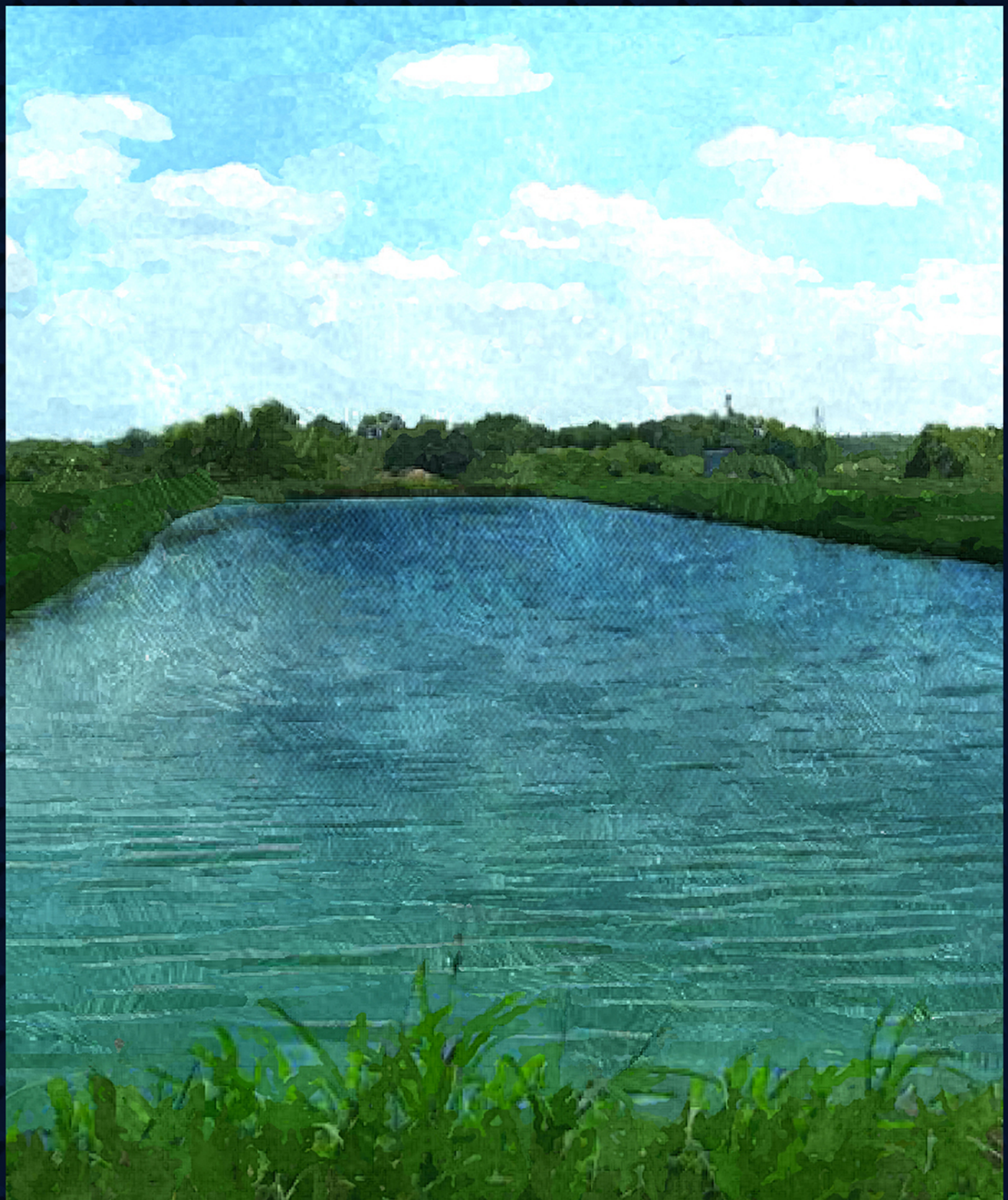
Dimensionamiento de lagunas de estabilización

IMTA

Divulgación

Universidad Juárez del Estado de Durango

Facundo Cortés Martínez Alejandro Treviño Cansino Ana Cecilia Tomasini Ortiz



Dimensionamiento de lagunas de estabilización

Facundo Cortés Martínez, Alejandro Treviño Cansino

y Ana Cecilia Tomasini Ortiz

IMTA
México, 2017

628.351 Cortés Martínez, Facundo
C24 Dimensionamiento de lagunas de estabilización / Facundo Cortés Martínez, Alejandro Treviño Cansino y Ana Cecilia Tomasini Ortiz. -- Jiutepec, Mor:. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2017.
128 p.
ISBN: 978-607-9368-57-9
1. Lagunas de estabilización 2. Dimensionamiento 3. Tratamiento de aguas residuales

Autores
Dr. Facundo Cortés Martínez
Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

M. I. Alejandro Treviño Cansino
Facultad de Ingeniería, Ciencias y Arquitectura de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

M. C. Ana Cecilia Tomasini Ortiz
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Coordinación editorial
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Coordinación de Comunicación, Participación e Información
Subcoordinación de Vinculación, Comercialización y Servicios Editoriales

Revisión técnica:
Ana Cecilia Tomasini Ortiz

Portada
Oscar Alonso Barrón

Diseño editorial:
Gema Alín Martínez Ocampo

Diagramación:
Muu'k Studio de Diseño

Primera edición 2017
Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuahunáhuac 8532,
Progreso, Jiutepec, Morelos
C.P. 62550
MÉXICO

Universidad Juárez del Estado de Durango
Calle Constitución 404 Sur
Centro
34100 Durango, Dgo.

ISBN: 978-607-9368-57-9

Colección: "Divulgación"

Índice

Prólogo 1

Introducción 3

1. Generalidades 5
   1.1. Lagunas de estabilización 5
   1.2. Ventajas 6
   1.3. Desventajas 6
   1.4. Definiciones 6

2. Fundamentos 9
   2.1. Clasificación y funcionamiento de lagunas de estabilización 9
   2.2. Clasificación en función del lugar que ocupan las lagunas 9
   2.3. Clasificación de acuerdo con la secuencia de las unidades de tratamiento 10
   2.4. Funcionamiento de lagunas de estabilización 11
      2.4.1 Lagunas anaerobias 11
      2.4.2 Lagunas facultativas 13
      2.4.3 Lagunas de maduración o pulimiento 13
   2.5. Modelos para determinar el dimensionamiento de las lagunas 15
      2.5.1 Empíricos 15
      2.5.2 Racionales 15

3. Hidráulica de los sistemas lagunares 17
   3.1. Factores hidráulicos que intervienen en lagunas de estabilización 17
   3.2. Mezcla 17
      3.2.1 Patrones de caudal y mezcla en lagunas de estabilización 18
         3.2.1.1 El flujo pistón 20
         3.2.1.2 Mezcla completa 20
         3.2.1.3 Flujo disperso 20
   3.3. Forma de la laguna 21
      3.3.1 Entradas y salidas de flujo en lagunas de estabilización 21
      3.3.2 Arreglos de lagunas 25

4. Bases teóricas para el diseño de sistemas lagunares 27
   4.1. Normatividad 27
   4.2. Periodo de diseño 28

4.3. Población de proyecto 28
4.4. Gastos de diseño 28
4.4.1 Dotación de agua potable 28
4.4.2 Aportación de aguas residuales 29
4.4.3 Cálculo de gasto de diseño 30
4.4.3.1 Gasto medio diario 30
4.4.3.2 Gasto mínimo 30
4.4.3.3 Gasto máximo instantáneo 30
4.4.3.4 Gasto máximo extraordinario 31
4.5. Características de las aguas residuales 31
4.5.1 Calidad del agua a tratar 31
4.5.2 Análisis de la demanda bioquímica de oxígeno 32
4.5.2.1 Ejemplo para determinar la demanda bioquímica de oxígeno cuando no se cuenta con resultados de laboratorio 33
4.5.3 Coliformes fecales 34
4.5.4 Temperatura 35
4.6. Evaporación e infiltración 35
4.7. Reúso del agua residual tratada 35
4.8. Localización y disponibilidad del terreno para la construcción de la planta de tratamiento 38
4.9. Requerimientos mínimos para el cálculo del sistema lagunar en pequeñas comunidades rurales 39
4.10. Conceptos básicos de diseño 40
4.11. Ecuaciones de diseño de lagunas de estabilización 41
4.11.1 Laguna anaerobia 41
4.11.2 Laguna facultativa 44
4.11.3 Laguna de pulimiento o maduración 47
4.11.4 Balance hídrico 48
5. Diseño de sistemas lagunares con diferentes arreglos 51
5.1. Cálculo de la proyección de la población 51
5.1.1 Método lineal 52
5.1.2 Método de interés compuesto 52
5.1.3 Método logarítmico 53
5.1.4 Método de interés simple 53
5.2. Diferentes arreglos propuestos para el diseño de sistemas lagunares 54
5.3. Datos de diseño para un sistema de lagunas de estabilización con diferentes arreglos 54
5.4. Diseño del sistema de lagunas: anaerobia + facultativa + maduración 1 + maduración 2 55
5.4.1 Diseño de laguna anaerobia 55
5.4.2 Diseño de laguna facultativa (método de flujo disperso) 57

5.4.3 Diseño de la laguna de maduración 1 (flujo disperso) 59
5.4.4 Diseño de la segunda laguna de maduración (flujo disperso) 61
5.4.5 Bordo libre 65
5.5. Diseño del sistema de lagunas: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 66
5.5.1 Diseño de laguna facultativa 66
5.5.2 Diseño de laguna de maduración 68
5.6. Diseño del sistema de lagunas: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 + maduración 2 72
5.6.1 Diseño de laguna de maduración 1 72
5.6.2 Diseño de laguna de maduración 2 74
5.7. Diseño del sistema de lagunas: anaerobia + facultativa + maduración con 4 mamparas 78
5.7.1 Diseño de la laguna de maduración 78
5.8. Diseño de la laguna facultativa con 3 mamparas 82
5.8.1 Diseño de la laguna facultativa 82
5.9. Diseño del sistema de lagunas: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas 86
5.10. Diseño del sistema lagunar: facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara 88
5.11. Diseño del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas 90
5.12. Cálculo del sistema lagunar: facultativa + maduración con 6 mamparas 93
5.13. Análisis comparativo de resultados 95
6. Segundo proyecto en el diseño de sistemas lagunares con diferentes arreglos 97
6.1. Datos de diseño para lagunas de estabilización (segundo proyecto) 98
6.2. Diseño del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas 98
6.3. Diseño del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 y maduración 2 101
6.4. Diseño del sistema lagunar: facultativa + maduración 1 con 7 mamparas y maduración 2 con 8 mamparas 103
6.5. Diseño del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas 105
7. Ecosistemas de las lagunas de estabilización 109
7.1. Bacterias 112
7.1.1 Bacterias Aerobias 112
7.1.2 Bacterias formadoras de ácidos 112
7.1.3 Cianobacterias 113
7.1.4 Bacterias púrpura del azufre 114

7.1.5 Bacterias patógenas 115
7.2. Algas 116
7.3. Importancia de la fotosíntesis 117
7.4. Hongos 118
7.5. Protozoarios y metazoarios 118
7.5.1 Papel del zooplancton 118

Resumen 121

Referencias 123

Figuras

Figura 2.1 Configuración de lagunas en paralelo, facultativa más maduración. Fuente: adaptada de Oakley (2005). 10
Figura 2.2 Configuración de lagunas en paralelo, facultativa más maduración. Fuente: adaptada de Oakley (2005). 11
Figura 2.3 Proceso de una laguna anaerobia. Fuente: adaptado de Oakley (2005). 12
Figura 2.4 Interacción de bacterias y algas en una laguna facultativa. Fuente: adaptada de Conagua/ IMTA (2007a). 14
Figura 2.5 Proceso de una laguna facultativa. Fuente: adaptado de Oakley (2005). 14
Figura 3.1 Mamparas en laguna de estabilización. Fuente: adaptada de (Oakley (2005). 18
Figura 3.2 Canales independientes. Fuente: adaptada del Cetesb (1989). Laguna facultativa con mamparas. Fuente: adaptada del Cetesb (1989). 19
Figura 3.3 Reactor de flujo pistón. Fuente: Arceivala (1981). 19
Figura 3.4 Reactor de mezcla completa. Fuente: Arceivala (1981). 20
Figura 3.5 Reactor de flujo disperso. Fuente: Arceivala (1981). 20
Figura 3.6 Detalles de entrada, salida e interconexiones en lagunas. Fuente: adaptada de Arthur (1983) y Arceivala (1981). 21
Figura 3.7 Laguna facultativa con dispositivos múltiples de entrada y salida para aproximar al flujo pistón. Fuente: adaptada de Oakley (2005). 22
Figura 3.8 Laguna de maduración o pulimiento con una entrada y una salida. Fuente: adaptada de Oakley (2005). 23
Figura 3.9 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración 1 + maduración 2. 24
Figura 5.1 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración 1 + maduración 2. 64
Figura 5.2 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración. 65
Figura 5.3 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración. 71
Figura 5.4 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 + maduración 2. 71
Figura 5.5 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 + maduración 2. 77
Figura 5.6 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración con 4 mamparas. 77
Figura 5.7 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración con 4 mamparas. 81

Figura 5.8 Dimensiones de la laguna facultativa con 3 mamparas. 81
Figura 5.9 Corte longitudinal de la laguna facultativa con 3 mamparas. 85
Figura 5.10 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas. 85
Figura 5.11 Corte longitudinal sin escala del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas. 87
Figura 5.12 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara. 88
Figura 5.13 Corte longitudinal del sistema lagunar: facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara. 89
Figura 5.14 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas. 90
Figura 5.15 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas. 92
Figura 5.16 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: facultativa + maduración con 6 mamparas. 92
Figura 5.17 Corte longitudinal del sistema lagunar: facultativa + maduración con 6 mamparas. 94
Figura 6.1 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas + maduración 2 con 4 mamparas. 94
Figura 6.2 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas + maduración 2 con 4 mamparas. 100
Figura 6.3 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 y maduración 2. 100
Figura 6.4 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 y maduración 2. 102
Figura 6.5 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: facultativa + maduración 1 con 7 mamparas y maduración 2 con 8 mamparas. 103
Figura 6.6 Corte longitudinal del sistema lagunar: facultativa + maduración 1 con 7 mamparas y maduración 2 con 8 mamparas. 104
Figura 6.7 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas. 105
Figura 6.8 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas. 106
Figura 7.1 Proceso de la degradación de la materia orgánica. Fuente Rolim, 2000. 107
Figura 7.2 Zonas de la laguna facultativa. Adaptado de Rolim (2000). 107
Figura 7.3 Bacterias aerobias: a) Beggiatoa alba y b) Sphaerotilus natans. 110
Figura 7.4 Cianobacterias: a) Anabaena sp. b) Nostoc sp. c) Oscilatoria sp. y d) Merismopedia sp 111
Figura 7.5 Bacterias púrpura de azufre: a) Chromatiaceae y b) Coloración rojiza debido a la presencia de bacterias púrpura del azufre. 112

Figura 7.6 Bacterias patógenas, a) Escherichia coli. b) Shigella sp. 113
Figura 7.7 Algas: a) Chlorella vulgaris y b) Scenedesmus sp. 114
Figura 7.8 Zooplancton: a) Brachionus sp., b) Daphnia magna, c) Pleuronema sp. y d) Vorticella sp. 115

Tablas

Tabla 4.1	Clasificación de climas por temperatura.	29
Tabla 4.2 .	Dotación de agua potable por clima y número de habitantes.	29
Tabla 4.3	Composición típica del agua residual doméstica bruta.	32
Tabla 4.4	Límites máximos permisibles para contaminantes básicos. NOM-001-Semarnat-1996.	36
Tabla 4.5	Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros. NOM-001-Semarnat-1996.	37
Tabla 4.6	Parámetros de diseño.	40
Tabla 4.7	Valores de diseño para cargas volumétricas en función de la temperatura.	41
Tabla 5.1	Datos de los censos para el ejido San Luis el Alto.	52
Tabla 5.2	Nomenclatura para el cálculo de la proyección de la población.	52
Tabla 5.3	Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 + maduración 2.	63
Tabla 5.4	Valores de la dispersión con diferentes condiciones largo-ancho.	64
Tabla 5.5	Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración.	70
Tabla 5.6	Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 + maduración 2.	76
Tabla 5.7	Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración con 4 mamparas.	80
Tabla 5.8	Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: laguna facultativa con 3 mamparas.	84
Tabla 5.9	Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas.	86
Tabla 5.10	Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara.	88
Tabla 5.11	Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas.	90
Tabla 5.12	Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: facultativa + maduración con 6 mamparas.	93

Tabla 5.13 Comparativo de resultados del área y tiempo de retención hidráulico. 95
Tabla 6.1 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas + maduración 2 con 4 mamparas. 99
Tabla 6.2 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 y maduración 2. 101
Tabla 6.3 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: facultativa + maduración 1 con 7 mamparas y maduración 2 con 8 mamparas. 103
Tabla 6.4 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas. 105

Prólogo

El campo de acción de la ingeniería sanitaria, en lo general y de manera global, es cada vez más amplio. Lo anterior, sin duda, como respuesta a la creciente demanda de soluciones en la materia y a consecuencia del crecimiento de la población, sobre todo en décadas recientes.

Nuestro país, de acuerdo con sus propias características sociales, económicas y tecnológicas, se ha visto inmerso en esta dinámica toda vez que su población se duplicó desde hace aproximadamente cuarenta años.

Ya ubicados en el ámbito de nuestro interés, así como en la etapa cronológica que nos ha tocado vivir, habremos de situar dentro de la cobertura tan extensa que tiene la ingeniería sanitaria el área específica relacionada con la ubicación de residuos sólidos y el tratamiento de aguas residuales, considerando como destino las comunidades rurales.

Estos temas en específico, han sido objetivo a nivel mundial de un minucioso seguimiento en el ámbito investigativo, generando sin duda, valiosas aportaciones en el campo de la Ingeniería Sanitaria. En México, dicha labor científica ha tenido un mayor auge de aproximadamente 25 años a la fecha, viéndose esto reflejado en la cada vez más creciente producción de artículos y textos relacionados con la disciplina.

Acorde con lo anteriormente señalado, el presente libro busca apoyar la labor de alumnos, catedráticos e investigadores del área en su quehacer profesional diario, mediante la divulgación del conocimiento mostrado en la obra con auténtico rigor profesional y científico.

Alberto Diosdado Salazar (†)

INTRODUCCIÓN

En los países en desarrollo son frecuentes las enfermedades gastrointestinales, ya sea por no aplicar ningún tratamiento al agua residual, o bien, por una disposición inadecuada. Algunas enfermedades son: cólera, tifoidea, paratifoidea, diarrea y hepatitis, entre otras. Por lo tanto, se deben desarrollar tecnologías de bajo costo que se adapten a las condiciones de la comunidad bajo estudio y que proporcionen un servicio adecuado. Para que un programa de saneamiento tenga éxito, es recomendable considerar las condiciones sociales, culturales, económicas y técnicas de la comunidad en estudio. Derivado de este trabajo, se determina la alternativa tecnológica apropiada y el grado de servicio.

Para realizar el presente libro se consultó bibliografía actualizada: artículos científicos, fichas técnicas, manuales, libros, y se tomaron en cuenta algunos textos considerados obras clásicas en el tema y que, por alguna razón, no han sido reeditados. No obstante que existe una amplia bibliografía sobre el diseño de sistemas lagunares, en este trabajo se incluyeron solo las de mayor utilidad.

Esta publicación servirá como apoyo técnico tanto al estudiante de ingeniería sanitaria como al ingeniero de proyectos responsable de elaborar las estrategias para establecer un sistema de saneamiento y tratamiento de aguas residuales en una comunidad rural.

Por último, un reconocimiento al M. C. Alberto Diosdado Salazar (†) por el apoyo recibido para la ejecución de esta obra.

Facundo Cortés Martínez

1

Generalidades

Objetivo

Que el lector conozca el propósito de los sistemas lagunares, así como sus ventajas y desventajas.

Los sistemas lagunares son una opción viable para el tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo. Regiones con climas tropicales proporcionan condiciones ambientales que favorecen al proceso de tratamiento. Algunas ventajas importantes son: operación sencilla, construcción económica y poco personal.

El presente libro tiene como propósito fundamental orientar al estudiante o profesional en el cálculo del dimensionamiento de los sistemas lagunares en pequeñas comunidades. En México y en los países en desarrollo existen muchos sistemas de tratamiento de lagunas que desafortunadamente no funcionan. Lo anterior no se debe a una construcción inadecuada, sino a un deficiente diseño, mala operación y falta de mantenimiento. Para que un sistema de este tipo funcione correctamente se debe tomar en cuenta la forma de las lagunas, tamaño, profundidad, patrón de flujo, tiempo de retención hidráulico y, principalmente, la operación y mantenimiento.

1.1. LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Son estanques excavados con el propósito de embalsar agua residual con largos periodos de retención. En estas se realiza un tratamiento por medio de la actividad bacteriana con acciones simbióticas de algas y otros organismos (Rolim, 2000; Conagua/IMTA, 2007a; Conagua/ IMTA, 2007b).

Los sistemas lagunares tienen tres objetivos básicos: a) *remoción de la materia orgánica de las aguas residuales*, b) *remoción de nutrientes: nitrógeno y fósforo*, y c) *eliminación de microorganismos patógenos*. Según Rolim (2000) y Shelef y Kanarek (1995, citado por Conagua/IMTA, 2007a), los sistemas lagunares presentan las siguientes ventajas y desventajas.

1.2. VENTAJAS

- Costos bajos por construcción, operación y mantenimiento
- Fáciles de *construir, operar y mantener* (no se necesita personal calificado)
- Buena remoción de materia orgánica y microorganismos patógenos
- Absorben los picos hidráulicos, cargas orgánicas y compuestos tóxicos
- Pueden tratar aguas residuales biodegradables
- No presentan problemas de operación en el manejo y disposición de lodos
- Utilización del agua tratada en agricultura y acuicultura
- Se pueden utilizar como sistemas reguladores de riego

1.3. DESVENTAJAS

- La principal desventaja es que necesitan una gran área de terreno
- Debido a la infiltración, no deben construirse en suelos arenosos por la *contaminación* que causan a los mantos acuíferos
- Pueden generar olores desagradables cuando se incluya una laguna anaerobia y esta reciba *alta concentración* de carga orgánica
- El funcionamiento adecuado de un sistema de lagunas depende de las condiciones ambientales del lugar: viento, temperatura, nubosidad, etcétera
- Se recomienda que la ubicación del sistema de tratamiento se localice, por lo menos, a 500 metros de la mancha urbana
- El efluente descargado incluye *alto contenido* de algas (sólidos suspendidos) que puede ocasionar problemas en el suelo cuando se reutiliza en regadío de cultivos

1.4. DEFINICIONES

Con el propósito de entender el funcionamiento biológico que se lleva a cabo en las lagunas de estabilización, se definen algunos conceptos básicos:

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La Agencia Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) la define como el oxígeno disuelto necesario para que los organismos vivos que se encuentran en el agua descompongan la materia orgánica (EPA, 1999). En México, la norma para determinar este contaminante es la NMX-AA-028-SCFI-2001, publicada en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF, 2001). La determinación de la DBO se lleva a cabo a una temperatura de 20 grados centígrados (°C), con un tiempo de incu-

bación de cinco días. Una vez definida la concentración, se escribe: DBO_5.

Demanda química de oxígeno (DQO). Se refiere a la medición de oxígeno necesario para oxidar toda la materia orgánica e inorgánica, tanto de aguas residuales industriales como de municipales. La norma mexicana para su determinación: NMX-AA-030-SCFI-2001 (DOF, 2001). Ambos análisis (DQO y DBO_5) son utilizados para precisar la concentración de la materia orgánica. La diferencia entre las dos mediciones estriba en que con la DQO se obtienen mayores mediciones, ya que se oxida cualquier tipo de compuesto, mientras que la DBO_5 oxida solo la materia que pueda ser degradada por medios biológicos (Metcalf y Eddy, 1991).

Proceso biológico. La EPA (1994) lo define como: "Los procesos mediante los cuales las actividades biológicas de las bacterias y de otros microorganismos descomponen complejos materiales orgánicos en sustancias simples más estables" (p. 123).

Coliformes fecales. Las bacterias coliformes fecales son aquellas que fermentan la lactosa en el intervalo de 44.5-45.5 °C, donde crecerá principalmente *Escherichia coli.* La presencia de miembros del grupo coliforme que habitan normalmente en el intestino del hombre y otros animales de sangre caliente proporciona una indicación sensible de contaminación fecal. Su presencia en el agua revela la posibilidad de que existan organismos dañinos para el ser humano. Algunas enfermedades generadas por estas bacterias son: cólera, hepatitis infecciosa, gastroenteritis, lepra, sarna y fiebre amarilla, entre otras importantes (EPA, 1999; DOF, 2006; Conagua/IMTA, 2007c).

Nutrientes. Constituyen la fuente de alimento durante el proceso biológico: nitrógeno y fósforo, entre otros.

Anaerobio. "Se refiere a los organismos que no requieren oxígeno para vivir, y a los procesos que tienen lugar sin la presencia de oxígeno" (EPA, 1994, p. 17).

Aerobio. "Describe a los organismos vivos y los procesos que necesitan la presencia de oxígeno" (EPA, 1994, p. 17).

Facultativo. Se refiere a la oxidación de la materia orgánica. Esta se realiza en condiciones aerobias y anaerobias (Conagua/IMTA, 2007b).

Bacteria. Organismo unicelular y procariota perteneciente al reino monera. Su aspecto externo es variado. Puede poseer una forma esférica (coco), alargado (bacilo) o helicoidal y, aunque se pueden encontrar aisladas, cuando las condiciones son favorables se multiplican asexualmente por bipartición y generan colonias. La estructura celular consta de una membrana lipídica en cuyo citoplasma abundan los ribosomas. Las bacterias carecen de membrana nuclear, por lo que el material genético se halla esparcido por toda la célula; este consta de un único cromosoma circular y, a veces, exis-

te un segundo anillo muy reducido denominado "plásmido". La célula bacteriana se recubre con la pared que le proporciona forma y que, según su estructura y composición, se pueden distinguir dos grandes grupos de bacterias: gram-positivas y gram-negativas (Csuros, M. y Csuros, C. 1999).

Huevos de helminto. Término designado a un amplio grupo de organismos que incluye a todos los gusanos parásitos (de humanos, animales y vegetales) y de vida libre, con forma y tamaños variados. Poseen órganos diferenciados y sus ciclos de vida comprenden la producción de huevos o larvas, infecciosas o no, y la alternancia compleja de estadios que incluye hasta tres huéspedes diferentes (NMX-AA-113-SCFI-2012, DOF, 2012).

Protozoarios. Son células eucariotas simples (organismos cuyas células tienen membrana nuclear) con características del reino animal, ya que son móviles y heterótrofos. El nombre, que proviene del griego *proto*: 'primero', y zoo: 'animal', avala la hipótesis de que son los seres vivos más antiguos; las primeras células que existieron. Debido a su tamaño pequeño y a la producción de quistes que les permiten resistir las condiciones medioambientales adversas, muchas especies son cosmopolitas, mientras que otras son de distribución limitada (Csuros, M. y Csuros, C. 1999).

Cinética de primer orden. Es la velocidad de reacción directamente proporcional a la concentración de una única especie A, y es independiente de las concentraciones de todas las demás.

Organismos patógenos. Organismos, incluidos virus, bacterias o quistes, capaces de causar enfermedades tales como: tifus, cólera o disentería en un receptor; por ejemplo: el hombre (EPA, 1999).

2

Fundamentos

Objetivo

Que el lector aprenda la clasificación de los sistemas lagunares, así como los distintos tipos de estanques.

2.1. CLASIFICACIÓN Y FUNCIONAMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Rolim (2000) clasifica las lagunas de estabilización en cuatro tipos: anaerobias, facultativas, de maduración o pulimiento y aerobias de alta tasa. El citado autor también clasifica las lagunas de estabilización de acuerdo con la función del lugar que ocupan, al propósito del tratamiento y a la secuencia de unidades del proceso.

2.2. CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DEL LUGAR QUE OCUPAN LAS LAGUNAS

Primarias. Se nombran así porque reciben el agua residual cruda y pueden ser lagunas facultativas o anaerobias.

Secundarias. Cuando se recibe agua residual de un estanque primario o cualquier otro proceso de tratamiento.

Pulimiento o maduración. Estas lagunas se utilizan cuando se pretende disminuir la concentración de coliformes fecales y son la última etapa del tratamiento con sistemas lagunares (Conagua/IMTA, 2007a; 2007b).

Alta tasa. Son de poca profundidad y se utilizan principalmente para la producción de algas (Rolim, 2000).

2.3. CLASIFICACIÓN DE ACUERDO CON LA SECUENCIA DE LAS UNIDADES DE TRATAMIENTO

Lagunas en serie. En esta categoría se incluyen sistemas de tratamiento seguidos; es decir: anaerobia, facultativa y maduración, aunque también puede considerarse una laguna facultativa seguida de otra facultativa y luego una de maduración. Cuando se diseñe solo una laguna, debe considerarse la facultativa.

Lagunas en paralelo. Con el propósito de llevar a cabo un adecuado mantenimiento del sistema lagunar, se recomienda incluir en la construcción series de lagunas en paralelo (CONAGUA/IMTA, 2007b). Según Metcalf y Eddy (1991), cuando se requiera una eficiencia mayor en la eliminación de contaminantes, en el diseño debe considerarse un arreglo de tres lagunas: anaerobia, facultativa y maduración. En las Figura 2.1 y Figura 2.2 se muestran algunas configuraciones en paralelo.

Figura 2.1 Configuración de lagunas en paralelo, facultativa más maduración.
Fuente: adaptada de Oakley (2005).

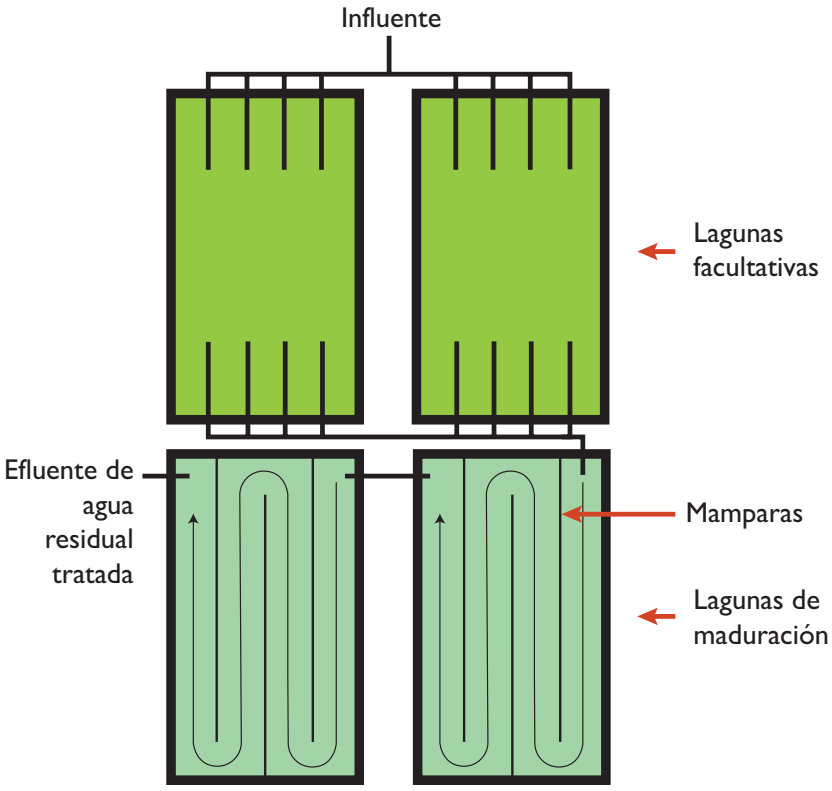
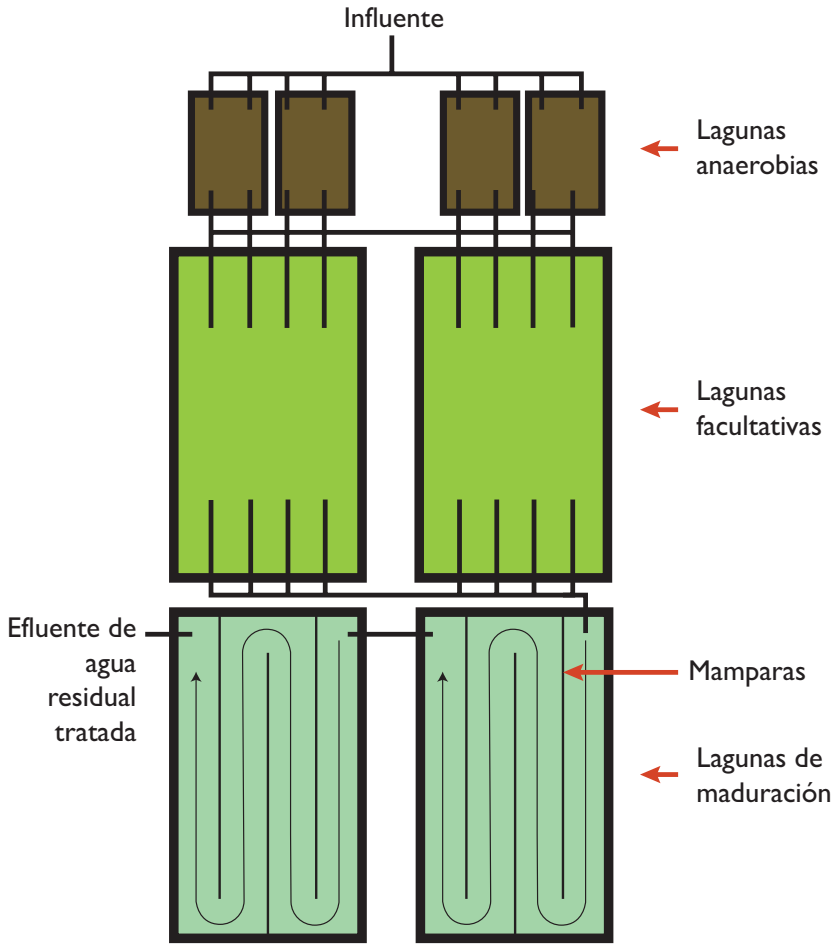


Figura 2.2 Configuración de lagunas en paralelo, facultativa más maduración.
Fuente: adaptada de Oakley (2005).



2.4. FUNCIONAMIENTO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Las lagunas de estabilización constituyen el método más sencillo de tratamiento de aguas residuales. Estas remueven, principalmente, la materia orgánica y los coliformes fecales (Rolim, 2000). En seguida, se describe su funcionamiento.

2.4.1 Lagunas anaerobias

Este tipo de estaques requieren pequeñas áreas, no se generan algas y tampoco existe un proceso fotosintético; es decir, no existe oxígeno disuelto. Las bacterias, huevos de helminto y protozoarios son depositados en el fondo. Luego, son removidos por el proceso anaeróbico que se realiza. La eficiencia en la eliminación de los organismos

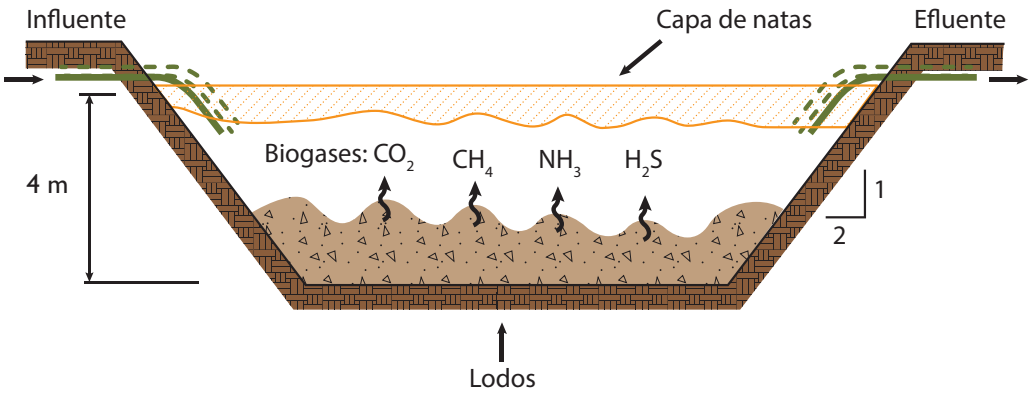
indicados depende principalmente del *tiempo de retención* hidráulico (de uno a cinco días). El propósito de las lagunas anaerobias es el desbaste de la materia orgánica, por lo que pueden recibir altas concentraciones de cargas orgánicas: la *remoción* de la DBO_5 se lleva a cabo debido a la sedimentación de sólidos y el proceso anaerobio (Rolim, 2000; Conagua/ IMTA, 2007a; 2007b). Los estanques anaerobios generan malos olores debido a la producción de sulfuro de hidrógeno (Mara *et ál*., 1992; Rolim, 2000). Según Kalbermatten *et ál*. (1982), la cinética de remoción de la DBO en una laguna anaerobia es similar al efectuado en un digestor convencional anaerobio. El tratamiento del agua residual en lagunas anaerobias necesita de dos condiciones importantes: a) como ya se indicó, no debe *contener oxígeno disuelto* en el fondo de la laguna, y b) la temperatura debe ser mayor a 15 °C. Una vez establecidas las condiciones anteriores, la materia orgánica pasa por las siguientes etapas:

Licuefacción. La materia orgánica presente es modificada por hidrólisis: las bacterias facultativas convierten los carbohidratos y gases en ácidos grasos. En esta etapa todavía no se presenta la remoción de la materia orgánica.

Gasificación. En esta etapa se lleva a cabo la remoción de la materia orgánica: las bacterias anaerobias generan gas metano (CH_4). Luego, el carbono orgánico (C) es convertido a bióxido de carbono (CO_2); de esta manera se presenta la reducción de la materia orgánica.

Las profundidades sugeridas son de 3.0 a 5.0 metros, y la recomendación de tiempo para realizar el desazolve, considerando una operación continua, es de dos a cuatro años (Rolim, 2000; Oakley, 2005). En la Figura 2.3 se muestra el proceso de una laguna anaerobia.

Figura 2.3 Proceso de una laguna anaerobia. Fuente: adaptado de Oakley (2005).



2.4.2 Lagunas facultativas

El tratamiento del agua residual en lagunas facultativas considera tres zonas: a) se establecen condiciones aerobias en la parte superior; es decir, existe oxígeno disuelto, b) una parte facultativa intermedia en donde las bacterias aerobias, anaerobias y facultativas (las bacterias facultativas pueden vivir tanto en condiciones anaerobias como aerobias) llevan a cabo la descomposición de la materia orgánica (DBO), y c) una zona anaerobia en la parte inferior de la laguna, donde los sólidos que sedimentan se descomponen de manera fermentativa (Figura 2.4).

Los factores ambientales que favorecen el adecuado proceso son: radiación solar, sedimentación, elevado potencial de hidrógeno (pH), altas concentraciones de oxígeno disuelto y tiempo de retención hidráulico, entre otros. El pH determina el grado de acidez o alcalinidad de una solución. Este puede encontrarse entre un rango de 0 a 14. Si el valor es 0, se dice que muy ácido; mientras que el 14 indica una alta alcalinidad. Una condición neutra se considera 7 (EPA, 1999).

La profundidad sugerida es de 1.5 a 2.5 metros. Si el proyecto solo considera lagunas facultativas y de maduración; es decir, lagunas facultativas como primarias, la profundidad mínima recomendada es de 1.5 metros.

Las algas, en este tipo de estanques, se generan por el contenido de nitrógeno, fósforo y carbono en el agua residual; luego, las algas producen oxígeno debido a la fotosíntesis. Enseguida, el oxígeno generado es usado por las bacterias aerobias; de esta forma se elimina la DBO. Después, las bacterias producen gas carbónico que, a su vez, es utilizado por las algas. Por dichas razones es que existe una relación simbiótica entre algas y bacterias (Gloyna, 1971; Feachem, *et ál.,* 1977; Rolim, 2000; Oakley, 2005). Las Figura 2.4 y Figura 2.5 muestran el proceso de la laguna facultativa.

2.4.3 Lagunas de maduración o pulimiento

Las condiciones del tratamiento son totalmente aerobias en toda la laguna. El propósito es reducir los coliformes fecales hasta cumplir con la norma de descarga del agua residual tratada a los cuerpos receptores. Los factores que intervienen para el tratamiento son: potencial de hidrogeno alto, rayos ultravioleta del sol, existencia de depredadores, existencia de oxígeno disuelto y carencia de nutrientes. Las lagunas de maduración o pulimiento pueden *recibir aguas residuales previamente tratadas* por otros sistemas de tratamiento secundario: lodos activados o biofiltros (Gloyna, 1971; Feachem *et ál.,* 1977; Metcalf y Eddy, 1991; Conagua/IMTA, 2007b).

Según Banda (2007) y Oakley (2005), el número de lagunas y sus dimensiones se determinan por el tiempo de retención necesario para la eliminación de coliformes fecales. Dos sugerencias importantes en el diseño de estas lagunas son: consi-

Figura 2.4 Interacción de bacterias y algas en una laguna facultativa.
Fuente: adaptada de CONAGUA/ IMTA (2007a).

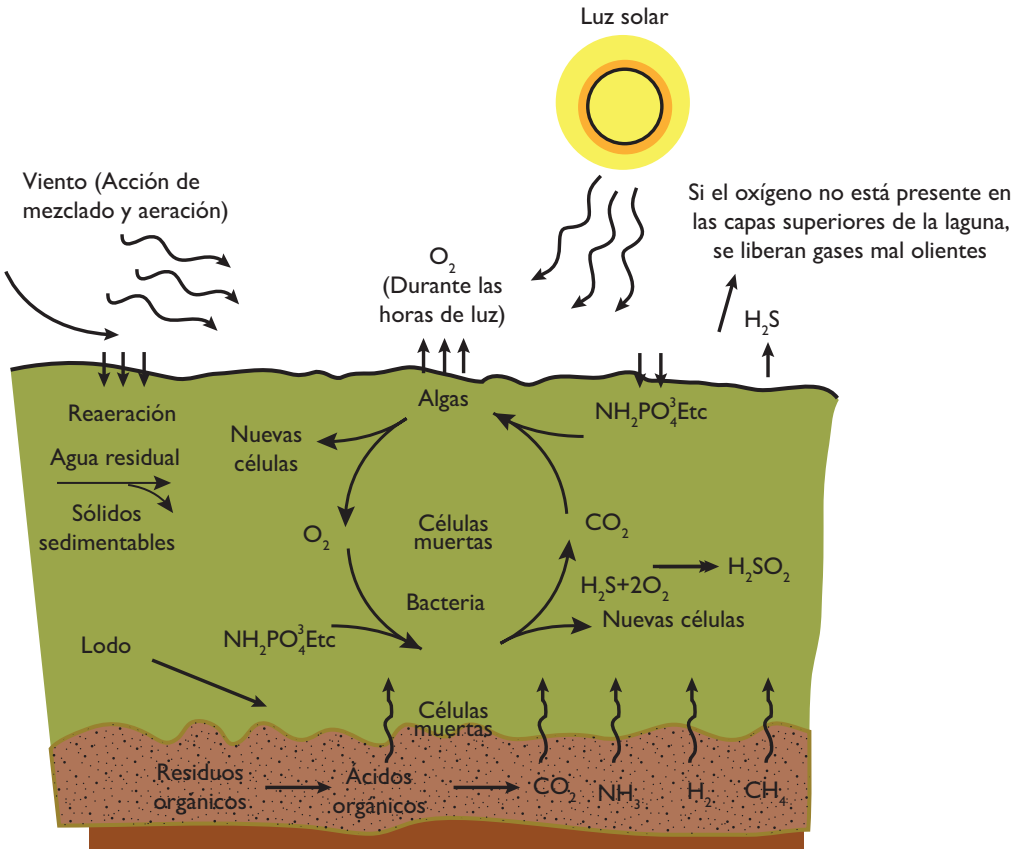
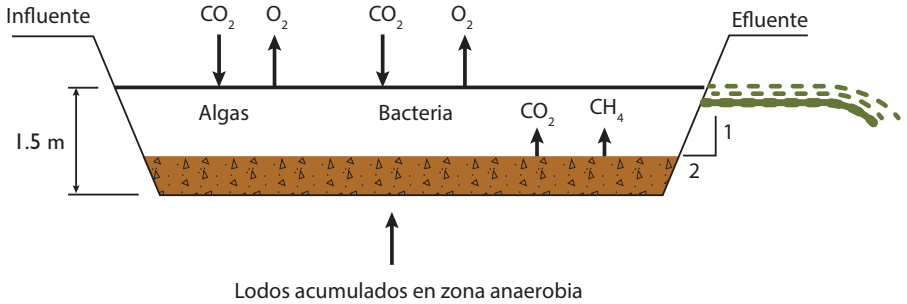


Figura 2.5 Proceso de una laguna facultativa. Fuente: adaptado de Oakley (2005).



derar la *eliminación* del organismo indicador hasta un 99.999% y definir la profundidad entre 0.6 a 1.5 metros (Conagua/IMTA, 2007a; Rolim, 2000; Oakley, 2005).

Como se indicó, el propósito de las lagunas de maduración es la *eliminación* de coliformes fecales; no obstante lo anterior, también remueven una cantidad pequeña de materia orgánica (Oakley, 2005).

2.5. MODELOS PARA DETERMINAR EL DIMENSIONAMIENTO DE LAS LAGUNAS

Se clasifican en empíricos y racionales.

2.5.1 Empíricos

Según Rolim (2000), los modelos empíricos se limitan solo a la observación; es decir, se estudian los sistemas lagunares que han estado operando correctamente. En otras palabras, cuando se tenga una buena eficiencia en la eliminación de contaminantes: materia orgánica y organismos patógenos.

2.5.2 Racionales

Utilizan estudios en laboratorio para determinar los procesos que se llevan a cabo en las lagunas. Generalmente incluyen correlaciones matemáticas; por ejemplo: relacionan los resultados de una buena operación de un sistema lagunar con las expresiones numéricas obtenidas.

Hay muchos criterios para determinar el dimensionamiento de lagunas de estabilización. Por mencionar algunos y de manera general, existen para lagunas anaerobias: sudafricano y método basado en el tiempo de retención hidráulico; para lagunas facultativas: de Gloyna, método basado en el tiempo de retención hidráulico, sustentado en la carga superficial y las correlaciones por temperatura; para lagunas de maduración o pulimiento: método basado en el tiempo de retención hidráulico y usando los criterios de flujo disperso por el método de Yánez (Rolim, 2000). A continuación, se describen algunos aspectos hidráulicos en lagunas de estabilización.

3

Hidráulica de los sistemas lagunares

Objetivo

Que el profesional o estudiante de la ingeniería sanitaria aprenda los patrones de caudal y mezcla en los sistemas lagunares

3.1. FACTORES HIDRÁULICOS QUE INTERVIENEN EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

La existencia de cortocircuitos hidráulicos en una laguna de estabilización genera *serios problemas* en el proceso de tratamiento: zonas muertas en algunas áreas de la laguna. Lo anterior significa que el agua residual permanece estancada y las consecuencias son: a) *disminuye el volumen de trabajo* de la laguna, así como el área superficial, b) se generan malos olores y la eficiencia del tratamiento se reduce en forma importante; por lo tanto, es recomendable favorecer la mezcla de las aguas residuales.

3.2. MEZCLA

Con el propósito de realizar el tratamiento adecuado del agua residual, se recomienda verificar que la *distribución* del agua residual sea uniforme; esto es, que se utilice todo el vo-

lumen de la laguna. Esta acción permitirá obtener lo siguiente: se establece el tiempo de retención proyectado, y como ya se indicó, se evita la formación de zonas muertas.

Las lagunas que requieren una mayor área son las facultativas. En ellas es posible instalar canales de flujo independiente, o bien, *mamparas con flujo horizontal*, tal como se muestra en las Figura 3.1, Figura 3.2 y 3.3. Los investigadores Kilani y Ogunrombi (1984); Muttamara y Puetpaiboon (1996; 1997); Sperling *et ál.* (2003); Shilton y Harrison (2003); Shilton y Mara (2005); Abbas *et ál*. (2006), Cortés *et ál*. (2011; 2012; 2013) recomiendan la utilización de mamparas o deflectores, ya que según los resultados se obtienen las siguientes ventajas: a) aumenta la eficiencia en la remoción de contaminantes, b) se mejora la hidráulica dentro del estanque porque se establece el flujo pistón, y c) se eliminan las zonas muertas. Según Polpraset y Agarwalla (1994), la eficiencia del tratamiento aumenta ya que se generan las condiciones para la eliminación de los contaminantes presentes en el agua residual.

3.2.1 Patrones de caudal y mezcla en lagunas de estabilización

Los sistemas del tipo lagunas de estabilización se consideran como reactores, ya que en estos se llevan a cabo procesos físicos, químicos y biológicos. Algunos factores importantes que influyen en la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales son: a) la profundidad, b) la forma y tamaño de los estanques, c) el tiempo de retención hidráulico y d) el patrón de flujo hidráulico que se establezca

Figura 3.1 Mamparas en laguna de estabilización. Fuente: adaptada de (Oakley (2005).

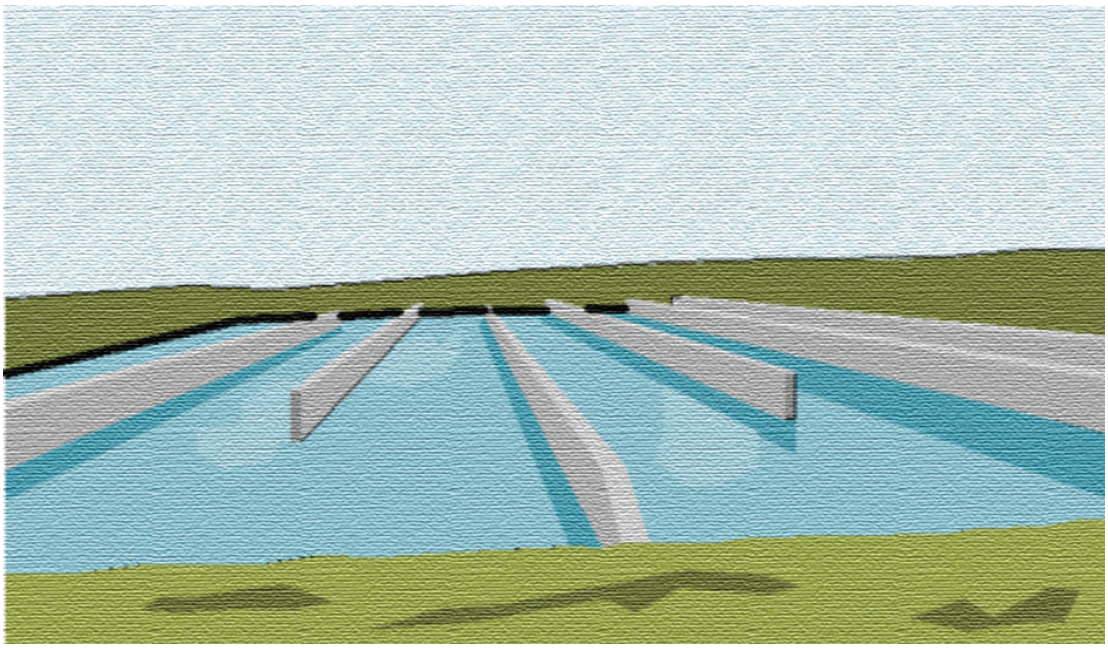


Figura 3.2 Canales independientes. Fuente: adaptada del Cetesb (1989). Laguna facultativa con mamparas. Fuente: adaptada del Cetesb (1989).

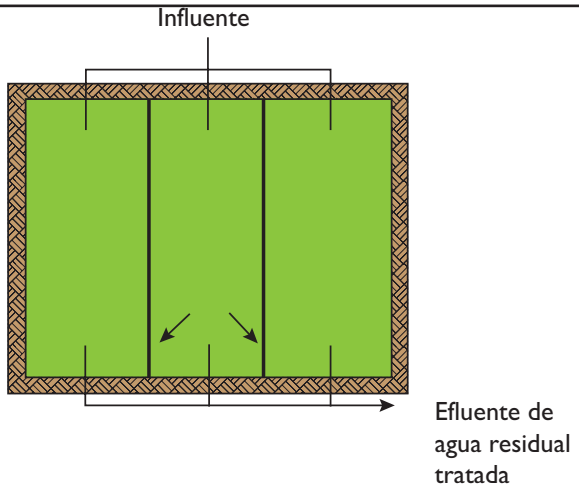
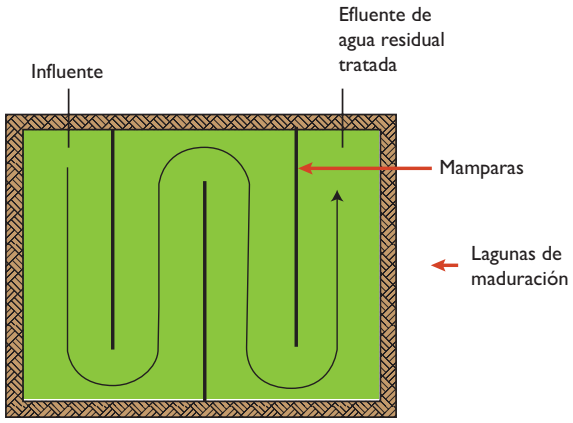


Figura 3.3 Reactor de flujo pistón. Fuente: Arceivala (1981).



en las lagunas (Muttamara y Puetpaiboon, 1997; Lloyd *et ál.,* 2003).

Según Guevara (1996) y Rolim (2000), los patrones de flujo hidráulico, así como la mezcla dentro de las lagunas, se dividen en dos tipos: reactores continuos y descontinuos. Los últimos son utilizados para estudios en laboratorio; sin caudal continuo; mientras que los continuos se clasifican en: flujo pistón, mezcla completa y flujo disperso. Enseguida se detalla cada uno de los patrones de flujo continuo en lagunas de estabilización.

3.2.1.1 El flujo pistón

Según Guevara (1996) y Conagua/IMTA (2007a), no se observa mezcla en la dirección del flujo, pero en el sentido perpendicular sí, y todos los contaminantes presentes en el agua residual son expuestos en el mismo tiempo de retención. EL flujo pistón se establece en la laguna cuando la dispersión de contaminantes es pequeña y la relación largo-ancho es mayor a 3.

3.2.1.2 Mezcla completa

De acuerdo con Guevara (1996), este tipo de lagunas presenta zonas muertas y se establece cuando la dispersión de contaminantes es mayor o igual a 10. La relación largo-ancho es menor que 1. Una característica importante es que el caudal es homogéneo en toda el área de la laguna. En la Figura 3.5 se muestra el reactor de mezcla completa.

3.2.1.3 Flujo disperso

"El flujo disperso se define como aquel en que cada elemento del caudal tiene un tiempo de detención para cada periodo. También llamado de flujo arbitrario y está comprendido entre dos límites, el flujo pistón ideal y la mezcla completa" (Rolim, 2000, p. 219). La relación largo-ancho es de 1 a 3. En la Figura 3.6 se muestra el esquema de mezcla completa.

Figura 3.4 Reactor de mezcla completa. Fuente: Arceivala (1981).

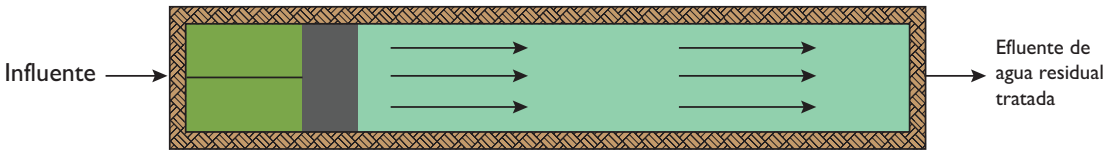


Figura 3.5 Reactor de flujo disperso. Fuente: Arceivala (1981).

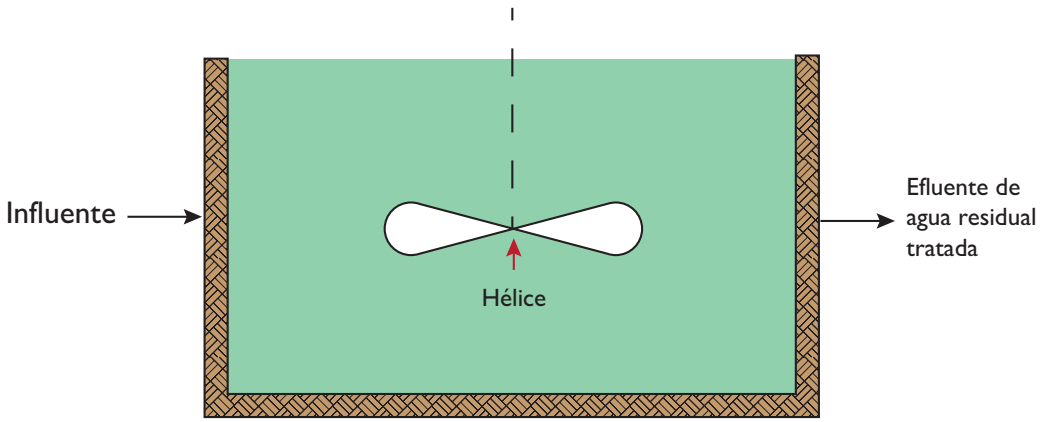
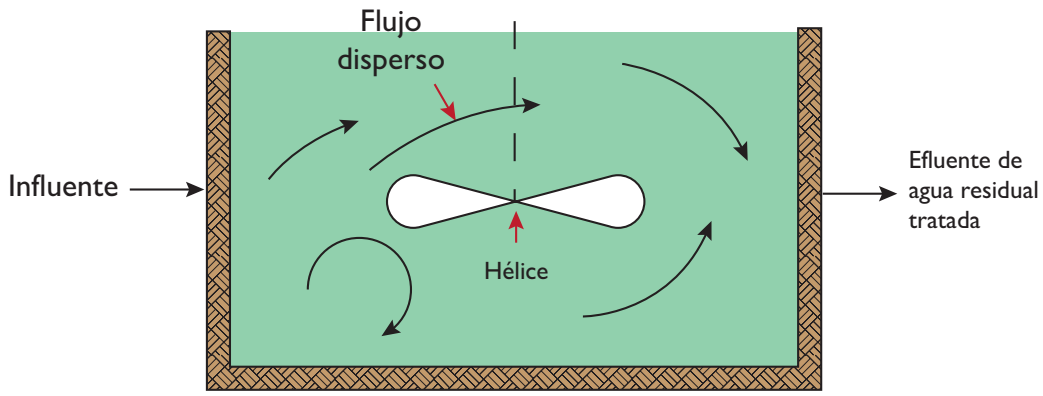


Figura 3.6 Detalles de entrada, salida e interconexiones en lagunas.
Fuente: adaptada de Arthur (1983) y Arceivala (1981).



Según el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (Cepis), considera el modelo de flujo disperso como el mejor régimen hidráulico que se lleva a cabo en una laguna de estabilización (Sáenz, 1987).

3.3. FORMA DE LA LAGUNA

La forma rectangular de una laguna favorece la distribución uniforme de la carga orgánica; se tienen *mejores resultados* que en las lagunas circulares o irregulares. Las lagunas facultativas y anaerobias (primarias) deben ser, en la medida de lo posible, rectangulares con relación largo-ancho, de 2 o 3 a 1. La relación largo-ancho de las lagunas secundarias o de maduración es entre 3 y 8. Esta última relación (forma alargada) busca que las condiciones hidráulicas se realicen en forma de flujo pistón y se reduzca la posibilidad de que se presenten los problemas hidráulicos.

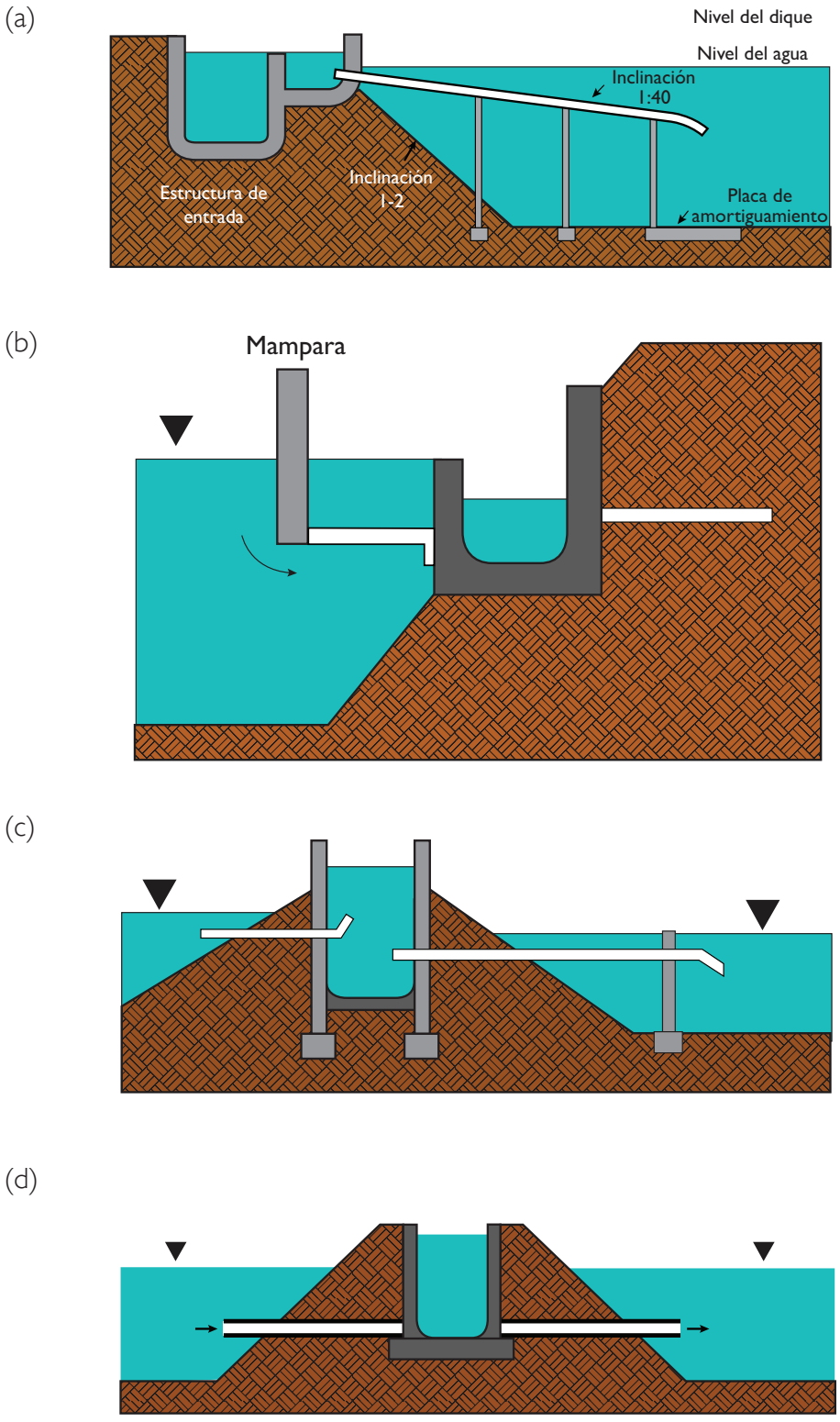
Como ya se dijo, la inclusión de mamparas o canales de flujo aumentan la eficiencia de tratamiento y ayudan a resolver el problema de los cortocircuitos. Las entradas y salidas múltiples a la laguna facultativa es otra condición que también ayuda a disminuir los efectos hidráulicos negativos.

El Cepis realizó estudios experimentales en lagunas de estabilización y concluyó que no existe la mezcla completa; más bien existe flujo disperso y la eficacia de la dispersión depende de la forma de las lagunas (Sáenz, 2000).

3.3.1 Entradas y salidas de flujo en lagunas de estabilización

La entrada para las lagunas anaerobias, facultativas y maduración deben localizarse por debajo del nivel del espejo de agua, aproximadamente a media profundidad. Esta acción *favorecerá la operación* adecuada de las lagunas, puesto que se reduce la generación de cortocircuitos hidráulicos. En las Figura 3.7 (a), (b), (c) y (d) se muestran algunos detalles de entradas y salidas en sistemas lagunares. Existen varios tipos de estructuras de salida

Figura 3.7 Laguna facultativa con dispositivos múltiples de entrada y salida para aproximar al flujo pistón. Fuente: adaptada de Oakley (2005).



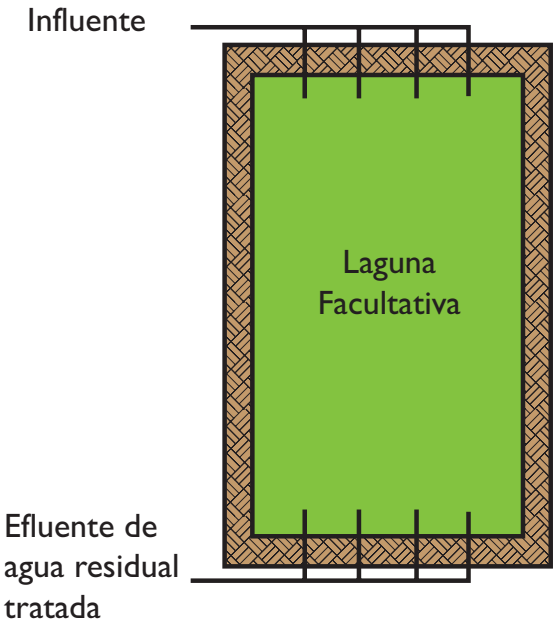
pero se recomienda se utilicen, de preferencia, las estructuras con dispositivos para manejar el nivel del agua; es decir, que pueda variarse el nivel. Lo anterior con fines de operación y mantenimiento de bordos del sistema lagunar (Lothar, 1980; Rojas y León, 1990; Oakley, 2005).

Los aspectos hidráulicos y climáticos son importantes en las reacciones que se llevan a cabo en sistemas lagunares. Por tanto, no deben ser ignorados, ya que influyen directamente en la eficiencia de tratamiento. Ejemplos de aspectos hidráulicos a tomar en cuenta: forma de las lagunas, diseño y localización de estructuras de entrada y salida, dispositivos para medir y distribuir el flujo, y remoción de materia flotante, entre otros (Sáenz, 2000).

Otra consideración importante es colocar varias entradas y salidas en la laguna facultativa con el propósito de aproximarse al flujo pistón. Además, se *distribuyen uniformemente* los lodos que se depositan en el fondo de la laguna (Rolim, 2000). En la Figura 3.8 se muestra una laguna facultativa con entradas y salidas múltiples.

Por otro lado, Pearson (2000); Abbas *et ál*. (2006); Shilton y Harrison (2003) y Oakley (2005) indican la importancia de la localización de las entradas y salidas en los sistemas lagunares. Pearson (2000); Crites y Tchobanoglous (2000); Metcalf & Eddy (2001); Abbas *et ál*. (2006); Shilton y Harrison (2003) y Oakley (2005) determinaron que la dispersión depende de la relación largo-ancho de la laguna, así como la ubicación de entradas y salidas

Figura 3.8 Laguna de maduración o pulimiento con una entrada y una salida.
Fuente: adaptada de Oakley (2005).

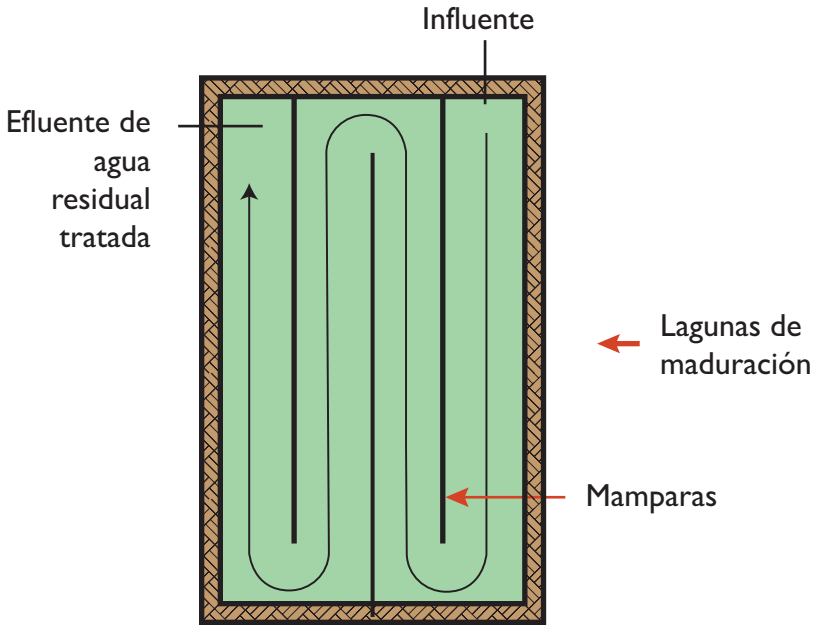


del estanque. La repartición de flujo por medio de entradas múltiples es un factor fundamental: la laguna no recibirá toda la carga orgánica e hidráulica de un solo lado.

Laguna de maduración. Es recomendable que la laguna de maduración o pulimiento incluya solo *una entrada y una sola salida,* considerando mamparas, tal como se muestra en la Figura 3.9. Como ya se indicó, las mamparas maximizan el régimen hidráulico del flujo pistón (Shilton y Harrison, 2003).

Es conveniente instalar trampas de grasas y natas en las salidas (efluentes) de todas las lagunas y también definir la localización de estas. En la laguna anaerobia se deben instalar cerca de la profundidad donde se encuentra el lodo. En la laguna facultativa, la trampa deberá colocarse debajo del estrato donde se encuentran las algas. La recomendación anterior es porque se busca evitar que las algas abandonen la laguna facultativa. No hay que olvidar que las algas son una parte importante en el proceso de depuración de las aguas residuales. Finalmente, en la laguna de maduración la trampa debe colocarse en el nivel donde se localice la mejor calidad microbiológica. La colocación de estos dispositivos mejorará la calidad del agua residual. Rolim (2000) recomienda instalar las salidas (efluentes) de las lagunas en sentido contrario a la dirección de los vientos dominantes, a fin de evitar que las natas y materia flotante descarguen en el cuerpo receptor.

Figura 3.9 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración 1 + maduración 2.



3.3.2 Arreglos de lagunas

Según la Conagua/IMTA (2007a; 2007b), para determinar un arreglo de lagunas, o sea una combinación de estas, es prudente considerar la caracterización del agua residual por tratar, el *reúso* que se tenga programado para el agua residual tratada y la *disponibilidad* de terreno. Una vez que se cuente y valore la información anterior, entonces se procede a proponer los sistemas, que pueden ser:

- Facultativa + facultativa + aerobia
- Anaerobia + facultativa + maduración
- Facultativa + facultativa + maduración
- Facultativa + maduración
- Facultativa + maduración + maduración
- Tanque séptico + laguna facultativa
- Tanque séptico + laguna facultativa + laguna de maduración

Existen más arreglos de lagunas con tanques sépticos y tanques Imhoff, pero en el presente libro solo se incluye el cálculo de dimensionamiento para sistemas lagunares.

4

Bases teóricas para el diseño de sistemas lagunares

Objetivo

Que el lector conozca las bases técnicas metodológicas y de normatividad para el diseño de lagunas de estabilización

4.1. NORMATIVIDAD

Las normas siguientes tienen carácter *obligatorio* y mencionan las condiciones mínimas que debe reunir la calidad del agua residual:

1. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SERMANART-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales (DOF, 1997).
2. Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMANART-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal (DOF, 1998a).

3. La Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMANART- 1997 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público (DOF, 1998b).

El cumplimiento de la NOM-002 es *obligatorio para las industrias y comercios* que generan aguas residuales de proceso y que son descargadas al sistema de drenaje y alcantarillado municipal. La NOM-001 aplica para las aguas residuales procesadas por *las plantas de tratamiento municipale*s y que son dispuestas en diferentes cuerpos receptores.

Una vez comprendidas las principales características técnicas de las lagunas de estabilización, se estará en condiciones de continuar con los apartados siguientes: periodo de diseño, población de proyecto, dotación de agua potable, aportación de aguas residuales, gasto de diseño, calidad del agua a tratar y análisis de la $DBO_{5.}$

4.2. PERIODO DE DISEÑO

Para climas cálidos no es conveniente adoptar periodos de diseño muy largos. En los primeros años la capacidad del sistema de tratamiento estará excedida, por tanto, es recomendable considerar en el proyecto la modulación de unidades; es decir, incluir la incorporación de unidades cada cinco años. En México, la Conagua/IMTA (2007d) consideran el periodo de diseño para plantas de tratamiento de cinco a diez años, aunque algunos autores sugieren 15 y hasta 20 años.

4.3. POBLACIÓN DE PROYECTO

Para determinar las *dimensiones* de un sistema de tratamiento de lagunas de estabilización, es necesario calcular *la población a futuro* de la localidad bajo estudio. Para efectuar lo anterior, se debe conocer la población actual y analizar cómo ha crecido. Es importante señalar que la proyección de la población es compleja; no existen soluciones exactas. Hay *factores* que pueden alterar el crecimiento demográfico normal, tales como actividades económicas, movimientos migratorios y políticas de descentralización, entre otras. La base de cálculo para la *predicción* de la población son los datos estadísticos de crecimiento. En México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía e Informática (Inegi) realiza un censo nacional cada diez años. Estos datos son los que se usan en los modelos matemáticos para llevar a cabo el cálculo de la población (Conagua/IMTA, 2007a; Lara, 1991).

4.4. GASTOS DE DISEÑO

4.4.1 Dotación de agua potable

Una vez que se cuenta con la proyección de la población al horizonte de proyecto, se determina la dotación de agua potable. "La dotación es la cantidad de agua asignada a cada habitante, considerando todos los consumos de los servicios y

las pérdidas físicas en el sistema, en un día medio anual; sus unidades son en L/hab/día" (Conagua/IMTA, 2007d, p. 14). Para establecer la cantidad de agua por día es prudente *clasificar el tipo de clima*, tal como se muestra en la Tabla 4.1; luego, con esta base, se determina la dotación.

En 1979, la entonces Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (Sahop) publicó en su *Manual de normas de proyecto para obras de aprovisionamiento de agua potable en localidades urbanas de la República Mexicana*; valores para la dotación considerando el clima y número de habitantes. La Tabla 4.2 indica los valores de la dotación.

Es importante dejar en claro que los valores indicados en la Tabla 4.2 pueden ser ajustados de acuerdo con las necesidades de la comunidad donde se tiene planeado llevar a cabo el estudio. Lo anterior, considerando la disponibilidad de agua (superficial o subterránea), además de las condiciones físicas, económicas, sociales y políticas. Una vez definida la dotación, se estará en condiciones de fijar la aportación de aguas residuales.

4.4.2 Aportación de aguas residuales

La aportación es el volumen diario de aguas negras desalojado por habitante en un día, y se determina

Tabla 4.1 Clasificación de climas por temperatura.

Temperatura media anual (° C)	Tipo de clima
Mayor que 22	Cálido
De 18 a 22	Semicálido
De 12 a 17.9	Templado
De 5 a 11.9	Semifrío
Menor que 5	Frío

Fuente: Sahop (1979).

Tabla 4.2 . Dotación de agua potable por clima y número de habitantes.

Dotación de agua potable (L/hab/día) Climas			
Número de habitantes	Cálido	Templado	Frío
2 500 a 15 000	150	125	100
15 000 a 30 000	200	150	125
30 000 a 70 000	250	200	175
70 000 a 150 000	300	250	200
Mayor de 150 000	350	300	250

Fuente: Sahop (1979).

como un *porcentaje de la dotación* de agua potable. El porcentaje estimado es del 75 a 80% de la dotación. Existe una parte de agua potable que no se vierte al sistema de drenaje (del 20 al 25%); se estima que estas *pérdidas* son debido al riego de jardines, parques, lavado de vehículos y pérdidas en las tuberías de distribución. En México, la Comisión Nacional del Agua (Conagua), determinó como la aportación el 75% de la dotación en L/hab/día. Una vez definida la aportación, se calcula el gasto medio diario (Lara, 1991; Conagua/IMTA, 2007d).

4.4.3 Cálculo de gasto de diseño

4.4.3.1 Gasto medio diario

Es el caudal de aguas residuales en un día de aportación promedio al año. Este gasto está en función del número de habitantes y de la aportación determinada para cada habitante. En las pequeñas comunidades rurales es difícil medir el consumo de agua, aun cuando exista el servicio de agua intradomiciliar. En ocasiones no se cuenta con medidores de agua (micro medición), por lo tanto, para el cálculo del gasto medio se considera, como ya se indicó, el 75% de la dotación de agua potable (Conagua/IMTA, 2007a; 2007b). El gasto medio diario se calcula con la expresión (4.1).

$$Qmed = \frac{Ap(P)}{86,400} \qquad (4.1)$$

Qmed = Gasto medio de aguas residuales en (L/s)

Ap = Aportación de aguas negras también en (L/s)

P = Población número de habitantes al horizonte de proyecto

86400 = Número de segundos por día

4.4.3.2 Gasto mínimo

Para el caudal mínimo se considera el 50% del gasto medio.

$$Qmin = \frac{Qmed}{2} \qquad (4.2)$$

Qmin = Gasto mínimo (L/s)

4.4.3.3 Gasto máximo instantáneo

Se refiere al valor máximo de agua que se presenta en un determinado instante. El gasto máximo instantáneo se determina con base en el coeficiente de Harmon (M).

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{p/1000}} \qquad (4.3)$$

M = Coeficiente de Harmon

p = Población en miles

Luego, para determinar el gasto máximo instantáneo, se tiene:

$$Qmáx\ inst = (M)(Qmed) \qquad (4.4)$$

Donde:

Qmáx inst = Gasto máximo instantáneo (L/s)

4.4.3.4 Gasto máximo extraordinario

Este gasto se refiere a las aportaciones que no corresponden a las descargas de aguas residuales normales; por ejemplo, las aguas pluviales, aunque también puede considerarse el gasto generado por un crecimiento demográfico repentino. El coeficiente de seguridad que se incluye es 1.5. La expresión (4.5) define el gasto máximo extraordinario.

$$Q_{máx\ ext} = CS(Q_{máx\ inst}) \quad (4.5)$$

Donde:

$Q_{máx\ ext}$ = Gasto máximo extraordinario (L/s)

CS = Coeficiente de seguridad

La mayoría de los diseños de plantas de tratamiento de lagunas de estabilización en pequeñas comunidades consideran el gasto medio. Lo anterior basado en mediciones llevadas a cabo a diferentes horas del día, o bien, si se cuenta con registros de consumo de agua también son una buena base. Pero cuando no se dispone de ninguna información, se pueden hacer estimaciones sustentándose en la población actual y en los datos de crecimiento de población ya indicadas en el apartado "Población de proyecto", así como en la aportación de aguas residuales. Metcalf y Eddy (1991) mencionan que en la evaluación y determinación de los caudales de proyecto se incluya el gasto máximo horario para el dimensionamiento de las unidades de tratamiento biológico. Es decir, tomar en cuenta las aportaciones incontroladas y caudales industriales en la red de alcantarillado municipal, así como el efecto de las infiltraciones. Para el presente caso de comunidades pequeñas, se considerará el gasto medio.

4.5. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Se refiere a la composición de las aguas residuales por tratar, o sea, a los constituyentes físicos, químicos y biológicos que están presentes en el agua residual.

4.5.1 Calidad del agua a tratar

Según la Conagua/IMTA (2007a), el balance de nutrientes (nitrógeno y fósforo), diferente al requerido 100:5:1 (DBO:N:P), inhibe el crecimiento de las algas que llevan cabo la purificación del agua residual.

Las lagunas de estabilización en el medio urbano *se diseñan* para tratar aguas residuales domésticas, por lo que es necesario contar con un padrón de descargas de aguas residuales de procesos industriales y comerciales vertidas al sistema de drenaje y alcantarillado municipal. Lo anterior, con el propósito de *evitar interferencias* en el sistema biológico de tratamiento (Cortés *et ál.,* 2010). En la comunidad rural, posiblemente no sea necesario tomar en cuenta la recomendación del control de descargas de aguas residuales industriales, pero en comunidades más grandes es prudente realizar una verificación de descargas. Si existen industrias

o comercios, entonces se deberán implementar sistemas de pretratamiento en las empresas. En la Tabla 4.3 se muestra la composición típica del agua residual bruta.

Como se mencionó, los parámetros principales que se utilizan para calcular el dimensionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales de sistemas lagunares son: demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y coliformes fecales.

4.5.2 Análisis de la demanda bioquímica de oxígeno

Para determinar la concentración de la DBO_5 en mg/L, lo prudente es llevar a cabo un muestreo de

Tabla 4.3 Composición típica del agua residual doméstica bruta.

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/L	350	720	1200
Disueltos totales (SDT)	mg/L	250	500	850
Fijos	mg/L	145	300	525
Volátiles	mg/L	105	200	325
Sólidos suspendidos (SS)	mg/L	100	202	350
Fijos	mg/L	20	55	75
Volátiles	mg/L	80	165	275
Sólidos sedimentables	mg/L	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno cinco días (DBO_5)	mg/L	110	220	400
Carbón orgánico total (COT)	mg/L	80	160	290
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	250	500	1000
Nitrógeno total (en la forma N) (NT)	mg/L	20	40	85
Orgánico	mg/L	8	15	35
Amoniaco libre	mg/L	12	25	50
Nitritos	mg/L	0	0	0
Nitratos	mg/L	0	0	0
Fósforo total (en la forma P) (PT)	mg/L	4	8	15
Orgánico	mg/L	1	3	5
Inorgánico	mg/L	3	5	10
Cloruros*	mg/L	30	50	100
Sulfatos*	mg/L	20	30	50
Alcalinidad (como $CaCO_3$)	mg/L	50	100	200
Grasas y aceites (GyA)	mg/L	50	100	150
Coliformes totales	NMP/100 mL	10^6-10^7	10^7-10^8	10^8-10^9
Compuestos orgánicos volátiles (COVs)	µg/L	<100	100-400	>400

* Los valores deben aumentarse en la cantidad en que estos compuestos se hallen presentes en las aguas de suministro.

Fuente: Metcalf y Eddy (1991).

las aguas residuales, de acuerdo con la normatividad: muestras compuestas durante siete días para luego enviarlas al laboratorio.

En pequeñas comunidades rurales, en ocasiones no es posible realizar el muestreo y análisis del agua residual; por lo tanto, para determinar la concentración de la DBO_5 se tienen dos opciones: la primera, asignar *una contribución* de la DBO_5 por habitante y día; posteriormente, definir la aportación de aguas residuales, también por habitante y día. Finalmente, calcular la proyección de la población a un horizonte de proyecto. Arthur (1983) considera la contribución del DBO_5 de 40 gramos *per cápita*. Enseguida, el cálculo de la materia orgánica.

4.5.2.1 Ejemplo para determinar la demanda bioquímica de oxígeno cuando no se cuenta con resultados de laboratorio

Se desea calcular el valor de la DBO_5 para diseñar una planta de tratamiento de lagunas de estabilización, de acuerdo con los siguientes datos: población de proyecto de 5 000 habitantes. Considerar la contribución del DBO_5 de 40 g/hab/día. La dotación de agua potable es de 250 L/hab/día.

Solución

Primero, se calcula la carga orgánica con la expresión (4.6).

$$C.O. = \frac{(P)(\text{cont } DBO_5)}{1000} \qquad (4.6)$$

Donde:

C.O.	=	Carga orgánica en (kg)
Cont DBO_5	=	Contribución de materia orgánica en (gr/hab/día)
1000		Factor de conversión

Según la CONAGUA/IMTA (2007a), la carga orgánica se refiere a la medición de las DBO_5 y DQO. Esta carga es *aplicada* todos los días a la laguna y es la que será estabilizada biológicamente. Sus unidades son en kg de DBO_5 por unidad de tiempo *(kg/día)*

Sustituyendo, se tiene:

Carga orgánica =

$$C.O. = \frac{(5000\ \text{hab})(40\ \text{gr/hab/día})}{1000} = 200\ kg$$

Aportación = 75% de la dotación

$$Ap = (\text{dotación})(0.75) \qquad (4.7)$$

Sustituyendo:

$$Ap = (250\ \text{L/hab/día})(0.75) = 187.5\ \text{L/hab/día}$$

Para determinar el gasto medio, utilizar la ecuación (4.1)

$$Qmed = \frac{187.5\text{L/hab/día}(5,000\ \text{hab})}{86,400} = 10.85\ L/seg$$

$$\frac{(10.85\ \text{L/seg})(86,400\ \text{seg})}{1000} =$$

$$937.44\ \text{m}^3/\text{día} \approx 937.5\ m^3/día$$

Otra forma de calcular el gasto diario es:

$$\frac{(\text{población})(\text{aportación})}{1,000} \qquad (4.8)$$

$$\frac{(5,000\ \text{hab})(187.5\ \text{L/hab/día})}{1,000} = 937.5\ \text{m}^3/\text{día}$$

En el análisis anterior no se incluyó la aportación por infiltración.

Para calcular la concentración de la DBO_5 en (mg/L), en el influente de la planta de tratamiento, se tiene:

$$\text{DBO}_5\ \text{en el influente} = \frac{(\text{C.O.})(1000)}{\text{Gasto medio}} \qquad (4.9)$$

Las variables ya fueron definidas:

$$= \frac{(200\text{kg})(1000)}{937.5\text{m}^3/\text{día}} = 213.33 \gg 213\ \ mg/L.$$

Esta será la concentración de diseño del sistema lagunar.

La segunda opción es considerar el valor de la DBO_5 que se indica en la Tabla 4.3. El ingeniero de proyectos debe determinar si la concentración de la materia orgánica es débil, media o fuerte, de acuerdo con la inspección de campo y la información recabada. A continuación, se describen los criterios para calcular la contribución de la materia orgánica.

El valor de la DBO_5 en el agua residual que genera una comunidad depende del consumo de agua. A mayor consumo, la materia orgánica es diluida; mientras que a menor consumo la DBO_5 es mayor. Otra consideración importante es que la DBO_5 por habitante presenta variaciones; es decir, en cada país es diferente. La contribución de la demanda bioquímica de oxígeno por persona es importante en el diseño de cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales; influye directamente en el dimensionamiento (Rolim, 2000).

Afini (1989 citado por Rolim, 2000) realizó estudios acerca de la contribución de materia orgánica por persona y concluyó lo siguiente: 45 g/hab/día para ciudades pequeñas; 60 g/hab/día para ciudades medianas, y 75 g/hab/día para ciudades grandes.

Karl Imhoff realizó en Alemania estudios para determinar la carga orgánica *por persona*. Finalmente determinó 54 g/hab/día. Otros estudios efectuados en Brasil en 1963, establecieron 51 y hasta 59 g/hab/día (Lothar, 1980). En México, la Conagua considera la contribución de la DBO_5 *por persona* de 54 g/hab/día. Pero se recomienda, de preferencia, realizar el muestro de aguas residuales y análisis de laboratorio (Conagua/IMTA, 2007b).

4.5.3 Coliformes fecales

El muestreo y análisis del agua residual para determinar los coliformes fecales con unidades de número más probable (NMP), debe realizarse de acuerdo con la normatividad vigente; sin embargo, en muchas ocasiones no es posible llevar a cabo las acciones anteriores por lo retirado o disperso de la comunidad rural donde se pretenda hacer el

estudio. Al igual que la DBO_5, también se pueden *considerar los valores* que indica la Tabla 4.3.

Marais (1974) y Mara *et ál.* (2001) publicaron modelos de pronóstico para organismos patógenos (coliformes fecales) en la salida del sistema de tratamiento. Estos consideraron la cinética de primer orden e incluyeron el flujo de mezcla completa. Los estudios indicados fueron publicados en los siguientes manuales y libros: Mara *et ál.* (1992); Mara (1997); Mara y Pearson (1998) y Mara *et ál.* (2001). Posteriormente, se publicaron otras teorías para determinar los coliformes fecales en el efluente, así como los modelos de optimización.

La temperatura es otra condición importante en el tratamiento de aguas residuales con base en lagunas de estabilización.

4.5.4 Temperatura

De acuerdo con Rolim (2000), la temperatura es un parámetro importante en el proceso de tratamiento del agua residual. Favorece el proceso de fotosíntesis y el metabolismo de las bacterias que limpian el agua. Temperaturas entre 20 y 25 °C generan condiciones óptimas para la producción de oxígeno en las lagunas facultativas. El rango de temperaturas mínimas y máximas donde disminuye la eficiencia en la remoción de contaminantes es entre 4 y 35 °C., mientras que la fermentación anaerobia se lleva a cabo después de los 22 °C y disminuye debajo de los 15.

Para el diseño de un sistema lagunar debe considerarse la temperatura media del aire del mes más frío. Esta información deberá obtenerse en la estación meteorológica más cercana del lugar donde se tenga pensado ejecutar el proyecto de tratamiento. El periodo de observación deberá ser de, por lo menos, diez años (Collí *et ál.,* 1992; Conagua/IMTA, 2007a).

4.6. EVAPORACIÓN E INFILTRACIÓN

La evaporación e infiltración determinan la *reducción del caudal* en el efluente de una laguna; al reducirse el gasto, la concentración de contaminantes y salinidad es mayor. Los efectos anteriores perjudican el tratamiento biológico de la planta. La evaporación e infiltración dependen también de las condiciones *climáticas y geológicas* del lugar donde se piense hacer el estudio. Por ejemplo: temperatura, humedad del aire, viento y suelo. La evaporación que debe tomarse para el diseño de un sistema de tratamiento es la tasa neta de evaporación anual y la del mes más cálido (Collí *et ál.,* 1992).

4.7. REÚSO DEL AGUA RESIDUAL TRATADA

Como ya se indicó anteriormente, la calidad del agua residual en el efluente de la planta de tratamiento se obtiene en función de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996, la cual establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes

Tabla 4.4 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos. NOM-001-SEMARNAT-1996.

Parámetros	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Agus costeras						Suelo			
(miligramos por litro, excepto cuando se especifique)	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Temperatura oC (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia flotante (3)	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU	AU
Sólidos sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	150	200	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125
Demanda bioquímica de osígeno$_5$	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	150	200	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fósforo total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A	N.A.	N.A	N.A.	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

(1) Instantáneo
(2) Muetreo simple promedio ponderado
(3) Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006
P.D.= Promedio Diario; P.M. Promedio Mensual
N.A.= No es aplizable
AU=Ausente
(A), (B) y (C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos
Fuente: (DOF 1997)

Tabla 4.5 Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros. NOM-001-SEMARNAT-1996.

Parámetros	Ríos						Embalses naturales y artificiales				Agus costeras						Suelo			
(miligramos por litro)	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (B)		Protección de vida acuática (C)		Uso en riego agrícola (B)		Uso público urbano (C)		Explotación pesquera, navegación y otros usos (A)		Recreación (B)		Estuarios (B)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.05	0.1	0.1	0.2
Cianuros	1	3	1	2	1	2	2	3	1	2	1	2	2	3	1	2	2	3	1	2
Cobre	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6	4	6
Cromo	1	1.5	0.5	1	0.5	1	1	1.5	0.5	1	0.5	1	1	1.5	0.5	1	0.5	1	0.5	1
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	0.1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.4
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total
P.D.= Promedio Diario; P.M.=Promedio Mensual:
N.A. = No es aplicable
(A), (B) y (C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos
Fuente: (DOF, 1997).

nacionales. En la Tabla 4.4 y Tabla 4.5 se indican los valores máximos de contaminantes que pueden ser descargados a los diferentes cuerpos receptores.

4.8. LOCALIZACIÓN Y DISPONIBILIDAD DEL TERRENO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO

Para la selección del terreno donde será construida una planta de tratamiento, es prudente considerar lo siguiente:

- Debe existir terreno *suficiente y de bajo costo.*
- De preferencia el terreno debe estar localizado cerca de donde se tenga proyectado reutilizar el agua tratada (cuerpo receptor). Lothar (1980) recomienda que la elección del terreno para el sistema lagunar se localice en áreas donde no estén sujetas a corrientes pluviales. Por otro lado, es importante considerar el diseño de un sistema de desvío para las aguas pluviales antes de ingresar a la planta de tratamiento. Lo anterior, con el propósito de proteger el sistema biológico de tratamiento y los bordos.
- Es recomendable que el terreno sea ubicado *con respecto a la topografía*; lo anterior, con el fin de excluir el uso de bombeo. Esta acción permitirá evitar costos en la operación y mantenimiento por el consumo de energía eléctrica (Lothar, 1980; Oakley, 2005).
- *El terreno debe localizarse en las áreas más bajas*, tomando como referencia el sistema de alcantarillado y drenaje de toda la ciudad o comunidad bajo estudio. Es decir, el gasto debe fluir por gravedad hasta el terreno donde se ubica la planta de tratamiento (Oakley, 2005).
- Rolim (2000) recomienda que el terreno seleccionado para la planta de tratamiento cuente con una pendiente suave para minimizar el movimiento de tierra y bajar los costos de construcción.
- Cuando las lagunas de estabilización se ubiquen cerca de los aeropuertos, se recomienda considerar una distancia de por lo *menos dos kilómetros*, con el propósito de evitar que aves atraídas por las lagunas puedan ocasionar accidentes (Oakley, 2005).
- El terreno para las lagunas debe localizarse considerando los *vientos dominantes*; es decir, no deben dirigirse en dirección a las viviendas. Rolim (2000) recomienda que las lagunas anaerobias y facultativas (las que pueden generar olores desagradables si son mal operadas), deban ubicarse a un mínimo de

500 y 1 000 metros de las zonas habitacionales.

- Otra condición es que el terreno debe estar alejado de un área de crecimiento de población futuro (Oakley, 2005).
- Los dispositivos de entrada y salida del agua residual en las lagunas deben proyectarse de manera que la dirección de los vientos dominantes se realice del efluente al afluente. Lo anterior tiene como objetivo *evitar la formación de cortocircuitos* en las lagunas; estos interfieren con el adecuado tratamiento de las aguas residuales (Rolim, 2000).
- Antes de realizar la operación de compra venta del terreno, es necesario hacer un *estudio de mecánica de suelos*, con objeto de determinar la permeabilidad y así poder calcular la infiltración del agua. En México, muchas lagunas de estabilización no funcionan debido a problemas de infiltración. Por otro lado, se debe asegurar el diseño adecuado del terraplén incluyendo la inclinación de los taludes. Se recomienda que la geometría del dique considere la relación 1 a 3 (1 en la parte vertical y 3 en la horizontal), aunque puede tomarse en cuenta también la 1 a 2, pero solo en caso de contar con suelos duros (Rojas y León, 1990).

Los terrenos rocosos no son viables debido a que encarecen de forma importante la construcción. En resumen, antes de llevar a cabo la compra del terreno, se recomienda hacer la *caracterización y clasificación del suelo* a fin de determinar la compresibilidad, permeabilidad y capacidad de carga. Es importante mencionar que el problema de filtración puede ser eliminado con el uso de revestimientos sintéticos, también llamadas "geo membranas". Estos se instalan sobre el talud interior de las lagunas. Los revestimientos sintéticos más usados son de polietileno de alta densidad (PAD), aunque en el mercado existe variedad de materiales; por ejemplo: PVC, neopreno y butilo, entre otros (Conagua/IMTA, 2007a; Rolim, 2000; Oakley, 2005).

4.9. REQUERIMIENTOS MÍNIMOS PARA EL CÁLCULO DEL SISTEMA LAGUNAR EN PEQUEÑAS COMUNIDADES RURALES

Arthur (1983) y Conagua/IMTA (2007b) sugieren los siguientes requisitos para el diseño de sistemas lagunares:

- Población al horizonte de proyecto
- Dotación de agua potable
- Aportación de aguas residuales per cápita (75 % de la dotación)
- Gastos de diseño
- Caracterización de las aguas residuales por tratar (muestreo y análisis en laboratorio, o bien, calcular con criterios de

contribución de la DBO_5). Para los coliformes fecales también se deben determinar en laboratorio; en caso contrario y como último recurso, se pueden considerar los indicados en la Tabla 4.3.

- Temperatura y evaporación neta
- Uso que se tenga programado para el agua residual tratada
- Disponibilidad del terreno y estudios de mecánica de suelos
- Localización, como ya se indicó el terreno debe estar ubicado de 500 a 1 000 metros de la mancha urbana

En la Tabla 4.6 se muestran los parámetros de diseño para lagunas de estabilización.

4.10. CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO

Para calcular las dimensiones de un sistema de tratamiento con base en lagunas de estabilización, es necesario *entender claramente* las siguientes definiciones. En estas se basan el diseño y los criterios de cálculo.

Carga orgánica superficial de diseño

La Conagua/IMTA (2007a, p. 32) definen textualmente: "Es la masa diaria de sustrato *aplicado* a la

Tabla 4.6 Parámetros de diseño.

Parámetro	Laguna anaerobia	Laguna facultativa	Laguna de maduración
Régimen de flujo	-	Mezcla intermitente	Mezcla intermitente
Dimensiones de la laguna, ha	0.2 - 0.8 múltiples	0.8 - 4.0 múltiples	0.8 - 4.0 múltiples
Operación b	Series	Series o paralelo	Series o paralelo
Tiempo de retención b, días	20 - 50	5 - 30	5 - 20
Profundidad, m	2.0 - 5.0	1.2 - 2.4	1.0 - 1.5
pH	6.5 - 7.2	6.5 - 8.5	6.5 - 10.5
Rango de temperatura, °C	6 - 50	0 - 50	0 - 30
Temperatura óptima, °C	30	20	20
Carga de DBO_5, kg/(ha d)	224 - 560	56 - 202	<17
Remoción de DBO_5, %	50 - 85	80 - 95	60 - 80
Remoción de coliformes fecales	1 log	1 log	4 log
Remoción de helmintos, R'o	70	-	100
Conversión	$C0_2$, CH_4, tejido celular bacteriano	Algas $C0_2$, CH_4, tejido celular bacteriano	Algas $C0_2$, tejido celular bacteriano, $N0_3$
Concentración de algas, mg/L	0 - 5	5 - 20	5 - 10
Sólidos suspendidos en el efluente d, mg/L	80 - 160	40 - 60	10 - 30
Función principal	Sedimentación de sólidos, remoción de DBO, estabilización del efluente, remoción de helmintos.	Remoción de DBO	Remoción de patógenos, remoción de nutrientes.

Fuente: (Metcalf and Eddy, 1991; Conagua, 1994; Horan, 1990).

laguna por unidad de área superficial. Se expresa en kgDBO_5/m^2.d"

Carga orgánica volumétrica

"Es la masa diaria de sustrato aplicado a la laguna por unidad de volumen y tiempo. Se expresa en kgDBO o DQO/m^3.d" (Conagua/IMTA, 2007a, p. 32).

Tiempo de retención hidráulico

Es el tiempo determinado teóricamente, en donde el agua permanece en el tratamiento biológico; sus unidades son en días.

La Tabla 4.7 indica los valores de diseño para cargas volumétricas, dependiendo de la temperatura para lagunas anaerobias.

4.11. ECUACIONES DE DISEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Modelo de dimensionamiento adoptado para México por la Comisión Nacional del Agua. (Marais y flujo disperso) lagunas anaerobias, facultativas y maduración

El método de diseño fue consultado en: Paquetes Tecnológicos para el Tratamiento de Excretas y Aguas Residuales en Comunidades Rurales Conagua/IMTA (2007b); Cortés *et ál.* (2011: 2012; 2013; 2014a; 2014b; 2015) y Martínez *et ál.* (2016). Para la laguna anaerobia se calcula de acuerdo con el método de Marais; para la facultativa y de maduración, el de flujo disperso.

4.11.1 Laguna anaerobia

La carga orgánica se determina con la expresión (4.10).

a) Carga orgánica

$$C.O. = \frac{Q_i \, DBO_i}{1000} \qquad (4.10)$$

Donde:

Q_i = Gasto en el influente en (m^3/día).

Tabla 4.7 Valores de diseño para cargas volumétricas en función de la temperatura.

Temperatura, °C	Carga volumétrica *(g.DBO_5/m^3-día)*	Remoción del DBO %
< 10	100	40
10 - 20	20T - 100	2T + 20
> 20	300	60*

T: temperatura del aire del mes más frío.

*Valores más altos pueden utilizarse si la experiencia local indica que es apropiado.

Fuente: Conagua/IMTA (1994).

DBO_5 = Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en la entrada del estanque en (mg/L).
1000 Factor de conversión

b) Carga volumétrica de diseño

$$\lambda_v = 20\ (T) - 100 \qquad \textbf{(4.11)}$$

Donde:

λ_v = Carga orgánica volumétrica (g DBO_i /m^3-día).
T = Temperatura mínima mensual del mes más frio (°C).

De acuerdo con la Tabla 4.7 el valor de la carga volumétrica, para aguas residuales domésticas debe encontrarse entre 100 y 300 g DBO_5/m^3-día.

c) Remoción de la DBO_5

$$\%DBO_{removido} = 2\ T + 20 \qquad \textbf{(4.12)}$$

La variable T ya fue definida.

El volumen servirá para calcular el tiempo de retención hidráulico.

d) Volumen de la laguna

$$V_a = \frac{L_i\ Q_i}{\lambda_v} \qquad \textbf{(4.13)}$$

Donde:

V_a = Volumen en (m^3).
L_i = Concentración de la materia orgánica en la entrada del estanque en (mg/L).
Q_i = Gasto en el influente en (m^3/día).
λ_v = La variable ya fue definida.

Una vez calculado el volumen, se procede a determinar el área de la laguna.

e) Área de la laguna

Profundidad recomendada (Z = de 2.0 a 4.0 metros).

$$A_a = \frac{V_a}{Z} \qquad \textbf{(4.14)}$$

Donde:

A_a = Área de la laguna en (m^2).
Z = La variable ya fue definida.

La acumulación de lodos es generada principalmente por los sólidos suspendidos en lagunas anaerobias y facultativas. Al acumularse por largo periodo de tiempo, se acorta el tiempo de retención hidráulico y se reduce la eficiencia del sistema de tratamiento. Según Oakley (2005) los lodos en lagunas anaerobias deben removerse de 2 a 5 años; mientras que en lagunas facultativas de 5 a 10 años. O bien cuando el volumen de la laguna disminuya máximo el 30 %. De acuerdo con la CONAGUA/IMTA (2007a) cada persona genera 40 litros de lodo por año. Al multiplicar por el número de habitantes al horizonte de proyecto se define el volumen de lodo por año. Debido a lo anterior es prudente incluir una profundidad adicional en la laguna anaerobia o facultativa si estas últimas son primarias. No obstante lo anterior en el presente libro no se incluyó esta consideración. Por lo que

se recomienda proporcionar el mantenimiento de lagunas anaerobias y facultativas cada 2 y 5 años respectivamente.

Con el volumen de la laguna y el gasto en el influente, se calcula el tiempo de retención hidráulico.

f) Tiempo medio de retención hidráulico

$$O_a = \frac{V_a}{Q_i} \qquad (4.15)$$

Donde:

O_a = Tiempo de detención hidráulico (días).
Va y Qi ya fueron definidas.

El valor de la DBO_5 en la salida de la laguna anaerobia permitirá conocer la eficiencia del tratamiento.

g) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna

$$DBO_e = (100 - \%DBO_{removido})\ DBO_i \qquad (4.16)$$

Donde:

DBO_e = Concentración de la materia orgánica en el efluente en (mg/L).

Para calcular el gasto en la salida de la laguna anaerobia se debe contar, previamente, con el dato estadístico de la evaporación.

h) Gasto en el efluente corregido por evaporación

$$Q_e = Q_i - 0.001\ A_a\ ev \qquad (4.17)$$

Donde:

Q_e = Gasto en la salida del estanque (m^3/día).
ev = Evaporación en (mm/día).

i) Remoción de coliformes fecales. Factor de decaimiento

$$Kt(d^{-1}) = 2.6\ (1.19)^{T\ -\ 20} \qquad (4.18)$$

Donde:

$Kt(d^{-1})$ Constante global de decaimiento en (d^{-1}).

Coliformes fecales en el efluente de la laguna.

$$N_e = \frac{N_i}{1 + Kt\ Oa} \qquad (4.19)$$

N_E = Coliformes fecales en la salida del estanque en (NMP/100 mL).
Ni = Coliformes fecales en la entrada del estanque en (NMP/100 mL).

i) Cálculo de la materia orgánica incluyendo la evaporación

$$DBO_{corr} = \frac{DBO_e\ Q_i}{Q_e} \qquad (4.20)$$

Variables ya definidas

k) Coliformes fecales corregidos por evaporación

$$N_{e\,corr} = \frac{N_e\ Q_i}{Q_e} \qquad (4.21)$$

Variables ya definidas

A continuación, el cálculo de las dimensiones promedio de la laguna: ancho y longitud.

I) Dimensionamiento de la laguna. Se considera una relación largo-ancho x = 2.

$$B_{prom} = \sqrt{Aa/x} \qquad (4.22)$$

Donde:

B_{prom} = Ancho promedio de la laguna en (m).

Para la longitud promedio se tiene:

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} \qquad (4.23)$$

L_{prom} = Longitud promedio del estanque anaerobio en (m).

Para determinar el ancho superior de la laguna anaerobia se tiene:

$$B_{sup} = B_{prom} + Z\ (talud) \qquad (4.24)$$

Donde:

B_{sup} = Ancho superior del estanque anaerobio en (m).

Z = Profundidad en (m).

Cálculo de la longitud superior de la laguna.

$$L_{sup} = L_{prom} + Z\ (talud) \qquad (4.25)$$

Donde:

L_{sup} = Largo superior del estanque en (m).

Cálculo del área superficial.

$$A_{sup} = B_{sup}\ L_{sup} \qquad (4.26)$$

Donde:

A_{sup} = Área superficial en (m^2).

Para el cálculo del ancho inferior (B_{inf}) considerar el (B_{sup}) menos el producto de Z por la relación del talud, luego para la longitud inferior (L_{inf}) incluir la (L_{sup}) menos el producto de Z y la relación de talud, las unidades en metros. Se utilizará el mismo criterio para lagunas facultativas y de maduración.

4.11.2 Laguna facultativa

Para el diseño del estanque facultativo se consideran los resultados de la laguna anaerobia: evaporación, DBO_5 en la salida del estanque, coliformes fecales, gasto en el efluente y temperatura.

a) Carga orgánica. Se aplica la ecuación (4.10) de la laguna anaerobia.

b) Carga superficial de diseño. McGArry y Pescod (1970) llevaron a cabo estudios en 143 estanques facultativos, considerando diferentes condiciones de climas. Concluyeron que la eliminación de la DBO_5 es del 70 al 90%. Luego, Mara y Silva (1979)

modificaron el criterio de análisis y obtuvieron resultados más reales. Más tarde, Arthur (1983) ajustó el criterio de análisis de la fórmula para climas cálidos. Mara (1987) creó una ecuación para describir de manera global la carga superficial. Luego en Brasil, se realizaron estudios y se determinó que a temperaturas de 25 °C, las cargas superiores a 350 kg/ha/día disminuyen la producción de oxígeno. Finalmente, la expresión (4.27) fue adoptada por la Comisión Nacional del Agua para México (Conagua/IMTA, 2007a; 2007b).

$$\lambda_S = 250\ (1.085)^{T\ -\ 20} \qquad \textbf{(4.27)}$$

Donde:

λ_S = Carga orgánica superficial, ($kgDBO_5/ha*día$).
T = Temperatura media mensual mínima del aire (°C).

c) Área de la laguna facultativa

$$A_f = \frac{10\ L_i Q_{med}}{\lambda_S} \qquad \textbf{(4.28)}$$

Donde:

L_i = DBO_5 corregida por evaporación de laguna anaerobia (mg/L)
A_f = Área del estanque facultativo en (m^2).
Q_{med} = En este caso considerar $Q_{med} = Q_i$ (m^3/día).

Las demás variables ya fueron definidas.

Una vez determinada el área de la laguna facultativa y definida la profundidad, se procede a calcular el volumen.

d) Volumen de la laguna

$$V = A_f\ \ Z \qquad \textbf{(4.29)}$$

Donde:

V = Volumen en (m^3).
Z = Profundidad del estanque, se considera entre 1.5 a 1.8 (m).

e) Tiempo de retención hidráulico. Considerar la expresión (4.15) del estanque anaerobio.

f) Dimensionamiento. Con el propósito de evitar, hasta donde sea posible, las zonas muertas, se sugiere una relación largo-ancho de 3. Para calcular el promedio del ancho y la longitud, aplicar las expresiones (4.22) y (4.23). De igual forma, para el ancho y largo superior considerar las ecuaciones (4.24) y (4.25). El talud de los bordos 2:1.

Para B_{inf} y L_{inf} tomar en cuenta las consideraciones indicadas en laguna anaerobia.

g) Cálculo del área superficial. Considerar la expresión (4.26).

h) Gasto en el efluente. Aplicar fórmula (4.17).

i) Remoción de coliformes fecales. Primero se determina el coeficiente de dispersión, por lo que se incluye la relación largo-ancho (Yánez, 1983). De acuerdo con Rolim (2000), la dispersión caracteriza las condiciones de trabajo de una laguna o un reactor. Los factores que determinan la dispersión son: geometría de la laguna, localización de las estructuras de entradas y salidas del gasto, velocidad del flujo y fluctuaciones, temperatura del agua y caracterización

del agua residual en el influente del sistema de tratamiento, entre otras (CONAGUA/IMTA, 2007a).

Al incluir canales o mamparas con longitud del 70% del largo de la laguna se obtiene:

x = (Lprom) (0.70) (No. de mamparas + 1) / (Bprom) / (No. de mamparas + 1)

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\ x + 1.0136\ x^2} \qquad \textbf{(4.30)}$$

Donde:

d	=	Factor de dispersión adimensional
x	=	Relación largo ancho

Para el caso de lagunas facultativas sin incluir mamparas, se tomará en cuenta la relación largo-ancho determinada previamente (3). Este valor se incluirá en la ecuación (4.30) para calcular el coeficiente de dispersión.

j) Coeficiente de reducción bacteriana. Este depende de la temperatura. Esta ecuación fue sugerida por Yánez (1984) y pretende que el diseño sea eficiente.

$$K_b = 0.841\ (1.075)^{T\ -\ 20} \qquad \textbf{(4.31)}$$

Donde:

K_b	=	Coeficiente de decaimiento bacteriano (día^{-1}).

k) Constante "a". Esta constante se sustenta por medio de la expresión de Wehner & Wilhem, simplificada por Thirimurthi: se utilizará en el cálculo para los coliformes fecales en el efluente de la laguna.

$$a = \sqrt{1 + 4\ K_b\ O_f\ d} \qquad \textbf{(4.32)}$$

Donde:

a	=	Constante sin dimensiones
O_f	=	Tiempo de retención hidráulico (días)
		La variable K_b ya fue definida

l) Coliformes fecales en el efluente de la laguna facultativa. La ecuación (4.33) fue propuesta por Thirumurti (1969), y la condición para usar la expresión es que "d" sea menor que 2. La fórmula se sustenta en la ley de Chick (Sáenz, 1987).

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\ a\ e^{(1\ -\ a/2\ d)}}{(1 + a)^2} \qquad \textbf{(4.33)}$$

Donde:

$\frac{N_f}{N_o}$	=	Coeficiente de coliformes fecales remanentes en el efluente.
e		2.7182818

Las demás variables ya fueron definidas.

La operación matemática para definir (Ne) será la multiplicación de (Nf/No) por (Ni).

m) Coliformes fecales corregidos por evaporación. Aplicar la expresión (4.21).

n) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna. Este parámetro se analizó en el laboratorio a 35 °C. El resultado fue K_f=*1.2 día^{-1}*.

La expresión (4.34) determina el factor Kf para diferentes temperaturas.

$$K_f = \frac{1.2}{(1.085)^{35\ -\ T}} \qquad \textbf{(4.34)}$$

Donde:

K_f = Constante de decaimiento a una temperatura en cualquiera (día^{-1}).

De acuerdo con Sáenz (1985) algunos valores de kf son los siguientes:

Temperatura en °C	5	10	15	20	25	30	35
k_f en días^{-1}	0.10	0.12	0.24	0.35	0.53	0.80	1.2

La CNA e IMTA (2007b) consideran un valor diferente al 1.2 de la expresión 4.34: el 1.066 para lagunas facultativas y de 1.00 para estanques de maduración en México. En el presente texto se tomó en cuenta el valor original de la expresión indicada. Por otro lado es prudente aclarar que la temperatura del agua en las lagunas estará entre 2 y 4 grados centígrados mayor que la del ambiente (Sáenz, 1976).

Concentración de la materia orgánica en la salida del estanque.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\, O_f + 1} \qquad \textbf{(4.35)}$$

Las variables ya fueron definidas.

o) Eficiencia de remoción de la DBO_5

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e}{DBO_i}\ 100 \qquad \textbf{(4.36)}$$

Las variables ya fueron definidas.

p) DBO corregida por evaporación. Aplicar la ecuación (4.20).

4.11.3 Laguna de pulimiento o maduración

1) Tiempo de retención hidráulico). El cálculo es un poco diferente, ya que primero se propone un tiempo de retención, luego se revisan los coliformes fecales corregidos por evaporación y la materia orgánica. Estos deben cumplir con los límites máximos permitidos por la normatividad para descarga a los cuerpos receptores.

2) Volumen de la laguna

$$V = Q_i\, O_m \qquad \textbf{(4.37)}$$

Las variables ya fueron definidas.

3) Área de la laguna

$$Am = \frac{V}{Z} \qquad \textbf{(4.38)}$$

Las variables ya fueron definidas.

Para concluir con el diseño de la laguna de maduración, considerar los incisos f) hasta p) de la laguna facultativa. Se recomienda incluir la profundidad de 1.0 metro.

Según Milddlebrooks y Crites (1988), los diferentes modelos para el diseño de lagunas de estabilización que actualmente se aplican son difíciles de comparar debido a sus limitaciones. No obstante lo anterior, los citados autores indican que todos los modelos se pueden aplicar a cualquier región, pero es nece-

sario que se reúnan las condiciones climáticas adecuadas. Lo importante en el modelo es considerar una carga orgánica y un tiempo de retención. Una última recomendación: evitar los cortos circuitos hidráulicos y zonas muertas dentro del estanque.

Otras consideraciones importantes en el diseño de lagunas de estabilización. Los sistemas en serie donde se incluye una laguna anaerobia, más una facultativa y otra de maduración presentan una economía de área total. Por otro lado los sistemas en paralelo no incrementan la calidad en el tratamiento, sin embargo; desde el punto de vista de la operación presentan una ventaja: al incluir por lo menos dos lagunas en paralelo, por ejemplo dos facultativas primarias es posible realizar el desazolve de un estanque sobrecargándolo mientras se lleva a cabo el mantenimiento en el otro. Un ejemplo de un sistema en paralelo puede ser de dos lagunas anaerobias, luego una facultativa y una de maduración o bien dos facultativas seguidas de dos maduraciones etc. Como se observa se obtienen algunos beneficios tanto en lagunas en serie como en paralelo. Un criterio para realizar el diseño de sistemas lagunares en paralelo, es dividir el gasto total en dos partes, luego realizar el diseño completo con la mitad del gasto y finalmente elaborar el proyecto en forma paralela.

4.11.4 Balance hídrico

De acuerdo con Sáenz (1985) éste es considerado como un factor de seguridad: si el estanque es grande mayor confianza en la remoción de la materia orgánica, pero se arriesga el balance hídrico. Para que un sistema de lagunas funcione correctamente debe mantener el nivel de agua residual adecuado, la expresión (4.39) calcula el citado balance.

$$Q_e = Q_a + (P_r + P_c) - (E + P_e) \qquad (4.39)$$

Donde:

Q_e = Caudal del efluente.
Q_a = Caudal afluente de aguas residuales.
P_r = Precipitación sobre el área de laguna.
P_c = Infiltración de agua subterránea hacia la laguna.
E = Evaporación
P_e = Pérdida por percolación: sucede cuando no se impermeabilizan las lagunas.

Las unidades, en todas las variables, pueden considerarse en (m^3/día) o (L/día). El criterio recomendado por Sáenz (1985) es tomar en cuenta el mes más crítico; es decir, el de menor precipitación, nivel freático muy bajo y alta evaporación. Una vez analizada la expresión (4.39) el valor del gasto en el efluente tiene que resultar positivo. Posiblemente sea prudente reducir el área total del sistema de tratamiento, es en esta parte donde se diseña con diferentes arreglos para lograr la menor área posible y asegurar el funcionamiento hídrico del sistema lagunar. El balance hídrico solo se aplica en lagunas facultativas y de maduración, en las

anaerobias no es posible, ya que generalmente, la superficie es cubierta por una nata. De esta forma se evita en forma importante la evaporación (Conagua/IMTA, 2007a).

En el criterio de diseño utilizado en el presente texto, no se incluye la infiltración ya que supone un tratamiento del suelo, o bien el uso de recubrimiento sintético ya indicado en el capítulo 4.

5 Diseño de sistemas lagunares con diferentes arreglos

Objetivo

Que el profesional o estudiante de la ingeniería sanitaria aplique la metodología de diseño de los sistemas lagunares con diferentes condiciones y analice e interprete los resultados

5.1. CÁLCULO DE LA PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN

Con el propósito de conocer el número de personas al horizonte de proyecto, se calculará la proyección hasta el año 2034. Se considerarán los censos de población realizados por el INEGI de 1980 hasta 2010 en el ejido San Luis el Alto de ciudad Lerdo, Durango. Se analizarán cuatro métodos para la proyección: lineal, de interés compuesto, logarítmico y de interés simple. La Tabla 5.1 muestra los datos de los censos.

Tabla 5.1 Datos de los censos para el ejido San Luis el Alto.

Datos de censos	
Año	Población
1980	105
1990	296
2000	379
2010	498

Fuente: INEGI (s.f.).

Tabla 5.2 Nomenclatura para el cálculo de la proyección de la población.

Concepto	Abreviatura
Población futura	"Pf"
Población del último censo	"Puc"
Población del censo inicial	"Pci"
Año para proyección	"Tf"
Año del último censo	"Tuc"
Año del censo inicial	"Tci"
Pendiente de la recta	"Ka"
Tasa de interés	"i"
Tasa de crecimiento	"Kg"
Razón de crecimiento	"r"

A continuación, el criterio de análisis para la estimación de la población futura, considerando cada uno de los cuatro métodos antes mencionados. Primero, se establece la nomenclatura apropiada, como se muestra en la Tabla 5.2.

5.1.1 Método lineal

De acuerdo con López (2003), la proyección de población se realiza con la siguiente ecuación.

$$Pf = Puc + Ka\ (Tf - Tuc) \qquad (5.1)$$

Donde:

$$Ka = \frac{Puc - Pci}{Tuc - Tci} \qquad (5.2)$$

Primero, se obtiene el valor de Ka.

$$Ka = \frac{Puc - Pci}{Tuc - Tci} = \frac{498 - 105}{2010 - 1980} = 13.10$$

Con este valor se procede a calcular la población para el año 2034.

$$Pf = 498 + 13.10\ (2034 - 2010) = 8\ 12.4 \approx 813 \text{ habitantes}$$

Este resultado representa la cantidad de habitantes hasta el horizonte de proyecto.

5.1.2 Método de interés compuesto

Los métodos de interés simple, logarítmico y de interés compuesto son más complejos, ya que primero se requiere calcular un factor de crecimiento para cada par de datos consecutivos, y después obtener un promedio de dicho factor para utilizarlo en el cálculo de la población futura (Valdez, 1990). La proyección de población se efectúa con la siguiente ecuación

$$Pf = Puc\ (1 + i)^t \qquad (5.3)$$

$$i = \sqrt[t]{\frac{Puc}{Pci}} - 1 \qquad (5.4)$$

Donde t es igual al intervalo entre un censo y otro.

Primero, se determina el valor de i para cada par de datos y después se obtiene el promedio con el que se desarrollará el cálculo.

$$i = \sqrt[t]{\frac{Puc}{Pci}} - 1 = \sqrt[10]{\frac{296}{105}} - 1 = 0.109200971$$

Enseguida, se muestran los resultados para cada par de datos, así como el valor promedio.

Calculo de i por par de datos	
1980-1990	0.109200971
1990-2000	0.025025689
2000-2010	0.027682623
Promedio	0.053969761

Se procede a calcular la población para el año 2034.

$$Pf = Puc\ (1 + i)^t =$$
$$498\ (1 + 0.053969761)^{2034\ -\ 2010} =$$
$$1\ 758.3 \approx 1\ 759 \text{ habitantes}$$

5.1.3 Método logarítmico

Las ecuaciones utilizadas en este método se presentan a continuación.

$$Ln\ Pf = Ln\ Puc + \acute{k}g\ (Tf - Tci) \qquad (5.5)$$

$$\acute{k}g = (Ln\ Pci - Ln\ Puc)/\Delta t \qquad (5.6)$$

Se indica cómo desarrollar el cálculo del factor para el par de datos 1980-1990.

Para 1980-1990.

$$\acute{k}g = \frac{Ln\ Pci - Ln\ Puc}{\Delta t} = \frac{Ln\ 296 - Ln\ 105}{1990-1980} = 0.10363991$$

A continuación, se indican los valores obtenidos para cada par de datos, así como el valor promedio.

Cálculo de kg por par de datos	
1980-1990	0.10363991
1990-2000	0.024717675
2000-2010	0.027306387
Promedio	0.051887991

Por último, se calcula la proyección futura para el año 2034.

$$Ln\ Pf = Ln\ Puc + \acute{k}g\ (Tf - Tci) = Ln\ 1663 +$$
$$0.051887991\ (2034 - 2033) = 7.46826647$$
$$Pf = e^{7.46826647} = 1\ 751.5 \approx 1\ 752 \text{ habitantes}$$

5.1.4 Método de interés simple

Enseguida, las expresiones para el cálculo de la población futura.

$$Pf = Puc\ [1 + r\ (Tf - Tci)] \qquad (5.7)$$

$$r = \frac{Puc - Pci}{Pci\ (Tf - Tci)} \qquad (5.8)$$

Enseguida, el cálculo del factor para el par de datos 1980-1990.

$$r = \frac{Puc - Pci}{Pci\ (Tf - Tci)} = \frac{296 - 105}{105\ (1990 - 1980)} = 0.181904762$$

A continuación, los resultados para los demás datos del censo.

Calculo de r por par de datos	
1980-1990	0.181904762
1990-2000	0.028040541
2000-2010	0.031398417
Promedio	0.08044791

Cálculo la proyección futura para 2034.

$$Pf = Puc\ [1 + r\ (Tf - Tci)] =$$

$$498\ [1 + 0.08044791\ (2034 - 2010)]$$

$$Pf = 1\ 459.5 \approx 1\ 460\ habitantes$$

El número de habitantes promedio considerado al horizonte de proyecto resultó de 1 446.

5.2. DIFERENTES ARREGLOS PROPUESTOS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS LAGUNARES

Diseñar un sistema de lagunas de estabilización, considerando diferentes arreglos y configuraciones para determinar la menor área posible de terreno necesaria.

1. Anaerobia + facultativa + maduración 1 + maduración 2
2. Anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración
3. Anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 + maduración 2
4. Anaerobia + facultativa + maduración con 4 mamparas
5. Facultativa con 3 mamparas
6. Anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas
7. Facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara
8. Anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas
9. Facultativa + maduración con 6 mamparas

5.3. DATOS DE DISEÑO PARA UN SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN CON DIFERENTES ARREGLOS

- Número de habitantes al horizonte de proyecto: 1 446
- Aportación de aguas residuales: 120 L/hab/día
- Temperatura promedio del mes más frío: 12.9 grados centígrados
- Concentración de la DBO_5: 220 mg/L., coliformes fecales $1X10^7$NMP/100 mL
- Evaporación de 5.8 mm/día
- Considerar la relación largo ancho de 2 para lagunas anaerobias y de 3 para facultativas
- En las lagunas de maduración se tomará el mismo ancho de la laguna facultativa, a fin de aprovechar el bordo para disminuir costos

Para definir la calidad del agua residual tratada, se incluyó como base lo que indica la Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-96. Como ya se indicó, esta norma menciona los límites máximos permisibles de contaminantes que pueden ser descargados a los cuerpos receptores.

Los contaminantes con sus valores de concentración requeridos en el efluente de la planta de tratamiento son los siguientes: DBO_5 30 mg/L., para descarga en embalses naturales y artificiales, protección de la vida acuática, y coliformes fecales igual o menor a 1 000 NMP/100 mL (DOF, 1996).

En la comunidad rural bajo estudio no existen descargas industriales ni comerciales que pudieran causar interferencia con el sistema biológico de la planta de tratamiento; es decir, no existe alta concentración de carga orgánica. Los metales pesados se consideran bajo norma.

La calidad del agua residual que llega al influente de la planta de tratamiento se supone de concentración media; se tomarán los valores indicados en la Tabla 4.3.

A continuación se indica el cálculo para el dimensionamiento de la laguna anaerobia, de acuerdo con la metodología ya descrita en el capítulo 4.

5.4. DISEÑO DEL SISTEMA DE LAGUNAS: ANAEROBIA + FACULTATIVA + MADURACIÓN 1 + MADURACIÓN 2

Se analizará, en todos los casos, con modelo de operación en serie.

5.4.1 Diseño de laguna anaerobia

Se considera el gasto medio como el de diseño. Se calcula con la población servida y la aportación. Aplicar la ecuación (4.1).

$$Q_i = \frac{P\,(Ap)}{86\,400} = \frac{1\,446 * 120}{86\,400} = \text{aproximadamente } 2.01 \text{ L/s}$$

$$Q_i = 2.01 \text{ L/s} * 86.4 = \mathbf{173.66\ m^3/día}$$

1.- Carga orgánica: se aplica la ecuación (4.10).

$$C.O. = \frac{Q_i\ DBO_i}{1000} = \frac{173.66 * 220}{1000} = \mathbf{38.21\ kg/día}$$

2.- Carga volumétrica de diseño.

$$\lambda_v = 20\,(T) - 100 = 20\,(12.9) - 100 = \mathbf{158\ gDBO_5/m^3*día}$$

El valor se encuentra entre 100 y 300 $gDBO_5/m^3$-día.
Por lo tanto: bien.

3.- Remoción de la DBO_5.

$$\%DBO_{removido} = 2\,T + 20 = 2\,(12.9) + 20 = \mathbf{45.80\ \%}$$

4.- Volumen de la laguna.

$$V_a = \frac{L_i\ Q_i}{\lambda_v} = \frac{220 * 173.66}{158} = 241.8050 \approx \mathbf{241.81\ m^3}$$

5.- Área de la laguna. Profundidad de la laguna (Z) de 2 a 4 metros.

$$A_a = \frac{V_a}{Z} = \frac{241.81}{4.0} = \mathbf{60.45\ m^2}$$

6.- Tiempo de retención hidráulico.

$$O_a = \frac{V_a}{Q_i} = \frac{241.81}{173.66} = \mathbf{1.39\ días}$$

De acuerdo con (Gloyna 1971 en Rolim 2000) se muestran los datos para la remoción de la DBO_5 en lagunas anaerobias.

Tiempo de retención (d)	DBO_5 remanente (%)	DBO_5 removida (%)
0.12	80	20
0.40	70	30
0.71	65	35
1.30	60	40
2.40	55	45
4.70	50	50
9.40	45	55

Datos basados en un sistema mixto (fosas sépticas, laguna anaerobias, en Zambia, África), para m = 4.8 y k = 6: d-1 a 22°C FUENTE: (Rolim, 1990)

Como se observa la remoción de la materia orgánica con 1.39 días resultó del 45.80 %. Valor ligeramente por arriba de lo estudiado por Gloyna: las condiciones son diferentes, sin embargo en términos generales los resutlados coinciden con los del citado autor.

7.- Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = (100 - \%DBO_{removido})\ DBO_i =$$

$$\left(\frac{100 - 45.80}{100}\right)\ 220 = \mathbf{119.24\ mg/L}$$

8.- Gasto en el efluente corregido por evaporación.

$$Q_e = Q_i - 0.001\ A_a\ ev = 173.66 -$$

$$(0.001 * 60.45 * 5.8) = 173.3093 \approx \mathbf{173.31\ m^3/día}$$

9.- Remoción de coliformes fecales. Constante global de decaimiento.

$$Kt(d^{-1}) = 2.6\ (1.19)^{T - 20} = 2.6\ (1.19)^{12.9 - 20} =$$

$$= \mathbf{0.7561\ d^{-1}}$$

Coliformes fecales en el efluente de la laguna.

$$N_e = \frac{N_i}{1 + Kt\ Oa} = \frac{(1 \times 10^7)}{1 + (0.7561 * 1.39)} =$$

4 875 720 NMP/100 mL

10.- DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{DBO_e\ Q_i}{Q_e} = \frac{119.24 * 173.66}{173.31} =$$

$$= \mathbf{119.48\ mg/L}\ !$$

11.- Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_{ecorr} = \frac{N_e\ Q_i}{Q_e} = \frac{4\ 875\ 720 * 173.66}{173.31} =$$

885 567 NMP/100 mL

Aclaraciones importantes:

- La mayoría de las operaciones fueron cerradas a 2 y 4 decimales, por lo que cuan-

do sean verificadas con calculadora o con hoja de cálculo, posiblemente existan pequeñas diferencias

- En los resultados de coliformes fecales, en el efluente inciso 9 existen diferencias que pudieran modificar en pequeña escala los resultados. Por ejemplo, al llevar a cabo los cálculos con *Excel*, el resultado es de 4 871 339.71, contra 4 875 720. Como se indicó, para facilitar el aprendizaje y criterio de análisis de los diseños se consideraron 2 y 4 decimales. Queda a juicio del calculista considerar la opción más conveniente.

12.- Dimensionamiento: relación largo-ancho x = 2. Se incluye un talud 0:1 y, para calcular el ancho y longitud promedio, se tiene:

$$B_{prom} = \sqrt{Aa/x} = \sqrt{60.45/2} = \mathbf{5.50\ m}$$

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} = \frac{60.45}{5.50} = \mathbf{11.00\ m}$$

Considerando un talud 0:1.

$$B_{sup} = B_{prom} + Z\ (talud) = 5.50 + (0) = \mathbf{5.50\ m}$$
$$L_{sup} = L_{prom} + Z\ (talud) = 11.00 + (0) = \mathbf{11.00\ m}$$
$$A_{sup} = B_{sup} ! L_{sup} = 5.50 * 11.00 = \mathbf{60.50\ m^2}$$

Para el ancho y largo inferior se tiene:

$$B_{inf} = B_{prom} - Z\ (talud) = 5.50 - (0) = \mathbf{5.50\ m}$$
$$L_{inf} = L_{prom} - Z\ (talud) = 11.00 - (0) = \mathbf{11.00\ m}$$

Los muros son verticales: pueden ser construidos de cemento o mampostería.

5.4.2 Diseño de laguna facultativa (método de flujo disperso)

Para el cálculo se consideran los resultados obtenidos de la laguna anaerobia:

- Gasto en el efluente: 173.31 m³/día
- DBO_5 en el efluente: 119.48 mg/L.
- Coliformes fecales: 4 885 567 NMP/100 mL., incisos 8, 10, 11, respectivamente.
- Temperatura: 12.9 °C.
- Evaporación: 5.8 mm/día.

Como se observa, los resultados de la laguna anaerobia son los datos de entrada para el cálculo de la laguna facultativa.

a) Carga orgánica. Se aplica la ecuación (4.10) de la metodología de diseño.

$$C.O. = \frac{Q_i\ DBO_i}{1\ 000} = \frac{173.31 * 119.48}{1\ 000} = \mathbf{20.71\ kg/día}$$

b) Carga superficial de diseño. La ecuación (4.27) es la que más se aproxima a las condiciones de México.

$$\lambda_S = 250\ (1.085)^{T\ -\ 20} = 250\ (1.085)^{12.9\ -\ 20} = 1$$

140.08 kgDBO$_5$/ha*día

c) Área de la laguna facultativa (área promedio).

$$A_f = \frac{10\ L_i\ Q_{med}}{\lambda_S} = \frac{10 * 119.48 * 173.31}{140.08} =$$

1 478.23 m²

d) Volumen de la laguna con Z = 1.5 metros.

$$V = A_f \; Z = 1\,478.23 * 1.5 = \mathbf{2\,217.35\ m^3}$$

e) Tiempo de retención hidráulico.

$$Of = \frac{V}{Q_i} = \frac{2\,217.35}{173.31} = \mathbf{12.79\ días}$$

f) Dimensionamiento. Relación largo-ancho x = 3 para minimizar cortocircuitos; para los bordos se considera un talud 2:1.

$$B_{prom} = \sqrt{A_f/x} = \sqrt{1\,478.23/3} = \mathbf{22.20\ m}$$

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} = \frac{1\,478.23}{22.20} = \mathbf{66.60\ m}$$

Considerando un talud 2:1.

$$B_{sup} = B_{prom} + Z\ (talud) = 22.20 + (1.5 * 2) = \mathbf{25.20\ m}$$
$$L_{sup} = L_{prom} + Z\ (talud) = 66.60 + (1.5 * 2) = \mathbf{69.60\ m}$$

g) Cálculo del área superficial, ancho y largo inferior.

$$A_{sup} = B_{sup}\ L_{sup} = 25.20 * 69.60 = \mathbf{1\,753.92\ m^2}$$
$$B_{inf} = B_{prom} - Z\ (talud) = 22.20 - (1.5 * 2) = \mathbf{19.20\ m}$$
$$L_{inf} = L_{prom} - Z\ (talud) = 66.60 - (1.5 * 2) = \mathbf{63.60\ m}$$

h) Gasto en el efluente corregido por evaporación.

$$Q_e = Q_i - 0.001\ A_{sup}\ ev = 173.31 - (0.001 * 1\,753.92 * 5.8) = \mathbf{163.14\ m^3/día}$$

i) Remoción de coliformes fecales. Coeficiente de dispersión: la ecuación incluye la relación largo ancho (x).

De acuerdo con la metodología descrita en el capítulo 4, para la relación largo ancho sin considerar mamparas, se tomará en cuenta la relación definida previamente: 3. Por lo que se tiene:

$$x = \frac{L_{prom}}{B_{prom}} = \frac{66.60}{22.20} = \mathbf{3m}$$

El análisis anterior es solo una comprobación; puede anotarse directamente el 3 en el cálculo de la dispersión (d).

Coeficiente de dispersión.

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\ x + 1.0136\ x^2}$$

$$= \frac{3}{-0.26118 + 0.25392\ (3) + 1.0136\ (3)^2} =$$

0.3118 sin dimensiones

j) Coeficiente de reducción bacteriana.

$$K_b = 0.841\ (1.075)^{T\ -\ 20} = 0.841\ (1.075)^{12.9\ -\ 20}$$

$$= \mathbf{0.5033\ d^{-1}}$$

k) Constante "a".

$$a = \sqrt{1 + 4\ K_b\ O_f\ d} =$$

$$\sqrt{1 + (4 * 0.5033 * 12.79 * 0.3118)} = \mathbf{3.0047}$$

l) Coliformes fecales en el efluente de la laguna facultativa.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\ a\ e^{(1 - a/2\ d)}}{(1 + a)^2}$$

$$= \frac{4 * 3.0047 * e^{(1 - 3.0047/2 * 0.3118)}}{(1 + 3.0047)^2} =$$

0.03010132

Al multiplicar por los coliformes fecales en el influente (Ni), se tiene:

Ne = 0.03010132 * 4 885 668 =
147 065.05 NMP/100 mL

m) Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_{ecorr} = \frac{Ne\ Q_i}{Q_e} = \frac{147\ 065.05 * 173.31}{163.14} =$$

156 232.96 NMP/100 mL

n) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna y constante para lagunas facultativas.

$$K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35 - T}} = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - 12.9}} = \mathbf{0.1978\ d^{-1}}$$

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\ O_f + 1} = \frac{119.48}{(0.1978 * 12.79) + 1} =$$

33.85 mg/L

o) Eficiencia de remoción de la DBO_5

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e)}{DBO_i} \text{ x } 100 =$$

$$\frac{119.48 - 33.85}{119.48} \text{ x } 100 = \mathbf{71.67\ \%}$$

p) DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{Q_i\ DBO_e}{Q_e} = \frac{173.31 * 33.85}{163.14} =$$

35.96 mg/L

5.4.3 Diseño de la laguna de maduración 1 (flujo disperso)

Como se indicó en el capítulo 4, en la laguna de maduración primero se propone un tiempo de retención y luego se verifican tanto la materia orgánica como los coliformes fecales; es decir, es un proceso iterativo. Los valores de concentración deben ser igual o menores a los mencionados en la normatividad. El tiempo de retención hidráulico (O_{m1}) propuesto fue de diez días. Enseguida, para el cálculo se toman los resultados de la laguna facultativa corregidos por evaporación: Q_e=163.4 m_3/día; N_e=156 232.96 NMP/100 mL., DBO_{corr}=35.96 mg/L., incisos h), m) y p), respectivamente.

1) Volumen de la laguna.

$$V = Q_i\ O_{m1} = 163.14 * 10 = \mathbf{1\ 631.40\ m^3}$$

2) Área de la laguna con Z = 1.0 metro.

$$Am_1 = \frac{V}{Z} = \frac{1\ 631.40}{1.0} = \mathbf{1\ 631.40\ m^2}$$

3) Dimensionamiento. Se considera un ancho promedio (B_{prom}), igual que el estanque facultativo para ahorrar costos de construcción.

$$B_{prom} = \mathbf{22.20\ m}$$

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} = \frac{1\ 631.40}{22.20} = \mathbf{73.49\ m}$$

Considerando un talud 2:1.

$$B_{sup} = B_{prom} + Z\ (talud) = 22.20 + (1 * 2) = \mathbf{24.20\ m}$$
$$L_{sup} = L_{prom} + Z\ (talud) = 73.49 + (1 * 2) = \mathbf{75.49\ m}$$

4) Cálculo del área superficial, ancho y largo inferior.

$$A_{sup} = B_{sup}\ L_{sup} = 24.20 * 75.49 = \mathbf{1\ 826.86\ m^2}$$
$$B_{inf} = B_{prom} - Z\ (talud) = 22.20 - (1 * 2) = \mathbf{20.20\ m}$$
$$L_{inf} = L_{prom} - Z\ (talud) = 73.49 - (1 * 2) = \mathbf{71.49\ m}$$

5) Gasto en el efluente corregido por evaporación.

$$Q_e = Q_i - 0.001\ A_{sup}\ ev$$
$$= 163.14 - (0.001 * 1\ 826.86 * 5.8) =$$
$$\mathbf{152.54\ m^3/día}$$

6) Remoción de coliformes fecales. Coeficiente de dispersión: la ecuación incluye la relación largo ancho (x).

Sin considerar mamparas, se tiene:

$$x = \frac{L_{prom}}{B_{prom}} = \frac{73.49}{22.20} = \mathbf{3.31}\text{m}$$

Es importante indicar que, en este caso, el resultado de la relación largo-ancho fue superior a 3. Lo anterior, debido a que se consideró, como ya se indicó, el ancho de la laguna facultativa.

Coeficiente de dispersión.

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\ x + 1.0136\ x^2}$$

$$= \frac{3.31}{-0.26118 + 0.25392\ (3.31) + 1.0136\ (3.31)^2} =$$

$$\mathbf{0.2833\ Adimensional}$$

7) Coeficiente de reducción bacteriana.

$$K_b = 0.841\ (1.075)^{T - 20} =$$

$$0.841\ (1.075)^{12.9 - 20} = \mathbf{0.5033\ d^{-1}}$$

8) Constante "a".

$$a = \sqrt{1 + 4\ K_b\ O_{m1}}\ d =$$

$$\sqrt{1 + (4 * 0.5033 * 10 * 0.2833)} =$$

$$\mathbf{2.5891\ Adimensional}$$

9) Coliformes fecales en el efluente de la laguna de maduración.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\ a\ e^{(1 - a/2\ d)}}{(1 + a)^2} =$$

$$\frac{4 * 2.5891 * e^{(1 - 2.5891/2 * 0.2833)}}{(1 + 2.5891)^2} =$$

$$0.048663679$$

Al multiplicar por los coliformes fecales en el influente (Ni), se tiene:

$$Ne = 0.048663679 * 156\ 232.96 =$$
$$\mathbf{7\ 602.87\ NMP/100mL}$$

10) Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_{ecorr} = \frac{Ne \quad Q_i}{Q_e} = \frac{7\,602.8708 * 163.14}{152.54} =$$

8 131.19 NMP/100mL

11) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna y la constante para lagunas K_f.

$$K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35 - T}} = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - 12.9}} =$$

0.1978 d^{-1}

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\, O_{m1} + 1} = \frac{35.96}{(0.1978 * 10) + 1} =$$

12.08 mg/L

12) Eficiencia de remoción de la DBO_5.

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e)}{DBO_i} \text{ x } 100 =$$

$$\frac{35.96 - 12.08}{35.96} \text{ x } 100 = \textbf{66.41 \%}$$

13.) DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{Q_i\, DBO_e}{Q_e} =$$

$$\frac{163.14 * 12.08}{152.54} = \textbf{12.92 mg/L}$$

5.4.4 Diseño de la segunda laguna de maduración (flujo disperso)

Se propone un tiempo de retención hidráulico (O_{m2}) de siete días. Se toman como datos los resultados de la primera laguna de maduración corregidos por evaporación: Q_e=152.54 m^3/día., N_e=8 131.19 NMP/100 mL, DBO_{corr}=12.92 mg/L, incisos 5, 10 y 13, respectivamente.

a) Volumen de la laguna.

$$V = Q_i\, O_{m2} = 152.54 * 7 = \textbf{1 067.78 m}^3$$

a) Área de la laguna con Z = 1.0 metro.

$$Am_2 = \frac{V}{Z} = \frac{1\,067.78}{1.0} = \textbf{1 067.78 m}^2$$

b) Dimensionamiento. Se considera un ancho promedio (B_{prom}) igual al estanque facultativo.

$$B_{prom} = \textbf{22.20 m}$$

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} = \frac{1\,067.78}{22.20} = \textbf{48.10 m}$$

Considerando un talud 2:1.

$$B_{sup} = B_{prom} + Z\,(talud) = 22.20 + (1 * 2) = \textbf{24.20 m}$$
$$L_{sup} = L_{prom} + Z\,(talud) = 48.10 + (1 * 2) = \textbf{50.10 m}$$

c) Cálculo del área superficial, ancho y largo inferior.

$$A_{sup} = B_{sup}\, L_{sup} = 24.20 * 50.10 = \textbf{1 212.42 m}^2$$
$$B_{inf} = B_{prom} - Z\,(talud) = 22.20 - (1 * 2) = \textbf{20.20 m}$$
$$L_{inf} = L_{prom} - Z\,(talud) = 48.10 - (1 * 2) = \textbf{46.10 m}$$

d) Gasto en el efluente corregido por evaporación.

$$Q_e = Q_i - 0.001\ A_{sup}\ ev =$$
$$152.54 - (0.001 * 1\ 212.42 * 5.8)$$
$$= \mathbf{145.51\ m^3/día}$$

e) Remoción de coliformes fecales. Coeficiente de dispersión: la ecuación incluye la relación largo-ancho (x).

Sin considerar mamparas, se tiene:

$$x = \frac{L_{prom}}{B_{prom}} = \frac{L_{prom}}{B_{prom}} = \mathbf{2.17}$$

Coeficiente de dispersión.

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\ x + 1.0136\ x^2}$$
$$= \frac{2.17}{-0.26118 + 0.25392\ (2.17) + 1.0136\ (2.17)^2}$$
$$= \mathbf{0.4286}$$

f) Coeficiente de reducción bacteriana.

$$K_b = 0.841\ (1.075)^{T - 20} =$$
$$0.841\ (1.075)^{12.9 - 20} = \mathbf{0.5033\ d^{-1}}$$

g) Constante "a".

$$a = \sqrt{1 + 4\ K_b\ O_{m2}\ d} =$$
$$\sqrt{1 + (4 * 0.5033 * 7 * 0.4286)}$$
$$= \mathbf{2.6533}$$

h) Coliformes fecales en el efluente de la laguna de maduración.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\ a\ e^{(1 - a/2\ d)}}{(1 + a)^2}$$
$$= \frac{4 * 2.6533 * e^{(1 - 2.6533/2 * 0.4286)}}{(1 + 2.6533)^2}$$
$$= 0.115569333$$

Al multiplicar por los coliformes fecales en el influente (Ni), se tiene:

$$Ne = 0.115569333 * 8\ 131.1941 =$$
$$\mathbf{939.7167\ NMP/100\ mL}$$

i) Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_{ecorr} = \frac{N_e\ Q_i}{Q_e} = \frac{939.7167 * 152.54}{145.51} =$$
$$\mathbf{985.11\ NMP/100\ mL < 1\ 000\ NMP/100\ mL\ \therefore\ Bien}$$

j) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna y la constante para lagunas K_f.

$$K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35 - T}} =$$
$$\frac{1.2}{(1.085)^{35 - 12.9}} = \mathbf{0.1978\ d^{-1}}$$

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\ O_{m2} + 1} =$$
$$\frac{12.92}{(0.1978 * 7) + 1} = \mathbf{5.42\ mg/L}$$

k) Eficiencia de remoción de la DBO_5.

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e}{DBO_i}\ 100 =$$
$$\frac{12.92 - 5.42}{12.92}\ 100 = \mathbf{58.05\ \%}$$

l) DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{Q_i\ DBO_e}{Q_e} = \frac{152.54 * 5.42}{145.51} =$$
$$\mathbf{5.68\ mg/L\ <\ 30\ mg/L\ \therefore\ Bien}$$

En la Tabla 5.3 se muestran los resultados.

Tabla 5.3 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 + maduración 2.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Anaerobia	1 446	173.66	220.00	10 000 000.00	38.21	158
Facultativa	1 446	173.31	119.48	4 885 567.00	20.71	-
Maduración 1	1 446	163.14	35.96	156 232.96	-	-
Maduración 2	1 446	152.54	12.92	8 131.19	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud (m)	Gasto en efluente (m^3/día)
-	4.0	241.81	1.39	-	-	173.31
140.08	1.5	2 217.35	12.79	-	-	163.14
-	1.0	1 631.40	10.00	-	-	152.54
-	1.0	1 067.78	7.00	-	-	145.51

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
45.80	119.48	4 885 567.00	60.45	2.00	0:1	5.50
71.67	35.96	156 232.96	1 478.23	3.00	2:1	22.20
66.41	12.92	8 131.19	1 631.40	3.31	2:1	22.20
58.05	5.68	985.11	1 067.78	2.17	2:1	22.20

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)	Dispersión (d) (adimensional)
11.00	5.50	11.00	60.50	5.50	11.00	-
66.60	25.20	69.60	1 753.92	19.20	63.60	0.3118
73.49	24.20	75.49	1 826.86	20.20	71.49	0.2833
48.10	24.20	50.10	1 212.42	20.20	46.10	0.4286

Como se observa en la Tabla 5.4, el flujo disperso se localiza aproximadamente entre los valores de 0.2 y 1. Las dispersiones (d) que se obtuvieron en cada una de las lagunas se localizan dentro del área para flujo disperso: facultativa 0.3118; maduración 1: 0.2833 y maduración 2: 0.4286. Según Yánez (1988 citado por Rolim, 2000), la dispersión para una laguna cuadrada debe ser de 0.99362. Esta se presenta cuando la relación largo-ancho = 1. En la Tabla 5.4 se indican los valores de la dispersión para diferentes condiciones de largo-ancho. La dispersión de la laguna facultativa con relación largo-ancho de 3 coincide con la Tabla 5.4; los resultados del diseño confirman lo publicado por el citado autor.

En las Figura 5.1 y Figura 5.2 se muestran las dimensiones del sistema lagunar y corte longitudinal sin escala.

Tabla 5.4 Valores de la dispersión con diferentes condiciones largo-ancho.

Relación largo-ancho	Forma de la laguna	Valores de (d) sin dimensiones
1	Cuadrada	0.99362
2	Rectangular	0.46497
3	Rectangular	0.31173
4	Rectangular	0.23566

Fuente: Yánez (1988 citado por Rolim, 2000).

Figura 5.1 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración 1 + maduración 2.

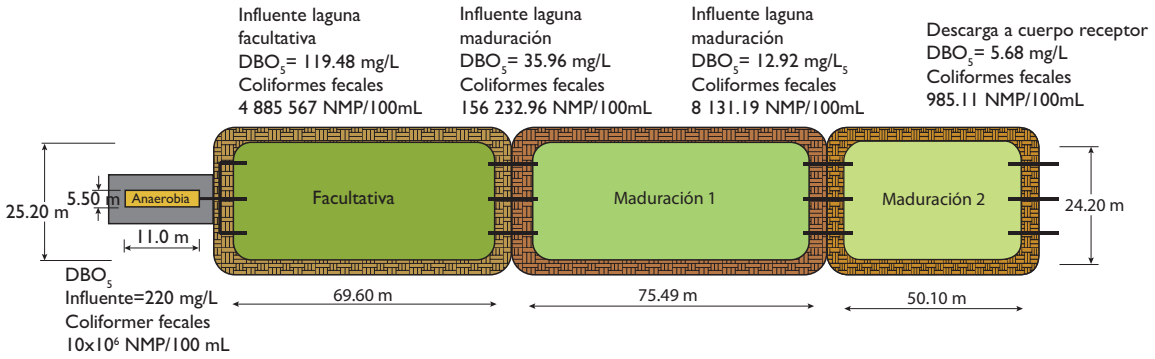
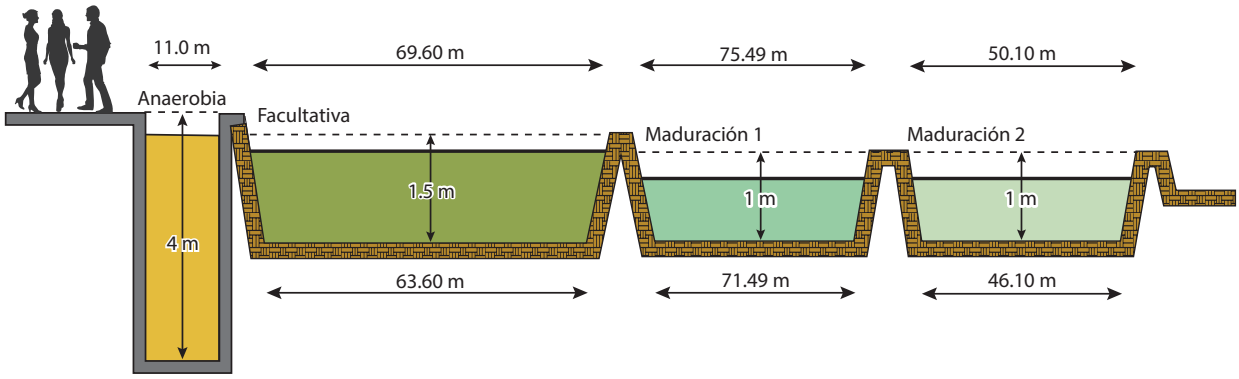


Figura 5.2 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración.



En la Tabla 5.3, en la columna DBO_5 en el efluente corregida por evaporación, se observa la demanda bioquímica de oxígeno remanente, es decir, de 220 mg/L., disminuyó aproximadamente a 6 mg/L. Como ya se indicó, los límites máximos permitidos en la concentración de la DBO_5 que indica la NOM-001-Semarnat-1996, es de 30 mg/L.

En la laguna anaerobia el ancho inferior promedio y superior resultaron de la misma longitud, así como el largo inferior promedio y superior; se considera la relación del talud 0:1. Lo anterior significa que los muros de la laguna anaerobia son verticales.

En el caso de coliformes fecales de 1×10^7 NMP/100 mL., disminuyó 985 NMP/100 mL., según se indica en la misma Tabla 5.3. La NOM-001-Semarnat-1996 señala el límite máximo permisible de 1 000 NMP/100 mL. La demanda bioquímica de oxígeno y los coliformes fecales, como ya se mencionó, son los parámetros empleados para el cálculo de dimensionamiento de las lagunas de estabilización; también son utilizados para medir la calidad del efluente en cada una de las lagunas.

Aunque la forma de las lagunas pueden ser cuadradas o rectangulares, es prudente tomar en cuenta lo siguiente: la Conagua/IMTA (2007a; 2007b) recomiendan que las esquinas de las lagunas de estabilización sean redondas con el propósito de asegurar que se establezca el funcionamiento hidráulico del tipo pistón. La acción señalada tiene algunas ventajas importantes: a) se evitan los cortocircuitos o las zonas muertas; b) se facilita la construcción: la maquinaria pesada puede maniobrar y, finalmente, c) las lagunas de estabilización deben orientarse de tal forma que su lado más largo se localice en forma paralela a la dirección del viento dominante. Lo anterior, con el propósito de aprovechar el viento para el mezclado del agua residual.

5.4.5 Bordo libre

La Conagua/IMTA (2007a) sugieren un bordo libre en lagunas artificiales de, cuando menos, 50 centímetros, por lo que es necesario agregar esta medida. Quizá sea prudente aumentar más la altura del bordo libre; lo indicado dependerá de las siguientes consideraciones: a) la sobreelevación del

agua causada por la acción del viento: las lagunas menores a 2.0 hectáreas no están expuestas a la acción del viento, y b) la altura de rodamiento de las olas sobre el talud arriba del nivel del agua. En el presente texto no se incluyen los estudios para bordo libre, solamente se analizan lagunas para pequeñas comunidades. Por lo tanto, se tomará en cuenta la recomendación de bordo libre que indica la Conagua/IMTA.

5.5. DISEÑO DEL SISTEMA DE LAGUNAS: ANAEROBIA + FACULTATIVA CON 2 MAMPARAS + MADURACIÓN

Se consideran los mismos datos de diseño: gasto, evaporación, concentración de coliformes fecales y materia orgánica indicados en los datos de diseño anteriormente expuestos.

El cálculo de la laguna anaerobia ya se realizó y los resultados se indican en la Tabla 5.5: no hubo ningún cambio en los datos. Es decir, los resultados de la laguna anaerobia indicados en la Tabla 5.3 fueron transferidos a la Tabla 5.5.

En la laguna facultativa se incluyen mamparas: los cambios son esencialmente en la remoción de coliformes fecales debido a las dos mamparas. Lo anterior significa que no es necesario volver a desarrollar el cálculo de carga orgánica, carga superficial de diseño, área de la laguna facultativa, volumen de la laguna, tiempo de retención hidráulico, dimensionamiento, cálculo del área superficial y gasto en el efluente. Es decir, del inciso a) hasta el h) del numeral 5.4.2: "Diseño de laguna facultativa (método de flujo disperso)". Con base en lo indicado, solo es necesario calcular a partir del inciso i) "Remoción de coliformes fecales".

5.5.1 Diseño de laguna facultativa

Para el cálculo se toman los resultados obtenidos en la laguna anaerobia: DBO_5 en el efluente corregida por evaporación: 119.48 mg/L.; coliformes fecales corregidos por evaporación: 4 885 567 NMP/100 mL.; gasto en el efluente: 173.31 m³/día; temperatura: 12.9 °C, y evaporación: 5.8 mm/día. La información de diseño fue tomada de la Tabla 5.3.

i) Remoción de coliformes fecales. Coeficiente de dispersión: la ecuación incluye la relación largo ancho (x).

De acuerdo con la metodología indicada en el capítulo 4, inciso i, al incluir deflectores o mamparas se observará el 70% de la longitud de la laguna.

Considerando dos mamparas, se tiene:

$$x = \frac{L_{prom} * 0.7\ (\text{No. de mamparas} + 1)}{B_{prom}/(\text{No.de mamparas} + 1)} = \frac{66.60 * 0.7 * 3}{22.20/3} = \mathbf{18.90}$$

La longitud y ancho promedio ya fueron calculados y se tomaron de la Tabla 5.3.

Coeficiente de dispersión.

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\,x + 1.0136\,x^2}$$

$$= \frac{18.90}{-0.26118 + 0.25392\,(18.90) + 1.0136\,(18.90)^2} =$$

0.0516

j) Coeficiente de reducción bacteriana.

$$K_b = 0.841\,(1.075)^{T - 20} = 0.841\,(1.075)^{12.9 - 20}$$

$$= \mathbf{0.5033\ d^{-1}}$$

k) Constante "a".

$$a = \sqrt{1 + 4\,K_b\,O_f\,d} =$$

$$\sqrt{1 + (4 * 0.5033 * 12.79 * 0.0516)} = \mathbf{1.5259}$$

l) Coliformes fecales en el efluente de la laguna facultativa.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\,a\,e^{(1 - a/2\,d)}}{(1 + a)^2}$$

$$= \frac{4 * 1.5259 * e^{(1 - 1.5259/2 * 0.0516)}}{(1 + 1.5259)^2}$$

$$= 0.0058562482$$

Al multiplicar por los coliformes fecales en el influente (Ni), se tiene:

$$Ne = 0.0058562482 * 4\,885\,567 =$$

28 611.09 NMP/100 mL

m) Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_{ecorr} = \frac{N_e\,Q_i}{Q_e} = \frac{28\,611.09 * 173.31}{163.14} =$$

30 394.68 NMP/100 mL

n) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna y constante para lagunas facultativas.

$$K_f = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - T}} = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - 12.9}} = \mathbf{0.1978\ d^{-1}}$$

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\,O_f + 1} = \frac{119.48}{(0.1978 * 12.79) + 1} = \mathbf{33.85\ mg/L}$$

o) Eficiencia de remoción de la DBO_5.

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e)}{DBO_i}\,x\,100 = \frac{119.48 - 33.85}{119.48}\,x\,100 = \mathbf{71.67\ \%}$$

p) DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{Q_i\,DBO_e}{Q_e} = \frac{173.31 * 33.85}{163.14} = \mathbf{35.96\ mg/L}$$

Como se observa, los resultados de los incisos m), n), o) y p) son similares a los indicados en la laguna facultativa del primer diseño.

5.5.2 Diseño de laguna de maduración

Se propone un tiempo de retención hidráulico (Om) de 12 días, se toman los resultados de la laguna facultativa corregidos por evaporación: Q_e=163.14 m^3/día y DBO_{corr}=35.96 mg/L. Estos datos fueron tomados de la Tabla 5.3. Mientras que los coliformes fecales del inciso m) del cálculo de la laguna facultativa del presente diseño, numeral 5.5: N_e=30 394.68 NMP/100 mL. Los coliformes fecales no fueron tomados de la Tabla 5.3 debido a que en este análisis el estanque facultativo no incluyó las dos mamparas.

1) Volumen de la laguna.

$$V = Q_i \, O_m = 163.14 * 12 = \mathbf{1\ 957.68\ m^3}$$

2) Área de la laguna, con Z = 1.0 metro (área promedio)

$$Am = \frac{V}{Z} = \frac{1\ 957.68}{1.0} = \mathbf{1\ 957.68\ m^2}$$

3) Dimensionamiento. Se incluye un ancho promedio (B_{prom}) igual que la laguna facultativa.

$$B_{prom} = \mathbf{22.20\ m}$$

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} = \frac{1\ 957.68}{22.20} = \mathbf{88.18\ m}$$

Considerando un talud 2:1.

$$B_{sup} = B_{prom} + Z\ (talud) = 22.20 + (1 * 2) = \mathbf{24.20\ m}$$
$$L_{sup} = L_{prom} + Z\ (talud) = 88.18 + (1 * 2) = \mathbf{90.18\ m}$$

4) Cálculo del área superficial, ancho y largo inferior.

$$A_{sup} = B_{sup}\ L_{sup} = 24.20 * 90.18 = \mathbf{2\ 182.36\ m^2}$$
$$B_{inf} = B_{prom} - Z\ (talud) = 22.20 - (1 * 2) = \mathbf{20.20\ m}$$
$$L_{inf} = L_{prom} - Z\ (talud) = 88.18 - (1 * 2) = \mathbf{86.18\ m}$$

5) Gasto en el efluente corregido por evaporación.

$$Q_e = Q_i - 0.001\ A_{sup}\ ev =$$

$$163.14 - (0.001 * 2\ 182.36 * 5.8) = \mathbf{150.48\ m^3/día}$$

6) Remoción de coliformes fecales. Coeficiente de dispersión: la ecuación incluye la relación largo ancho (x).

Sin considerar mamparas, se tiene:

$$x = \frac{L_{prom}}{B_{prom}} = \frac{88.18}{22.20} = \mathbf{3.97\ m}$$

7) Coeficiente de dispersión.

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\ x + 1.0136\ x^2}$$
$$= \frac{3.97}{-0.26118 + 0.25392\ (3.97) + 1.0136\ (3.97)^2}$$
$$= \mathbf{0.2374}$$

7) Coeficiente de reducción bacteriana.

$$K_b = 0.841\ (1.075)^{T\ -\ 20} = 0.841\ (1.075)^{12.9\ -\ 20}$$
$$= \mathbf{0.5033\ d^{-1}}$$

8) Constante "a".

$$a=\sqrt{1 + 4\ K_b\ O_m\ d} =$$

$$\sqrt{1 + (4 * 0.5033 * 12 * 0.2374)}$$

$$= \mathbf{2.5952}$$

9) Coliformes fecales en el efluente de la laguna de maduración.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\ a\ e^{(1 - a/2\ d)}}{(1 + a)^2}$$

$$= \frac{4 * 2.5952 * e^{(1 - 2.5952/2 * 0.2374)}}{(1 + 2.5952)^2} = 0.027904377$$

Al multiplicar por los coliformes fecales en el influente (Ni), se tiene:

$$Ne = 0.027904377 * 30\ 394.68 =$$

848.14 NMP/100 mL

10) Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_{ecorr} = \frac{N_e\ Q_i}{Q_e} = \frac{848.14 * 163.14}{150.48} =$$

919.50 NMP/100 mL < 1000 NMP/100 mL ∴ Bien

11) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna y la constante para lagunas K_f

$$K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35 - T}} = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - 12.9}} = \mathbf{0.1978\ d^{-1}}$$

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\ O_m + 1} = \frac{35.96}{(0.1978 * 12) + 1} =$$

10.67 mg/L

12) Eficiencia de remoción de la DBO_5.

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e)}{DBO_i} x\,100 = \frac{35.96 - 10.67}{35.96} x\,100 =$$

= 70.33 %

13) DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{Q_i\ DBO_e}{Q_e} = \frac{163.14 * 10.67}{150.48} =$$

11.57 mg/L < 30 mg/L ∴ Bien

Los resultados del sistema lagunar se muestran en la Tabla 5.5

Tabla 5.5 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Anaerobia	1 446	173.66	220.00	10 000 000.00	38.21	158
Facultativa	1 446	173.31	119.48	4 885 567.00	20.71	-
Maduración	1 446	163.14	35.96	30 394.68	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud (m)	Gasto en efluente (m^3/día)
-	4.0	241.81	1.39	-	-	173.31
140.08	1.5	2 217.35	12.79	2	48.72	163.14
-	1.0	1 957.68	12.00	-	-	150.48

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
45.80	119.48	4 885 567.00	60.45	2.00	0:1	5.50
71.67	35.96	30 394.68	1 478.23	3.00	2:1	22.20
70.33	11.57	919.50	1 957.68	3.97	2:1	22.20

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)	Dispersión (d) (adimensional)
11.00	5.50	11.00	60.50	5.50	11.00	
66.60	25.20	69.60	1 753.92	19.20	63.60	0.0516
88.18	24.20	90.18	2 182.36	20.20	86.18	0.2374

En las Figura 5.3 y Figura 5.4 se muestran las dimensiones del sistema lagunar y un corte longitudinal sin escala.

Según Yánez (1988, citado por Rolim, 2000), para el flujo pistón d = 0, para mezcla completa d = ∞ y para flujo disperso los valores son desde 0.0625 hasta 4. En otras palabras, el flujo disperso se localiza entre el flujo pitón y mezcla completa.

La dispersión en el estanque facultativo resultó de 0.0518; disminuyó en forma importante comparándola con el primer diseño de dimensionamiento: 0.3118. Lo anterior se explica por el uso de mamparas o deflectores. Según Shilton y Harrison (2003), Shilton y Mara (2005), Abbas *et ál*. (2006) y Cortés *et ál.* (2014a; 2014b), las mamparas incrementan la eficiencia hidráulica en la laguna, por lo que aumenta la eliminación de los coliformes

Figura 5.3 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración.

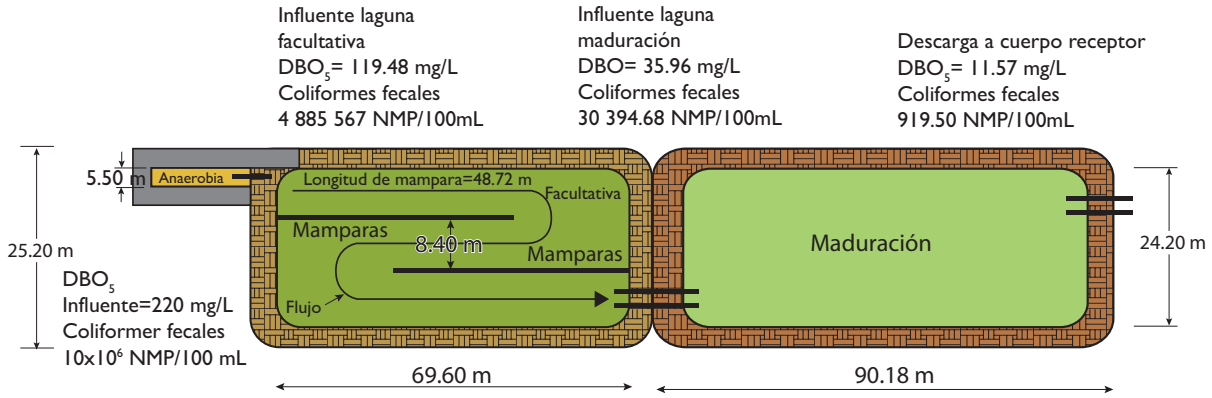
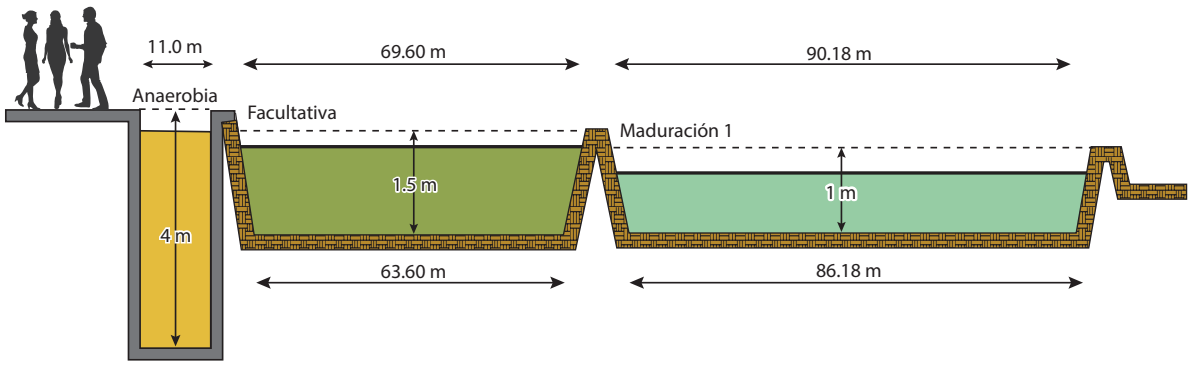


Figura 5.4 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 + maduración 2.



fecales; además se establece el flujo pistón, ya que 0.0516 es menor a 0.0625.

En la laguna de maduración no se incluyeron mamparas, por lo que el flujo resultó disperso: 0.2374. Este resultado coincide con las afirmaciones de Yánez (1988, citado por Rolim, 2000) para la relación largo-ancho de 4 la d= 0.2356 (Tabla 5.4). La diferencia es porque la relación obtenida en el la laguna de maduración fue de 3.97.

De acuerdo con Pedahzur *et ál.* (1993), Zanotelli *et ál*. (2002) y Cortés *et ál*. (2013; 2014a; 2014b), se obtienen mejores resultados con una prolongación de mamparas del 70% de la longitud del estanque. Con base en lo anterior, en todos los diseños donde se incluyan mamparas se aplicará esta recomendación.

Mara (1976) sugiere los tiempos de retención de las lagunas de maduración. Estos deben encontrarse en el rango de cinco y diez días. Además, debe considerarse en lo posible que los tiempos de retención sean similares en cada una de las lagunas.

El tiempo de retención del presente diseño fue de 12 días, por lo que se realizará de nueva cuenta el análisis pero considerando la recomendación del citado autor. Es decir, los resultados de la laguna anaerobia y facultativa permanecerán iguales. Ello no significa que el diseño anterior esté equivocado; la decisión de llevar a cabo el trabajo dependerá de la disponibilidad y forma del terreno para la construcción del proyecto. Solo se incluirá el diseño de las dos lagunas de maduración considerando seis y cinco días, respectivamente.

5.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE LAGUNAS: ANAEROBIA + FACULTATIVA CON 2 MAMPARAS + MADURACIÓN 1 + MADURACIÓN 2

5.6.1 Diseño de laguna de maduración 1

Se propone un tiempo de retención hidráulico (Om_1) de seis días; se toman los resultados del efluente corregidos por evaporación de la laguna facultativa ya calculados en el diseño anterior.

Tabla 5.5: Q_e=163.14 m3/día; DBO_{corr}=35.96 mg/L., y N_e=39 394.68 NMP/100 mL.

a) Volumen de la laguna.

$$V = Q_i \; O_{m1} = 163.14 * 6 = \mathbf{978.84\ m^3}$$

b) Área de la laguna, con Z = 1.0 metro (área promedio).

$$Am1 = \frac{V}{Z} = \frac{978.84}{1.0} = \mathbf{978.84\ m^2}$$

c) Dimensionamiento. Se incluye un ancho promedio (B_{prom}) igual que el estanque facultativo.

B_{prom} = **22.20 m**

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} = \frac{978.84}{22.20} = \mathbf{44.09\ m}$$

Considerando un talud 2:1.

$B_{sup} = B_{prom} + Z\ (talud) = 22.20 + (1 * 2) = \mathbf{24.20\ m}$
$L_{sup} = L_{prom} + Z\ (talud) = 44.09 + (1 * 2) = \mathbf{46.09\ m}$

d) Cálculo del área superficial, ancho y largo inferior.

$A_{sup} = B_{sup}\ L_{sup} = 24.20 * 46.09 = \mathbf{1\ 115.38\ m^2}$
$B_{inf} = B_{prom} - Z\ (talud) = 22.20 - (1 * 2) = \mathbf{20.20\ m}$
$L_{inf} = L_{prom} - Z\ (talud) = 44.09 - (1 * 2) = \mathbf{42.09\ m}$

e) Gasto en el efluente corregido por evaporación.

$Q_e = Q_i - 0.001\ A_{sup}\ ev =$
$163.14 - (0.001 * 1\ 115.38 * 5.8)$
$= \mathbf{156.67\ m^3/día}$

f) Remoción de coliformes fecales. Coeficiente de dispersión: la ecuación incluye la relación largo ancho (x).

Sin considerar mamparas, se tiene:

$$x = \frac{L_{prom}}{B_{prom}} = \frac{44.09}{22.20} = 1.9860 \approx \mathbf{2.00}$$

Se deja a criterio del calculista cerrar la relación largo-ancho o tomar los datos exactos. En los diseños del presente libro, algunos se considerarán cerrados a número superior y otros exactos.

Coeficiente de dispersión.

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\ x + 1.0136\ x^2}$$

$$= \frac{2.00}{-0.26118 + 0.25392\ (2.00) + 1.0136\ (2.00)^2} = \mathbf{0.4650}$$

g) Coeficiente de reducción bacteriana.

$K_b = 0.841\ (1.075)^{T\ -\ 20} = 0.841\ (1.075)^{12.9\ -\ 20} =$

$\mathbf{0.5033\ d^{-1}}$

h) Constante "a".

$$a = \sqrt{1 + 4\ K_b\ O_{m1}\ d} =$$

$$\sqrt{1 + (4 * 0.5033 * 6 * 0.4650)} = \mathbf{2.5723}$$

i) Coliformes fecales en el efluente de la laguna de maduración.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\ a\ e^{(1\ -\ a/2\ d)}}{(1 + a)^2}$$

$$= \frac{4 * 2.5723 * e^{(1\ -\ 2.5723/2 * 0.4650)}}{(1 + 2.5723)^2} = 0.148678406$$

Al multiplicar por los coliformes fecales en el influente (Ni) se tiene:

$Ne = 0.148678406 * 30\ 394.68 = \mathbf{4\ 519.03\ NMP/100\ mL}$

j) Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_{ecorr} = \frac{N_e\ Q_i}{Q_e} = \frac{4\ 519.03 * 163.14}{156.67} =$$

4 705.65 NMP/100 mL

k) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna y la constante para lagunas

$$K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35 - T}} = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - 12.9}} = \mathbf{0.1978\ d^{-1}}$$

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\ O_{m1} + 1} = \frac{35.96}{(0.1978 * 6) + 1} =$$

16.44 mg/L

l) Eficiencia de remoción de la DBO_5.

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e}{DBO_i}\ 100 =$$

$$\frac{35.96 - 16.44}{35.96}\ 100 = \mathbf{54.28\ \%}$$

m) DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{Q_i\ DBO_e}{Q_e} = \frac{163.14 * 16.44}{156.67} =$$

17.12 mg/L

5.6.2 Diseño de laguna de maduración 2

Se propone un tiempo de retención hidráulico (Om_2) de cinco días; se toman los resultados de la laguna de maduración 1 corregidos por evaporación: Q_e=156.67 m³/día; N_e=4 705.65 NMP/00 mL; DBO_{corr}=17.12 mg/L Incisos e), j) y m), respectivamente.

l) Volumen de la laguna.

$$V = Q_i\ O_{m2} = 156.67 * 5 = \mathbf{783.35\ m^3}$$

2) Área de la laguna, con Z = 1.0 metro.

$$A = \frac{V}{Z} = \frac{783.35}{1.0} = \mathbf{783.35\ m^2}$$

3) Dimensionamiento. Se incluye un igual que la laguna facultativa.

$$B_{prom} = \mathbf{22.20\ m}$$

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} = \frac{783.35}{22.20} = \mathbf{35.29\ m}$$

Considerando un talud 2:1.

$$B_{sup} = B_{prom} + Z\ (talud) = 22.20 + (1 * 2) = \mathbf{24.20\ m}$$
$$L_{sup} = L_{prom} + Z\ (talud) = 35.29 + (1 * 2) = \mathbf{37.29\ m}$$

4) Cálculo del área superficial, ancho y largo inferior.

$$A_{sup} = B_{sup}\ L_{sup} = 24.20 * 37.29 = \mathbf{902.42\ m^2}$$
$$B_{inf} = B_{prom} - Z\ (talud) = 22.20 - (1 * 2) = \mathbf{20.20\ m}$$
$$L_{inf} = L_{prom} - Z\ (talud) = 35.29 - (1 * 2) = \mathbf{33.29\ m}$$

5) Gasto en el efluente corregido por evaporación.

$$Q_e = Q_i - 0.001\ A_{sup}\ ev =$$
$$156.67 - (0.001 * 902.42 * 5.8) =$$
151.44 m³/día

6) Remoción de coliformes fecales. Coeficiente de dispersión: la ecuación incluye la relación largo ancho (x).

Sin considerar mamparas, se tiene:

$$x = \frac{L_{prom}}{B_{prom}} = \frac{35.29}{22.20} = 1.5896 \approx \mathbf{1.60}$$

Coeficiente de dispersión.

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\,x + 1.0136\,x^2}$$

$$= \frac{1.60}{-0.26118 + 0.25392\,(1.60) + 1.0136\,(1.60)^2}$$

0.5840

7) Coeficiente de reducción bacteriana.

$$K_b = 0.841\,(1.075)^{T - 20} = 0.841\,(1.075)^{12.9 - 20} =$$

0.5033 d^{-1}

8) Constante "a".

$$a = \sqrt{1 + 4\,K_b\,O_{m2}\,d} =$$

$$\sqrt{1 + (4 * 0.5033 * 5 * 0.5840)} =$$

2.6227

9) Coliformes fecales en el efluente de la laguna de maduración.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\,a\,e^{(1 - a/2\,d)}}{(1 + a)^2}$$

$$= \frac{4 * 2.6227 * e^{(1 - 2.6227/2 * 0.5840)}}{(1 + 2.6227)^2} = 0.199241331$$

Al multiplicar por los coliformes fecales en el influente (Ni) se tiene:

$$Ne = 0.199241331 * 4\,705.65 =$$

937.55 NMP/100 mL

10. Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_{ecorr} = \frac{N_e\,Q_i}{Q_e} = \frac{937.55.* 156.67}{151.44} =$$

969.92 NMP/100 mL< 1000 NMP/100 mL ∴ Bien

11) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna y la constante para lagunas

$$K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35 - T}} = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - 12.9}} = \mathbf{0.1978\ d^{-1}}$$

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\,O_{m2} + 1} = \frac{17.12}{(0.1978 * 5) + 1} = 8.61\ mg/L$$

12) Eficiencia de remoción de la DBO_5.

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e}{DBO_i}\ 100 = \frac{17.12 - 8.61}{17.12}\ 100 = \mathbf{49.71\ \%}$$

13) DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{Q_i\,DBO_e}{Q_e} = \frac{156.67 * 8.61}{151.44} =$$

8.91 mg/L < 30 mg/L ∴ Bien

Los resultados del sistema lagunar se muestran en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 + maduración 2.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Anaerobia	1 446	173.66	220.00	10 000 000.00	38.21	158
Facultativa	1 446	173.31	119.48	4 885 567.00	20.71	-
Maduración 1	1 446	163.14	35.96	30 394.68	-	-
Maduración 2	1 446	156.67	17.12	4 705.65	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud (m)	Gasto en efluente (m^3/día)
-	4.0	241.81	1.39	-	-	173.31
140.08	1.5	2 217.35	12.79	2	48.72	163.14
-	1.0	978.84	6.00	-	-	156.67
-	1.0	783.35	5.00	-	-	151.44

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
45.80	119.48	4 885 567.00	60.45	2.00	0:1	5.50
71.67	35.96	30 394.68	1 478.23	3.00	2:1	22.20
54.28	17.12	4 705.65	978.84	2.00	2:1	22.20
49.71	8.91	969.92	783.35	1.60	2:1	22.20

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)	Dispersión (d) (adimensional)
11.00	5.50	11.00	60.50	5.50	11.00	
66.60	25.20	69.60	1 753.92	19.20	63.60	0.0516
44.09	24.20	46.09	1 115.38	20.20	42.09	0.4650
35.29	24.20	37.29	902.42	20.20	33.29	0.5840

En las Figura 5.5 y Figura 5.6 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas sin escala.

Figura 5.5 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 + maduración 2.

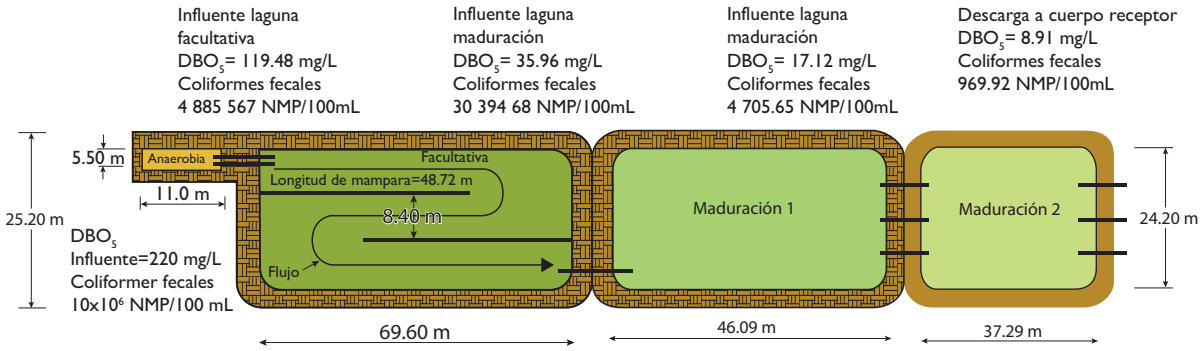
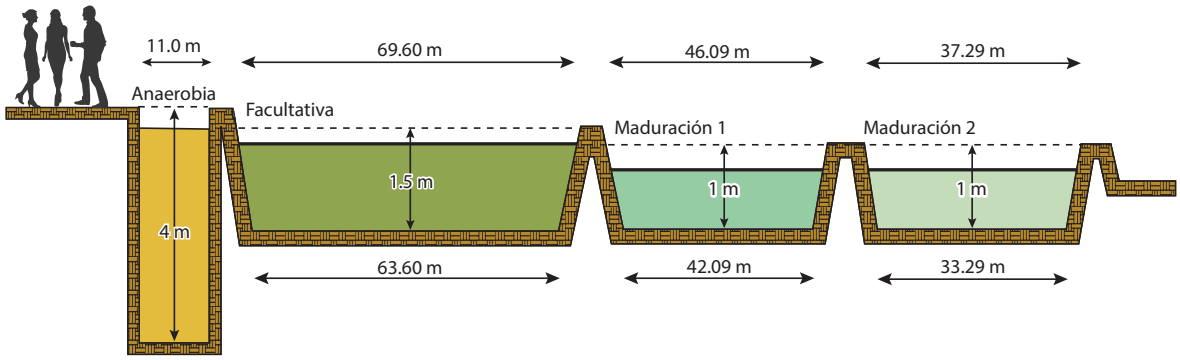


Figura 5.6 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración con 4 mamparas.



El valor de la dispersión en la laguna de maduración 1 resultó de 0.4650, con una relación largo ancho de 2. Como ya indicó en apartados anteriores, se incluyó el bordo de la laguna facultativa; es decir, el mismo ancho con el propósito de disminuir costos. Este resultado coincide con lo indicado en la Tabla 5.4: la dispersión para una laguna facultativa o de maduración, con una relación largo-ancho de 2, es de 0.4697. La relación largo-ancho del estanque de maduración 2 resultó de 1.60 y la dispersión de 0.5840.

5.7. DISEÑO DEL SISTEMA DE LAGUNAS: ANAEROBIA + FACULTATIVA + MADURACIÓN CON 4 MAMPARAS

Las lagunas anaerobia y facultativa ya fueron calculadas; los resultados se consignan en la Tabla 5.7, por lo que solamente se analizará la laguna de maduración con cuatro mamparas.

Es importante aclarar que, en el caso de la laguna facultativa, no se tomarán los datos de la Tabla 5.6, ya que esta fue calculada con dos mamparas y el presente diseño no las incluye, por lo tanto, los resultados considerados fueron los de la Tabla 5.3. Para la laguna anaerobia se toman los mismos resultados donde se ha incluido esta laguna.

5.7.1 Diseño de la laguna de maduración

Se propone un tiempo de retención hidráulico (O_m) de 11 días; se toman los datos Q_e=163.14 m^3/día, DBO_{corr}=35.96 mg/L. y N_e=156 232.96 NMP/100 mL de la laguna facultativa calculada previamente.

a) Volumen de la laguna.

$$V = Q_i\ O_m = 163.14 * 11 = \mathbf{1\ 794.54\ m^3}$$

b) Área de la laguna, con Z = 1.0 metro.

$$A = \frac{V}{Z} = \frac{1\ 794.54}{1.0} = \mathbf{1\ 794.54\ m^2}$$

c) Dimensionamiento. Se considera un ancho promedio (B_{prom}) igual que la laguna facultativa.

$$B_{prom} = \mathbf{22.20\ m}$$

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} = \frac{1\ 794.54}{22.20} = \mathbf{80.84\ m}$$

Considerando un talud 2:1

$B_{sup} = B_{prom} + Z\ (talud) = 22.20 + (1 * 2) =$ **24.20 m**
$L_{sup} = L_{prom} + Z\ (talud) = 80.84 + (1 * 2) =$ **82.84 m**

d) Cálculo del área superficial, ancho y largo inferior.

$A_{sup} = B_{sup}\ L_{sup} = 24.20 * 82.84 =$ **2 004.73 m^2**
$B_{inf} = B_{prom} - Z\ (talud) = 22.20 - (1 * 2) =$ **20.20 m**
$L_{inf} = L_{prom} - Z\ (talud) = 80.84 - (1 * 2) =$ **78.84 m**

e) Gasto en el efluente corregido por evaporación.

$$Q_e = Q_i - 0.001\ A_{sup}\ ev$$
$$163.14 - (0.001 * 2\ 004.73 * 5.8) =$$
151.51 m^3/día

f) Remoción de coliformes fecales. Coeficiente de dispersión: la ecuación incluye la relación largo ancho (x).

Considerando cuatro mamparas se tiene:

$$x = \frac{L_{prom} * 0.7 * (\text{Núm. mamparas} + 1)}{B_{prom}/(\text{Núm. mamparas} + 1)} =$$

$$\frac{80.84 * 0.7 * 5}{22.20/5} = \mathbf{63.73}$$

Coeficiente de dispersión.

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\ x + 1.0136\ x^2}$$

$$= \frac{63.73}{-0.26118 + 0.25392\ (63.73) + 1.0136\ (63.73)^2} =$$

0.0154

g) Coeficiente de reducción bacteriana.

$$K_b = 0.841\ (1.075)^{T - 20} =$$
$$0.841\ (1.075)^{12.9 - 20} = \mathbf{0.5033\ d^{-1}}$$

h) Constante "a".

$$a = \sqrt{1 + 4\ K_b\ O_m\ d} =$$
$$\sqrt{1 + (4 * 0.5033 * 11 * 0.0154)} = \mathbf{1.1580}$$

i) Coliformes fecales en el efluente de la laguna de maduración.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\ a\ e^{(1 - a/2\ d)}}{(1 + a)^2}$$

$$= \frac{4 * 1.1580 * e^{(1 - 1.1580/2 * 0.0154)}}{(1 + 1.1580)^2} = 0.005885608629$$

Al multiplicar por los coliformes fecales en el influente (Ni) se tiene:

$$Ne = 0.005885608629 * 156\ 232.9627 =$$
919.52 NMP/100 mL

j) Coliformes fecales corregidos por evaporación

$$N_{ecorr} = \frac{N_e\ Q_i}{Q_e} = \frac{919.52 * 163.14}{151.51} =$$

990.10 NMP/100 mL < 1000 NMP/100 mL ∴ Bien

k) Concentración de la DBO_5 en el efluente de la laguna y la constante para lagunas K_f.

$$K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35 - T}} = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - 12.9}} = \mathbf{0.1978\ d^{-1}}$$

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\, O_m + 1} = \frac{35.96}{(0.1978 * 11) + 1} =$$

11.32 mg/L

l) Eficiencia de remoción de la DBO5.

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e}{DBO_i} \text{ x}100 =$$

$$\frac{35.96 - 11.32}{35.96} \text{ x}100 = \mathbf{68.52\ \%}$$

m) DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{Q_i\, DBO_e}{Q_e} = \frac{163.14 * 11.32}{151.51} =$$

12.19 mg/L < 30 mg/L ∴ Bien

Los resultados del sistema lagunar se muestran en la Tabla 5.7.

En las Figura 5.7 y Figura 5.8 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas sin escala.

Tabla 5.7 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración con 4 mamparas.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Anaerobia	1 446	173.66	220.00	10 000 000.00	38.21	158
Facultativa	1 446	173.31	119.48	4 885 567.00	20.71	-
Maduración	1 446	163.14	35.96	156 232.96	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud (m)	Gasto en efluente (m^3/día)
-	4.0	241.81	1.39	-	-	173.31
140.08	1.5	2 217.35	12.79	-	-	163.14
-	1.0	1 794.54	11.00	4	57.98	151.51

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
45.80	119.48	4 885 567.00	60.45	2	0:1	5.50
71.67	35.96	156 232.96	1 478.23	3	2:1	22.20
68.52	12.19	990.10	1 794.54	-	2:1	22.20

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)	Dispersión (d) (Adimensional)
11.00	5.50	11.00	60.50	5.50	11.00	
66.60	25.20	69.60	1 753.92	19.20	63.60	0.3118
80.84	24.20	82.84	2 004.73	20.20	78.84	0.0154

Figura 5.7 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración con 4 mamparas.

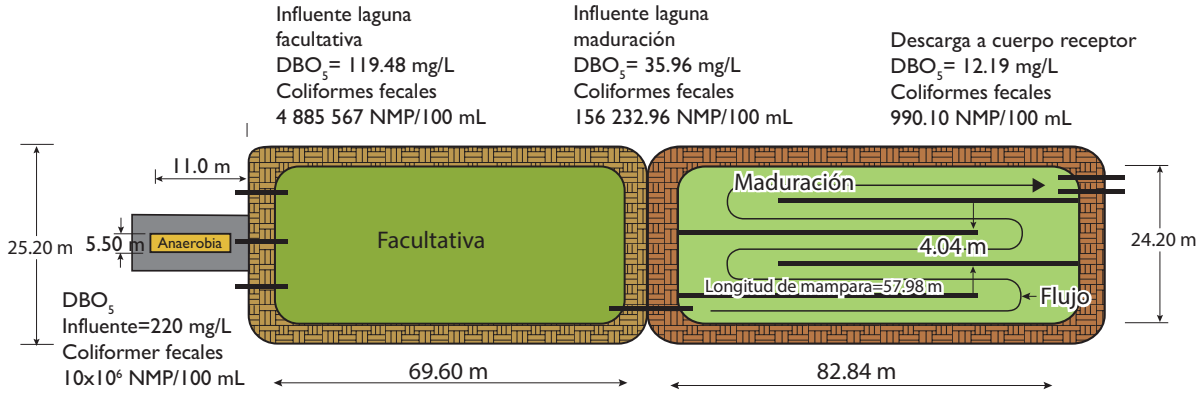
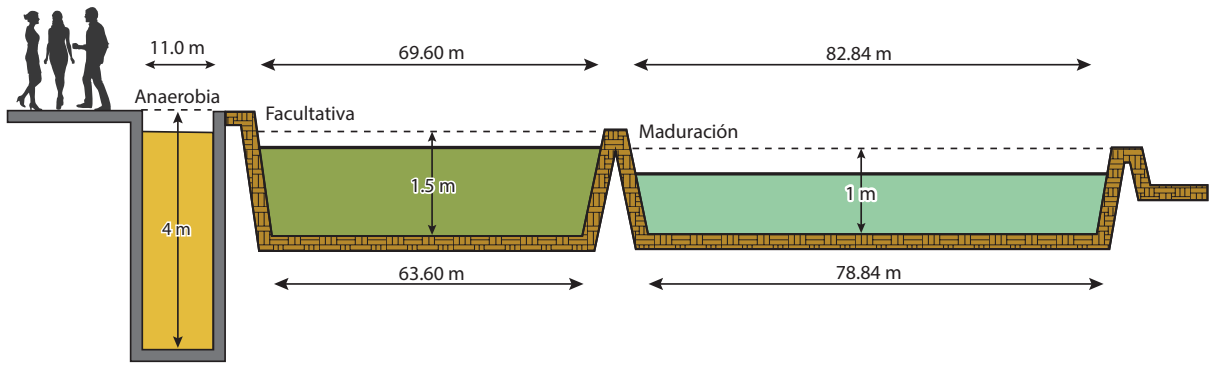


Figura 5.8 Dimensiones de la laguna facultativa con 3 mamparas.



La dispersión de la laguna facultativa ya fue calculada (Tabla 5.3) y, como se indicó, resultó para flujo disperso; mientras que la de maduración fue para pistón.

En el siguiente análisis se incluye solo una laguna facultativa con mamparas.

5.8. DISEÑO DE LA LAGUNA FACULTATIVA CON 3 MAMPARAS

Para el cálculo se toman los datos iniciales ya presentados: DBO_5 en el influente: 220 mg/L., coliformes fecales: 10 000 000 NMP/100 mL., gasto en el influente: 173.66 m³/día, temperatura 12.9 °C y evaporación: 5.8 mm/día. Siguiendo el criterio de diseño se obtienen los resultados en la Tabla 5.8. Es importante aclarar que en el presente diseño la concentración de la DBO_5 fue considerada para el vertido a embalses naturales y artificiales y uso en riego agrícola (A), por lo que según la Tabla 4.4, el límite máximo permitido fue de 75 mg/L.

5.8.1 Diseño de la laguna facultativa

a) Carga orgánica.

$$C.O. = \frac{Q_i\ DBO_i}{1000} = \frac{173.66 * 220}{1000} = \mathbf{38.21\ kg/día}$$

b) Carga superficial de diseño.

$$\lambda_S = 250\ (1.085)^{T\ -\ 20} = 250\ (1.085)^{12.9\ -\ 20} = \mathbf{140.08\ kgDBO_5/ha*día}$$

c) Área de la laguna facultativa.

$$A_f = \frac{10\ L_i\ DBO_i}{\lambda_S} = \frac{10 * 173.66 * 220}{140.08} = \mathbf{2\ 727.38\ m^2}$$

d) Volumen de la laguna con Z = 1.5 metros.

$$V = A\ Z = 2\ 727.38 * 1.5 = \mathbf{4\ 091.07\ m^3}$$

e) Tiempo de retención hidráulico.

$$O_f = \frac{V}{Q_i} = \frac{4\ 091.07}{173.66} = \mathbf{23.56\ días}$$

f) Dimensionamiento. Relación largo ancho x = 3.

$$B_{prom} = \sqrt{A_f/_X} = \sqrt{2\ 727.38}/_3 = \mathbf{30.15\ m}$$

$$L_{prom} = \frac{A_{prom}}{B_{prom}} = \frac{2\ 727.38}{30.15} = \mathbf{90.46\ m}$$

Considerando un talud 2:1.

$$B_{sup} = B_{prom} + Z\ (talud) = 30.15 + (1.5 * 2) = \mathbf{33.15\ m}$$
$$L_{sup} = L_{prom} + Z\ (talud) = 90.46 + (1.5 * 2) = \mathbf{93.46\ m}$$

g) Cálculo del área superficial ancho y largo inferior.

$$A_{sup} = B_{sup}\ L_{sup} = 33.15 * 93.46 = \mathbf{3\ 098.20\ m^2}$$
$$B_{inf} = B_{prom} - Z\ (talud) = 30.15 - (1.5 * 2) = \mathbf{27.15\ m}$$
$$L_{inf} = L_{prom} - Z\ (talud) = 90.46 - (1.5 * 2) = \mathbf{87.46\ m}$$

h) Gasto en el efluente corregido por evaporación.

$$Q_e = Q_i - 0.001\ A_{sup}\ ev =$$
$$173.66 - (0.001 * 3\ 098.20 * 5.8) =$$
$$\mathbf{155.69\ m^3/día}$$

i) Remoción de coliformes fecales. Coeficiente de dispersión: la ecuación incluye la relación largo ancho (x).

Considerando 3 mamparas se tiene:

$$x = \frac{L_{prom} * 0.7 * (\text{No. mamparas} + 1)}{B_{prom}/(\text{No. mamparas} + 1)} =$$

$$\frac{90.46 * 0.7 * 4}{30.15/4} = \mathbf{33.60}$$

Coeficiente de dispersión.

$$d = \frac{x}{-0.26118 + 0.25392\, x + 1.0136\, x^2}$$

$$= \frac{33.60}{-0.26118 + 0.25392\,(33.60) + 1.0136\,(33.60)^2} = \mathbf{0.0292}$$

j) Coeficiente de reducción bacteriana.

$$K_b = 0.841\,(1.075)^{T - 20} =$$
$$0.841\,(1.075)^{12.9 - 20} = \mathbf{0.5033\ d^{-1}}$$

k) Constante "a".

$$a = \sqrt{1 + 4\, K_b\, O_f\, d} =$$

$$\sqrt{1 + (4 * 0.5033 * 23.56 * 0.0292)} =$$

1.5443

l) Coliformes fecales en el efluente de la laguna facultativa.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4\, a\, e^{(1 - a/2\, d)}}{(1 + a)^2}$$

$$= \frac{4 * 1.5443 * e^{(1 - 1.5443/2 * 0.0292)}}{(1 + 1.5443)^2} = 0.0000854950985$$

Al multiplicar por los coliformes fecales en el influente (Ni) se tiene:

$$Ne = 0.0000854950985 * 10\,000\,000 =$$

854.95 NMP/100 mL

m) Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_{ecorr} = \frac{N_e\, Q_i}{Q_e} = \frac{854.9510 * 173.66}{155.69} =$$

953.63 NMP/100 mL < 1000 NMP/100 mL ∴ Bien

n) Concentración de la DBO_5 en el efluente y constante para lagunas facultativas

$$K_f = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - T}} = \frac{1.2}{(1.085)^{35 - 12.9}} = \mathbf{0.1978\ d^{-1}}$$

Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna.

$$DBO_e = \frac{DBO_i}{K_f\, O_f + 1} = \frac{220}{(0.1978 * 23.56) + 1} =$$

38.87 mg/L

o) Eficiencia de remoción de la DBO_5.

$$\% = \frac{(DBO_i - DBO_e}{DBO_i} x\, 100 =$$

$$\frac{220 - 38.87}{220} x\, 100 = \mathbf{82.33\ \%}$$

Según Rolim (2000) las lagunas facultativas primarias remueven del 60 al 90 % de materia orgánica. El resultado anterior coincide con las afirmaciones del citado autor.

p) DBO_5 corregida por evaporación.

$$DBO_{corr} = \frac{Q_i\ DBO_e}{Q_e} = \frac{173.66 * 38.87}{155.69} =$$

43.36 mg/L < 75 mg/L ∴ Bien

Los resultados del sistema lagunar se muestran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: laguna facultativa con 3 mamparas.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Facultativa	1 446	173.66	220	10 000 000	38.21	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud	Gasto en efluente (m^3/día)
140.08	1.5	4 091.07	23.56	3	65.42	155.69

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
82.33	43.36	953.63	2 727.38	-	2:1	30.15

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)
90.46	33.15	93.46	3 098.20	27.15	87.46

En las Figura 5.9 y Figura 5.10 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas sin escala.

Figura 5.9 Corte longitudinal de la laguna facultativa con 3 mamparas.

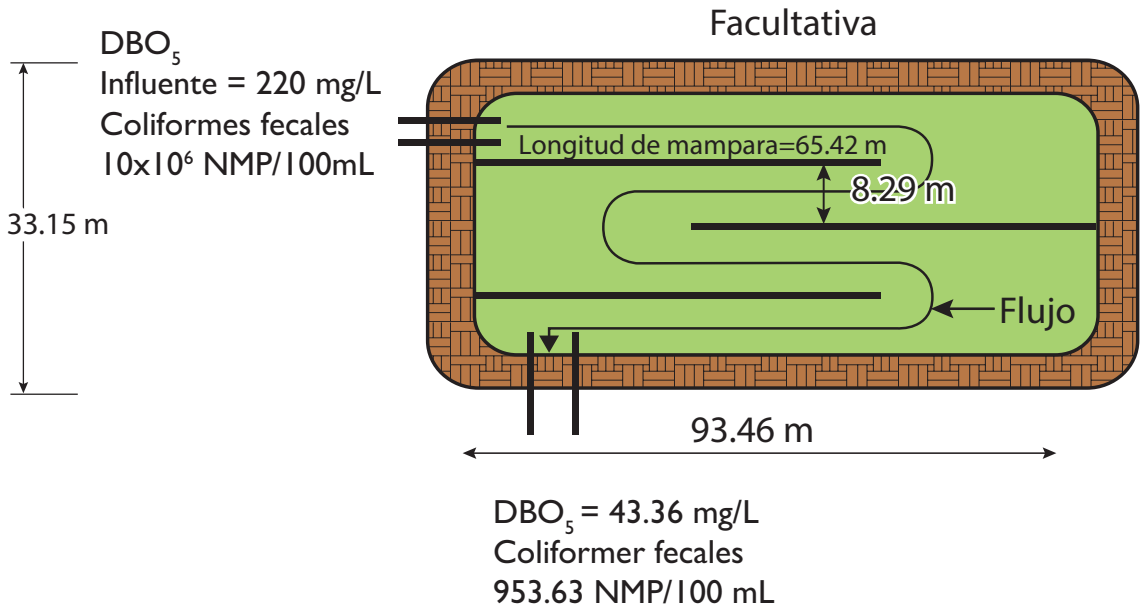
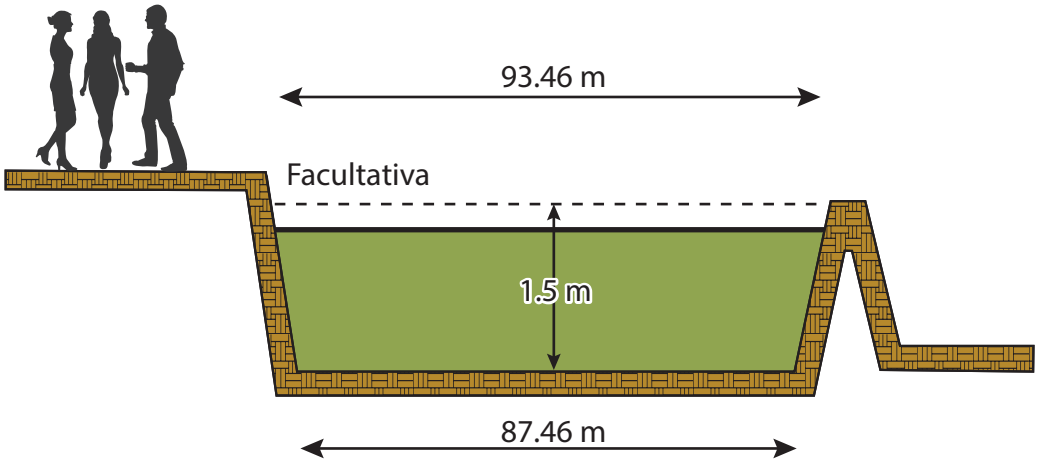


Figura 5.10 Dimensiones del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas.



La dispersión resultó para flujo pistón: 0.0292. Al respecto, los investigadores Kilani y Ogunrombi (1984), Pedahzur *et ál.* (1993), Muttamara y Puetpaiboon (1996; 1997) y Sperling *et ál.* (2002) publicaron, como ya se indicó, algunas ventajas al utilizar mamparas en las lagunas de estabilización: se mejoran la eliminación de contaminantes y el sistema hidráulico dentro del estanque, y disminuyen las zonas muertas; es decir, los cortos circuitos hidráulicos.

Se han realizado cinco diferentes diseños en forma detallada. De acuerdo con el numeral 5.2, faltan cuatro diseños por calcular: a) anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas; b) facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara; c) anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas y d) facultativa + maduración con 6 mamparas. Se sugiere que estos últimos trabajos los lleve a cabo el estudiante o profesional de la ingeniería sanitaria, con el propósito de entender adecuadamente la mecánica y criterios de diseño de los sistemas lagunares. Es prudente, primero, realizarlos en forma manual y, luego, comprobarlos con una hoja de cálculo *Excel*. En los siguientes diseños sólo se incluirán los resultados.

Como ya ase indicó, es posible que existan pequeñas diferencias en los resultados una vez verificados en una hoja de cálculo; sin embargo, las dimensiones no cambian.

5.9. DISEÑO DEL SISTEMA DE LAGUNAS: ANAEROBIA + FACULTATIVA CON 4 MAMPARAS + MADURACIÓN CON 4 MAMPARAS

En la Tabla 5.9 se muestran los resultados.

Tabla 5.9 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas.

Tipo de laguna	Población (Hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Anaerobia	1 446	173.66	220.00	10 000 000.00	38.21	158
Facultativa	1 446	173.31	119.48	4 885 567.00	20.71	-
Maduración	1 446	163.14	35.96	15 442.74	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud (m)	Gasto en efluente (m^3/día)
-	4.0	241.81	1.39	-	-	173.31
140.08	1.5	2 217.35	12.79	4	48.72	163.14
-	1.0	978.84	6.00	4	32.26	156.67

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
45.80	119.48	4 885 567.00	60.45	2	0:1	5.50
71.67	35.96	15 442.74	1 478.23	-	2:1	22.20
54.28	17.12	973.81	978.84	-	2:1	22.20

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)
11.00	5.50	11.00	60.50	5.50	11.00
66.60	25.20	69.60	1 753.92	19.20	63.60
44.09	24.20	46.09	1 115.38	20.20	42.09

En las Figura 5.11 y Figura 5.12 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas.

Figura 5.11 Corte longitudinal sin escala del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas.

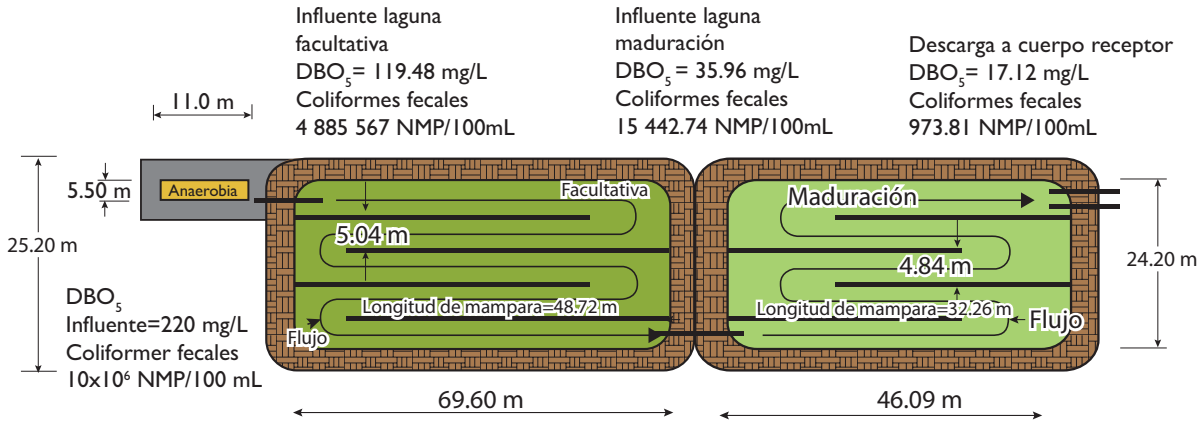
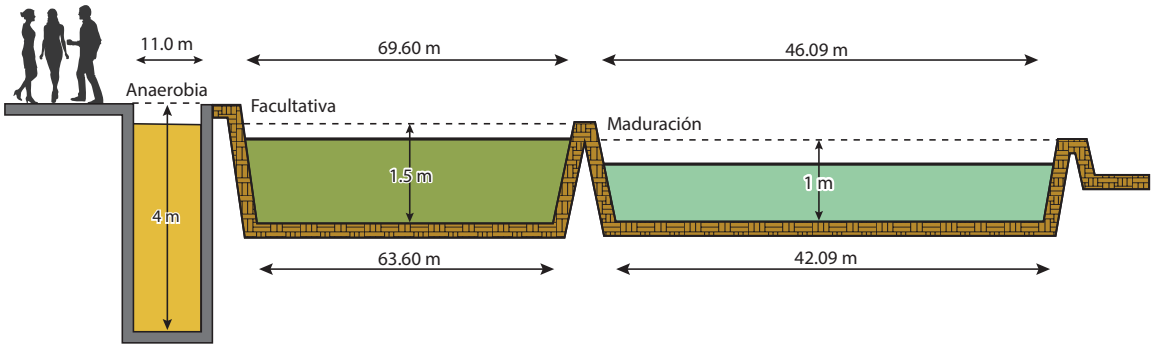


Figura 5.12 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara.



5.10. DISEÑO DEL SISTEMA LAGUNAR: FACULTATIVA CON 2 MAMPARAS + MADURACIÓN CON 1 MAMPARA

Los resultados se muestran en la Tabla 5.10.

En las Figura 5.13 y Figura 5.14 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas sin escala.

Tabla 5.10 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Facultativa	1 446	173.66	220.00	10 000 000.00	38.21	-
Maduración	1 446	155.69	43.36	2 517.57	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud (m)	Gasto en efluente (m^3/día)
140.08	1.5	4 090.96	23.56	2	65.42	155.69
-	1.0	778.45	5.00	1	19.47	150.50

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
82.33	43.36	2 517.57	2 727.38	-	2:1	30.15
49.72	22.55	466.66	778.45	-	2:1	30.15

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)
90.46	33.15	93.46	3 098.20	27.15	87.46
25.82	32.15	27.82	894.41	28.15	23.82

Figura 5.13 Corte longitudinal del sistema lagunar: facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara.

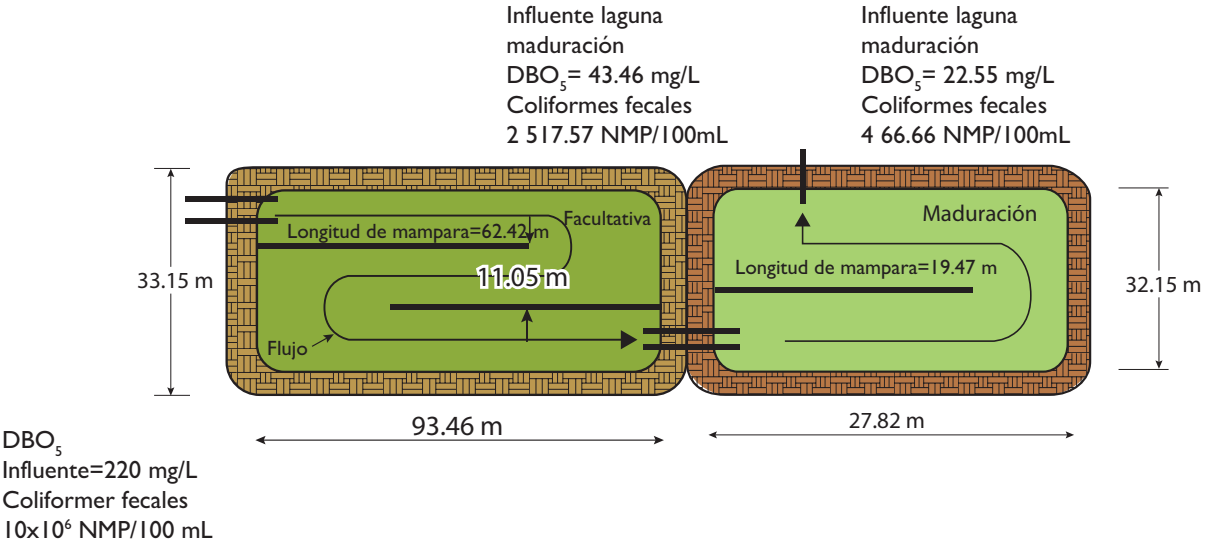
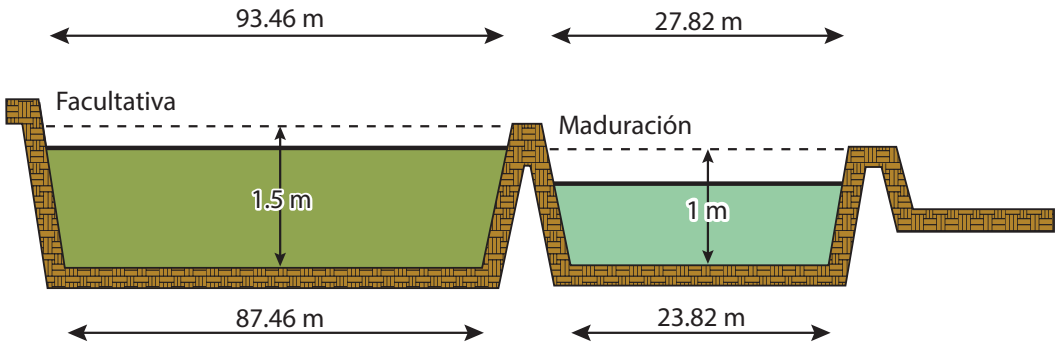


Figura 5.14 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mampa-



Según Gloyna (1973, citado por Rolim, 2000), el porcentaje de eliminación de la materia orgánica en lagunas facultativas primarias, como es el caso, se encuentra entre el 70 y 80%. En el presente diseño se obtuvo un 82.33%, valor ligeramente por encima del límite máximo reportado por el citado autor.

5.11. DISEÑO DEL SISTEMA LAGUNAR: ANAEROBIA + FACULTATIVA + MADURACIÓN 1 CON 4 MAMPARAS Y MADURACIÓN 2 CON 4 MAMPARAS

Los resultados se muestran en la Tabla 5.11.

Tabla 5.11 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Anaerobia	1 446	173.66	220.00	10 000 000.00	38.21	158
Facultativa	1 446	173.31	119.48	4 885 567.00	20.71	-
Maduración 1	1 446	163.14	35.96	156 232.96	-	-
Maduración 2	1 446	156.67	17.12	9 851.93	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5/ha*día$)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud (m)	Gasto en efluente (m^3/día)
-	4.0	241.81	1.39	-	-	173.31
140.08	1.5	2 217.35	12.79	-	-	163.14
-	1.0	978.84	6.00	4	32.26	156.67
-	1.0	783.35	5.00	4	26.10	151.44

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
45.80	119.48	4 885 567.00	60.50	2	0:1	5.50
71.67	35.96	156 232.96	1 478.23	3	2:1	22.20
54.28	17.12	9 851.93	978.84	-	2:1	22.20
49.71	8.91	989.90	783.35	-	2:1	22.20

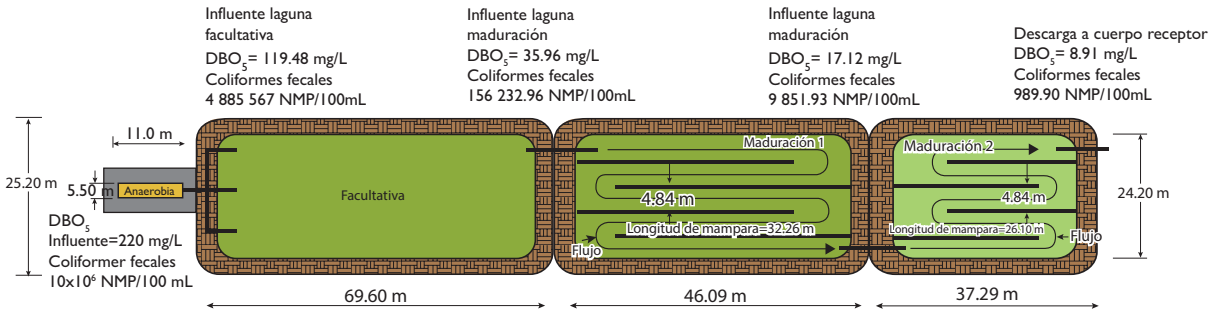
(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)
11.00	5.50	11.00	60.50	5.50	11.00
66.60	25.20	69.60	1 753.92	19.20	63.60
44.09	24.20	46.09	1 115.38	20.20	42.09
35.29	24.20	37.29	902.42	20.20	33.29

En las Figura 5.15 y Figura 5.16 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas sin escala.

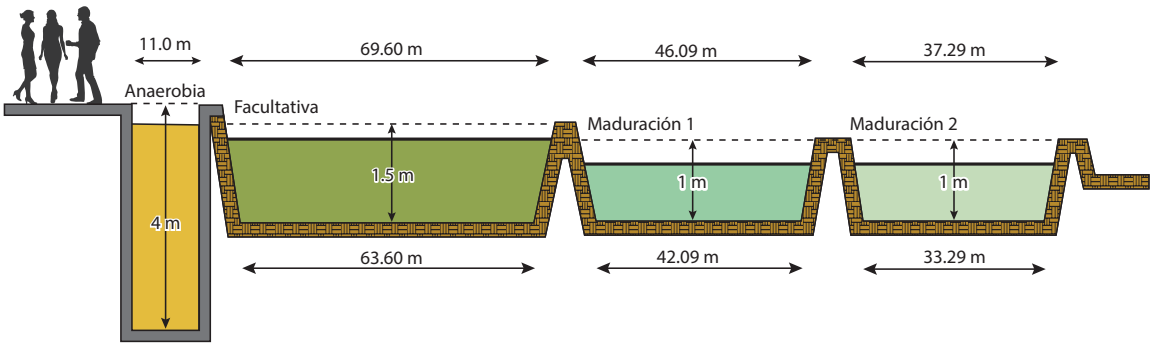
ras y maduración 2 con 4 mamparas.

Figura 5.15 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración



1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas.

Figura 5.16 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: facultativa + maduración con 6 mamparas.



Los resultados de las lagunas anaerobia y facultativa se tomaron de la Tabla 5.3 y se consignaron en la Tabla 5.11. Como se observa, en el estanque facultativo no se incluyeron mamparas; solo fueron calculadas las dos lagunas de maduración.

5.12. CÁLCULO DEL SISTEMA LAGUNAR: FACULTATIVA + MADURACIÓN CON 6 MAMPARAS

Los resultados se muestran en laTabla 5.12.

Tabla 5.12 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: facultativa + maduración con 6 mamparas.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5m^3$*día)
Facultativa	1 446	173.66	220.00	10 000 000.00	38.21	-
Maduración	1 446	155.69	43.36	60 904.41	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud (m)	Gasto en efluente (m^3/día)
140.08	1.5	4 090.96	23.56	-	-	155.69
-	1	1 401.21	9.00	6	33.93	146.65

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
82.33	43.36	60 904.41	2 727.38	3	2:1	30.15
64.03	16.56	963.06	1 401.21	-	2:1	30.15

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)
90.46	33.15	93.46	3 098.20	27.15	87.46
46.47	32.15	48.47	1 558.31	28.15	44.47

En las figuras 5.17 y 5.18 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas sin escala.

Figura 5.17 Corte longitudinal del sistema lagunar: facultativa + maduración con 6 mamparas.

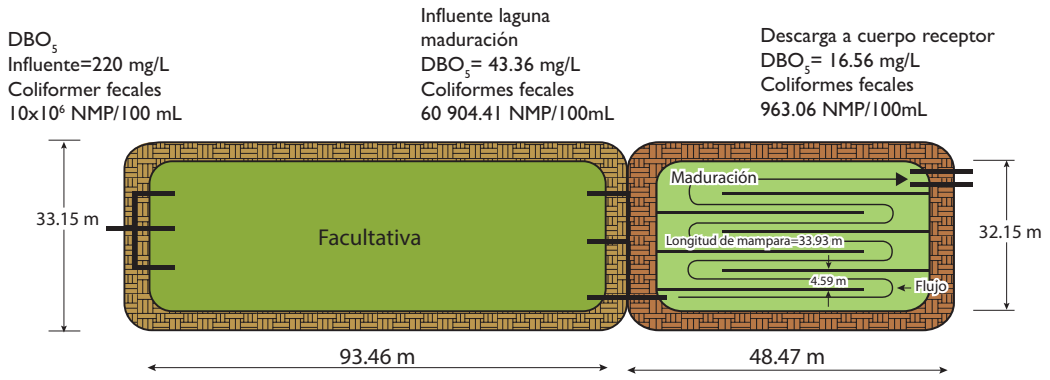
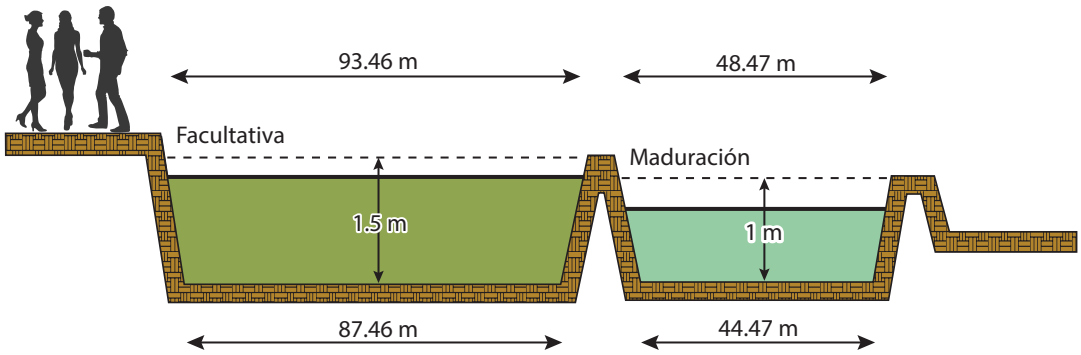


Figura 6.1 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas + maduración 2 con 4 mamparas.



5.13. ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS

En la Tabla 5.13 se observa que el arreglo anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración también con cuatro mamparas resultó con menor tiempo de retención: 20.18 días y área. Luego, la laguna facultativa con tres mamparas, tiempo de retención: 23.56 días. Enseguida, los tres arreglos que resultaron con el mismo tiempo de retención: 25.18. Cabe mencionar que, aunque son diferentes configuraciones, los resultados obtenidos fueron similares. El arreglo anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración resultó de 26.18 días. Como ya se indicó en apartados anteriores, la decisión de llevar a cabo el proyecto depende principalmente de la disposición de terreno y los recursos disponibles.

Tabla 5.13 Comparativo de resultados del área y tiempo de retención hidráulico.

Arreglos y configuraciones	Área superficial (m²)					Tiempo de retención total (días)
	Anaerobia	Facultativa	Maduración 1	Maduración 2	Total	
Anaerobia + facultativa + maduración 1 + maduración 2	60.50	1 753.92	1 826.86	1 212.42	4 853.70	31.18
Anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración	60.50	1 732.92	2 182.36		3 975.78	26.18
Anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 + maduración 2	60.50	1 753.92	1 115.38	902.42	3 832.22	25.18
Anaerobia + facultativa + maduración con 4 mamparas	60.50	1 753.92	2 004.73		3 819.15	25.18
Facultativa con mamparas	-	3 098.20			3 098.20	23.56
Anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas	60.50	1 753.92	1 115.38		2 929.80	20.18
Facultativa con 2 mamparas + maduración con 1 mampara	-	3 098.20	894.41		3 992.61	28.56
Anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas	60.50	1 753.92	1 115.38	902.42	3 832.22	25.18
Facultativa + maduración con 6 mamparas	-	3 098.20	1 558.31		4 656.51	32.56

6 Segundo proyecto en el diseño de sistemas lagunares con diferentes arreglos

Objetivo

Que el lector aplique la metodología de los sistemas lagunares con distintas condiciones.

Con el propósito de consolidar el criterio de diseño de los sistemas lagunares, en el presente capítulo se incluye otro proyecto. Las configuraciones y arreglos son, en la mayoría de los casos, diferentes a los analizados en el capítulo 5.

6.1. DATOS DE DISEÑO PARA LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN (SEGUNDO PROYECTO)

Realizar el cálculo de dimensionamiento para lagunas de estabilización, de acuerdo con los siguientes datos:

- Población de proyecto: 5 141 habitantes
- Aportación = 120 L/hab/ día
- DBO_5 en el influente = 220 mg/L.
- Coliformes fecales:
  10 000 000 NMP/100 mL
- Temperatura: 8.3 °C
- Evaporación: 5.5 mm/día
- Taludes 2:1 en todas las lagunas

Considerar la relación largo ancho de 3 para lagunas anaerobias y facultativas; en las de maduración, tomar en cuenta el ancho de la laguna facultativa.

Elaborar el cálculo con distintas configuraciones y arreglos: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas y maduración 2 con 4 mamparas; anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 y maduración 2; facultativa + maduración 1 con 7 mamparas y maduración 2 con 8 mamparas; anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas.

Se solicita elaborar un comparativo de áreas incluyendo todas las modalidades de diseño solicitadas anteriormente y determinar la menor área, arreglo funcional de los diferentes proyectos y cortes longitudinales.

A continuación, los resultados de los citados diseños. Se recomienda que el estudiante o profesional de la ingeniería sanitaria realice los cálculos, ya sea en forma manual o con una hoja de cálculo para verificar los resultados; luego, realizar el comparativo de áreas y tiempos de retención.

6.2. DISEÑO DEL SISTEMA LAGUNAR: ANAEROBIA + FACULTATIVA + MADURACIÓN 1 CON 4 MAMPARAS Y MADURACIÓN 2 CON 4 MAMPARAS

En la Tabla 6.1 se muestran los resultados.

Tabla 6.1 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas + maduración 2 con 4 mamparas.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Anaerobia	5 142	616.90	220.00	10 000 000.00	135.72	66
Facultativa	5 142	614.07	140.12	4 711 416.42	86.04	-
Maduración 1	5 142	561.25	38.63	93 603.28	-	-
Maduración 2	5 142	535.03	19.42	7 020.01	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud	Gasto en efluente (m^3/día)
-	4.0	2 056.33	3.33	-	-	614.07
96.25	1.5	13 409.37	21.84	-	-	561.25
-	1.0	4 490.00	8.00	4	58.97	535.03
-	1.0	3 477.70	6.50	4	45.99	514.58

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
36.60	140.12	4 711 416.42	514.08	3	2:1	13.09
74.80	38.63	93 603.28	8 939.58	3	2:1	54.59
52.08	19.42	7 020.01	4 490.00	-	2:1	54.59
46.91	10.72	860.85	3 477.70	-	2:1	54.59

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)
39.27	21.09	47.27	996.92	5.09	31.27
163.76	57.59	166.76	9 603.70	51.59	160.76
82.25	56.59	84.25	4 767.71	52.59	80.25
63.71	56.59	65.71	3 718.53	52.59	61.71

En las Figura 6.1 y Figura 6.2 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema sin escala.

Figura 6.2 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa + maduración 1 con 4 mamparas + maduración 2 con 4 mamparas.

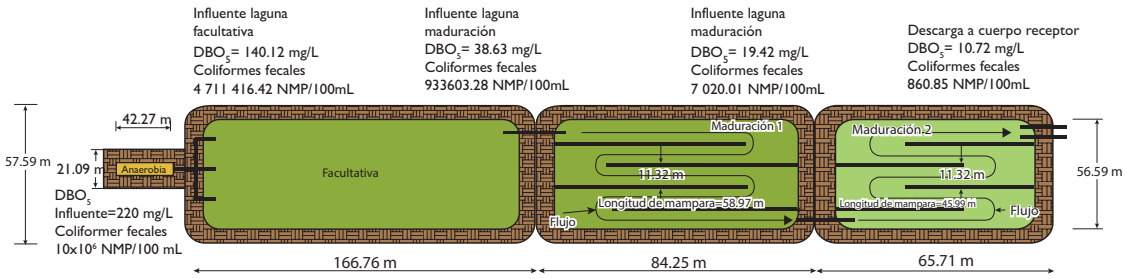
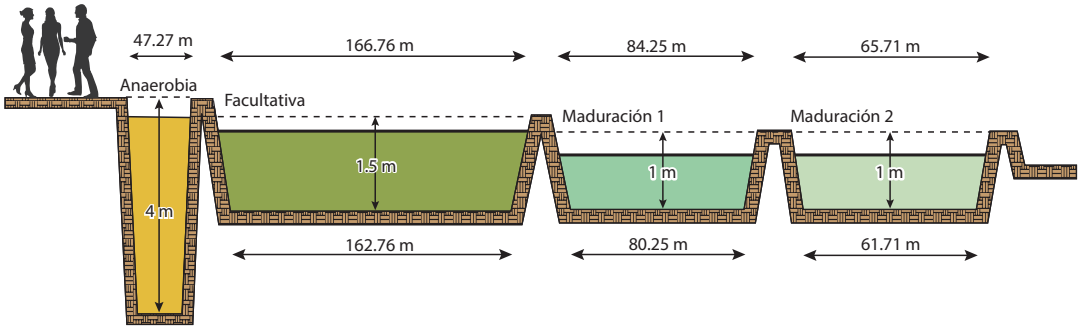


Figura 6.3 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 y maduración 2.



6.3. DISEÑO DEL SISTEMA LAGUNAR: ANAEROBIA + FACULTATIVA CON 2 MAMPARAS + MADURACIÓN 1 Y MADURACIÓN 2

En la Tabla 6.2 se muestran los resultados.

Tabla 6.2 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 y maduración 2.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Anaerobia	5 142	616.9	220.00	10 000 000.00	135.72	66
Facultativa	5 142	614.07	140.12	4 711 416.42	86.04	-
Maduración 1	5 142	561.25	38.63	11 887.83	-	-
Maduración 2	5 142	543.03	22.85	2 793.29	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud (m)	Gasto en efluente (m^3/día)
-	4.0	2 056.33	3.33	-	-	614.07
96.25	1.5	13 409.37	21.84	2	116.73	561.25
-	1.0	3 086.88	5.50	-	-	543.03
-	1.0	2 172.32	4.00	-	-	530.02

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación argo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
36.60	140.12	4 711 416.42	514.08	3	2:1	13.09
74.80	38.63	11 887.83	8 939.58	3	2:1	54.59
42.76	22.85	2 793.29	3 086.88		2:1	54.59
35.22	15.17	910.36	2 172.12		2:1	54.59

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)
39.27	21.09	47.27	996.92	5.09	31.27
163.76	57.59	166.76	9 603.70	51.59	160.76
56.55	56.59	58.55	3 313.34	52.59	54.55
39.79	56.59	41.79	2 364.88	52.59	37.79

En la Figura 6.3 y Figura 6.4 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas sin escala.

Figura 6.4 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 2 mamparas + maduración 1 y maduración 2.

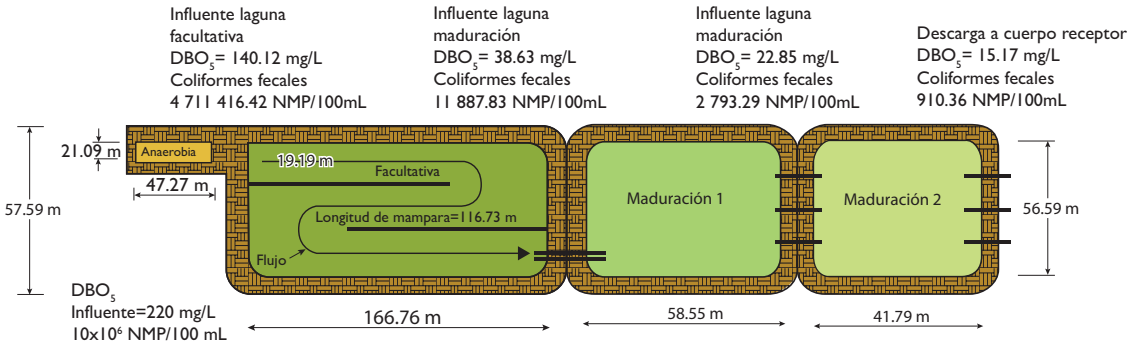
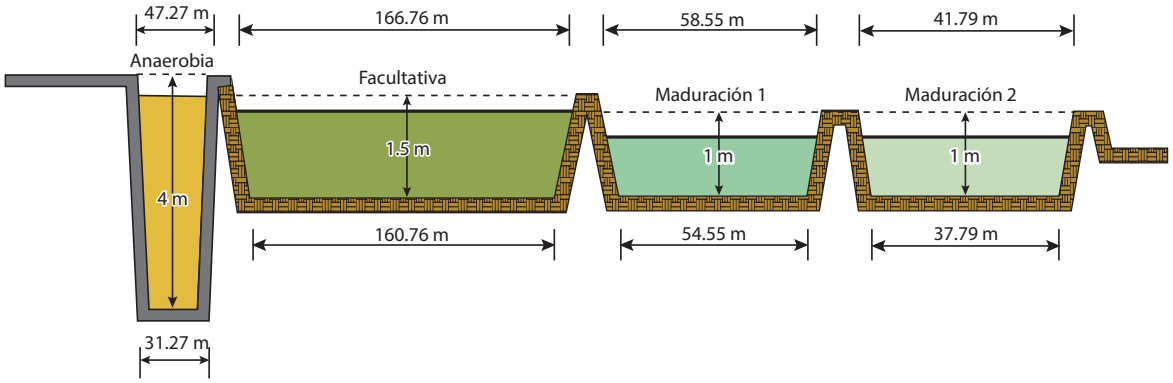


Figura 6.5 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: facultativa + maduración 1 con 7 mamparas y maduración 2 con 8 mamparas.



6.4. DISEÑO DEL SISTEMA LAGUNAR: FACULTATIVA + MADURACIÓN 1 CON 7 MAMPARAS Y MADURACIÓN 2 CON 8 MAMPARAS

En la tabla 6.3 se muestran los resultados.

Tabla 6.3 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: facultativa + maduración 1 con 7 mamparas y maduración 2 con 8 mamparas.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día)	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Facultativa	5 142	616.9	220.00	10 000 000.00	135.72	-
Maduración 1	5 142	534.77	44.84	54 728.57	-	-
Maduración 2	5 142	515.83	25.61	7 403.22	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5$/ha*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud	Gasto en efluente (m^3/día)
96.25	1.5	21 151.00	34.28	-	-	534.77
-	1.0	3 208.62	6.00	7	34.16	515.83
-	1.0	3 094.98	6.00	8	47.69	497.53

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
82.33	44.84	54 728.57	14 101.00	3	2:1	68.56
44.92	25.61	7 403.22	3 208.62	-	2:1	68.56
44.92	14.63	929.59	3 094.98	-	2:1	46.80

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)
205.67	71.56	208.67	14 932.43	65.56	202.67
46.80	70.56	48.80	3 443.33	66.56	44.80
66.13	48.80	68.13	3 324.84	44.80	64.13

En la Figura 6.5 y Figura 6.6 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas sin escala.

Figura 6.6 Corte longitudinal del sistema lagunar: facultativa + maduración 1 con 7 mamparas y maduración 2 con 8 mamparas.

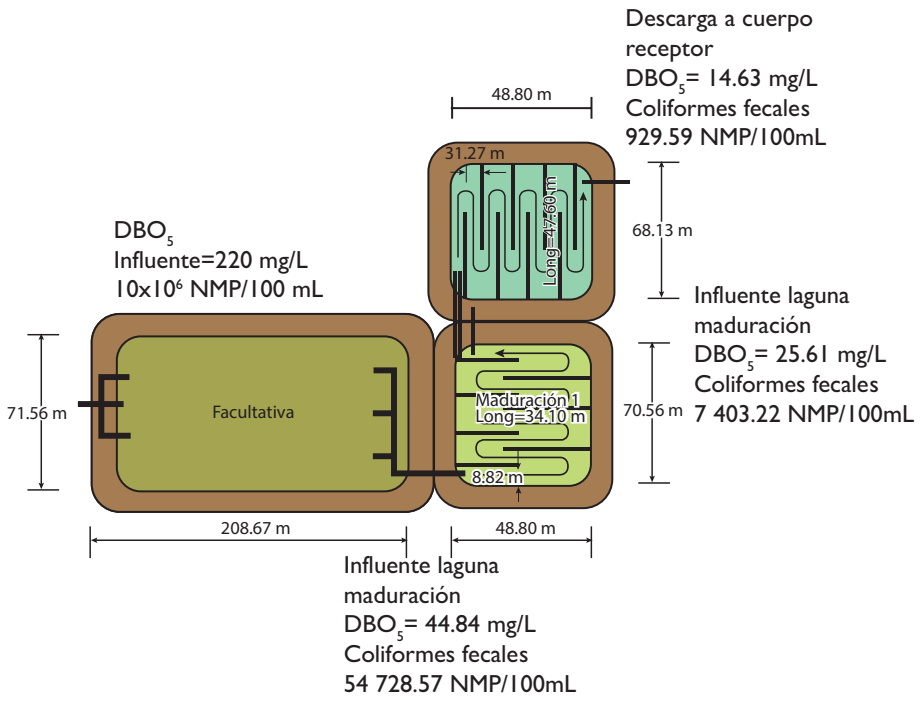
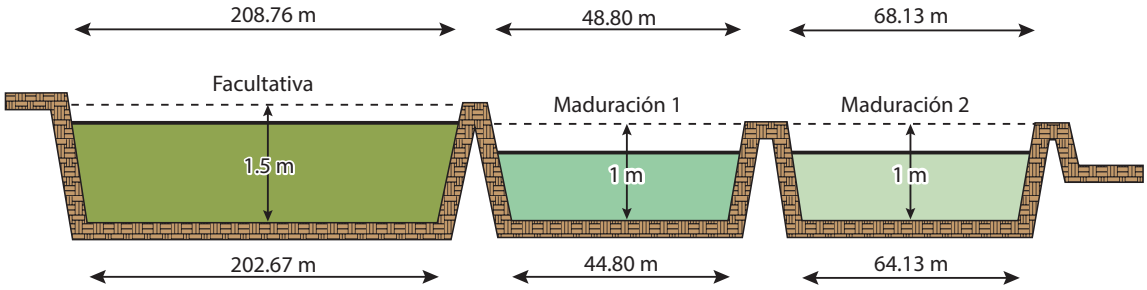


Figura 6.7 Dimensiones del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas.



6.5. DISEÑO DEL SISTEMA LAGUNAR: ANAEROBIA + FACULTATIVA CON 4 MAMPARAS + MADURACIÓN CON 4 MAMPARAS

Tabla 6.4 Resumen de cálculo de dimensionamiento del sistema lagunar con arreglo: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas.

Tipo de laguna	Población (hab)	Gasto de diseño (m^3/día	DBO_5 en el influente (mg/L)	Coliformes fecales en influente (NMP/100 mL)	Carga orgánica (kg/día)	Carga volumétrica ($gDBO_5/m^3$*día)
Anaerobia	5 142	616.90	220.00	10 000 000.00	135.72	66
Facultativa	5 142	614.07	140.12	4 711 416.42	86.04	-
Maduración	5 142	561.25	38.63	4 776.35	-	-

(Continuación)

Carga superficial de diseño ($kgDBO_5/ha$*día)	Z (m)	Volumen de la laguna (m^3)	Tiempo de retención (días)	Número de mamparas	Longitud mampara 0.7 de longitud	Gasto en efluente (m^3/día)
-	4.0	2 056.33	3.33	-	-	614.07
96.25	1.5	13 409.37	21.84	4	116.73	561.25
-	1.0	2 806.25	5.00	4	37.38	544.63

(Continuación)

% de remoción de DBO_5	DBO_5 en el efluente corregida por evaporación (mg/L)	Coliformes fecales en efluente corregidos por evaporación (NMP/100 mL)	Área promedio (m^2)	Relación largo-ancho	Talud	Ancho promedio (m)
36.60	140.12	4 711 416.42	514.08	3	2:1	13.09
74.80	38.63	4 776.35	8 939.58	-	2:1	54.59
40.46	23.70	943.00	2 806.25	-	2:1	54.59

(Continuación)

Largo promedio (m)	Ancho superior (m)	Largo superior (m)	Área superficial (m^2)	Ancho inferior (m)	Largo inferior (m)
39.27	21.09	47.27	996.92	5.09	31.27
163.76	57.59	166.76	9 603.70	51.59	160.76
51.41	56.59	53.41	3 022.47	52.59	49.41

En la Figura 6.7 y Figura 6.8 se muestran las dimensiones y corte longitudinal del sistema de lagunas sin escala.

Figura 6.8 Corte longitudinal del sistema lagunar: anaerobia + facultativa con 4 mamparas + maduración con 4 mamparas.

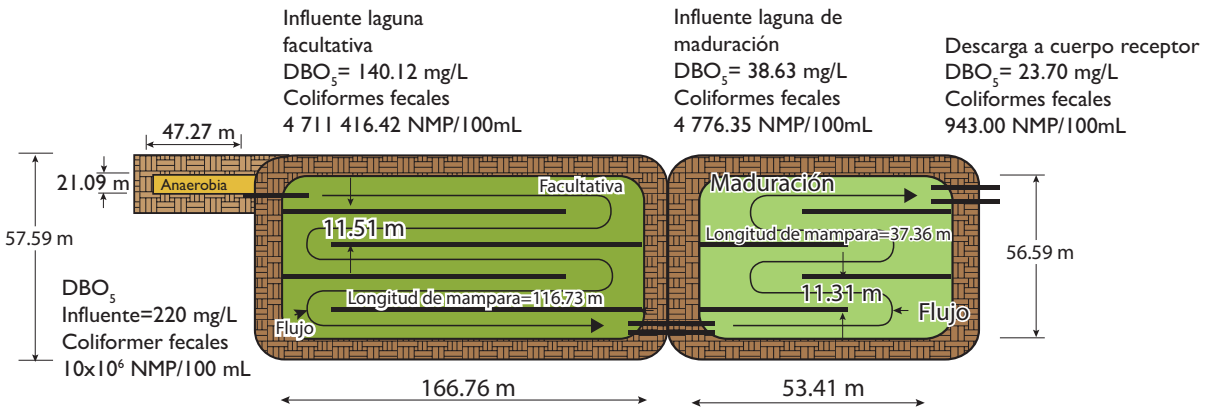
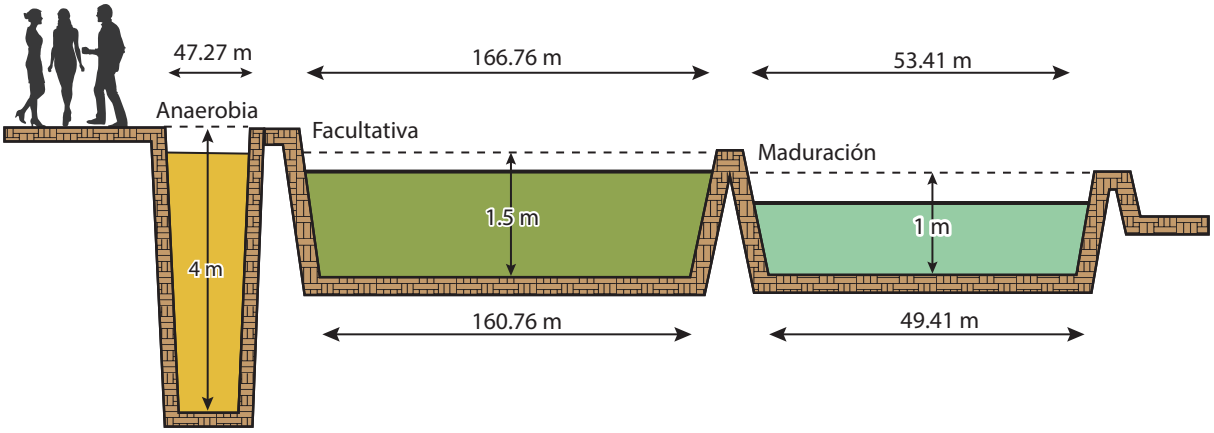


Figura 7.1 Proceso de la degradación de la materia orgánica. Fuente Rolim, 2000.

Figura 7.2 Zonas de la laguna facultativa. Adaptado de Rolim (2000).



Es recomendable llevar a cabo las pruebas de tratabilidad; es decir, construir a escala el sistema lagunar para luego probar el diseño. Lo anterior permitirá verificar la eficiencia del sistema, así como detectar alguna irregularidad.

7

Ecosistemas de las lagunas de estabilización

Objetivo

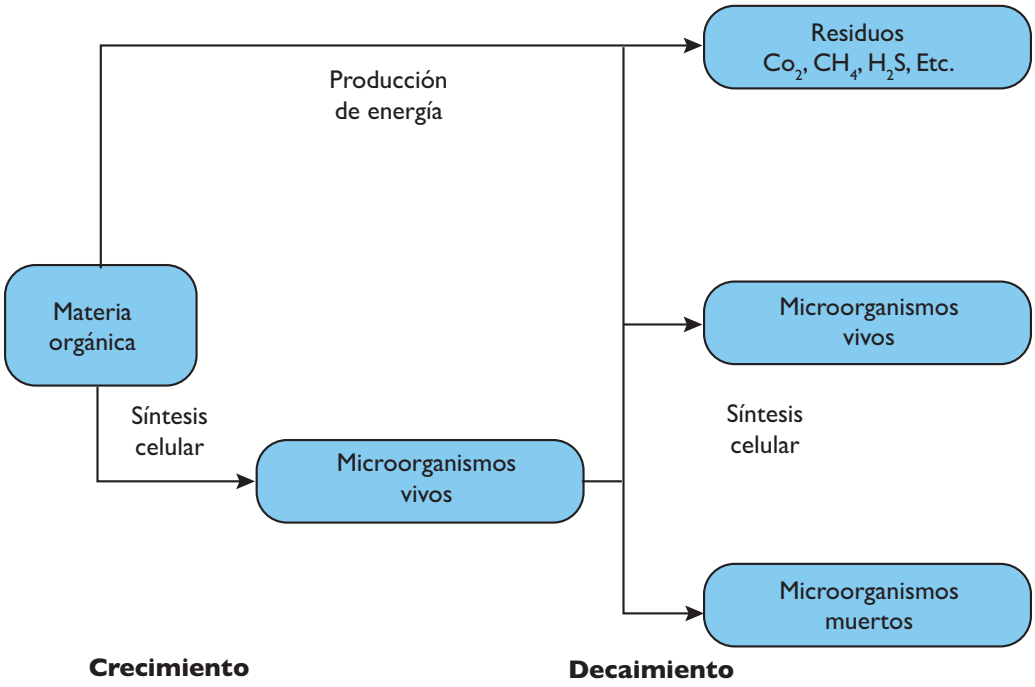
Que el lector conozca los microorganismos que se pueden encontrar en las lagunas y cuál es la función de estos.

En términos generales, puede decirse que los microorganismos, especialmente las bacterias, son ubicuos o pueden encontrarse en cualquier parte, incluyendo algunos ambientes donde casi ningún organismo puede sobrevivir. Las bacterias se encuentran en el aire, agua, suelos y es posible encontrarlas también en hábitats donde las condiciones de temperatura, pH, presión, oxígeno, etcétera son extremas (Rolim, 2000).

En el tratamiento de aguas residuales existen cuatro clases de microorganismos de gran interés: bacterias, hongos, algas y protozoarios.

En la Figura 7.1 se muestra la degradación de la materia orgánica en una laguna de estabilización, la cual resulta de la relación simbiótica entre algas y organismos heterótrofos (bacterias, hongos y protozoarios). Estos últimos oxidan la materia orgánica aerobiamente mediante la utilización del oxígeno generado por la población de las algas en el proceso fotosintético. A la vez, los productos de esta oxidación (dióxido de carbono, amonio y otros compuestos inorgánicos) son utilizados por las algas para su crecimiento y reproducción.

Figura 7.3 Bacterias aerobias: a) *Beggiatoa alba* y b) *Sphaerotilus natans.*

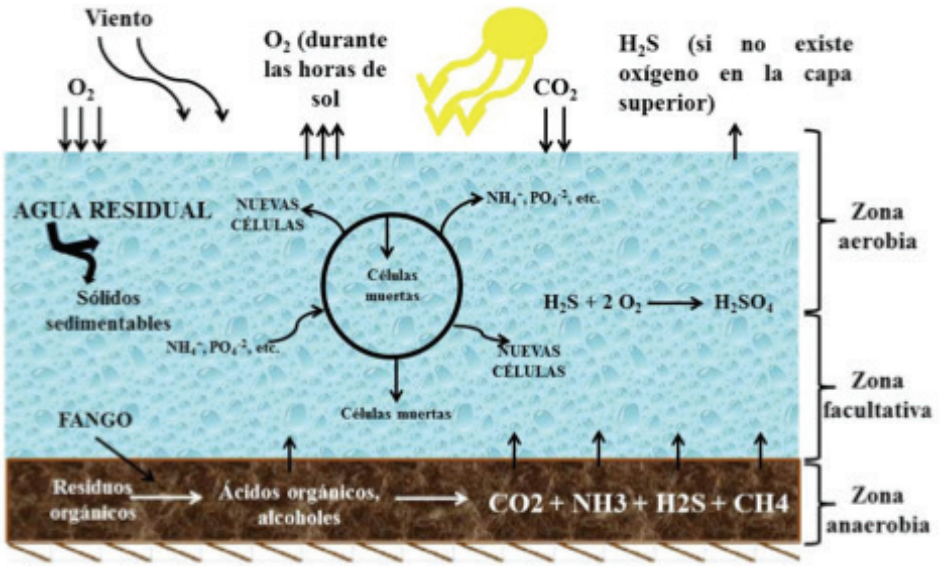


Los organismos acuáticos se agrupan en diferentes categorías, de acuerdo con su capacidad de supervivencia en un sistema en particular. Las bacterias presentes en áreas planctónicas y bentónicas juegan un papel importante en el ciclo biogeoquímico.

En los sedimentos, otras poblaciones bacterianas y hongos actinomicetos del grupo de las levaduras aseguran procesos de degradación de la materia orgánica, principalmente de tipo fermentativo. También, se tiene una presencia abundante de población bentónica compuesta en su mayoría por larvas de insectos que suelen ser los más abundantes y que se alimentan de microorganismos del sedimento, actuando sobre el mismo para removerlo. Su presencia o ausencia es un indicador del proceso en las lagunas (Rolim, 2000).

En las lagunas facultativas, los procesos de oxidación bacteriana convierten el material orgánico a dióxido de carbono, amoniaco y fosfato. Las bacterias involucradas son: *Pseudomonas sp, Flavobacterium sp* y *Alcaligenes sp*. La presencia de nutrientes (NH_4+, PO_4^{-2}) proporcionan un ambiente ideal para el desarrollo de las algas y estas, a través de su actividad fotosintética, producen más oxígeno. Este oxígeno se encuentra disponible para que las bacterias continúen la oxidación aerobia de la materia orgánica, como se muestra en la Figura 7.2 (Martínez, 2003).

Figura 7.4 Cianobacterias: a) *Anabaena sp.* b) *Nostoc sp.* c) *Oscilatoria sp.* y d) *Merismopedia sp*



Las lagunas aerobias de maduración o pulimento tienen como función principal la destrucción de microorganismos patógenos (bacterias, virus, quistes y huevos de parásitos intestinales).

7.1. BACTERIAS

7.1.1 Bacterias Aerobias

Los géneros aislados con mayor frecuencia son: *Beggiatoa alba, Sphaerotilus natans, Achromobacter, Alcaligenes, Flavobacterium, Pseudomonas y Zooglea sp. (Romero, 1999). Estos organismos están encargados de la descomposición de los materiales orgánicos. En la Figura 7.3 se muestran dos ejemplares de bacterias aerobias.*

Las bacterias aerobias, en el proceso de oxidación de la materia orgánica, utilizan el O_2 como aceptor final de electrones. Con ello, la descomposición se produce de la siguiente manera:

$$\text{Residuos} + O_2 \rightarrow \text{residuos oxidados} + \text{nuevas bacteria} \quad (7.1)$$

Residuos: carbón orgánico, hidrógeno orgánico, nitrógeno orgánico, sulfuro orgánico y fósforo orgánico.

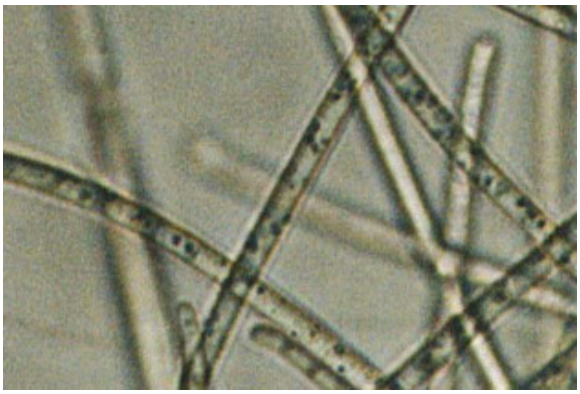
Residuos oxidados: CO_2, H_2O, NO_{3-}, SO_{4-}, PO_{4-} (respectivamente).

El proceso aerobio cuenta con la ventaja de la ausencia de olores y la mineralización completa de los compuestos biodegradables, aunque tienen la desventaja que podría requerir energía para la oxidación y mezcla.

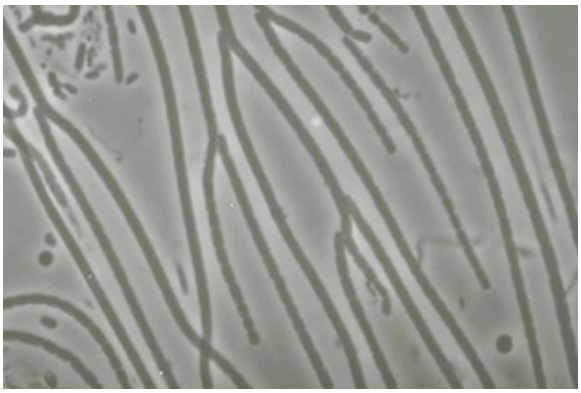
7.1.2 Bacterias formadoras de ácidos

Son todas aquellas bacterias heterótrofas capaces de convertir la materia orgánica compleja en

Figura 7.5 Bacterias púrpura de azufre: a) *Chromatiaceae* y b) Coloración rojiza debido a la presencia de bacterias púrpura del azufre.



a) Beggiatoa alba.
https://microbewiki.kenyon.edu/index.php/File:BEG-G3C.jpg



b) Sphaerotilus natans.
http://www.asissludge.com/Scripts/F11000000.htm

compuestos más simples como los alcoholes y los ácidos. La actividad de estos grupos es muy importante en la zona anaerobia de la laguna, ya que ellas producen los sustratos que posteriormente deberán reducirse a CO_2 y CH_4.

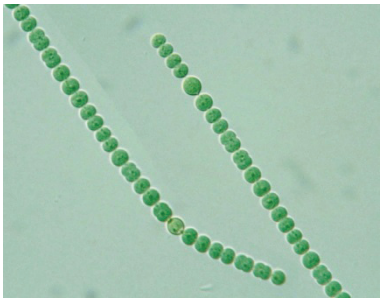
Estas bacterias anaerobias requieren temperaturas entre los 15 a 65 °C, por lo que su exposición a bajas temperaturas hace que disminuya su actividad biológica.

La actividad de este grupo es muy importante en la zona anaerobia, ya que ellas producen los sustratos que posteriormente deberán reducirse a metano y dióxido de carbono. Aparentemente, este grupo podría ser limitante en la descomposición anaerobia; sin embargo, la capacidad amortiguadora (buffer) del sistema permite mantener el pH cercano a la neutralidad (Martínez, 2003).

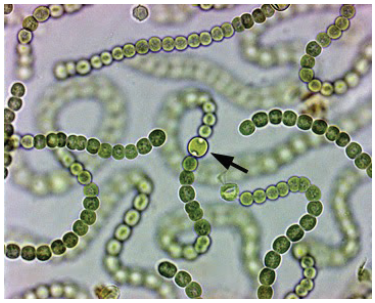
7.1.3 Cianobacterias

Grupo conocido también como algas azul-verdes, pueden utilizar compuestos orgánicos de tamaño pequeño, aunque su principal fuente de carbono es el CO_2 y producen oxígeno como subproducto del proceso de fotosíntesis. Una de las principales características de este grupo es su capacidad de

Figura 7.6 Bacterias patógenas, a) *Escherichia coli.* b) *Shigella sp.*

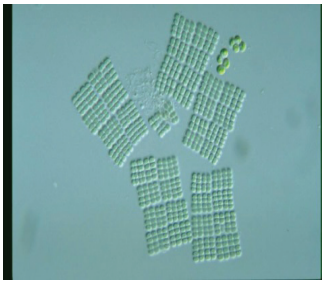


a) Anabaena sp.
http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/images/Prokaryotes/Nostocaceae/Anabaena/sp_17.html



b) Nostoc sp.
http://fitopasion.com/2015/05/la-tia-pauline.html

c) Oscilatoria sp.
http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/Images/Prokaryotes/Oscillatoriaceae/Oscillatoria/princeps/index.html



d) Merismopedia sp.
http://protist.i.hosei.ac.jp/PDB3/PCD2939/htmls/19.html

fijar o utilizar el nitrógeno atmosférico. En la Figura 7.4 se muestran algunos ejemplares del grupo de las cianobacterias que podemos encontrar en las lagunas.

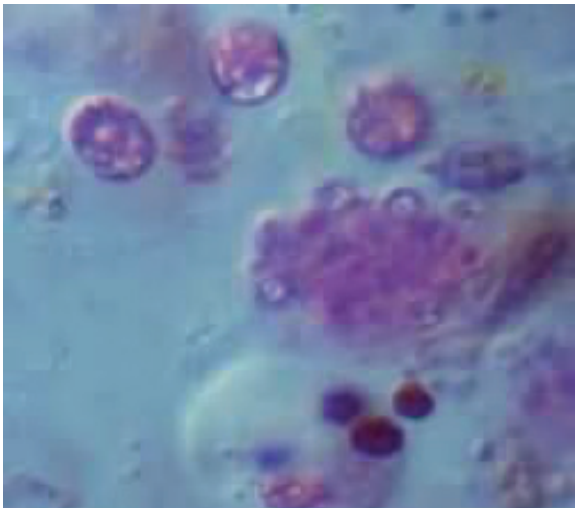
7.1.4 Bacterias púrpura del azufre

Muchas especies de la *Familia Chromatiaceae (bacterias púrpura del azufre) son púrpuras, como las que se muestran en la Figura 7.5 a), aunque otras son naranja oscuro o con varios tonos de morado o rojas. Estas bacterias crecen en cualquier ambiente acuático donde la luz tenga la longitud de onda adecuada para penetrar la masa de agua, que exista un suministro adecuado de* CO_2 y nitrógeno, y formas reducidas de azufre o hidrógeno. En la Figura 7.4 b) se muestra la coloración rojiza en un estanque con abundancia de bacterias púrpuras del azufre.

Generalmente, se localizan en la capa anaerobia inmediatamente por debajo de las algas, cianobacterias u otras bacterias de las lagunas, a una profundidad determinada, en una zona delgada donde las condiciones de nutrientes y de luz son óptimas. La conversión de compuestos azufrados a azufre elemental y/o sulfato es un factor significativo en el control de olores de las lagunas facultativas y anaerobias (Romero, 1999).

En lagunas anaerobias, con penetración de luz solar, las bacterias púrpura del azufre son capaces de efectuar fotosíntesis usando H_2S en vez de H_2S como donante de hidrógeno, de acuerdo con:

Figura 7.7 Algas: a) *Chlorella vulgaris* y b) *Scenedesmus sp.*



a) Chromatiaceae
http://neofronteras.com/?p=244

b) Coloración rojiza debido a la presencia de bacterias púrpura del azufre
http://gbtimes.com/china/lake-water-turns-purple-qingdao

$$6\,CO_2 + 12\,H_2S \xrightarrow[\text{Solar}]{\text{Energía}} {}_6H_{12}O_6 + 12\,S + 6\,H_2O$$

Si la población de las bacterias del azufre es muy numerosa, el agua puede tomar un color rojizo.

7.1.5 Bacterias patógenas

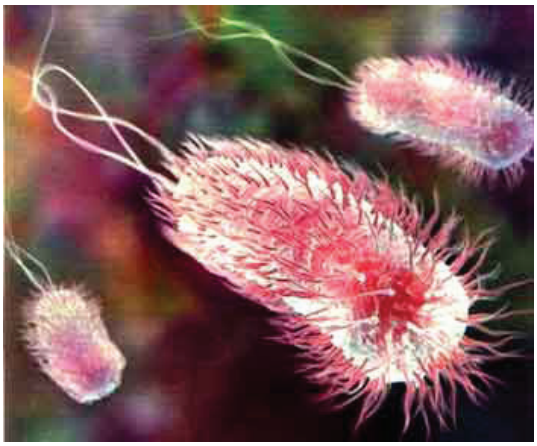
Las comúnmente asociadas con lagunas (aunque íntimamente relacionadas con las condiciones sanitarias de la población) son: *Salmonella, Shigella, Escheriquia, Leptospira, Francisella y Vibrio*.

En general, el agua no es el ambiente natural para estas bacterias, por lo que su papel principal es actuar como vehículo de transmisión. Las bacterias patógenas usualmente son incapaces de multiplicarse o de sobrevivir por largos periodos en un medio acuático. La disminución en número es el resultado de fenómenos como: sedimentación, carencia de nutrientes, radiación solar, pH, temperatura, competencia y depredación (Rolim, 2000).

La mayoría de las referencias en la literatura reportan para lagunas facultativas una alta reducción de bacterias coliformes: 99.9 por ciento.

En la Figura 7.6 se muestran dos fotografías de bacterias patógenas tomadas con un microscopio electrónico de barrido a color.

Figura 7.8 Zooplancton: a) *Brachionus sp.,* b) *Daphnia magna,* c) *Pleuronema sp.* y d) *Vorticella sp.*



a) Escherichia coli.
http://buenasiembra.com.ar/salud/terapias-alternativas/la-nueva-pandemia-ecoli-prohibir-lo-natural-1334.html

b) Shigella sp.
http://healthcollege.edu.pl/2013/09/were-vulnerable-to-disease/

7.2. ALGAS

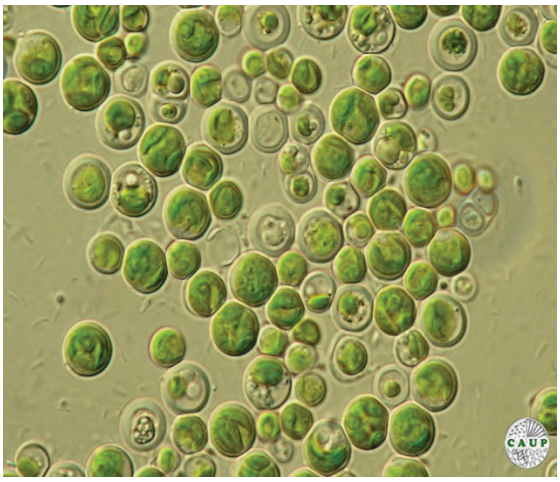
Existen en formas unicelulares, pluricelulares, móviles o inmóviles. No fijan nitrógeno atmosférico, pero lo requieren para sus procesos metabólicos, especialmente en forma inorgánica.

Taxonómicamente se dividen de acuerdo con los pigmentos que ellas poseen: algas verdes, algas doradas y algas rojas. En las lagunas de estabilización, las más frecuentes son las algas verdes y las algas doradas (Romero, 1999).

La presencia de las algas en niveles adecuados asegura el funcionamiento de la fase aerobia de las lagunas. Cuando se pierde el equilibrio ecológico, se corre con el riesgo de producir el predominio de la fase anaerobia, que trae como consecuencia una reducción de la eficiencia del sistema.

En las lagunas primarias facultativas predominan las algas flagelada como: *Euglena, Pyrobotrys* y *Chlamydomonas*. En lagunas secundarias, se incrementa el número de géneros y la densidad de algas, predominando las algas verdes, como: *Chlorella y Scenedesmus*. En lagunas terciarias, se presenta un mayor número de géneros de algas, entre los cuales predominan las algas verdes, como: *Chlorella, Scenedesmus, Ankistrodesmus* y *Microactinium*. En muchos casos, se ha observado la predominancia de algas azul-verdes. La predominancia de géneros varía según la temporada estacional.

En la Figura 7.7 se presentan dos ejemplares comunes de algas en lagunas.



a) Chlorella vulgaris.
http://botany.natur.cuni.cz/algo/database/node/110

b) Scenedesmus sp.
http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/images/chlorophyta/scenedesmus/index.html

7.3. IMPORTANCIA DE LA FOTOSÍNTESIS

Los estudios realizados sobre lagunas de estabilización han considerado como factores de importante influencia sobre el proceso: fotosíntesis, pH, profundidad, nutrientes, sedimentación de lodos, vientos, sulfuros, oxígeno disuelto, radiación solar, temperatura, tiempo de retención hidráulica, infiltración, evaporación, geometría de la laguna, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos.

Fotosíntesis. Proceso en el que ciertos organismos son capaces de utilizar la energía solar y transformarla en energía química para luego utilizarla en la fijación del CO_2; generalmente, este proceso se asocia con las plantas verdes, aunque también lo realizan algas y algunas bacterias como las algas azul-verdes. En lagunas de oxidación, los organismos fotosintéticos son algas, cianobacterias y bacterias púrpura de azufre (Martínez, 2003).

La fotosíntesis se clasifica en oxigénica y anoxigénica, dependiendo de la fuente reductora usada por un organismo en particular. En la fotosíntesis oxigénica, la descarga de agua es la fuente reductora, con el oxígeno producido como subproducto.

$$2H_2O \xrightarrow[\text{Solar}]{\text{Energía}} O_2 + 4H^+ + 4e^-$$

La fotosíntesis oxigénica la realizan las plantas verdes, algas y cianobacteria. En las lagunas, las algas y cianobacteria convierten el dióxido de carbono en compuestos orgánicos que actúan como una fuente energética adicional a la materia orgánica. El oxígeno producido permite a las bacterias aerobias degradar la materia orgánica compleja.

La fotosíntesis anoxigénica no produce oxígeno como subproducto y ocurre en ausencia completa de él. Las bacterias involucradas en este proceso son frecuentemente anaerobias y su fuente de energía proviene de la reducción de los compuestos inorgánicos. Algunas bacterias usan reductores de azufre produciendo azufre elemental (Martínez, 2003).

$$H_2S \longrightarrow S_o + 2H^+ + 2e^-$$

La materia orgánica del agua residual es oxidada por las bacterias heterótrofas, utilizando el oxígeno producido por las algas. Las algas, utilizando la energía solar, sintetizan materia orgánica y producen oxígeno con el bióxido de carbono y el amoniaco producido por las bacterias. La oxidación fotosintética permite cargas de DBO de hasta 25 g DBO/m^3d, pero en ausencia de oxigenación fotosintética, la oxigenación atmosférica solo permite cargas de 5 g DBO/m^3d para condiciones aerobias.

La actividad fotosintética demando un gran consumo de CO_2 por las algas, lo cual hace que se obtengan periodos de pH altos en las lagunas facultativas o aerobias. La presencia de pH muy alto hace que la actividad bacteriana disminuya, que la producción de CO_2 disminuya y que se limite el proceso simbiótico.

En las lagunas fotosintéticas, las algas verdes producen, generalmente, un color verde intenso y el conteo de algas puede ser tan alto como 10^8 células/mL.

7.4. HONGOS

Desde el punto de vista ecológico, cumplen un papel importante en la mineralización de los materiales leñosos, especialmente aquellos con alto contenido de lignina.

7.5. PROTOZOARIOS Y METAZOARIOS

Aunque las bacterias y algas son los principales microorganismos involucrados en la estabilización de la materia orgánica, algunas formas de vida superior también son importantes en estos sistemas.

Los protozoarios están constituidos por formas unicelulares. Algunos son depredadores y sus presas más comunes son las bacterias, algas, hongos y protozoarios más pequeños. Este grupo cumple un papel importante en el ámbito de los ecosistemas acuáticos, tanto en el control como en la regulación de las poblaciones existentes.

Microcrustáceos planctónicos del grupo de los cladóceros, y bentónicos del grupo de los chironomidae parecen ser la fauna más significativa en la comunidad de las lagunas de estabilización, especialmente por su contribución a la degradación de la materia orgánica. Los cladóceros se alimentan de algas y promueven la floculación y sedimentación del material particulado, lo cual permite una mejor penetración de la luz y un crecimiento a mayores profundidades. La materia orgánica sedimentada, posteriormente es degradada y estabilizada por los quironómidos bentónicos (Rolim, 2000).

7.5.1 Papel del zooplancton

El zooplancton en las lagunas de estabilización se conforma por cuatro grupos: ciliados, rotíferos, copépodos y cladóceros. Ocasionalmente, se presentan amibas de vida libre, ostrácodos, ácaros, tubelarios, larvas y pupas de dípteros. La mayoría de individuos de estos grupos solo están en las lagunas de estabilización durante algún estadio evolutivo; raramente tienen importancia cualitativa.

Los rotíferos predominan durante los meses de verano. Dentro de este grupo, el género Brachionus se presenta con mayor frecuencia, siendo el más resistente aun en condiciones extremas. Cuando el número de rotíferos se incrementa a instancias superiores a las normales, se observa un efecto negativo en la calidad del agua, ocasionando un aumento en los niveles de amonio, ortofosfato soluble, nitritos y nitratos. Asimismo, la presencia de un gran número de estos organismos, que consumen algas, disminuye la cantidad de oxígeno disuelto en el agua a niveles de riesgo. Los géneros predominantes de cladóceros son: *Monia* y *Daphnia,* y en los ciliados: *Pleuronema* y *Vorticella*.

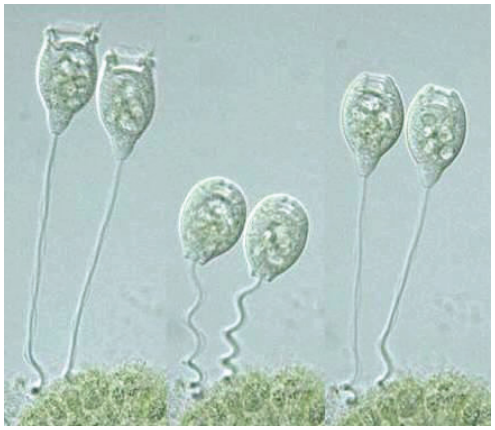
En la Figura 7.8 se presentan cuatro ejemplares del zooplancton que se encuentran comúnmente en lagunas.

Cabe señalar que en algunas lagunas, los mosquitos pueden ser un problema, no solo por el mal aspecto que produce, sino porque en algunos casos ellos pueden ser vectores de enfermedades como: encefalitis, malaria o fiebre amarilla, dengue, etcétera, por lo que deberán ser controlados. Generalmente, se ha encontrado que el medio más eficaz de control es la vegetación emergente, así

a) Brachionus sp.
http://cfb.unh.edu/cfbkey/html/Organisms/PRotifera/GBrachionus/brachionus_calyciflorus/brachionus-calyciflorus.html

b) Daphnia magna.
http://www.taringa.net/posts/ciencia-educacion/9140569/La-pulga-de-agua-tiene-mas-genes-que-el-ser-humano.html

c) Pleuronema sp.
http://www.plingfactory.de/Science/Atlas/KennkartenProtista/source/Pleuronema-coronatum.html



d) Vorticella sp.
http://protist.i.hosei.ac.jp/pdb/images/Ciliophora/Vorticella/convallaria/convallaria_2.html

como el uso de *Gambusia* o pez mosquito, en algunas lagunas de zonas cálidas.

En lagunas donde la carga orgánica y el tiempo de retención hidráulico permiten el predominio de crustáceos y/o rotíferos, consumidores de plancton, las algas pueden desaparecer y la oxigenación fotosintética de algas deja de ser importante (Rolim, 2000).

8
Resumen

Los sistemas lagunares son una excelente opción para el tratamiento de aguas residuales. Además, el agua tratada puede reusarse, o bien, intercambiar el agua tratada por agua potable. Esta última acción es considerada como una estrategia pues se reducen costos, favorece la disminución del abatimiento de aguas subterráneas, se mejora la calidad de vida y, finalmente, se promueve la cultura ambiental.

El presente libro ilustra en forma práctica los métodos de cálculo de dimensionamiento para los diferentes tipos de lagunas. Se describe a detalle un proyecto tomando en cuenta diferentes condiciones de diseño y se indican los resultados de cuatro diferentes arreglos. Con el propósito de comprender perfectamente los criterios de diseño, se consideró un proyecto adicional, de tal forma que el estudiante o ingeniero sanitario desarrolle el cálculo. De igual forma, se incluyeron los diferentes tipos de microorganismos que intervienen en el tratamiento de las aguas residuales con base en lagunas de estabilización.

Estos sistemas de tratamiento generalmente se construyen en pequeñas comunidades; sin embargo, también es posible considerarlos para ciudades medias de hasta 200 mil habitantes. No obstante que los sistemas lagunares absorben en parte los picos de materia orgánica y de gasto en el influente, es recomendable considerar, como se señala en los primeros capítulos, la implementación de un control de descargas de aguas residuales de procesos industriales, comerciales y de servicios. Lo anterior favorecerá la adecuada operación del sistema de tratamiento, de tal manera que la concentración de materia orgánica no sobrepase la de diseño.

Otros beneficios importantes con el control de descargas es la protección del sistema de drenaje sanitario y alcantarillado.

Cuando se diseñe para ciudades medias es recomendable considerar el sistema lagunar en paralelo, con el propósito de realizar el desazolve de lodos. De esta forma es posible evitar la diminución del tiempo de retención en la laguna anaerobia, ya que el tratamiento no se lleva a cabo adecuadamente, repercutiendo en el incremento de la concentración de contaminantes en el efluente del sistema de tratamiento.

Para que un sistema de tratamiento funcione adecuadamente, es necesaria la participación de la sociedad en general, empresarios, académicos y el personal de organismos operadores de agua.

Otro punto importante en el dimensionamiento de lagunas de estabilización es el diseño del sistema de pretratamiento: canal de aproximación, rejilla para retención de sólidos gruesos, medidor de flujo y canales desarenadores. Dichos diseños no forman parte del presente libro.

9
Referencias

Abbas, H., Nasr, R. and Seif, H. (2006). Study of Waste Stabilization Pond Geometry for Wastewater Treatment Efficiency. Ecol. Eng. 28: 25-34.

Arceivala, S. J. (1981). *Wastewater Treatment and Disposal. Engineering and Ecology in Polution Control.* Marcel Dekker, Inc. Nueva York.

Arthur J. P. (1983). *Notes on the Design and Operation and Waste Stabilization Ponds and Warm Climates of Developing Countries.* The World Bank, Washington D. C. USA.

Banda, C. G. (2007). *Computational Fluid Dynamics Modelling of Baffled Waste Stabilization Ponds* (Doctoral dissertation, University of Leeds).

Cetesb (1989). *Companhia de Tecnologia de Saneamiento Ambiental. Operacao e Manutencao de Lagoas Anaeróbicas e Facultativas.* Serie "Manuais". Sao Paulo.

Conagua (1994). *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Sistemas alternativos de aguas residuales y lodos producidos.* Libro II. 150 pp.

Conagua/IMTA (2007a). *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Manual de diseño de lagunas de estabilización.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos. México.

Conagua/IMTA (2007b). *Lagunas de estabilización. En Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Paquetes tecnológicos para el tratamiento de excretas y aguas residuales en comunidades rurales.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos. México.

Conagua/IMTA (2007c). *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos. México.

Conagua/IMTA (2007d). *Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos. México.

Collí, J.; Rico, M.; Rivas, A.; Escalante, V. y Luyendijk, R. (1992). *Manual simplificado para el diseño, operación y evaluación de lagunas*

de estabilización de aguas residuales. IMTA, México, DF, 52 pp.

Cortés, F.; Betancourt, F. y Medrano, J. (2010). Control inicial en la descarga de aguas residuales industriales y comerciales. *Conciencia Tecnológica.* 39: 43-49.

Cortés, F.; Luévanos, A.; Luévanos, R.; Uranga, C. A.; Ávila, C. M. y González, J. L. (2011). Diseño de lagunas de estabilización en serie con diferentes configuraciones. (Caso Comarca Lagunera, estado de Durango, México). *Arquitectura e Ingeniería*. EMPAI, 05-03, 2-16.

Cortés, F.; Luévanos, R.; Uranga C. A.; Martínez, F. y Ávila C. M. (2012). Diseño de lagunas de estabilización con diferente número de mamparas (Caso de estudio). *Revista Investigaciones Científicas UNERMB (NE)* Vol. 3, Núms. 1 y 2, 2012, 9/24.

Cortés, F.; Treviño, A.; Luévanos, A. y Luévanos, R. (2013). Mathematical Model for the Optimization of the Design of a Facultative Pond (Case Study). *Far East Journal of Mathematical Sciences (FJMS)*. Vol. 81, issue 1, 127-145.

Cortés, F.; Treviño, A.; Luévanos, A.; Luévanos, R. y Uranga, C. A. (2014a). Función objetivo en el diseño de la laguna facultativa (Caso de estudio). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas,* abril-mayo, 433-447.

Cortés, F.; Treviño, A.; Kalashnikov, V. y Luévanos, R. (2014b). Mathematical Analysis for the Optimization of a Design in a Facultative Pond: Indicator Organism and Organic Matter. *Mathematical Problems in Engineering.* Vol. 2014, Article ID 652509, 12 pages, 2014. doi:10.1155/2014/652509.

Cortés-Martínez, F., Treviño-Cansino, A., Alcorta-García, M. A., Sáenz-López, A., & González-Barrios, J. L. (2015). Optimización en el diseño de lagunas de estabilización con programación no lineal. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(2), 85-100.

Crites, R. y Tchobanoglouus, G. (2000). *Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados.* Tomo 2. Mc Graw Hill, Colombia, 552 pp.

Csuros, M. y Csuros, C. (1999). *Microbiológical examination of Water and Wastewater.* CRC Press LLC. USA, 324 pp.

Diario Oficial de la Federación (1997). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996* que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas en aguas y bienes nacionales, México.

Diario Oficial de la Federación (1998a). *Norma Oficial Mexicana NOM-002-Semarnat-1996* que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de Alcantarillado urbano o municipal, México.

Diario Oficial de la Federación (1998b). *Norma Oficial Mexicana NOM-003-Semarnat-1997* que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público, México.

Diario Oficial de la Federación (2001). NMX-AA-028-SCFI-2001. Análisis de agua - determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO5) y residuales tratadas - método de prueba, México.

Diario Oficial de la Federación (2001). NMX-AA-030-SCFI-20001. Análisis de agua - medición de la demanda química de oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- método de prueba - parte 1 - método de reflujo abierto, México.

Diario Oficial de la Federación (2006). NMX-AA-102-SCFI-2006. Calidad del agua- Detección y enumeración de organismos coliformes, organismos coliformes termotolerantes y Escherichia coli presuntiva - Método de filtración en membrana. México.

Diario Oficial de la Federación (2012). NMX-AA-113-SCFI-2012. Análisis de agua - Medición del número de huevos de Helminto en aguas residuales y residuales tratadas por observación microscópica - Método de prueba, México.

EPA (1994). Environmental Protection Agency. Guía, procedimientos y pautas recomendadas para establecer e implementar un programa de pretratamiento, USA.

EPA (1999). Environmental Protection Agency. Curso control de descargas a las redes de alcantarillado municipal. (Pretratamiento de aguas residuales para funcionarios mexicanos), USA.

Feachem, R. G., McGarry, M. & Mara, D. (1977). *Water Wastes and Health in Hot Climates.* John Wiley Sons, 8, 399 pp.

Gloyna, E. E. (1971). *Waste Stabilization Ponds.* World Health Organization, Geneva, 175 pp.

Guevara, V. A. (1996). *Propuesta metodológica. Evaluación de lagunas de estabilización.* (OMS/Cepis/OPS). Lima, Perú. Disponible en: http://www.cepis.org.pe/bvsacd/scan2/031278/031278-a.pdf

Horan, N. J. (1990). *Biological Wastewater Treatment Systems. Theory and Operation.* John Wiley and Sons, 309 pp.

Inegi (sin fecha). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. *Marco Geoestadístico Nacional, México.* Disponible en:
http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geoestadistica/consulta_localidades.aspx

Kalbermatten, J. M.; Julius D. S.; Gunnerson Ch. G. & Duncan, M. D. (1982). *Appropiate Technology for Water Supply and Sanitation.* A Sanitation Field Manual. World Bank Studies in Water and Sanitation 2, USA.

Kilani, J. S. and Ogunrombi, J. A. (1984). Effects of Baffles on the Performance of Model Waste Stabilization Ponds. *Water Res*. 18: 941-944.

Lara, J. L. (1991). *Alcantarillado.* Facultad de Ingeniería. División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica. Departamento de Ingeniería Sanitaria. UNAM, México.

Lloyd, B. J., Vorkas, C. A., y Guganesharajah, R. K. (2003). Reducing Hydraulic Shortcircuiting in Maturation Ponds to Maximize Pathogen Removal using Channels and Wind Breaks. *Water Science and Technology,* 48 (2), pp. 153-162.

López, R. A. (2003). *Población de diseño en elementos de diseño para acueductos y alcantarillados,* 2ª ed., Colombia, pp. 35-49.

Lothar, H. M. (1980). Curso para ingenieros sobre operación y mantenimiento de lagunas de estabilización de aguas residuales (OPS/OMS). Lima, Perú. Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/011634/011634-II-02.pdf

Mara, D. y Silva, A. (1979). Sewage Treatment in Waste Stabilization Ponds. *Progress in Water Technology,* 11(12), 341-344.

Mara, D. (1976). *Sewage Treatmen in Hot Climates.* John Wiley & Sons, London.

Mara, D. (1987). Waste Stabilization Ponds: Problems and Controversies. *Water Quality International,* (1), 20-22.

Mara, D. (1997). *Design Manual for Waste Stabilization Ponds in India.* Lagoon Technology International Ltd., Leeds, England.

Mara, D. (2001). Appropriate Wastewater Collection, Treatment and Reuse in Developing Countries. P*roceedings of the Institutions of Civil Engineers, London.* pp. 299-303.

Mara, D. D. y Pearson, H. W. (1998). *Waste Stabilization Ponds: Design Manual for Mediterranean Europe.* Lagoon Technology International Ltd. Leeds, England.

Mara, D.; Alabaster, G. P.; Pearson, H. W. & Mills, S. W. (1992). *Waste Stabilization Ponds: A Design Manual for Eastern Africa.* Lagoon Technology International. Leeds, England.

Mara, D.; Pearson, H. W.; Oragui, J. I.; Arridge, H. & Silva, A. (2001). *Development of a New Approach to Waste Stabilization Pond Design.* School of Civil Engineering, University of Leeds, Leeds, England.

Marais, G. V. R. (1974). Fecal Bacterial Kinetics in Waste Stabilization Ponds". *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, 100 (EE1), 119-139.

McGarry, M. G y Pescod, W. B. (1970). Stabilization Pond Design Criteria for Tropical Asia. *In Proceedings of the Second International Symposium on Waste Treatment Lagoons.* Ed. R. E. McKinney. Laurence, KS: University of Kansas, 114-132.

Martínez, A. (2003). *Análisis comparativo de criterios de diseño de lagunas de estabilización para ciudades pequeñas y medianas.* Tesis. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura. Unidad Zacatenco, IPN.

Martínez, F. C., Cansino, A. T., López, A. S., Barrios, J. L. G., & de la Cruz Acosta, F. J. (2016). Mathematical modeling and optimization in the design of a maturation pond. *Journal of Applied Research and Technology, 14*(2), 93-100.

Metcalf & Eddy (1991). *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal Reuse.* McGraw-Hill, 3a ed., USA.

Milddlebrooks, E. J. y Crites, R. (1988). *Natural Systems for Waste Management and Treatment.* Chapter Four, Mc Graw-Hill, USA.

Muttamara, S. & Puetpaiboon, U. (1996). Nitrogen Removal in Baffled Waste Stabilization Ponds. *Water Sci.* Technol. 33: 173-181.

Muttamara, S. & Puetpaiboon, U. (1997). Roles of Baffles in Waste Stabilization Ponds. *Water Sci. Technol*. 35: 275-284.

Oakley, S. M. (2005). Lagunas de estabilización en Honduras. *Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad,* USA.

Pearson, J. (2000). The Hydraulic Performance of Ponds of Various Layouts. *Urban Water*. 2: 243-250.

Pedahzur, R.; Nasser, A. M.; Dor, I.; Fattal, B. & Shuval, H. I. (1993).The Effect of Baffle Installation on the Performance of a Single-cell Stabilization Pond. *Water Science and Technology,* Vol. 27. Available in: http://www.iwaponline.com/wst/02707/wst027070045.htm

Polpraset, C. y Agarwalla, K. (1994). A Facultative Pond Model incorporating Biofilm Activity. *Water Environment Research.* 66: 725-732. Gran Bretaña.

Rojas, F. y León, G. (1990). *Lagunas facultativas en serie y en paralelo. Criterios de Dimensionamiento.* (OMS/Cepis). Lima, Perú. Disponible en: http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext/repind42/lagunas/lagunas.html

Rolim, M. S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización. Cómo utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío.* (OPS/OMS), McGraw-Hill, Colombia.

Romero, J. A. (1999). *Tratamiento de aguas residuales por lagunas de estabilización*. Ed. Alfa Omega, México.

Sáenz F. R. (1976). Diseño de lagunas de estabilización. *Manual del curso sobre lagunas de estabilización*. Universidad Autónoma de Santo Domingo. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. República Dominicana, p. 112.

Sáenz, F. R. (1985). *Lagunas de estabilización y otros sistemas simplificados para el tratamiento de aguas residuales*. Serie DTIAPA BID/OPS/OMS Manual C-14, 137.

Sáenz, R. (1987). *Predicción en la calidad del efluente en lagunas de estabilización.* Hojas de Divulgación Técnica. (Cepis) Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt 038.html

Sáenz, R. (2000). *Consideraciones en relación con el uso de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales.* Hojas de Divulgación Técnica. (Cepis) Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt33/hdt33.html

Shilton, A. & Harrison, J. (2003). *Guidelines for the Hydraulic Design of Waste Stabilization Ponds.* Institute of Technology and Engineering, Massey University, Palmerston North, New Zealand.

Shilton, A. & Mara, D. (2005). CFD (computational fluid dynamics) Modeling of Baffles for Optimizing Tropical Waste Stabilization Ponds System. *Water Sci.* Technol. 51: 103-106.

Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (1979). *Normas de proyecto para obras de aprovisionamiento de agua potable en localidades urbanas de la República Mexicana.* Subsecretaría de Bienes Inmuebles y Obras Urbanas. Dirección General de Construcción de Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado, México.

Sperling, M., Chernicharo, C. A. L., Soares, A. M. E., & Zerbini, A. M. (2002). Coliform and helminth eggs removal in a combined UASB reactor–baffled pond system in Brazil: performance evaluation and mathematical modelling. *Water Science and Technology,* 45(10), 237-242.

Sperling, M.; Chernicharo, C. A. L.; Soares, A. M. E. & Zerbini, A. M. (2003). Evaluation and Modelling of Helminth Eggs Removal in Baffled and Unbaffled Ponds Treating Anaerobic Effluent. *Water Sci. Technol.* 48: 113-120.

Thirimurthy, D. (1969). Design Principle of Waste Stabilization Ponds. *Journal of the Sanitary Engineering Division.* ASCE. Vol. 95 No. SA2, 311-329.

Valdez, E. C. (1990). Población de proyecto. *En Abastecimiento de agua potable.* Facultad de Ingeniería. División de Ingeniería Civil Topografía y Geodésica. Departamento de Ingeniería Sanitaria. UNAM, México.

Yánez, C. F. (1983). Manual de métodos experimentales. Evaluación de lagunas de estabilización. (OMS/Cepis). Serie Técnica (24). Lima, Perú. Disponible en: http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/012837/012837.htm

Zanotelli, C. T.; Medri, W.; Belli-Filho, P.; Perdomo, C. C. & Costa, R. H. R. (2002). Performance of a Baffled Facultative Pond Treating Piggery Wastes. *Water Sci. Technol*. 45: 49-53.

IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

Universidad Juárez
del Estado de Durango