema utilizando la ecuación 4-2. Asuma una razón de reciclaje de 2:1. Diseñe el sistema con *step feed* en ocho puntos como se muestra en la figura 31. La concentración del efluente de las ocho secciones del sistema puede ser estimada de la razón de reciclaje como se muestra en la figura 32.

$$0 = Q_r(C_8) + 0.125Q(C_0) - (Q_r + 0.125Q)(C_1) - k_T(C_1)V_1 \quad (4-2)$$

Donde,

$$Q_r = \text{flujo de reciclaje, m}^3/\text{d} = 2Q = 2(730) = 1460 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$C_8 = \text{Concentración de DBO}_5 \text{ en el efluente del reactor número 8 en serie, mg/L} = C_0/23 \text{ (ver figura 32)} = 127/23 = 5.52 \text{ mg/L}$$

$$0.125Q = \text{influyente en cada celda individual (Q/8), m}^3/\text{d} = 730/8 = 91.25 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$C_0 = \text{Concentración de DBO}_5 \text{ en el influente, mg/L} = \text{efluente del tanque Imhoff} = 127 \text{ mg/L}$$

$$C_1 = \text{Concentración de DBO}_5 \text{ en el efluente del reactor número 1 en serie, mg/L} = C_0/16 \text{ (ver figura 32)} = 127/16 = 7.94 \text{ mg/L}$$

$$k_T = \text{Tasa de reacción de primer orden constante a una temperatura T, d}^{-1} = 1.95 \text{ d}^{-1} \text{ a una temperatura de } 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$V_1 = \text{Volumen del primer reactor en serie, m}^3 = (\text{Volumen total})/8, \text{ m}^3.$$

$$0 = (1460)(5.52) + (91.25)(127) - (1460 + 91.25)(7.94) - (1.95)(7.94)V_1$$

$$0 = 8059 + 11589 - 12317 - 15.5 V_1$$

$$V_1 = 473 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total del sistema} = 8 \cdot V_1 = 8 \cdot (473) = 3784 \text{ m}^3$$

5. Calcule el número de estanques requeridos. Utilice los criterios de diseño de la Tabla XXVI para calcular la dimensión de los estanques. Basándose en dichos criterios, las medidas apropiadas para los estanques deberían ser: 122 m * 8.5 m * 0.75 m, de largo, ancho y profundidad respectivamente. Estas dimensiones para un estanque resultan en un volumen de 778 m³. Para obtener el volumen total del sistema (3784 m³), se necesitaran cinco estanques.
- Asuma que el oxígeno requerido es el doble que la carga orgánica, el aire contiene aproximadamente 0.28 kg/m³ de oxígeno y la eficiencia (E) de la aeración en los estanques poco profundos es aproximadamente del 8 por ciento.

Total de aire requerido:

$$\begin{aligned}
 &= [2(\text{DBO}_5, \text{ mg/L})(Q \text{ L/d})(10^{-6} \text{ kg/mg})]/[E(0.28 \text{ kg/m}^3)] \\
 &= [(2)(127)(730 \cdot 10^3)(10^{-6})]/[(0.08)(0.28)] \\
 &= 8278 \text{ m}^3/\text{d} = 5.75 \text{ m}^3/\text{minuto}.
 \end{aligned}$$

De la Tabla XXVI, el flujo de aire máximo por aerador es 0.028 m³/min. Ya que habrá cinco estanques, el número de aeradores requeridos por estanque es:

$$\begin{aligned}
 \text{Numero de aeradores} &= (5.75 \text{ m}^3/\text{min})/[(5 \text{ estanques})(0.028 \text{ m}^3/\text{min})] \\
 &= 41.1 \text{ aeradores/estanque}
 \end{aligned}$$

Divida los aeradores de cada estanque en ocho secciones dentro de los mismos como se muestra en la figura 31c. Cada aerador debería cubrir aproximadamente un área de 0.14 m².

6. Un sistema de entrada de *step feed* es esencial para asegurar que en los estanques se genere una distribución uniforme del influente. El uso del pez mosquito u otro agente químico o biológico es necesario para el control de mosquitos. Las plantas deberían ser segadas (cosechadas) aproximadamente a cada tres o cuatro semanas. En ningún momento se deberá remover más del 20% de la cubierta de plantas.

7. El sistema de tratamiento diseñado en este ejemplo tendrá mejores resultados que el sistema desarrollado en el ejemplo 1 en la mitad o una tercera parte del área de dicho ejemplo. Las principales razones son el uso del tanque Imhoff para tratamiento primario, la alimentación por *step feed*, y la aeración suplementaria. En lugares en donde no se dispone de terrenos o estos son muy costosos, el tratamiento con un sistema como el del presente ejemplo podría ser rentable cuando se requiera un nivel de tratamiento secundario. El costo del equipo de aeración puede ser compensado cuando la adquisición de tierras para construir los estanques sea demasiado cara. Un sistema de jacinto aerado se convierte en un sistema híbrido que es más complejo que un sistema acuático natural y menos complejo que el tratamiento convencional con filtros biológicos o módulos rotatorios de contacto.

5. CASO PRÁCTICO: CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON PLANTAS ACUÁTICAS

5.1 Descripción del sistema por construir

El sistema que se construyó consiste en un estanque de Jacinto de agua para tratar las aguas residuales domesticas (aguas de pila y ducha) de una vivienda individual de la aldea el astillero del municipio de Masagua, departamento de Escuintla. Dicha aldea no cuenta con servicio de alcantarillado público y se deja correr las aguas de pila y ducha por las calles, para la disposición de excretas y orina se utilizan letrinas de pozo seco y/o pozo ventilado.

5.2 Diseño del sistema

Datos de diseño:

No de habitantes = 4

Demanda bioquímica de oxigeno = 203 mg/L

Sólidos suspendidos = 154 mg/L

Dotación = 75 Lt/(Hab-d) (Si no se puede investigar se analiza la cantidad de agua que se gasta y se justifica la utilización de un valor).

Factor de retorno (FR) para lugares cálidos = 0.8

Temperatura ambiente durante la evaluación del sistema > 20 °C

1. Cálculo del caudal domiciliar (Caudal de diseño, Qdis)

$$\begin{aligned} Q_{dis} &= (\text{Dotación} * \text{FR} * \#\text{Hab})/86400 \\ &= (75 \text{ lt}/(\text{hab-d}))(0.8)(4 \text{ hab})/86400 \end{aligned}$$

$$= 2.78 \cdot 10^{-3} \text{ lt/seg} = 0.24 \text{ m}^3/\text{día}$$

$0.24 \text{ m}^3/\text{d} * 1 \text{ tonel}/0.22\text{m}^3 = 1 \text{ tonel} / \text{ día}$, OK, es lo que aproximadamente gasta la familia.

Se trabajó con la población actual y no con la población futura a un número determinado de años porque el tiempo de operación sería el necesario para evaluar el funcionamiento del sistema (1 a 4 meses).

2. Determinación de la carga orgánica (CO)

$$Q_{\text{diseño}} = 0.24 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{DBO}_5 = 203 \text{ mg/L} * (1000\text{lt}/1\text{m}^3)(1\text{g}/1000\text{mg})(1\text{kg}/1000\text{g}) = 0.203 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\text{CO} = (Q_{\text{dis}})(\text{DBO}_5) = (0.24 \text{ m}^3/\text{d})(0.203 \text{ kg}/\text{m}^3) = 0.04872 \text{ kg}/\text{d}$$

3. Determinación del área superficial requerida del estanque basándose en los criterios de la Tabla XXII:

Tipo de sistema: aeróbico sin aeración (suplementaria).

Propósito: tratamiento secundario.

Carga típica de DBO_5 ($\text{Kg}/(\text{Ha-d})$): entre 40 y 80

Asumir carga típica de DBO_5 a utilizar = $50 \text{ kg}/(\text{Ha-d})$.

$$\begin{aligned} \text{Área total} &= (\text{Carga orgánica diaria})/(\text{Carga típica de } \text{DBO}_5 \text{ asumida}) \\ &= (0.04872 \text{ kg}/\text{d})/(50 \text{ kg}/(\text{Ha-d})) = 9.744 \cdot 10^{-4} \text{ Ha} * (10000\text{m}^2/\text{Ha}) \\ &= 9.744 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

4. Dimensionamiento del estanque: se utilizó un estanque con $A = 9.744 \text{ m}^2$ y $L=3W$, (L =Longitud, W =Ancho) las dimensiones de la superficie resultaron:

$$L = 3W$$

$$A = LW$$

$$A = (3W)(W)=3W^2$$

$$9.744 = 3W^2$$

$$W = 1.8\text{m}$$

$$L = 5.4\text{m}$$

5. Cálculo del volumen del estanque: se dejaron 0.05 m para el almacenamiento de lodos y se asumieron 0.45 m de profundidad efectiva para el tratamiento; profundidad total del estanque = 0.5 m. Se utilizó pendiente de 1H:3V en las paredes laterales del estanque. Ya que el estanque es poco profundo no fue necesario dejar pendiente en las paredes frontal y posterior. Se utilizó la siguiente fórmula para determinar el volumen de tratamiento.

$$V = d*L*(W-d/3)$$

Donde,

V = Volumen de tratamiento, m³

d = Profundidad del estanque, m

L = Longitud del estanque, m

W = Ancho del estanque.

$$L=5.4 \quad W=1.8 \quad d=0.45$$

$$\begin{aligned} V &= (0.45)(5.4)(1.8 - 0.45/3) \\ &= 4.0095 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

6. Cálculo del tiempo de retención hidráulica t en la zona “efectiva” de tratamiento:

$$\begin{aligned}
 t &= (\text{Volumen del estanque})/(\text{Qdis}) \\
 &= (4.0095\text{m}^3)/(0.24 \text{ m}^3/\text{d}) \\
 &= 16.7 \text{ días (ver Tabla XXIII) entre 10 y 36, OK.}
 \end{aligned}$$

7. Verificación de la carga hidráulica

$$\text{Carga hidráulica} = (\text{Qdis})/(\text{A total de la superficie})$$

$$\text{Qdis} = 0.24 \text{ m}^3/\text{d}$$

$$\text{A de la superficie} = 9.744 \text{ m}^2 = 9.744 \cdot 10^{-4} \text{ Ha}$$

$$\text{Carga hidráulica} = (0.24 \text{ m}^3/\text{d})/(9.744 \cdot 10^{-4} \text{ Ha})$$

$$= 246.3 \text{ m}^3/(\text{Ha-d}) \text{ (ver Tabla XXIII) } > 200 \text{ m}^3/(\text{Ha-d}), \text{ OK.}$$

8. Estimación de la cantidad de nitrógeno removido utilizando los datos de la Tabla XXVII para asegurarse de que el nitrógeno presente fuera suficiente para mantener el crecimiento de las plantas flotantes en el estanque y para determinar la frecuencia de cosecha.

$$\text{Carga hidráulica} = 246.3 \text{ m}^3/(\text{Ha-d})$$

De Tabla XXVII, se predice esencialmente el 90% de remoción de nitrógeno a una carga hidráulica $< 935 \text{ m}^3/(\text{Ha-d})$. Debido a que el nitrógeno no estaría a los niveles de crecimiento óptimo en este sistema se sugirió realizar la cosecha anualmente. Con el fin de distribuir el agua residual no tratada en el influente, se colocó a la entrada del estanque un tubo transversal agujerado para esparcir la misma a lo ancho del estanque.

De Tabla XXV, se recomendó limpieza anual para el estanque ya que éste sistema sería utilizado temporalmente.

5.3 Elaboración del presupuesto del proyecto

El presupuesto es la valoración económica de una obra. Elaborar un presupuesto permite a las empresas, los gobiernos, las organizaciones privadas o a las familias establecer prioridades y evaluar la manera de poder alcanzar sus objetivos. Para alcanzar estos fines, puede ser necesario incurrir en déficit (que los gastos superen a los ingresos) o, por el contrario, puede ser posible ahorrar, en cuyo caso se presentará un superávit (los ingresos superan a los gastos).

Para la ejecución del presente proyecto que se trató de la elaboración de un sistema individual de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas fue necesario incurrir en un déficit ya que fue un proyecto de investigación del cual no se esperaba obtener ningún ingreso económico. El presupuesto del proyecto se presenta en la Tabla XXVIII.

Tabla XXVIII. Presupuesto de proyecto

PRESUPUESTO CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA ACUÁTICO INDIVIDUAL PARA TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, ALDEA EL ASTILLERO, MASAGUA, ESCUINTLA				
MATERIALES Y HERRAMIENTAS				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANT	PRECIO U	TOTAL
Piocha	unidad	1	Q55.00	Q55.00
Cabo piocha	unidad	1	Q10.00	Q10.00
Pala con cabo	unidad	1	Q38.00	Q38.00
Cuchara de albañilería	unidad	1	Q20.00	Q20.00
Metro (5m)	unidad	1	Q18.00	Q18.00
Hilo de albañil	rollo	1	Q12.00	Q12.00
Cal	bolsa 5lb	1	Q5.00	Q5.00
Cemento	saco	2	Q60.00	Q120.00
Tubo PVC 2"	unidad	1	Q50.00	Q50.00
Tapón PVC 2"	unidad	2	Q15.00	Q30.00
Te PVC 2"	unidad	1	Q17.00	Q17.00
Codo 90° PVC 2"	unidad	1	Q10.00	Q10.00
Pegamento para PVC	unidad	1	Q22.00	Q22.00
Sierra	unidad	1	Q3.00	Q3.00
Grapas para cerco	caja	1	Q6.00	Q6.00
Clavos 1½"	libra	1	Q10.00	Q10.00
Alambre de amarre	rollo	1	Q6.00	Q6.00
TOTAL MATERIALES CON IVA				Q432.00
TOTAL MATERIALES SIN IVA				Q380.16
MANO DE OBRA				
DESCRIPCION	UNIDAD	CANT	PRECIO U	TOTAL
Mano de obra	global	1	Q600.00	Q600.00
SUBTOTAL MANO DE OBRA				Q600.00
AYUDANTE				Q240.00
TOTAL MANO DE OBRA				Q840.00
TOTAL COSTO DIRECTO				Q1220.16
TOTAL COSTO INDIRECTO				Q488.06
SUBTOTAL				Q1708.22
IVA				Q204.99
COSTO TOTAL DEL PROYECTO				Q1913.20

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2009).

5.4 Formulación del proyecto

5.4.1 Aspectos de mercado

Los aspectos de mercado comprenden la consideración de la demanda y oferta que cualquier proyecto tendrá. Por el tipo de este proyecto, en la demanda se tuvo que tomar en cuenta las características de la población demandante: familia que vive en un área rural, comprendida por 4 personas, el padre, la madre, una hija y un hijo de cinco y tres años respectivamente. Para la oferta se deben identificar las instituciones que ofrecen el servicio (en este caso, tratamiento de aguas residuales) y cómo lo ofrecen: Para la fecha de construcción, ninguna entidad ofrecía el servicio de tratamiento de aguas residuales en la aldea y por lo tanto fue un proyecto único en su género.

5.4.2 Aspectos técnicos

Dentro de los aspectos técnicos se debe elaborar una lista ordenada con las obras físicas y terrenos adquiridos, determinar los recursos humanos requeridos y determinar las necesidades de infraestructura de apoyo para el proyecto. Para el proyecto de tratamiento de aguas residuales de una vivienda individual que se describe en el presente capítulo no fue necesario adquirir ningún terreno, ya que fue un sistema de tratamiento temporal. Los recursos humanos necesarios fueron nada más que dos obreros. No se necesitó de ninguna infraestructura de apoyo.

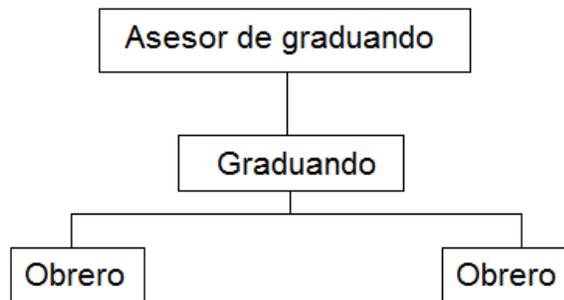
5.4.3 Aspectos administrativos y legales

En esta sección se deben determinar los datos de la empresa que realizará el proyecto, entre estos están:

El nombre de la empresa, personería jurídica, forma y fecha de constitución, duración y domicilio, si es una entidad del gobierno se debe indicar su posición dentro del sector público.

Ya que el proyecto fue realizado como parte de un trabajo de graduación no existió ninguna empresa a la cual el proyecto le fuera adjudicado. Se debe indicar también el tipo de personal administrativo y operativo que requiere el proyecto, describiendo la estructura organizativa. El organigrama que se utilizó para el caso práctico del presente capítulo se presenta en la figura 33.

Figura 33. Organigrama del proyecto



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2009).

Se debe establecer que no existan problemas legales con los terrenos, derechos de paso, etc., los cuales estén involucrados con la ejecución del proyecto. Además se debe determinar el tipo de patentes o licencias que se deben obtener de acuerdo al tipo de proyecto. Para el proyecto del presente capítulo se estableció que no existía ningún problema de carácter legal y se procedió con la siguiente sección.

5.4.4 Aspectos de impacto ambiental

Aquí se debe describir la forma en la cual se conservará el medio ambiente y el uso racional de los recursos naturales renovables.

Así mismo, se deben determinar los efectos negativos y positivos que se podrían generar y las medidas de mitigación a implementarse, según los efectos del proyecto. Por el tipo de proyecto, acerca de tratar aguas residuales, se conocía que el objetivo principal es conservar el medio ambiente. Los recursos utilizados no tuvieron un uso irracional. No se esperaron efectos negativos para el proyecto, al contrario, se contribuyó con el buen funcionamiento del ecosistema al proveer aguas residuales tratadas al ambiente.

5.4.5 Aspectos financieros

En esta sección se debe indicar los ingresos que el proyecto puede llegar a generar por venta de los bienes producidos. Se sugiere que se calculen en forma anual. Así mismo el total de inversión clasificándola en inversiones fijas: terrenos, edificaciones, maquinaria y equipo, construcciones (infraestructura), mobiliario y equipo de oficina. Inversiones intangibles o diferidos: estudios, gastos legales, gastos de organización, licencias, patentes, gastos de instalación, gastos de capacitación etc. Se debe determinar el capital de trabajo que constituye la inversión necesaria para que inicie la operación del proyecto hasta que sea capaz de obtener los ingresos que permitan que opere por sí mismo: efectivo en caja y bancos, materia prima en existencia y tránsito, suministros y repuestos, productos en proceso y terminados, gastos pagados por anticipado, etc.

De la misma manera se deben determinar los costos de operación y mantenimiento en forma anual, salarios, materias primas, combustibles, lubricantes, mantenimiento, energía eléctrica, agua potable, teléfono, prestaciones laborales, etc.

El proyecto descrito en el presente capítulo no generó ingresos debido a la naturaleza del mismo que es la investigación, sin embargo en la planificación de un sistema de tratamiento de aguas residuales en el cual se traten las aguas de una comunidad se puede tomar en cuenta cierto ingreso producido por la comunidad organizada al producir abonos orgánicos, al trabajar con piscicultura, etc. No se realizaron inversiones fijas, los gastos de los estudios (DBO₅, SS, etc.) corrieron por cuenta del Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería. El único gasto fue el que se detalló anteriormente en la sección Elaboración del presupuesto del proyecto. La determinación de los costos de operación y mantenimiento en forma anual se debe realizar cuando se planifique un sistema que no vaya a ser utilizado temporalmente.

5.4.6 Cronograma de ejecución

Se debe incluir un cronograma de ejecución de las actividades a realizar, en gestiones de proyectos denominadas tareas, numerando cada una de ellas señalando el tiempo en el cuál se realizará cada una. El cronograma de ejecución para el presente caso práctico se muestra en la Tabla XXIX.

Tabla XXIX. Cronograma de ejecución del proyecto

No	Nombre de la tarea	Duración	Semana 1	Semana 2	Semana 3
1.	Marcado de área de excavación	1/2 h	X		
2.	Excavación	4 h	X		
3.	Colocación de revestimiento	1 h	X		
4.	Colocación de polietileno	1/2 h	X		
5.	Colocación de tuberías	1 h	X		
6.	Construcción obra de llegada	1 h	X		
7.	Colocación de cerco perimetral	1 h	X		
8.	Construcción cuneta perimetral	1 h	X		
9.	Llenado de estanque	400 h	X X X X X X	X X X X X X X	X X X X
10.	Siembra del jacinto de agua	1 h			X

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Junio 2009).

5.5 Metodología empleada en la construcción del sistema construido

La metodología empleada para llevar a cabo la construcción del sistema fue la siguiente:

1. Se realizó una visita al lugar destinado para la realización del proyecto con el fin de conocer el número de habitantes de la vivienda cuyo drenaje serviría como influente del sistema acuático a construir. También se realizó la toma de una muestra (figura 34) del agua residual del lugar para analizarla y conocer la DBO_5 ya que este dato es necesario para el diseño del sistema.

Figura 34 .Toma de muestra de aguas residuales de origen doméstico



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Julio 2009).

2. Luego de haber investigado los datos de diseño, tales como: el número de habitantes, temperatura del lugar, etc., y de tener los resultados del análisis físico químico (figura 35) se procedió a realizar el diseño del sistema.

Figura 35. Análisis físico-químico de aguas residuales de origen doméstico y/o desechos industriales



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 004176

**ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMÉSTICO
Y/O DESECHOS INDUSTRIALES**

Orden de trabajo No.: 25 492 Informe No. 2 005

INTERESADO:	GERSON JONATAN RAMÍREZ BACH (carné 200511834)	PROYECTO:	Trabajo de graduación
MUESTRA CAPTADA POR:	Interesado	DEPENDENCIA:	FACULTAD DE INGENIERÍA /USAC DE
MUESTRA CAPTADA EN:	Aldea El Astillero	FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA:	2009-07-05, 16 h 05 min.
FUENTE:	Desague que corre a flor de tierra		
MUNICIPIO:	Masagua	FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO:	2009-07-06; 09 h 20 min.
DEPARTAMENTO:	Escuintla	CONDICIONES DE TRANSPORTE:	Sin refrigeración

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

OLOR:	Lig. Materia orgánica	SÓLIDOS SEDIMENTABLES:	00.50	cm ³ / litro en una hora
COLOR:	- - - unidades	SÓLIDOS SUSPENDIDOS:	154.00	mg/L.

DETERMINACIONES QUÍMICAS

DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O ₅):	203,000	mg/L.
--	---------	-------

TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. - A.W.W.A. - W.E.F. 21TH EDITION 2,005. NORMA COGUANOR NGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

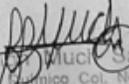
Guatemala, 2009-07-20

Vo.Bo.



Inga. Teima Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC





Zelmira Mucic Santos
Ing. Químico Col. No. 420
M. Sc. en Ingeniería Sanitaria
Jefe Técnico Laboratorio

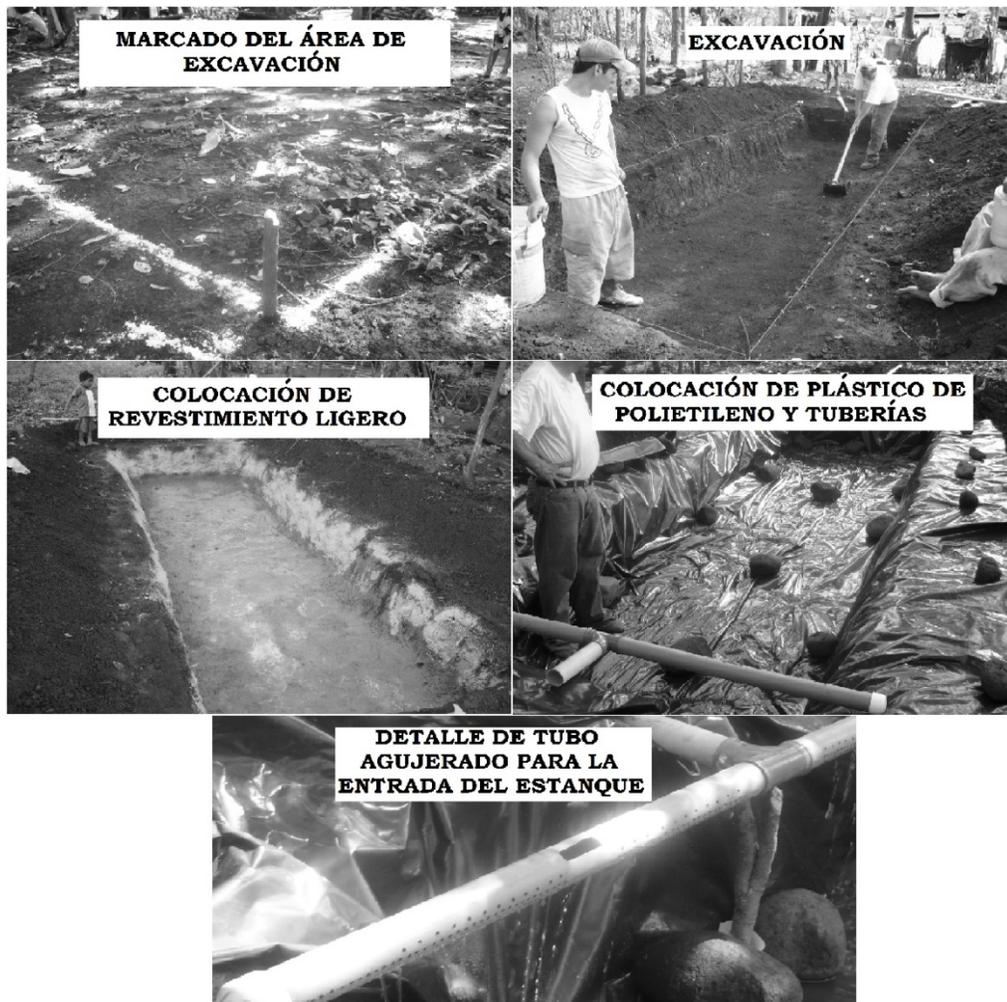


FACULTAD DE INGENIERIA -USAC
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2476-3992. Planta 2443-9560 Ext. 1502. FAX: 2476-3993
Página web: <http://cil.usac.edu.gt>

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Julio 2009).

3. Teniendo diseñado el sistema se procedió con la construcción del mismo conforme se muestra en las figuras 36 y 37.

Figura 36. Construcción de estanque (1/2)



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Noviembre 2009).

El revestimiento ligero y el plástico de polietileno se utilizaron como impermeabilizantes, ambos pueden ser sustituidos por losas fundidas de concreto o por mampostería recubierta según los recursos económicos de los que se disponga.

Figura 37. Construcción de estanque (2/2)



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Noviembre 2009).

5.6 Evaluación del funcionamiento del sistema construido

Se evaluó el funcionamiento del sistema por medio de visitas al área de construcción. Semanalmente, se realizaron las siguientes observaciones:

SEMANA 1: luego del fraguado de la mezcla utilizada, el estanque empezó a funcionar con la recepción de las aguas residuales de la vivienda, se pudo observar un inicio en el incremento de la altura de la superficie de agua. La impermeabilidad fue del 100% por parte del sistema, dicha impermeabilidad se debió principalmente a la utilización del plástico de polietileno.

SEMANA 2: durante esta semana, el estanque continuó llenándose y al finalizar la misma, el nivel de agua alcanzó aproximadamente un 90% de la altura total del estanque (figura 38) pudiéndose realizar la siembra de las plantas de jacinto de agua para dar inicio con la depuración de las aguas residuales y se quedo a la espera de que la altura de la superficie de agua alcanzara el 100% de la altura total del estanque para dar inicio con el ciclo del tiempo de retención hidráulica del estanque.

Figura 38. Estanque antes de llenarse completamente (Parte posterior)



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Diciembre 2009).

SEMANA 3: el estanque se comportó a la perfección, el flujo del agua a través del mismo fue lento y tranquilo como lo indica la teoría para sistemas acuáticos de buen funcionamiento. Las plantas se vieron muy saludables, de color verde y comenzaron a florecer (figura 39), esto quiere decir que estaban absorbiendo los nutrientes del agua residual de una forma optima.

Figura 39. Estado saludable de las plantas de jacinto



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Diciembre 2009).

SEMANAS 4 y 5: se observó un comportamiento normal del estanque, recibiendo el flujo, tratándolo y expulsándolo adecuadamente, la superficie de agua fue poblada totalmente por los jacintos de agua con excepción de la entrada y la salida del estanque en donde se colocaron ramas de árbol como divisorios (figura 40) entre las plantas y las tuberías de entrada y salida para evitar taponamientos y para asegurar el flujo libre del agua residual.

Figura 40. Divisorio entre tubería de entrada y plantas flotantes



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Diciembre 2009).

El tubo que aparece en la figura fue perforado a lo largo del mismo en la parte de abajo con agujeros circulares para distribuir el influente a lo ancho del estanque, el agujero de forma rectangular que se ve en la parte de arriba se perforó para evitar un posible colapso de la tubería en el caso de que los sedimentos llegaran a tapar los agujeros de la parte inferior.

SEMANA 6 y 7: el estanque continuó en funcionamiento, se observó que las plantas crecieron considerablemente (figura 41).

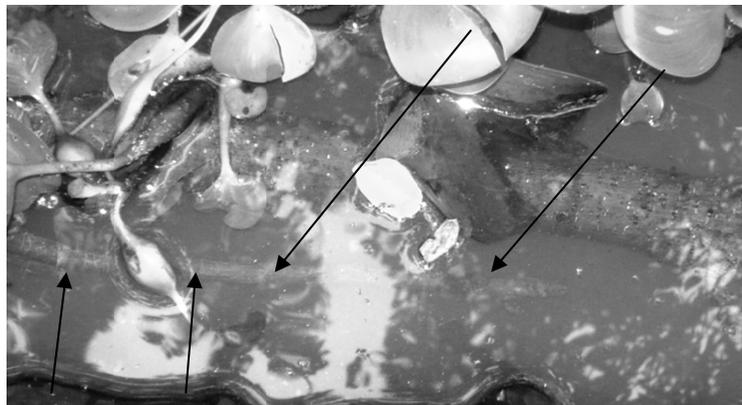
Figura 41. Estanque con población de jacintos de agua adultos



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Enero 2010).

También, se empezó a notar diferencia entre la turbiedad del agua del inicio del estanque y el agua del final del estanque, lo anterior se verificó introduciendo una vara pequeña en el agua, dicha vara se sumergió diagonalmente por debajo de la superficie del estanque y se notó que a una determinada profundidad, ésta fue visible al ser sumergida en la parte posterior del estanque (figura 42) mientras que al ser sumergida en la parte frontal no lo fue. También se realizó limpieza de la obra de llegada y de la malla que se utiliza para el pretratamiento (cribado).

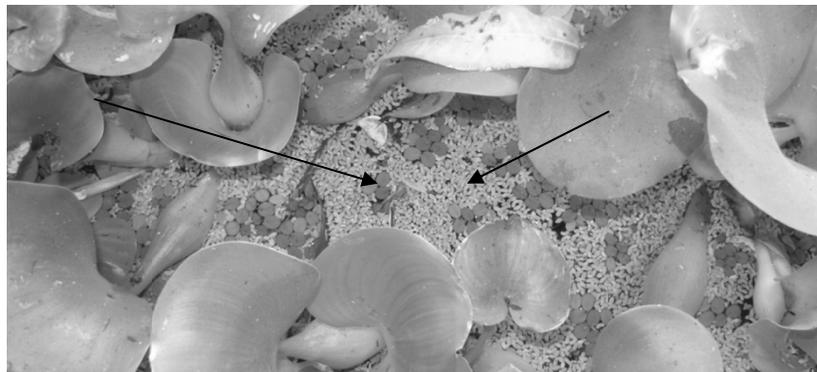
Figura 42. Visibilidad de un objeto sumergido en la parte posterior del estanque



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Enero 2010).

SEMANA 8: se observó que la superficie del agua fue cubierta por otras dos especies de hojas diminutas (figura 43) (lo cual no afecta en la depuración de las aguas residuales), lo más probable es que dichas hojas hayan llegado al estanque por medio de semillas adheridas a las raíces de los jacintos de agua ya que dichas hojas son comunes en el lugar de donde los jacintos de agua fueron extraídos para ser sembrados en el sistema. En ese entonces, el estanque funcionaba con normalidad y se consideró que era el tiempo apropiado para realizar la toma de la segunda muestra para verificar el rendimiento del sistema (figura 44).

Figura 43. Aparición de dos especies de hojas en el sistema



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Enero 2010).

Figura 44. Toma de la segunda muestra de aguas residuales



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Enero 2010).

La toma de la muestra se realizó directamente de la parte posterior del estanque ya que en ese momento, en la vivienda no se estaba utilizando agua y por lo tanto no existía movimiento de flujo en el estanque. De haber existido flujo, la muestra pudo haber sido tomada desde el extremo posterior del tubo que se colocó al final del estanque para desfogar el agua tratada.

La muestra se llevó al laboratorio unificado de química y microbiología sanitaria “Dra. Alba Tabarini Molina” del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería USAC. En dicho lugar se realizó el análisis físico químico de aguas residuales de origen doméstico y/o desechos industriales. Los dos valores que se analizaron para este caso son: a) la demanda bioquímica de oxígeno, ya que en base a éste, se diseñó el sistema y también en base a éste se verifica el rendimiento del mismo, b) los sólidos en suspensión que son otro parámetro para verificar el rendimiento del sistema. Los resultados obtenidos fueron: $DBO_5 = 32 \text{ mg/L}$; $SS = 20 \text{ mg/L}$.

Analizando los resultados (figura 45) con los proporcionados en la Tabla XXIII se observó que la DBO_5 está fuera de lo esperado por 2 mg/L , esto se debe principalmente a que en la tabla mencionada anteriormente se recomienda que la DBO_5 inicial en un sistema aeróbico sin aeración esté entre 130 y 180 mg/L , y la DBO_5 inicial para este caso práctico fue de 203 mg/L excediendo la recomendación en 23 mg/L , sin embargo la DBO_5 final se acerca considerablemente al valor esperado de 30 mg/L . También se observa una reducción aceptable de los Sólidos en Suspensión (SS) ya que el valor esperado es: $SS < 30 \text{ mg/L}$ y el valor obtenido es 20 mg/L . En el momento en que se presentó la muestra al laboratorio, en dicho lugar no se estaba realizando el análisis de nitrógeno total (NT) debido a cuestiones internas y por lo tanto no se muestra dicho valor dentro de los resultados, no obstante, según el diseño del sistema se espera esencialmente el 90% de remoción de nitrógeno.

Figura 45. Segundo análisis-físico químico de aguas residuales de origen doméstico y/o desechos industriales



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Nº 004342

**ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO DE AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN DOMÉSTICO
Y/O DESECHOS INDUSTRIALES**

Orden de trabajo No.: <u>26 523</u>	Informe No.: <u>2 011</u>
--	----------------------------------

INTERESADO: <u>GERSON JONATAN RAMÍREZ BACH</u> (carné 200511834)	PROYECTO: <u>Trabajo de graduación</u> DE <u>FACULTAD DE INGENIERÍA /USAC</u>
MUESTRA CAPTADA POR: <u>Interesado</u>	DEPENDENCIA: <u>FECHA DE RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA:</u>
MUESTRA CAPTADA EN: <u>Aldea El Astillero</u>	MUESTRA: <u>2010-01-21, 08 h 10 min.</u>
FUENTE: <u>Estanque</u>	FECHA Y HORA DE LLEGADA AL LABORATORIO: <u>2010-01-21; 11 h 30 min.</u>
MUNICIPIO: <u>Masagua</u>	CONDICIONES DE TRANSPORTE: <u>Sin refrigeración</u>
DEPARTAMENTO: <u>Escuintla</u>	

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

OLOR: <u>Lig. Materia orgánica</u>	SÓLIDOS SEDIMENTABLES: <u>--</u> cm ³ / litro en una hora
COLOR: <u>- -- unidades</u>	SÓLIDOS SUSPENDIDOS: <u>20,00</u> mg/L

DETERMINACIONES QUÍMICAS

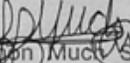
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (D.B.O ₅): <u>32,00</u>	mg/L
---	------

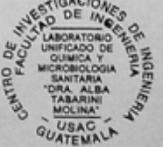
TÉCNICAS DEL "STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER" DE LA A.P.H.A. – A.W.W.A. – W.E.F. 21TH EDITION 2,005. NORMA COGUANOR NGO 4.010 SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.

Guatemala, 2010-02-09

Vo.Bo. 
 Inga. Telma Maricela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC




 Zetón Mucil Santos
 Ing. Químico Col. No. 420
 M. Sc. en Ingeniería Sanitaria
 Jefe Técnico Laboratorio



FACULTAD DE INGENIERIA -USAC
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo 2476-3992. Planta 2443-9500 Ext. 1502. FAX: 2476-3993
 Página web: <http://cil.usac.edu.gt>

Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Guatemala, Enero 2010).

SEMANA 9, 10 y 11: el sistema funcionó normalmente hasta que el nivel del agua del estanque comenzó a bajar, los habitantes del lugar mencionaron que estuvieron llegando aves de diferentes especies (palomas, zopes, patos) al estanque, y a esta situación se le atribuye la disminución del nivel de agua dentro del estanque ya que dichas aves al interactuar con el ambiente del estanque, agujeraron el plástico de polietileno haciendo que el agua se empezara a escapar lentamente y por ende, que se infiltrara lentamente en el suelo.

La llegada de las aves a los estanques de jacinto es una buena señal, esto quiere decir que el sistema encaja en el ecosistema.

El problema de los agujeros en el plástico de polietileno se puede resolver empleando un método diferente para impermeabilizar los estanques.

La disminución del nivel de agua en el estanque del caso práctico ocasionó que las raíces de las plantas de jacinto de agua no contaran con la profundidad necesaria para poder realizar la absorción de nutrientes y como consecuencia murieron (figura 46).

Figura 46. Muerte de las plantas de jacinto de agua



Fuente: Gerson Jonatan Ramírez Bach (Escuintla, Febrero 2010).

Afortunadamente, se realizó la toma de muestras antes de la muerte de los jacintos, para rehabilitar el sistema se necesitaría vaciar el estanque, colocar plástico de polietileno nuevo y protegerlo de las aves o utilizar otro método de impermeabilización.

CONCLUSIONES

1. La gran mayoría de los materiales que se utilizan en Guatemala para la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales se comportan adecuadamente y a lo largo del tiempo, los elementos siguen prestando el servicio para el cual han sido diseñados siempre y cuando se les dé un mantenimiento adecuado.
2. Las maneras de tratar aguas residuales son numerables y para elegir entre una y otra, se debe tomar en cuenta primeramente, los aspectos financieros, ya que Guatemala es un país que se caracteriza por contar con escasos recursos; cabe mencionar que también se deben tomar en cuenta los aspectos de mercado, técnicos, administrativos, legales y de impacto ambiental.
3. Los materiales de construcción que se encontraron con más frecuencia en las plantas de tratamiento de aguas residuales en Guatemala son: el concreto reforzado, el acero corrugado y la mampostería confinada recubierta y de los tres materiales, el que tiende a presentar fallas más rápido (fisuras) es la mampostería confinada recubierta. Esto no quiere decir que su uso sea inapropiado sino que solo refleja que de los tres materiales, la utilización de la mampostería confinada recubierta es más económica.

4. En Guatemala no se cuenta con sistemas de tratamiento acuáticos para la depuración de aguas residuales, y por ende, no se cuenta con ningún registro de resultados de evaluaciones de funcionamiento a través de los años. Esto condujo a que en la presente investigación se buscaran documentos bibliográficos de varios de los países más desarrollados del mundo y realizar el diseño con base en los criterios de dichos documentos adaptando las condiciones necesarias al territorio nacional de Guatemala.

5. La construcción de un sistema acuático no se realiza basándose en un esquema de funcionamiento estricto sino que depende del grado de contaminación del influente. Para aguas residuales de origen doméstico (desechos líquidos de pila y ducha) no es necesario realizar un tratamiento primario obligatorio (tanque de sedimentación o Imhoff) y/o un tratamiento con aeración suplementaria; lo más probable es que sea suficiente la construcción de uno o dos estanques de jacinto de agua para lograr la depuración, siempre y cuando el diseño cumpla con los requerimientos del efluente en el caso que existan.

6. Los resultados de la evaluación del caso práctico llevado a cabo como parte del presente trabajo de graduación, demuestran que en Guatemala se pueden implementar los sistemas de tratamiento acuáticos, ya que las diferentes especies de plantas acuáticas se pueden cultivar en gran parte del territorio nacional.

RECOMENDACIONES

1. Cuando se construye una planta de tratamiento de aguas residuales se debe elaborar un manual en el cual se especifique detalladamente la rutina a realizarse para cumplir con el mantenimiento de la misma.
2. Para darle tratamiento a las aguas residuales de las comunidades del área rural de Guatemala se deberían escoger métodos de depuración que requieren un mantenimiento mínimo y económico.
3. Para construir una planta de tratamiento se debe optar por los materiales que ofrecen una vida útil prolongada y verificar que los gastos de construcción y operación no incurran en un déficit para la comunidad.
4. Cuando se requiera un área extensa en un sistema de tratamiento acuático se recomienda construir más de un estanque con una configuración que permita la limpieza de lodos de la mitad del sistema, mientras que la otra mitad permanece en funcionamiento.
5. Se debe evaluar cualquier sistema de tratamiento acuático como mínimo con base en las diferencias de los valores de DBO_5 , SS y NT en la entrada y la salida del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agency, U.S. Environmental Protection. **Design manual, Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment.** Cincinnati, OH, 1988.
2. Agency, United States Environmental Protection. **Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, zanjas de oxidación.** Washington, D.C.: EPA, 1999.
3. Antošovský, ADOS Sekerka –. **Desengrasadores.** República Checa, 2010.
4. C.A., Defensas de Caribe. **Sistema de tratamiento de aguas residuales con plantas acuáticas.** Boconoíto, Venezuela, n.d.
5. Cisneros, Miguel Angel y Rosa Ferrer Miralles. **Contactores biológicos rotativos y biodiscos.** 2004.
6. College, Technical Learning. **Activated sludge.** Joseph Camerata, 2008.
7. Empresa municipal de alcantarillado y saneamiento. **Estructura de tratamiento preliminar.** Ecuador, 2010.
8. Hess, Max Lothar. **Reducción y disposición final de lodos, incineración, relleno, disposición en el terreno.** Sao Paulo, Brasil, 1988.
9. Instituto mexicano de tecnología del agua. "Verificación experimental del funcionamiento de aforadores tipo parshall." **2do foro académico nacional de Ingenierías y Arquitectura.** Michoacán, 2006.
10. Lomas W.R., Saul A.J. **Laboratory work in Hydraulics.** Great Britain, 1979.

11. Montoya, Guillermo Valencia. **Filtros biológicos**. Cali, Colombia, n.d.
12. Organización panamericana de la salud. **Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores**. Lima: COSUDE, 2005.
13. Organización panamericana de la salud, Centro panamericano de ingeniería sanitaria. **Especificaciones técnicas para la construcción de tanque séptico, tanque Imhoff y laguna de estabilización**. Lima: COSUDE, 2005.
14. Quiminet. **Tipos de cribas**. México D.F., 2006.
15. S.A., Estructplan consultora. **Deshidratación de lodos**. Argentina, 2002.
16. Sáenz, Rodolfo. **Consideraciones en relación con el uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales**. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria, 2000.
17. Valdez, Enrique y Alba Vásquez. **Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales**. 2000.
18. Varón, Miguel Ricardo Peña. **Lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales**. Cali, Colombia, 2003.
19. Yáñez Cossio, Fabián. **Normas de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, borrador para discusión**. Guatemala: OPS, 1993.
20. Yáñez, Fabián. **Digestión anaeróbica de lodos**. n.d.
21. Zabel, Thomas. **The advantages of dissolved air flotation for water treatment**. AWWA (1985).