

LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN HONDURAS

Manual de Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento, Monitoreo y Sostenibilidad

por
Stewart M. Oakley
Consultor de Ingeniería Sanitaria
Profesor/Investigador de Ingeniería Ambiental
Universidad Estatal de California

Junio 2005



FINANCIAMIENTO

Proporcionado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, por sus siglas en inglés). Las opiniones aquí expresadas son las del autor y no reflejan necesariamente las opiniones de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional.

(www.usaid.gov/hn)

CONTENIDO

RECONOCIMIENTO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
CAPITULO 1: INTRODUCCION.....	1
1.1 La Situación Mundial de Agua Potable y Saneamiento	1
1.2 La Situación de Agua y Saneamiento en América Latina y América Central.....	2
1.3 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN.....	6
<i>1.3.1 Remoción de Patógenos y Parámetros Convencionales.....</i>	<i>6</i>
<i>1.3.2 Simplicidad de Lagunas.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3.3 Bajo Costo.....</i>	<i>7</i>
<i>1.3.4 Mínimo Manejo de Lodos</i>	<i>8</i>
<i>1.3.5 Complejidad del Proceso y Requisitos de Operación y Mantenimiento.....</i>	<i>9</i>
<i>1.3.6 Estabilidad y Resiliencia de Procesos</i>	<i>9</i>
<i>1.3.7 Requisitos del Terreno</i>	<i>10</i>
1.4 La Remoción de Patógenos en Lagunas de Estabilización y el Potencial para Reuso....	10
<i>1.4.1 Los Factores Epidemiológicos y Ambientales de Patógenos</i>	<i>11</i>
<i>1.4.2 El Reuso de Aguas Residuales</i>	<i>16</i>
1.5 Propósito del Manual.....	17
CAPÍTULO 2: RESULTADOS DEL PROYECTO DE MONITOREO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION EN HONDURAS	18
2.1 Introducción	18
2.2 Alcance del Proyecto.....	18
2.3 Metodología	19
<i>2.3.1 Recolección de la información y toma de muestras.....</i>	<i>19</i>
<i>2.3.2 Parámetros Analizados y Tipo de Muestreo</i>	<i>19</i>
<i>2.3.3 Medición de Caudales.....</i>	<i>19</i>
<i>2.3.4 Topografía y Batimetría.....</i>	<i>20</i>
<i>2.3.5 Muestreo</i>	<i>20</i>
2.4 Resultados.....	22
<i>2.4.1 Caudales, Dotaciones, Tiempos de Retención Hidráulica, Cargas Orgánicas.....</i>	<i>22</i>
<i>2.4.2 Remoción de Huevos de Helminetos.....</i>	<i>24</i>
<i>2.4.3 Remoción de Coliformes Fecales y Escherichia coli.....</i>	<i>26</i>
<i>2.4.4 Monitoreo de Especies de Shigella</i>	<i>27</i>

2.4.5 Remoción de Parámetros Convencionales: DBO_5 y SS.....	31
2.4.6 Características Físico-Químicas de los Lodos	33
2.4.7 Observaciones de Condición Física, Operación y Mantenimiento, y Sostenibilidad.....	33
2.5 Lecciones Aprendidas y Recomendaciones	37
2.5.1 Funcionamiento de Sistemas y Diseño de Procesos	37
2.5.2 Diseño Físico y Construcción	38
2.5.3 Operación y Mantenimiento	38
2.5.4 Sostenibilidad.....	39
CAPITULO 3: PRETRATAMIENTO Y MEDICIÓN DE CAUDALES.....	40
3.1 Introducción	40
3.2 Remoción de Sólidos Gruesos: Rejillas	40
3.2.1 Diseño de Rejillas	45
3.2.2 Dimensionamiento de Rejillas y el Canal de Aproximación	49
3.2.3 Disposición Final de los Sólidos Gruesos	51
3.3 Remoción de Sólidos Arenosos: Desarenadores.....	53
3.3.1 Ecuaciones de Canaletas Parshall de Flujo Libre para el Diseño de Desarenadores ...	54
3.3.2 Ecuaciones del Desarenador Rectangular	62
3.3.3 Disposición Final de los Sólidos Arenosos.....	66
3.4 Procedimiento para el Diseño de Pretratamiento con Canaleta Parshall	66
3.5 Ejemplo 3-1: Diseño de Sistema de Pretratamiento para las Lagunas de Catacamas Este	69
3.6 Pozos de Colección de Sólidos Arenosos.....	72
CAPÍTULO 4: TEORIA DE DISEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION.....	74
4.1 Clasificación de Lagunas y Estrategias de Diseño	74
4.2 Lagunas Anaeróbicas.....	78
4.3 Lagunas Facultativas	83
4.3.1 La Carga Orgánica Superficial por el Método de Radiación Solar.....	83
4.3.2 Efectos de Viento y Temperatura en el Diseño de Lagunas Facultativas	86
4.3.3 El Dimensionamiento de Lagunas Facultativas	88
4.3.4 Acumulación de Lodos en Lagunas Facultativas	89
4.3.5 Remoción de Coliformes Fecales y <i>Escherichia coli</i> en Lagunas Facultativas	90
4.4 Lagunas de Maduración para Remoción de Patógenos	90
4.4.1 El Uso de Mamparas para Modelar Flujo de Tipo Pistón y Mejorar el TRH Promedio	90
4.4.2 TRH Nominal Mínima en Lagunas Facultativas y de Maduración	91

CAPITULO 5: NORMAS Y PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE PROCESO	99
5.1 Normas de Diseño	99
5.2 Procedimientos de Diseño del Proceso de un Sistema de Lagunas.....	99
5.3 Ejemplo del Diseño de Proceso: Una Batería de Lagunas Facultativas Seguida en Serie de una de Maduración para Catacamas Este, Honduras.....	102
CAPITULO 6: DISEÑO FISICO Y ASPECTOS DE CONSTRUCCION	106
6.1 Introducción	106
6.2 Selección del Terreno.....	106
6.3 Investigaciones Geotécnicas	106
6.4 Balance Hídrico.....	111
6.5 Pretratamiento y Medición de Caudales.....	115
6.6 Flujo Hidráulico	115
6.7 Estructuras Hidráulicas	124
6.7.1 <i>Dispositivos de Repartición</i>	124
6.7.2 <i>Entradas y Salidas</i>	124
6.7.3 <i>Dispositivos de Descarga Final.....</i>	130
6.7.4 <i>Dispositivos de Drenaje en Lagunas Facultativas</i>	132
6.7.5 <i>Vertederos de Demasías y Canales de Desvío y Escurrimiento</i>	132
6.8 Terraplén y los Taludes	134
6.8.1 <i>Taludes Interiores</i>	134
6.8.2 <i>Taludes Exteriores</i>	137
6.8.3 <i>Terraplén y Rampas de Acceso</i>	137
6.8 Cercos.....	139
6.9 Caseta de Operación	139
CAPÍTULO 7: OPERACION Y MANTENIMIENTO.....	142
7.1 Introducción	142
7.2 Manual de Operación y Mantenimiento	142
7.3 Operación Básica	143
7.3.1 <i>Puesta en Marcha de una Laguna</i>	143
7.3.2 <i>Medición de Caudales.....</i>	143

7.3.3 Control de Niveles del Agua	144
7.3.4 Vertederos de Demasías	144
7.3.5 Ajustamiento del Nivel de Descarga con la Compuerta de Fondo de Salidas	144
7.3.6 Detecciones Sensoriales: Olores y Colores	144
7.3.7 Medición de la Profundidad de Lodos	145
7.4 Mantenimiento Rutinario.....	145
7.4.1 Rejillas	145
7.4.2 Desarenadores	145
7.4.3 Remoción de Natas y Sólidos Flotantes	148
7.4.4 Céspedes, Vegetación y Malezas	148
7.4.5 Mosquitos, Moscas, Roedores y Otros Animales	148
7.4.6 Taludes	157
7.4.7 Cercos y Caminos	157
7.4.8 Implementos y Herramientas de Mantenimiento	157
7.5 Registros de Campo de la Operación Básica y Mantenimiento Rutinario.....	157
7.6 Operación para el Control del Funcionamiento: Monitoreo Analítico.....	157
7.6.1 Programa de Muestreo y Pruebas de Laboratorio.....	161
7.6.2 Presentación e Interpretación de los Resultados de Programas de Monitoreo	161
7.7 Remoción de los Lodos en Lagunas Facultativas.....	167
7.8 Personal Requerido.....	167
7.9 Medidas Higiénicas para Operadores.....	168
7-10 Problemas Operativos y su Solución.....	170
7.10.1 Señales del Buen Funcionamiento de las Lagunas Facultativas y de Maduración	170
7.10.2 Problemas del Funcionamiento en Lagunas Facultativas y de Maduración	170
7.10.3 Acumulación de Natas y Materiales Flotantes	172
7.10.4 Malos Olores.....	172
7.10.5 Coloraciones Anormales.....	172
7.10.6 Crecimiento de Malezas.....	173
7.10.7 Mosquitos y Otros Insectos	173
CAPITULO 8: REMOCIÓN DE LODOS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	175
8.1 Introducción	175
8.2 Etapas Esenciales en la Remoción de Lodos de Lagunas Primarias.....	175
8.2.1 Etapa 1: Estimación del Volumen de Lodos por Caudales, Concentraciones, y Años de Operación	175
8.2.2 Etapa 2: Medición del volumen de lodos a través de estudios de batimetría.....	178
8.2.3 Etapa 3: Caracterización Física-Química y Microbiológica de Lodos	179
8.2.4 Etapa 4: Estimación del Tiempo de Secado de Lodos.....	181

8.2.5 Etapa 5: Plan de Trabajo Usando el Método de Secado y Remoción con Equipo	186
8.3 Estudio de Caso: Remoción de Lodos de las Lagunas Primarias de Villanueva, Cortés	189
8.3.1 Antecedentes	189
8.3.2 Resultados de Estudio de Batimetría	189
8.3.3 Caracterización Física-Química y Microbiológica de los Lodos.....	193
8.3.4 Estimación del Tiempo de Secado y Volumen Final de Lodos	194
8.3.5 Plan de Trabajo	197
8.3.6 Comentario	199
8.4 Otros Métodos para Remover los Lodos Acumulados	199
8.5 Remoción de Lodos en las Lagunas de Estabilización en Estelí, Nicaragua	201
REFERENCIAS.....	205
ANEXO I: INVENTARIO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN HONDURAS ...	210
ANEXO II: RECOMENDACIONES DEL COMITÉ TÉCNICO CONSEJERO SOBRE EL PROYECTO DE MONITOREO.....	212
ANEXO III: TÉCNICA PARA LA DETERMINACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE HUEVOS DE HELMINTOS	219
ANEXO IV: EXPERIENCIAS EN EL RETIRO DE LODOS EN LAS LAGUNAS EN ESTELÍ, NICARAGUA	224

RECONOCIMIENTO

El autor quiere agradecer la contribución de las siguientes personas y entidades en la realización de este manual por su ayuda en las visitas a instalaciones, su asistencia técnica o su revisión crítica del borrador.

A la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), por su permanente interés y preocupación en aportar tecnologías adecuadas, para el mejoramiento de la calidad de vida de los hondureños y la protección de la salud pública y el medio ambiente.

Honduras: Ing. Mauricio Cruz, USAID-Honduras; Ings. Terencio Cruz, Janeth Munguia, Iván Olivieri, Manuel Padilla, Juan Parodi, y Carlos Selva, Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU.; Ings. Luis Eveline y Victor Ponce, ECOMAC; y personal de las Municipalidades de Catacamas, La Ceiba, Danlí, Puerto Cortés, Roatán, Tela, Trinidad, y Villanueva. También el autor agradece el apoyo del Ing. Humberto Puerto y la Señora Liliana García Sú de la Red Regional de Agua y Saneamiento de Centro América (RRAS-CA) en la publicación del Manual.

Guatemala: Ing. Adán Pocasangre, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria, Universidad de San Carlos; Ing. Doreen Salazar, Programa Ambiental Regional para Centroamérica (PROARCA).

Nicaragua: Ings. Arturo Coco, Italo Gandini, e Ivette Morazán, Proyecto Integrado Estelí-Ocotol, Programa Regional para la Reconstrucción de América Central (PRRAC).

Perú: Ings. Luis Moscoso y Sergio Rolim, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).

EE.UU.: El autor agradece la ayuda de la Lic. Gina Herun por su asistencia en la preparación de algunas de las gráficas, y el Ing. José Luquín por su revisión del borrador.

El autor acepta toda la responsabilidad por cualquier error en el manuscrito.

Este trabajo fue preparado gracias al apoyo financiero del Proyecto de Desarrollo Municipal financiado por USAID-Honduras y administrado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EE.UU., ya que sin ese apoyo la realización de este Manual no hubiese sido posible.

Finalmente, el autor desea añadir que realizó esta segunda edición del manual con el sincero deseo de mejorar el diseño, operación y mantenimiento, monitoreo y la sostenibilidad de las lagunas de estabilización en Honduras.

El autor espera que este manual sea una herramienta de mucha utilidad para las instituciones, organizaciones y profesionales y sobre todo, para el Fondo de Inversión Social (FHIS), institución que tiene la responsabilidad de brindar apoyo a las municipalidades, para una buena operación y mantenimiento que garantice la sostenibilidad.

Stewart Oakley
Chico, California
EE.UU.
Junio 2005

CAPITULO 1: INTRODUCCION

1.1 La Situación Mundial de Agua Potable y Saneamiento

Durante la década de los 1990s la Organización Mundial de Salud y UNICEF formaron el Programa de Monitoreo de Agua y Saneamiento, con el propósito de mejorar planificación y manejo de agua y saneamiento a escala mundial. En su último informe se concluye lo siguiente (WHO/UNICEF, 2000):

1. A escala mundial aproximadamente 1.1 billones de personas carecen de acceso a agua potable.
2. Aproximadamente 2.4 billones de personas no tienen acceso a saneamiento adecuado.
3. Enfermedades relacionadas a las excretas humanas son la causa principal de morbilidad y mortalidad a escala mundial:
 - a. Cada año hay aproximadamente 4 billones de casos de diarrea, que causan 2.2 billones de muertes, en su mayoría niños, de enfermedades relacionadas con falta de agua potable, saneamiento inadecuado, y mala higiene.
 - b. Helmintos intestinales infectan aproximadamente 1.1 billones de personas en el mundo, la gran mayoría en países de desarrollo.
 - c. Las infecciones de protozoarios probablemente exhiban una prevalencia parecida a los helmintos, y las infecciones de *Entamoeba histolytica* representan algunas de las infecciones más comunes en el mundo (Savioli, *et al.*, 1992).
4. Falta de tratamiento de aguas residuales domésticas es un peligro a la salud en todos los países en desarrollo. El porcentaje de aguas residuales reportado para ser tratado de cualquier método es estimado así:

Región Geográfica	Asia	América Latina y Caribe	África	Canadá y EE.UU.	Europa
Población en año 2000, billones	3.68	0.52	0.78	0.31	0.73
Porcentaje mediano de descargas de aguas residuales que reciben cualquier tipo de tratamiento.	35	14	0	90	66

5. La descarga de aguas residuales crudas es un peligro a la salud pública especialmente cuando se utilizan los cuerpos receptores contaminados como fuente de agua potable, para aseo personal, lavado de ropa, riego y pesquería.
6. La tecnología desarrollado en los EE.UU. y Europa para tratar aguas residuales, como lodos activados, no necesariamente provee el nivel mínimo de remoción de patógenos para la protección de la salud pública en países en desarrollo.

Tomando en cuenta esta situación en los países en desarrollo, los profesionales que trabajan en estos países—ingenieros sanitarios, médicos, microbiológicos, trabajadores en salud pública y administradores—han concluido hace años que el objetivo principal de aguas residuales donde las infecciones relacionadas a las excretas humanas son endémicas debe ser la remoción de patógenos (Cairncross y Feachem, 1992; CEPIS/OPS, 2000; Egocheaga y Moscoso, 2004; Feachem, et al., 1983; León y Moscoso, 1996; Mara, 1996; Rolim, 2000; Shuval, et al., 1986; WHO/UNICEF, 2000).

Este enfoque en la remoción de patógenos es distinto de los objetivos históricos de tratamiento de aguas residuales en los países industrializados, y los profesionales en estos países generalmente no lo reconocen ni lo aprecian, y por su puesto tienen tendencia a utilizar las tecnologías desarrolladas en su contexto socioeconómico. La gran mayoría de los textos de ingeniería ambiental publicada en los EE.UU. tiene como su enfoque los problemas de los EE.UU. y no de los países pobres con enfermedades endémicas que no existen en los EE.UU. Como un ejemplo de un texto con mucha influencia mundial, la cuarta edición de Metcalf y Eddy recientemente publicada ha eliminado los capítulos sobre lagunas de estabilización porque esta tecnología no es muy significativa hoy en día en los EE.UU. (Metcalf y Eddy, 2003). Sin embargo, lagunas de estabilización es la tecnología más recomendada por los mismos profesionales que trabajan en países en desarrollo (Cairncross y Feachem, 1992; CEPIS/OPS, 2000; Egocheaga y Moscoso, 2004; Feachem, *et al.*, 1983; León y Moscoso, 1996; Mara, 1996; Rolim, 2000; Shuval, *et al.*, 1986; WHO/UNICEF, 2000).

1.2 La Situación de Agua y Saneamiento en América Latina y América Central

De los 52,000,000 m³/día de aguas residuales que se recolectan en América Latina, se estima que solamente 3,100,000 m³/día, o 6%, reciben tratamiento adecuado antes de ser dispuestas en cuerpos de agua o campos agrícolas (Egocheaga y Moscoso, 2004). Encima de este problema serio, hay una tendencia en todo América Latina de usar para riego agua residual sin tratar (uso directo) o diluida con otra fuente de agua (uso indirecto); en todo América Latina hay un mínimo de 981,445 hectáreas regadas con agua residual cruda o diluida (Egocheaga y Moscoso, 2004). Las Fotos 1-1 muestran un ejemplo típico en América Latina del uso de aguas residuales para riego.

Los efectos en la salud pública de las enfermedades relacionadas a las excretas humanas han sido significativos en todo América Latina. Los siguientes ejemplos son típicos de la Región y muestran los grandes problemas relacionadas por el mal manejo de las aguas residuales que han afectado no solamente poblaciones locales sino poblaciones al nivel de todo el hemisferio:



Fotos 1-1: De todas las aguas residuales recolectadas en América Latina, se estima que solamente 6% reciben un tratamiento adecuado. Una práctica común en América Latina es el uso de aguas residuales crudas para riego agrícola: por los menos hay casi un millón de hectáreas regadas con aguas residuales sin tratamiento. En las fotos arriba un agricultor rompió la alcantarilla troncal y bombeó las aguas residuales crudas para regar sus cultivos. Esta práctica es una causa importante de morbilidad y mortalidad de enfermedades relacionadas a las excretas humanas. (Guastatoya, Guatemala)

1. La epidemia de cólera, que empezó en el Perú en 1991, produjo 1,199,804 de casos con 11,875 defunciones en los años 1991—97 en 20 países de América Latina y los EE.UU.; se estima que la epidemia costó a la economía del Perú un estimado \$US 1 billón en turismo y exportación de productos agrícolas en solo 10 semanas (OPS, 1998; Salazar, 2003). Se asume que la gran mayoría de la epidemia fue causada por la vía de agua contaminada y riego con aguas residuales crudas o diluidas (OPS, 1998). El cólera, lo que no había llegado al hemisferio occidental en más de 100 años, hoy en día es endémico en varios países de la Región.
2. Cinco epidemias en los años 1995, 1996, 1997, 1998 y 2000 en los EE.UU. y Canadá de ciclosporiasis, causado por el patógeno emergente protozoario *Ciclospora cayetanensis*, han sido relacionadas a frambuesas importadas de Guatemala (Bern, *et al.*, 1999; Ho, *et al.*, 2002). Se asume que las frambuesas fueron regadas o lavadas con aguas residuales crudas o diluidas. La ruta de transmisión principal de infección con *Ciclospora* en Guatemala es por la vía de agua (Bern, *et al.*, 1999).
3. La epidemia más grande de hepatitis A en la historia de los EE.UU. ocurrió en 2003, donde las cebollas verdes utilizadas en restaurantes fueron contaminadas con el virus y más de 700 personas en cuatro estados fueron infectadas. La fuente de las cebollas fue una o dos fincas en México, y se asume que las cebollas fueron regadas o lavadas con aguas residuales crudas o diluidas (Fiore, 2004).

En América Central las infecciones relacionadas a las excretas son endémicas y una causa principal de morbilidad y mortalidad. La epidemia de cólera causó 152,311 casos acumulados de 1991—97 en los países de El Salvador, Guatemala, Honduras, y Nicaragua (OPS, 1998). Las infecciones de parásitos intestinales son un problema serio y la prevalencia con infecciones de helmintos intestinales llega hasta más de 60% de la población en muchas áreas (OPS, 1998; Girard de Kaminsky, 1996). El Cuadro 1-1 presenta un resumen de la prevalencia de parasitismo en El Salvador, Guatemala y Honduras.

Sin duda las aguas superficiales tienen un papel significativo en la continua transmisión de enfermedades relacionadas a las excretas en América Central, especialmente la transmisión de los parásitos intestinales mostradas en el Cuadro 1-1. El nivel de tratamiento de aguas residuales descargadas a las aguas superficiales es casi nulo como se ve en el Cuadro 1-2 (Salazar, 2003), y es muy común usar aguas residuales crudas o diluidas en aguas superficiales para riego (Fotos 1-1), para aseo personal y lavar ropa, como fuente de agua potable, y para la pesca.

Cuadro 1-1: El Parasitismo en América Central

Parásito	Prevalencia en Varios Lugares de Honduras 1986—93	Prevalencia en Encuestas Comunitarias en Guatemala 1996—98	Prevalencia en Varios Lugares de El Salvador 1998
Protozoarios			
<i>Cyclospora cayatanensis</i>		6.7%	
<i>Entamoeba histolytica</i>	2—19.5%		
<i>Giardia lamblia</i>	2.8—61.0 %		
<i>Cryptosporidium</i> especies	3.6—15.0%		
Helminths			
Anquilostomas	2—6%	39.5%	12.5%
<i>Ascaris lumbricoides</i>	5—70%	31.7%	>30%
<i>Trichuris trichiura</i>	1—32%	23.3%	20%

Fuentes: Bern, *et al.*, 1999; Girard de Kaminsky, 1996; OPS, 1998.

Cuadro 1-2: Tratamiento de Aguas Residuales en Algunos Países de América Central

País	Porcentaje Estimado de Descargas de Aguas Residuales que Reciben Cualquier Forma de Tratamiento, %
Costa Rica	4
El Salvador	2
Guatemala	1
Honduras	3

Fuente: Salazar, 2003.

Como resultado, la conclusión profesional relacionada al objetivo de tratamiento de aguas residuales para los países de América Central dicta la remoción de patógenos. De hecho, las conclusiones principales de la Conferencia Regional de Intercambio de Experiencias Sobre Lagunas de Estabilización en Centroamérica, celebrado en Managua, Nicaragua en 1997, y asistido por profesionales de El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua, fueron la siguiente (Oakley, 1997):

El tratamiento de aguas residuales domésticas debe tener como objetivo en orden de prioridad:

- i. La remoción de patógenos para prevenir la transmisión de enfermedades relacionadas a las excretas humanas.
- ii. La remoción de sólidos en suspensión y material orgánico para evitar la contaminación de los cuerpos receptores.

Un estudio amplio recientemente publicado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS), llamado *Una Estrategia para la Gestión de las Aguas Residuales Domésticas*, propone que el modelo de gestión de aguas residuales en países en desarrollo debe enfocarse en la salud como prioridad, con la remoción de patógenos el objetivo principal de tratamiento (Egocheaga y Moscoso, 2004). Se propone además que para resolver el problema de la demanda de agua en el sector agrícola, y el de la sostenibilidad de cualquier sistema de tratamiento, se debe integrar el tratamiento de aguas residuales (enfocando en la remoción de patógenos) con el uso productivo de agua residual tratada (Egocheaga y Moscoso, 2004). En esta manera se convierte un problema que no se puede resolver utilizando la tecnología de los países industrializados a una solución integrada y apropiada por todos los aspectos sociales, ambientales, económicos y técnicos de América Latina. Se concluyen en el estudio que la mejor opción tecnológica para remoción de patógenos es lagunas de estabilización (Egocheaga y Moscoso, 2004).

1.3 Tratamiento de Aguas Residuales con Lagunas de Estabilización

Se han realizado muchas investigaciones sobre el uso de lagunas de estabilización para tratamiento de aguas residuales en países en desarrollo (Arceivala, *et al.*, 1970; Arthur, 1983; Cisneros, *et al.*, sin fecha; Egocheaga y Moscoso, 2004; Feachem *et al.*, 1983; León y Moscoso, 1996; Mara y Cairncross, 1989; Mara *et al.*, 1992; Rolim, S., 2000; Shuval *et al.*, 1986; Yáñez, 1992). Los resultados muestran claramente que las lagunas pueden tratar aguas residuales a un alto nivel—tanto en la remoción de patógenos como en la de compuestos orgánicos—requiriendo mínimos recursos para su diseño, construcción, operación, y mantenimiento. El diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales en América Latina y en países en desarrollo no debe ser similar a lo de países industrializados, donde se basa el diseño en la reducción de compuestos orgánicos para proteger los cuerpos receptores con poca o ninguna atención a los aspectos de salud pública, especialmente a la remoción de los patógenos. Dado que una de las principales causas de mortalidad y morbilidad es la de enfermedades relacionadas a las excretas humanas en América Latina, se concluye que los procedimientos de diseño de países industrializados no son adecuados y que el diseño debe enfocarse fundamentalmente en la remoción de patógenos conjuntamente con el posible reuso de los efluentes en agricultura o acuicultura como un recurso sostenible.

1.3.1 Remoción de Patógenos y Parámetros Convencionales

El Cuadro 1-3 presenta un resumen de los varios procesos de tratamiento de aguas residuales en términos de remoción de patógenos y los parámetros convencionales de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y sólidos suspendidos (SS) (Feachem *et al.*, 1983; Mara *et al.*, 1992; Yáñez, 1992). Se ve claramente que las lagunas de estabilización es la mejor opción para la remoción de patógenos: Las lagunas de estabilización que están diseñadas y operadas apropiadamente tienen la mejor eficiencia en la remoción de virus, bacteria, y especialmente huevos de helmintos y quistes de protozoarios. Todos los otros procesos requieren desinfección como un proceso terciario para obtener una remoción de bacterias o virus igual a la que las lagunas pueden alcanzar mediante un proceso secundario; además, el cloro no puede matar totalmente los huevos de helmintos y los quistes de protozoarios. La laguna es el único proceso que, como un proceso secundario, puede producir efluentes de una calidad que puede utilizarse para el riego en la agricultura o para la fuente de agua en acuicultura.

**Cuadro 1-3:
Eficiencia de Remoción de Patógenos y Parámetros Convencionales para Varios Procesos**

Proceso	Remoción, %		Remoción, Ciclos log ₁₀ ⁴			
	DBO ₅	SS	Virus	Bacteria	Huevos de Helmintos	Quistes de Protozoarios
Sedimentación primaria	25—40	40—70	0—1	0—1	0—1	0—2
Lodos activados ¹	55—95	55—95	1—2	0—2	0—1	1—2
Filtros percoladores ¹	50—95	50—90	1—2	0—2	0—1	1—2
Desinfección con cloro	---	---	0—4	2—6	0—1	0—3
Lagunas en serie ²	70—95	55—95 ³	2—4	2—6	2—4 (100%)	2—4 (100%)

1. Precedidos y seguidos de sedimentación

2. Dependiendo del número de lagunas en serie, tiempo de retención hidráulica, y factores de diseño físico.

3. El efluente de lagunas puede contener altas concentraciones de SS en forma de algas.

4. 1 ciclo log₁₀ = 90% remoción; 2 ciclos = 99%; 3 ciclos = 99.9%; etc. Las lagunas pueden remover 100% de los huevos de helmintos y 100% de los quistes de protozoarios.

Fuentes: Feachem *et al.*, 1983; Mara *et al.*, 1992; Yáñez, 1992.

Además de la remoción de patógenos, la remoción de DBO₅ y SS puede ser tan alta como en cualquier otro proceso si la laguna está diseñada y operada adecuadamente y si se considera que los sólidos en el efluente son algas producidas en la laguna y no los sólidos suspendidos de las aguas residuales originales que entran el sistema.. Se presenta otras ventajas de las lagunas de estabilización a continuación (Mara *et al.*, 1992).

1.3.2 Simplicidad de Lagunas

Las lagunas son más sencillas de diseñar, construir, operar y mantener que cualquier otro proceso de tratamiento. La excavación es la actividad principal en la construcción. La construcción de obras civiles es mínima: solamente estructuras de ingresos, interconexiones, salidas, y el revestimiento de los taludes interiores. La operación y mantenimiento consiste normalmente en tareas de rutina como el corte de vegetación en la orilla y en el dique, remoción de natas y sólidos flotantes, la medición diaria del caudal, y el monitoreo periódico del afluente y efluente.

1.3.3 Bajo Costo

Las lagunas cuestan mucho menos que los otros procesos de tratamiento. El equipo requerido se puede obtener localmente; las plantas de lodos activados, por ejemplo, requieren de la importación de equipo mecanizado y piezas de repuesto costosas. El consumo de energía es

mínimo; por ejemplo, para una población de 10,000 personas, una planta de lodos activados puede consumir 1,000,000 kW-hrs/año, mientras que una serie de lagunas de estabilización no consumiría ninguna energía eléctrica (Mara *et al.*, 1992).

1.3.4 Mínimo Manejo de Lodos

El costo mayor en operación de plantas secundarias de tratamiento de aguas residuales con sedimentación primaria y secundaria es el manejo de los lodos producidos. Una ventaja fundamental en el uso de lagunas es el hecho que se producen menos lodos que cualquier otro proceso como se presenta en el Cuadro 1-4. Porque los lodos quedan en la laguna primaria por años en vez de horas o días como en los otros procesos, se consolidan con tiempo y ocupan menos volumen poco a poco (Nelson, *et al.*, 2004).

Porque todos los lodos de cualquier proceso estarán muy contaminados con huevos de helmintos, quistes de protozoarios, y otros patógenos bacterianos y de los virus, la otra ventaja importante es el mínimo manejo de lodos producidos, con menos concentraciones de patógenos en los lodos por su edad. Una planta de filtros percoladores o lodos activados con sedimentación primaria y secundaria, y con digestión anaeróbica, tendría que remover lodos con una frecuencia de, por lo menos, cada mes, con todos los riesgos de manejar y disponer sanitariamente los lodos contaminados. En contraste, la remoción de lodos de una laguna primaria es necesaria solamente cada 5 a 10 años, con menos riesgos de patógenos porque los lodos estarán más viejos.

Cuadro 1-4: Cantidades de Lodos Producidos por Varios Procesos

Proceso de Tratamiento	Lodos Producidos (m ³ de lodos mojados por 1,000m ³ de aguas residuales tratadas)
Sedimentación Primaria	2.1—3.3
Lodos Activados	1.4—1.9
Tratamiento Secundario sin Digestión de Lodos	3.5—5.2
Tratamiento Secundario con Digestión de Lodos	2.6—3.9
Laguna Facultativa de Estabilización	0.4—0.6

Fuentes: Metcalf & Eddy, 1991; Mara y Pearson, 1998.

1.3.5 Complejidad del Proceso y Requisitos de Operación y Mantenimiento

El Cuadro 1-5 presenta el nivel de complejidad de varios procesos y los requisitos de capacitación de personal y de monitoreo del proceso. Las lagunas de estabilización, por su bajo nivel de complejidad, tienen muchos menos requisitos de operación y mantenimiento de cualquier otro proceso, lo que es una ventaja clave para municipalidades con pocos recursos.

Cuadro 1-5: Complejidad y Requisitos de Capacitación y Monitoreo

Proceso de Tratamiento	Nivel de Complejidad	Nivel de Capacitación de Personal	Requerimientos de Monitoreo del Proceso
Lodos Activados	Alto	Alto	Alto
Filtro Percolador	Medio—Alto	Medio—Alto	Medio
Laguna Aireada	Medio—Alto	Medio—Alto	Medio—Alto
Sistema de Lagunas de Estabilización	Bajo	Bajo	Bajo

1.3.6 Estabilidad y Resiliencia de Procesos

Lagunas de estabilización, como resultado de su largo tiempo de retención hidráulica, lo que se mide en días en vez de horas para tecnologías más complicadas, tienen mucha más resiliencia a cargas altas orgánicas, hidráulicas, y a concentraciones altas a compuestos tóxicos como se presentan en el Cuadro 1-6. Como resultado, en muchos países industrializados se utilizan frecuentemente lagunas para tratar aguas residuales industriales por su mejor estabilidad y resiliencia.

Cuadro 1-6: Resiliencia de los Procesos de Tratamiento

Proceso	Sensibilidad a Cargas Altas de Materia Orgánica	Sensibilidad a Cargas Altas Hidráulicas	Sensibilidad a Compuestos Tóxicos
Lodos Activados	Alta	Alta	Alta
Filtro Percolador	Media	Media	Media
Laguna Aireada	Baja—Media	Baja—Media	Baja—Media
Sistema de Lagunas Facultativas	Baja	Baja	Baja

1.3.7 Requisitos del Terreno

La principal desventaja de las lagunas de estabilización es el área requerida. Generalmente, como una regla práctica, en los climas de América Central o en climas tropicales-subtropicales, se puede estimar que se necesitaría entre 2.0 a 2.5 hectáreas mínimas de lagunas para servir a una población de 10,000 habitantes. El Cuadro 1-7 muestra el área requerida para los varios procesos de tratamiento Carranza, 1997; Mara y Pearson, 1998).

Cuadro 1-7: El Área Requerida para Varios Procesos de Tratamiento

Proceso de Tratamiento	Área Requerida, (m ² /persona)
Lodos Activados	0.3—1
Filtro Percolador	0.4—1
Laguna Aireada	4—10
Sistema de Lagunas de Estabilización	2—20 ¹

1. El área requerida depende sobre el clima, el diseño, y el nivel de tratamiento requerido.

1.4 La Remoción de Patógenos en Lagunas de Estabilización y el Potencial para Reuso

Generalmente, las normas para patógenos de descargas de efluentes se expresan por las autoridades en términos de coliformes fecales como se presenta en el Cuadro 1-8. Sin embargo,

Cuadro 1-8: Normas Microbiológicas de Calidad de Efluentes para Descargas de Aguas Residuales a Cuerpos Receptores

Parámetro	El Salvador (Propuesta)	Guatemala (Propuesta)			Honduras	Nicaragua
		Límites Máximos Permisibles				
		3 Años	6 Años	9 Años		
				Concentración Máxima Permisible	Límites Máximos Permisibles	
Coliformes Fecales NMP/100mL	2,000	100,000	10,000	1,000	5,000	10,000 en 80% de una serie de muestras 50,000 en una muestra

Fuentes: El Salvador: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), 2000.
Guatemala: Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 1999.
Honduras: Ministerio de Salud, 1995.
Nicaragua: La Gaceta Diario Oficial, Decreto No. 33-95, 1995.

el coliform fecal es solamente un indicador y no un patógeno, y fue desarrollado originalmente para proteger la salud pública en agua potable (Feachem, *et al.*, 1983). Debido a que sistemas de lagunas de estabilización frecuentemente no pueden cumplir una norma de coliformes fecales muy estricta—por ejemplo los sistemas de lagunas en Nicaragua no pueden cumplir la norma

nicaragüense de coliformes fecales (Oakley, 2000; 1998), y la mayoría de los sistemas en Honduras no cumplen la norma hondureña como se presenta en el Capítulo 2—se podría concluir que una norma que se enfoca solamente en una cierta concentración de coliformes fecales no es satisfactoria para la situación real de América Central.

No existe una norma legislada adecuada en los países de América Central que enfrente los problemas de patógenos discutidos anteriormente. En este respecto es importante que los ingenieros sanitarios y otros profesionales involucrados en salud pública desarrollen normas de diseño y nivel de tratamiento requerido para remover los patógenos que realmente causan los problemas de salud. Existen pocos estudios científicos de los cuerpos receptores y el grado del tratamiento requerido para proteger la salud y el cuerpo receptor, y probablemente no van a existir en un futuro cercano (la carencia de esos estudios es un problema de todos los países centroamericanos). Por lo tanto, es importante buscar soluciones que estén basadas en los problemas fundamentales a la salud pública en vez del cuerpo receptor. Debido a que los problemas más urgentes en Centroamérica son las enfermedades relacionados con las excretas, se puede concluir que la remoción de patógenos es la norma más importante. Sin embargo, hay que tomar en cuenta que en otros países como los Estados Unidos, el problema es totalmente diferente y por lo tanto, la tecnología requerida allá puede ser muy diferente también; es por eso que el uso de plantas de lodos activados es común en los Estados Unidos pero no apropiado para muchas aplicaciones en Centroamérica.

Por ahora, se recomiendan los siguientes puntos para tomar en cuenta en el desarrollo de normas de diseño y nivel de tratamiento para efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lagunas de estabilización.

1.4.1 Los Factores Epidemiológicos y Ambientales de Patógenos

El Cuadro 1-9 presenta las enfermedades transmisibles relacionadas a las excretas que se encuentra en América Central. Se nota que el problema principal con los patógenos de Categoría I es el de los protozoarios, los cuales tienen una dosis infectiva baja con ninguna inmunidad. En contraste, todas las infecciones de los virus dan una inmunidad al infectado. En la Categoría II se ve que, a pesar que todas las infecciones de bacteria dan una inmunidad, la bacteria puede multiplicar en el medio ambiente—un problema en el monitoreo de la remoción de coliformes fecales en lagunas. Finalmente, se nota que las enfermedades de helmintos en las Categorías III y IV no solamente da ninguna inmunidad, sino que la dosis infectiva es baja y la persistencia de los helmintos en el medio ambiente puede ser muy larga. En el Cuadro 1-10 se presenta un resumen de los factores epidemiológicos y ambientales más importantes del Cuadro 1-9.

Shuval *et al.* (1986), después de hacer una investigación intensiva, desarrollaron los siguientes factores del riesgo que regulan la forma en la cual se transmiten las enfermedades relacionados a los excrementos humanos, especialmente cuando se utiliza aguas residuales para riego:

- 1) Persistencia del patógeno por períodos prolongados en el medio ambiente
- 2) Un período de latencia o etapa de desarrollo prolongados
- 3) El huésped presenta poca o ninguna inmunidad
- 4) Que exista una mínima transmisión simultánea por medio de otras vías, como los alimentos, el agua, e higiene personal

**Cuadro 1-9:
Enfermedades Transmisibles Relacionadas a Las Excretas Humanas en América Central**

Categoría Epidemiológica y Enfermedad	Agente Patógeno	Inmunidad	Persistencia Ambiental 20—30 °C
I. Fecal-Oral Sin Latencia, Dosis Infecciosa Baja Heces→Vehículo/Vector→Ingestión			
<i>Sin Inmunidad:</i>			
Amebiasis	Protozoario	No	25 días
Criptosporidiosis	Protozoario	No	30 días
Giardiasis	Protozoario	No	25 días
Infecciones por <i>Cyclospora</i> (Tiene un período de latencia)	Protozoario	No	?
Enterobiasis	Helminto	No	7 días
<i>Con Inmunidad:</i>			
Hymenolepiasis	Helminto	Sí (Parcial)	30 días
Hepatitis A	Virus	Sí	?
Infecciones por Enterovirus	Virus	Sí	3 meses
Infecciones por Rotavirus	Virus	Sí	?
II. Fecal-Oral Sin Latencia, Dosis Infecciosa Media, Persistencia Moderada, Puede Multiplicar en el Medio Ambiente (Bacteria) Heces→Vehículo/Vector→Ingestión			
Cólera	Bacteria	Sí	1 mes
Diarrea por <i>Escherichia coli</i> enteropatógena	Bacteria	Sí	3 meses
Enteritis por <i>Campylobacter</i>	Bacteria	Sí	7 días
Fiebre tifoidea	Bacteria	Sí	2 meses
Salmonelosis	Bacteria	Sí	3 meses
Shigelosis	Bacteria	Sí	1 mes
Yersiniosis	Bacteria	Sí	3 meses
III. Fecal-Oral o Fecal-Cutáneo, Con Latencia y Persistencia en el Suelo Heces→Suelo→Ingestión Heces→Suelo→Penetración por la piel			
Anquilostomiasis	Helminto	No	3 meses
Ascariasis	Helminto	No	> 1 año
Tricuriasis	Helminto	No	9 meses
IV. Fecal-Huésped Intermediario, Con Latencia y Persistencia Heces→Cerdo/Ganado→Ingestión de Carne			
Teniasis y Cisticercosis	Helminto	No	9 meses
V. Fecal-Huéspedes Intermediarios Acuáticos-Cutáneo Heces→Agua Dulce→Caracol→Larva Infecciosa→ Penetración de Larva por la Piel			
Esquistosomiasis ¹	Helminto	No	2 días
VI. Transmisión por Vectores Artrópodos Aguas Residuales→Mosquitos→Picaduras de Mosquitos			
Filariasis ²	Helminto	No	No se aplica
Las enfermedades de todas las categorías también pueden ser transmitidas mecánicamente por insectos y otros vectores.			

1. El esquistosomiasis ha sido reportado solamente en Sudamérica y Cuba en el Caribe.

2. El filariasis ha sido reportado en Sudamérica, el Caribe, y Costa Rica.

Adaptado de Feachem, *et al.*, 1983.

Cuadro 1-10: Características Epidemiológicas de los Patógenos Excretados

Tipo de Patógeno	Tamaño	Persistencia en el Medio Ambiente (20—30 °C)	Dosis Infectiva	Inmunidad	Transmisión Simultánea¹	Latencia	Multiplicación Fuera del Huésped Humano	Resistencia a Desinfección con Cloro
Virus	0.02—0.08µm	Meses	Baja	Sí	Común	No	No	No
Bacteria	1—5µm	1—3 meses	Media—Alta	Sí	Común	No	Sí	No
Protozoarios	5—20µm	< 30 días	Baja	No	Menos Común	No	No	Sí
Helmintos	40—60µm	Meses—años	Baja	No	No Común	Sí	No	Sí

1. La transmisión simultánea puede ser a través del agua, alimentos, y contacto directo de persona a persona.

Adaptado de Feachem, *et al.*, 1983.

Shuval *et al.* (1986) concluyeron que las infecciones por helmintos constituyen el riesgo más peligroso para la salud en relación con el tratamiento de aguas residuales cuando se utiliza el efluente para riego (uso directo o indirecto de agua superficial contaminada), una práctica común en América Latina que ha causado los problemas discutidos anteriormente. Se concluyeron que después de las infecciones de helmintos, en orden de riesgo por las infecciones serían las de protozoarios, bacterias, y finalmente los virus. Por lo tanto, se puede clasificar los riesgos de patógenos en el siguiente orden:

Nivel de Riesgo	Tipo de Patógeno
Elevado	Helmintos: <i>Ascaris lumbricoides</i> , <i>Ancylostoma duodenale</i> , <i>Necator americanus</i> , <i>Trichuris trichuria</i>
Medio-Elevado	Protozoarios: <i>Entamoeba histolytica</i> , <i>Giardia lamblia</i> , <i>Cryptosporidium</i> , <i>Cyclospora</i>
Medio	Bacteria: <i>Eschericia coli</i> patogénica, <i>Vibrio cholerae</i> , <i>Salmonella</i> , <i>Shigella</i> , <i>Campylobacter fetus</i>
Mínimo	Virus: Enterovirus, Roatvirus, virus de Hepatitis A

Estas conclusiones fueron también confirmadas por Feachem *et al.* (1983) y aceptadas por la Organización Mundial de Salud (OMS), que ha establecido los criterios de calidad para el caso de reuso de aguas residuales en agricultura (se utiliza coliformes fecales como un organismo indicador de patógenos de las bacterias) (WHO, 1989). Se muestran los criterios en Cuadro 1-11.

Con la información anterior y en la ausencia de otros estudios de la salud pública y del cuerpo receptor, se recomienda un sistema de tratamiento de aguas residuales que remueva primero los huevos de helmintos y segundo los patógenos de protozoarios—las enfermedades de parásitos más importantes en América Central y en Honduras—utilizando las normas de la OMS para los efluentes como una norma mínima. Es posible cumplir las normas de la OMS con mínimo costo con lagunas de estabilización, con el resultado que se puede utilizar el efluente como un recurso en el riego, un punto muy importante en América Latina (Egocheaga y Moscoso, 2004). Por la carencia de otra información, se puede asumir que, si los huevos de helmintos son removidos, también los quistes de protozoarios serían removidos; esta suposición es precisa especialmente en las lagunas de estabilización (Blumenthal, *et al.*, 2000).

Típicamente las concentraciones de patógenos de bacteria en aguas residuales están 3 o 4 órdenes de magnitud más abajo las de coliformes fecales (Feachem, *et al.*, 1983). Varias investigaciones han mostrado que los efluentes de una serie de lagunas que tenían una remoción de coliformes fecales de por lo menos 3 ciclos \log_{10} no contenía ninguna concentración de patógenos significados, incluyendo los de cólera (Arridge, *et al.*, 1995; Castro de Esparza, *et al.*, 1992; León y Moscoso, 1996; Mara *et al.*, 1992). Como ejemplo, la Figura 1-1 presenta la remoción de *Vibrio cholerae* 01 relacionada a la remoción de coliformes fecales en las lagunas de San Juan en Lima, Perú durante el pico de la epidemia de cólera (Castro de Esparza, *et al.*, 1992). Mientras la concentración de coliformes fecales fue todavía 1.7×10^5 NMP/100mL en el efluente de la primera laguna de maduración, la concentración de *Vibrio cholerae* 01 bajó de

**Cuadro 1-11:
Normas Microbiológicas de la OMS de Calidad de
Efluentes de Agua Residual Tratada para Riego**

Categoría y Condición de Reuso	Grupo Expuesto	Promedia de Una Serie de Muestras Durante el Período de Riego		Tratamiento Previsto para Alcanzar los Requerimientos de las Normas
		Helmintos Intestinales ¹ Número de Huevos/L (Media Aritmética)	Coliformes Fecales NMP/100mL (Media Geométrica)	
Categoría A Riego No Restringido: Cultivos que se consumen crudos: campos deportivos; parques públicos ² .	Trabajadores Consumidores Público	≤ 1	≤ 1,000	Lagunas de estabilización diseñadas para alcanzar la calidad microbiológica indicada, o un tratamiento equivalente.
Categoría B Riego Restringido: Cultivos de cereales, praderas, forrajeros, y árboles ³ .	Trabajadores	≤ 1	Ninguna Norma Recomendada	Tiempo de retención hidráulica por 8 a 10 días en lagunas de estabilización, o su equivalente en remoción de huevos de helmintos.
Categoría C Riego Restringido: Cultivos de cereales, praderas, forrajeros, y árboles sin exposición de trabajadores o público.	Ninguno	No se aplica	No se aplica	Pretratamiento según lo requiera la técnica de riego, no menos de sedimentación primaria.

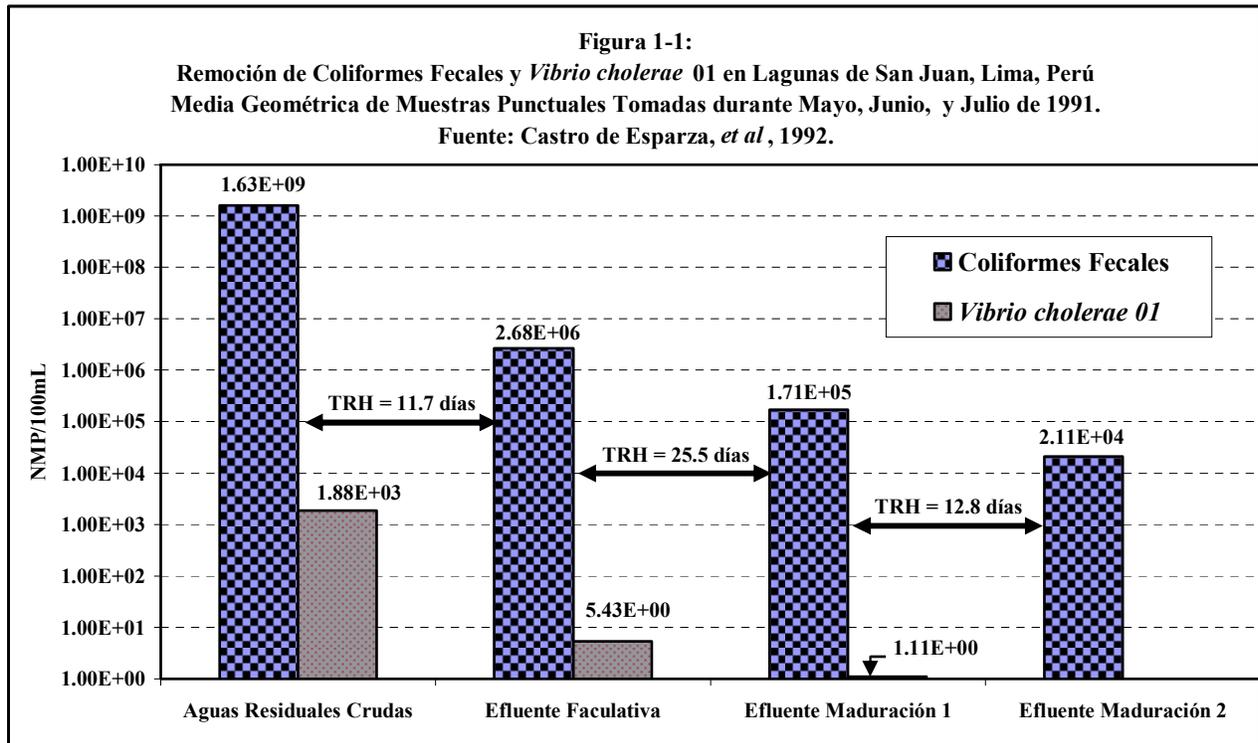
1. Especies de *Ascaris*, *Trichuris*, y *Anquilostomas*.

2. Un límite más estricto de ≤ 200 NMP/100mL coliformes fecales es apropiado para áreas públicas donde el público tiene contacto directo con el cultivo.

3. En el caso de árboles frutales, el riego debe cesar dos semanas antes de la cosecha de los frutos y ningún fruto debe ser recogido del suelo. No es conveniente regar por aspersión.

Fuente: OMS, 1989.

1.88 E+03 a 5.4 NMP/100mL en la laguna facultativa hasta 1.11 NMP/100mL en la primera laguna de maduración. Tomando en cuenta estas investigaciones y las conclusiones de Shuval *et al.* (1986) para riesgos bacterianos, se recomienda una remoción mínima de 3 ciclos \log_{10} de coliformes fecales en un sistema de lagunas en serie que tiene un tiempo de retención hidráulica nominal de, por lo menos, 15 días, para remoción de patógenos bacterianos.



1.4.2 El Reuso de Aguas Residuales

Un punto importante presentado en detalle en el informe reciente de CEPIS (Egocheaga y Moscoso, 2004) es que las aguas residuales tratadas pueden ser un recurso sostenible en vez de un problema de la salud pública y el medio ambiente. Como se presenta en los siguientes capítulos, los resultados del Proyecto de Monitoreo de las Lagunas de Estabilización en Honduras muestran que todos los sistemas monitoreados cumplían la norma de Categoría B de la OMS en el Cuadro 1-11 para riego restringido, y un sistema cumplía la norma de Categoría A para riego no restringido. Si se considera las normas de la OMS para el uso de efluentes en acuicultura mostrada en el Cuadro 1-12, cinco sistemas monitoreadas cumplían la norma.

Como Egocheaga y Moscoso (2004) discuten en detalle, las normas de la OMS han existido desde 1989, y ofrecen una excelente referencia en demostrar la posibilidad real de usar el agua residual doméstica en actividades productivas, haciendo más sostenible la protección de la salud pública y el uso de los recursos hídricos. Desgraciadamente, la mayoría de los países de América Latina no han considerada las normas en todo su potencial por diversas razones, lo que incluyen enfoques en remoción de material orgánico y protección ambiental, y más énfasis en buen

funcionamiento del sistema de tratamiento en términos operativos y mucho menos al sanitario con énfasis en enfermedades infecciosas. Se espera que este manual ofrezca un punto de vista demostrando la posibilidad real de mejorar la protección de la salud pública, especialmente en la remoción de huevos de helmintos con lagunas de estabilización, con la posibilidad de aprovechar el efluente en actividades productivas para que los sistemas de lagunas sean sostenibles a largo plazo.

Cuadro 1-12:
Normas Microbiológicas de la OMS de Calidad de Efluentes
de Aguas Residuales Tratadas para Reuso en Acuicultura

Proceso de Reuso	Promedia de Una Serie de Muestras Durante el Período de Reuso	
	Huevos de Helmintos con Huéspedes Intermediarios Acuáticos (<i>Schistosoma</i> especies en Latinoamérica) Número de Huevos/L (Media Aritmética)	Coliformes Fecales NMP/100mL (Media Geométrica)
Cultura de Peces	0	<10,000
Cultura de Macrofitas	0	<10,000

Fuente: OMS, 1989.

1.5 Propósito del Manual

El propósito de este manual es:

1. Presentar los resultados de Proyecto de Monitoreo de las Lagunas de Estabilización en Honduras.
2. Presentar la teoría de tratamiento de aguas residuales a través de lagunas de estabilización.
3. Establecer una metodología sistemática de diseño, operación y mantenimiento, monitoreo, remoción de lodos, y reuso de efluentes de estas lagunas.
4. Proporcionar a los planificadores, consultores, supervisores de obras, ingenieros municipales, y operadores de sistemas de lagunas los instrumentos apropiados para incorporar las variables de diseño, construcción, operación, mantenimiento, monitoreo, remoción de lodos, y reuso en su trabajo para que las lagunas de estabilización tengan éxito en las municipalidades a largo plazo.

CAPÍTULO 2: RESULTADOS DEL PROYECTO DE MONITOREO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION EN HONDURAS

2.1 Introducción

El proyecto de monitoreo de los sistemas municipales de lagunas de estabilización en Honduras fue ejecutado durante el año 2003 por la empresa Hondureña ECOMAC, financiado por la Agencia para el Desarrollo Internacional (USAID-Honduras), y administrado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. A la fecha, la USAID ha financiado en las municipalidades unos 20 sistemas de lagunas de estabilización a lo largo del país, y se planea construir más con el tiempo. El proyecto de monitoreo contempló la evaluación de 10 sistemas de lagunas localizados a lo largo del país que mostraron diferentes condiciones ambientales y tamaños variables de población servida. Se incluyeron los sistemas de Catacamas Este, Catacamas Oeste, Danlí, El Progreso, Juticalpa, Morocelí, Pajuiles, Tela, Trinidad, y Villanueva. Este estudio fue el primero que se elaboró en la región de América Central, lo que representa un importante avance en el tema.

El proyecto tenía como objetivo principal el de reportar el monitoreo realizado durante el periodo comprendido durante las épocas secas y lluviosas, enfocándose principalmente en la remoción de parámetros previamente seleccionados con respecto a la determinación de un eficiente funcionamiento de cada sistema y su sostenibilidad a largo plazo.

En cuanto a los objetivos específicos se encuentran los que se mencionan a continuación:

- Recopilación y análisis de información facilitada por cada municipalidad, las entidades gubernamentales responsables, los operadores que operan y mantienen la instalación, y el público.
- Exponer y analizar los resultados de los parámetros monitoreados, enfatizándose en la remoción que existe desde las aguas residuales crudas que entran al sistema hasta las aguas tratadas que salen.
- Medir y analizar los caudales que entran cada sistema.
- Exponer las dificultades u obstáculos que podrían alterar el buen funcionamiento de cada sistema para luego proponer recomendaciones que superen dichos obstáculos para que el sistema sea sostenible.

Los resultados están publicados en 11 informes (uno para cada sistema con Villanueva dividida en I y II) (ECOMAC, 2004). Dentro de cada informe se incluyen los antecedentes o cualquier otra información como memorias técnicas, planos, y censos entre otros. Se complementa cada informe con las observaciones que se hicieron y la interpretación de datos para cada sistema.

2.2 Alcance del Proyecto

Se basó en el conocimiento del predio donde se encuentran ubicadas las lagunas de estabilización, evaluando las características ambientales de la zona, y el tipo de obras presentes

dentro de los sistemas, como estructuras para la medición de caudales, rejillas, desarenadores, tipo de entradas y salidas, interconexiones, etc. Acompañado a esto se ejecutó estudios topográficos y batimétricos para poder definir bien las áreas y volúmenes de las lagunas y de los lodos depositados.

Así mismo se evaluaron los parámetros en el agua y en los lodos de las lagunas primarias (anaeróbica o facultativa) y secundarias (facultativa o de maduración), efectuando análisis de campo y de laboratorio que definen el funcionamiento y comportamiento de los sistemas.

El estudio se dividió en dos etapas así: época seca (marzo, abril y mayo) y época lluviosa (septiembre, octubre y noviembre) del año 2003.

2.3 Metodología

2.3.1 Recolección de la información y toma de muestras

El monitoreo tomó un período de 5 días en cada sistema. Se dividieron en 2 días para recolección de información de soporte como ser: población servida, edad de las lagunas, copia de planos y memorias técnicas, evaluación física de las lagunas y del predio en que se encuentran, y otra información o reporte relevante para la evaluación. La información de campo se llevó a cabo mediante la elaboración sistemática de fichas de recolección de datos, lo que permitió la realización de una validación de resultados y un mejoramiento del procesamiento de los datos.

Los 3 últimos días se dispusieron para realizar la toma de muestras de los diferentes parámetros (físicos, químicos y microbiológicos) considerados.

2.3.2 Parámetros Analizados y Tipo de Muestreo

Dentro de los parámetros analizados se buscaron los que fueran representativos de un buen o un mal funcionamiento de las lagunas de estabilización en términos de remoción de sólidos, material orgánico, y patógenos. Los parámetros convencionales de aguas residuales seleccionados fueron sólidos suspendidos, DBO₅ total y filtrada; para patógenos se seleccionaron los parámetros de coliformes fecales, *Escherichia coli*, especies de *Shigella*, y huevos de helmintos. Para lodos se seleccionaron los parámetros de sólidos totales, volátiles y fijos, y huevos de helmintos. Los análisis se realizaron en dos laboratorios asignado para la zona más cerca al sistema monitoreada, los cuales emplearon metodologías de Standard Methods para el análisis de las muestras (APHA, 1992). Se utilizó el laboratorio Jordan Labs ubicado en San Pedro Sula, y el Laboratorio de Análisis Industriales en la ciudad de Tegucigalpa para la mayoría de los análisis. Únicamente para el análisis de huevos de helmintos (en agua y en lodos), se acudió al laboratorio nacional del Centro de Estudio y Control de Contaminantes (CESCCO), de la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente.

Los parámetros de pH, temperatura, oxígeno disuelto, temperatura ambiente, humedad relativa, y luminosidad se analizaron *in situ* con equipo portátil.

2.3.3 Medición de Caudales

Para medir los caudales se utilizó un medidor de flujo área-velocidad de ISCO, modelo 4250, con sistema doppler, calibrando continuamente su precisión para brindar datos impresos cada

hora. Antes de Iniciar se procedió a verificación de caudales, efectuando varios análisis volumétricos mostrando diferencias despreciables, por lo que los caudales encontrados son valiosos datos que han venido a demostrar a las municipalidades un mayor interés por desarrollar mejor administración de sus coberturas de servicio.

2.3.4 Topografía y Batimetría

Mediante el estudio topográfico se delimitaron los predios de las lagunas, se efectuó la planialtimetría de las lagunas, logrando encontrar áreas, y la batimetría (volúmenes de aguas y lodos acumulados). Adicionalmente se detallaron todas las estructuras menores de los sistemas, como canaletas Parshall, entradas, salidas, y otros.

2.3.5 Muestreo

La Figura 2-1 muestra los puntos seleccionados para realizar la toma de muestras en agua se mencionan a continuación:

- Entrada de laguna primaria o canaleta Parshall.
- Salida de laguna primaria (facultativa o anaeróbica)
- Salida de laguna de maduración.

Los parámetros que se tomaron en los puntos anteriormente mencionados fueron DBO₅ total y filtrada, SS, pH, temperatura, oxígeno disuelto, coliformes fecales, huevos de helmintos, especies de *Shigella*, y *Escherichia coli*.

La Figura 2-1 muestra los sitios de muestreo seleccionados dentro de las lagunas siempre fueron los mismos para todos los sistemas para poder tener una visión clara del comportamiento de las aguas desde la entrada de estas y hasta la salida. Así mismo se realizaron análisis dentro de las lagunas tomando únicamente lo que son lodos de la laguna facultativa, y oxígeno disuelto de todo el sistema en profundidades de 0.50 cm y 110 cm.

El procedimiento de extracción de lodos y toma de oxígeno disuelto se utilizó una pequeña embarcación para capacidad de dos personas y espacio suficiente de maniobras de manejo de equipo y disposición de muestras en recipientes especiales. El análisis de oxígeno disuelto se efectuó por medio de un oxímetro empleando el método de membrana, teniendo de inmediato resultados a las profundidades señaladas.

Para el análisis de huevos de helmintos, el estudio contempló análisis en lodos y en agua. En el caso de lodo, este fue extraído por medio de una pequeña draga (capacidad 4 kg), posteriormente preservado con formaldehído al 4%. Para el análisis de helmintos en el agua, la muestra esta extrajo en la entrada del agua cruda y se manejó un volumen compuesto.

Ambas muestras de huevos de helmintos (agua y lodos) fueron llevadas a CESCO para su análisis. El procedimiento para el análisis de Helmintos se siguió la metodología mejicana (Anexo I). Las muestras para el recuento de huevos de helmintos fueron realizadas en el Laboratorio de Microbiología Ambiental y de Alimentos del CESCO, para lo cual se tomaron muestras de agua en frascos de 3 galones preparados previamente en el laboratorio; para las muestras de sedimento se utilizaron recipientes de plástico de 1 litro con boca ancha. Una vez

colectadas fueron trasladadas al laboratorio en hieleras con bolsas de hielo. Los tiempos de conservación en refrigeración y transporte fueron reducido al mínimo. En el laboratorio las muestras de agua y sedimentos fueron procesadas de acuerdo al método de referencia que utiliza la combinación de los principios del método difásico y del método de flotación que es aplicable para la cuantificación de huevos de helmintos en muestras de lodos, afluentes y efluentes de plantas de tratamiento. Los resultados se expresaron como número de huevos de helmintos por litro o gramo de muestra (Dr. Gilberto Padilla, comunicación personal).

Figura 2-1: Esquemas Mostrando la Ubicación de Puntos de Muestreo entre Lagunas

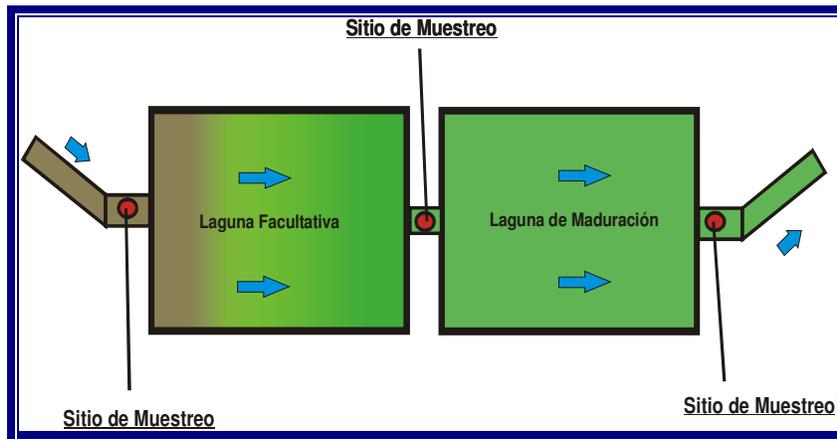
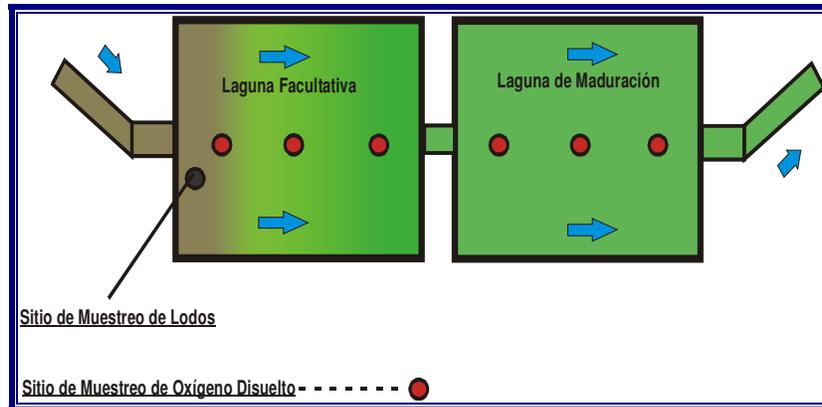


Figura 2-2: Esquemas Mostrando la Ubicación de Puntos de Muestreo Dentro Lagunas



2.4 Resultados

2.4.1 Caudales, Dotaciones, Tiempos de Retención Hidráulica, Cargas Orgánicas

El Cuadro 2-1 presenta el resumen de los caudales promedios, la población reportada que estaba conectada al sistema, los caudales per cápita, los tiempos de retención hidráulica, la DBO₅ promedia medida en el efluente, y las cargas superficiales calculadas y las cargas volumétricas calculadas para las lagunas anaeróbicas. No se presentan resultados para Pajuiles o Villanueva por las dificultades en medir los caudales: Pajuiles no tenía un caudal continuo porque el agua estaba racionada, y el sistema de Villanueva estaba sobrecargada y no podía colocar el medidor de caudales en la tubería de la entrada del sistema (ECOMAC, 2004). Se concluye la siguiente de los resultados:

1. El caudal per cápita varía entre 127 y 515 litros por persona por día, con un promedio de 363 Lppd. Los aportes per cápita de caudal son muchos más altos que los asumidos por diseñadores, los cuales típicamente varían entre 80—120 Lppd. La razón por la diferencia puede ser por:

- i) Crecimiento alto de la población que conecta al alcantarillado.
- ii) Desperdicios de agua por parte de la población.
- iii) Infiltración al alcantarillado.
- iv) Conexiones de maquiladoras y otras industrias.

2. El tiempo de retención hidráulica nominal, TRH, para la mayoría de los sistemas es menor como resultado del incremento de los caudales, y la mayoría de sistemas no cumplen la recomendación de la OMS de 10 días mínimas para remover huevos de helmintos en lagunas facultativas (Mara y Cairncross, 1989).

3. La DBO₅ promedia en el afluente varía mucha entre las municipalidades, de 62 a 437 mg/L, y a pesar que el promedio de todos los sistemas (incluyendo Pajuiles y Villanueva) fue de 206 mg/L, podría ser un error significativo en asumir este valor promedio para diseño.

4. Como resultado de los caudales altos con menos TRH, en combinación a veces con una DBO₅ alta en el afluente, la carga superficial orgánica para la laguna facultativa fue alta en la mayoría de los sistemas, variando entre 74 a 1,011 kg DBO₅/ha-día, con un promedio de 501 kg DBO₅/ha-día. La mayoría de las cargas están arriba de la carga máxima superficial para los climas de Honduras, que se asume variar (con un factor de seguridad) entre 280 a 350 kg DBO₅/ha-día, como se discute en el Capítulo 4. Se concluye que las lagunas primarias de Catacamas Este, Juticalpa, Morocelí, y Villanueva I y II (por monitoreo dentro de la laguna y observación visual) estaban operando arriba de los límites de lagunas facultativas. La laguna de Danlí fue diseñada como una laguna anaeróbica y su carga superficial es aceptable en este respecto.

Cuadro 2-1: Resultados de los Caudales Promedios y per Cápita, Tiempo de Retención Hidráulica, y Carga Superficial*

Sistema	Caudal Promedio m ³ /día	Población Reportado Conectado	Caudal per Cápita Lppd	Área de Laguna Primaria Ha	Volumen Útil de Laguna Primaria m ³	TRH Nominal días				DBO ₅ Promedio Afluente mg/L	Carga Superficial CS kg DBO Ha-día	Carga Volumétrica CV g DBO m ³ -día
						F/A ¹	F/M ²	M	Total			
<i>Resultados del Monitoreo en la Época Seca:</i>												
Catacamas Este ³	2.580	5.350	482	1,02	12.976	5,0	3,7		8,7	400	1.011	80
Catacamas Oeste	945	3.400	278	1,38	21.694	23,0	4,2		27,1	437	300	
Morocelí	218	705	309	0,12	1.519	7,0	7,0		14,0	220	410	
Tela ³	2.726	5.306	514	0,42	7.025	2,6	4,3	2,6	9,5	114	737	44
<i>Resultados del Monitoreo en la Época Lluviosa:</i>												
Catacamas Este ³	2.639	5.350	493	1,02	12.976	4,9	3,6		8,5	296	765	60
Catacamas Oeste	902	3.400	265	1,38	21.694	24,1	4,4		28,4	294	193	
Danlí ³	5.150	10.000	515	0,99	12.444	2,4	4,8		7,2	205	1.066	85
Juticalpa ⁴	3.510	11.422	307	1,23	21.583	6,1	3,4		9,5	177	505	
El Progreso ⁴	2.932	23.000	127	2,83	61.360	20,9	13,9		34,8	71	74	
Tela ³	2.121	5.306	400	0,42	7.025	3,3	5,5	3,4	12,2	62	313	19
Trinidad	1.816	6.108	297	0,98	14.205	7,8	6,2		14,1	76	141	

*No se incluyen Pajuiles ni Villanueva por las dificultades en medir los caudales.

1. F/A: facultativa o anaeróbica. Los sistemas de Danlí y Tela consisten de una laguna anaeróbica seguida por una facultativa. Tela tiene una tercera laguna de maduración.
2. F/M: Facultativa o de maduración.
3. Asumiendo el volumen útil de agua en la laguna primaria (volumen total menos el volumen de lodos acumulados).
4. Solamente una batería de dos en paralelo fue monitoreada.

5. La carga orgánica volumétrica para una laguna anaeróbica debe ser de 100 a 300 g DBO₅/m³-día, como se discute en el Capítulo 4. Los resultados muestran que las lagunas primarias de Danlí y Tela, las dos diseñadas como lagunas anaeróbicas, estaban funcionando abajo el límite de la carga volumétrica de 100 g DBO₅/m³-día mínima. La laguna primaria de Catacamas Este, diseñada como una laguna facultativa, estaba aproximando la carga volumétrica de una laguna anaeróbica con 80 g DBO₅/m³-día.

6. Las lagunas primarias de Catacamas Este, Danlí y Villanueva están llegando a su límite de acumulación de lodos como resultado de no haber tenido operaciones de limpieza de lodos durante un período entre 7 a 10 años con sobrecarga de caudales; esto ha generado disminución del volumen útil de agua con la consecuente reducción del tiempo de retención hidráulica.

2.4.2 Remoción de Huevos de Helmintos

El Cuadro 2-2 presenta los resultados de monitoreo de huevos de helmintos, los que se ilustran en las Fotos 2-1. La especie encontrada con más frecuencia fue *Ascaris lumbricoides*, seguido por *Trichuris trichiura* y finalmente las especies de Anquilostomas. Los resultados muestran claramente que todos los sistemas estaban removiendo 100% de los huevos de helmintos. La mayoría de los sistemas removían 100% de los huevos en las lagunas primarias; solamente las lagunas de Danlí, Pajuiles y Villanueva tenían concentraciones de huevos en el efluente de las lagunas primarias. Ese resultado es posible en función de que estas lagunas primarias de Danlí y Villanueva están funcionando como lagunas anaeróbicas, lo que induce a una generación de burbujas por la digestión anaeróbica y por ende una resuspensión de huevos llevados hasta el efluente.

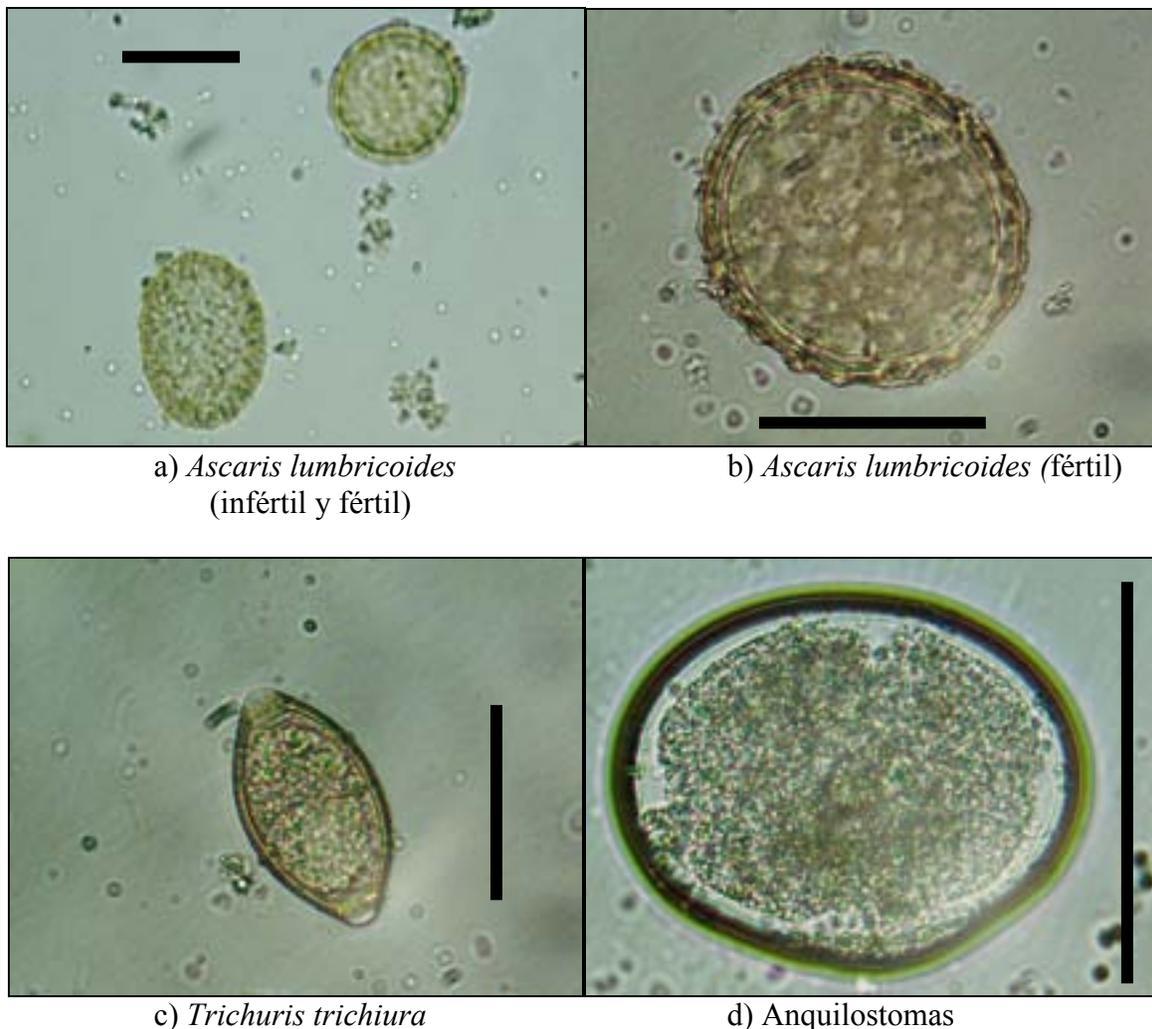
La salida de huevos en la laguna primaria de Pajuiles, consistente en una laguna facultativa, podría ser causada por las actividades de animales como tortugas o cocodrilos en los lodos. Se concluye que las lagunas secundarias de maduración sirven como un factor de seguridad importante para la remoción de huevos de helmintos.

El Cuadro 2-2 muestra que todos los lodos de todos los sistemas tienen concentraciones altas de huevos de helmintos. En vista de ese resultado, se concluye que el manejo adecuado de lodos durante la limpieza de lagunas debe requerir seguridad de los trabajadores, limpieza de equipo, y una disposición final que protege la salud pública y evita la recontaminación del medio ambiente con huevos fértiles.

Cuadro 2-2: Remoción de Huevos de Helmintos en Lagunas de Estabilización de Honduras

Sistema de Lagunas	Concentración Promedia de Huevos de Helmintos, Número/L (Rango de Muestras en Paréntesis, Número/L)			Concentración Promedia de Huevos de Helmintos en Lodos de Laguna Primaria ¹
	Aguas Residuales Crudas	Efluente de Laguna Facultativa ¹	Efluente de Laguna de Maduración ¹	Número de Huevos gramo seco (Rango en Paréntesis)
Catacamas Este				
Verano	13 (9—18)	0	0	53 (13—84)
Invierno	33 (24—48)	0	0	308 (247—354)
Catacamas Oeste				
Verano	84 (42—133)	0	0	303 (202—499)
Invierno	29 (24—48)	0	0	674 (520—960)
Danlí ¹ (Invierno)	45 (30—58)	2 (0—7)	0	467 (30—1,164)
Juticalpa (Invierno)	9 (0—20)	0		35 (8—53)
Morocelí (Verano)	15 (0—24)	0	0	189 (126—295)
Pajuiles (Verano)	744 (720—792)	29 (22-42)	0	4,473 (3,720—5,299)
El Progreso (Invierno)	6 (3—9)	0	0	62 (15—141)
Tela				
Verano	9 (4—16)	0	0	1 (1—2)
Invierno	2 (0—4)	0	0	50 (18—108)
Trinidad (Invierno)	6 (4—8)	0	0	15 (6—20)
Villanueva I y II (Verano)	55 (18—72)	3 (0—16)	0	738 (270—1,075)

1. Los sistemas de Danlí y Tela fueron diseñados como una laguna anaeróbica seguido por una laguna facultativa. Mientras la laguna primaria de Danlí funciona como una laguna anaeróbica, la laguna primaria de Tela funciona como una laguna facultativa por la baja carga orgánica.



Fotos 2-1: Ejemplos de los huevos de helmintos encontrados en las aguas residuales de las municipalidades monitoreadas en Honduras. La barra negra representa 50 μm . (Fotos tomadas de una placa cortesía de Dr. Gilberto Padilla de CESCO.)

2.4.3 Remoción de Coliformes Fecales y *Escherichia coli*

Los Cuadros 2-3 y 2-4 presentan los resultados de la remoción de coliformes fecales y *Escherichia coli* en los sistemas monitoreados. Las Figuras 2-3 y 2-4 muestran la remoción en ciclos \log_{10} para los dos parámetros como función de tiempo de retención hidráulica para lagunas primarias. Las Figuras 2-5 y 2-6 muestran la remoción en ciclos \log_{10} para versus tiempo de retención hidráulica para lagunas de maduración. Una vez analizados los resultados presentados en los cuadros y las figuras se puede concluir el siguiente:

1. La naturaleza de la remoción de coliformes fecales y *Escherichia coli* es parecida en todos los sistemas en lagunas primarias y de maduración. Probablemente la mayoría de las especies observadas en el análisis de coliformes fecales corresponde a *E. coli*.

2. Las Figuras 2-3 y 2-4 sugieren que la remoción de ambos: coliformes fecales y *E. Coli*, mejora significativamente en lagunas primarias hasta que se aproxima 10 días de tiempo de retención hidráulica; después de 10 días, aunque hay pocos datos, parece que la tasa de remoción baja y aproxima un valor limitante como una reacción del primer orden. Cuando el TRH aproxima 10 días, se puede obtener 2.0 ciclos \log_{10} remoción de coliformes fecales y *E. coli*.
3. Las Figuras 2-5 y 2-6 muestran que no existe una relación significativa entre remoción de coliformes fecales o *E. coli* en lagunas de maduración con relación el TRH. Se concluye que con 5 a 10 días de TRH se debe obtener una remoción de 1.0 ciclos \log_{10} . Con una tercera laguna se puede obtener un ciclo de remoción más como se ve en los datos de Tela.
4. La concentración de coliformes fecales o *E. coli* en el efluente final es en gran parte una función de la concentración de bacteria que entra el sistema. La Figura 2-7 muestra la relación entre la concentración en el efluente final versus la concentración en el afluente.
5. La mayoría de los sistemas no puede cumplir la norma de Honduras de coliformes fecales de 5,000 NMP/100mL como se ve en la Figura 2-7.
6. Tanto Coliformes fecales como *E. coli* son especies limitadas usadas como indicadores de patógenos para plantas de tratamiento de aguas residuales, y especialmente en lagunas de estabilización. Es posible que poblaciones de ellos se puedan multiplicar dentro de una laguna (Feachem, *et al.*, 1983), y por otro lado, las aves y mamíferos de sangre caliente que frecuentan las instalaciones también pueden contribuir concentraciones significativas.

2.4.4 Monitoreo de Especies de *Shigella*

Con el motivo de monitorear un patógeno bacteriano para evitar los problemas mencionadas de coliformes fecales y *Escherichia coli*, se seleccionó las especies de *Shigella*, lo que es un patógeno único del ser humano sin ningún reservorio animal (Feachem, *et al.*, 1983). Se esperaba que la remoción de especies de *Shigella* demostraría más el comportamiento de la remoción de verdaderos patógenos bacterianos diferente de los indicadores, que no solamente pueden ser excretados por la fauna de la laguna, sino ellos mismos pueden multiplicar dentro del sistema abajo condiciones propias (Feachem, *et al.*, 1983).

Desafortunadamente, no se detectó la presencia de especies de *Shigella* en ninguna muestra en todo el proyecto de monitoreo. La razón de esto se debe a que los patógenos bacterianos ocurren en aguas residuales solamente durante un brote o epidemia, como se discutió en el Capítulo 1. Se concluye que el monitoreo de parásitos, especialmente helmintos, sería mejor como indicador de la eficiencia de lagunas en remover patógenos relacionados a los excrementos humanos.

Cuadro 2-3: Remoción de Coliformes Fecales en los Sistemas Monitoreados

Sistema	Media Geométrica Concentración de Coliformes Fecales Número Más Probable/100mL			
	Afluente	Efluente Laguna 1	Efluente Laguna 2	Efluente Laguna 3
<i>Época Seca:</i>				
Catacamas Este	3.49E+07	4.32E+05	8.95E+04	
Catacamas Oeste	8.04E+07	3.17E+05	3.18E+03	
Morocelí	1.10E+08	9.25E+05	2.63E+04	
Pajuiles	3.00E+07	5.58E+06	6.63E+03	
Tela	6.49E+06	7.43E+06	2.69E+04	3.44E+04
Villanueva I	5.64E+07	1.06E+07	8.30E+05	
Villanueva II	6.59E+06	5.29E+06	2.69E+04	
<i>Época Lluviosa</i>				
Catacamas Este	2.52E+07	1.36E+06	1.26E+05	
Catacamas Oeste	3.91E+08	1.17E+06	7.49E+04	
Danlí	2.01E+09	2.01E+08	1.47E+07	
Juticalpa	1.38E+09	7.11E+07	1.22E+07	
El Progreso	2.84E+06	3.65E+04	3.67E+03	
Tela	2.97E+06	8.44E+05	1.13E+05	7.94E+03
Trinidad	1.04E+07	1.43E+05	6.21E+02	

Cuadro 2-4: Remoción de *Escherichia coli* en los Sistemas Monitoreados

Sistema	Media Geométrica Concentración de <i>Escherichia coli</i> Número Más Probable/100mL			
	Afluente	Efluente Laguna 1	Efluente Laguna 2	Efluente Laguna 3
<i>Época Seca:</i>				
Catacamas Este	8.01E+06	3.62E+05	4.27E+04	
Catacamas Oeste	2.91E+07	5.14E+04	4.16E+02	
Morocelí	5.11E+07	3.31E+05	4.39E+03	
Pajuiles	2.42E+07	2.35E+06	1.75E+03	
Tela	4.28E+06	4.45E+06	2.33E+04	2.76E+04
Villanueva I	2.42E+07	7.26E+06	3.29E+05	
Villanueva II	5.15E+06	3.82E+06	1.90E+04	
<i>Época Lluviosa</i>				
Catacamas Este	1.22E+07	1.00E+06	1.26E+05	
Catacamas Oeste	3.91E+08	9.93E+04	2.08E+04	
Danlí	8.96E+08	9.28E+07	1.17E+07	
Juticalpa	4.16E+08	6.32E+07	5.43E+06	
El Progreso	1.22E+06	1.55E+04	1.16E+03	
Tela	2.52E+06	5.70E+05	8.67E+04	4.38E+03
Trinidad	7.68E+06	1.07E+05	2.71E+02	

Figura 2-3: Remoción de Coliformes Fecales en Lagunas Primarias

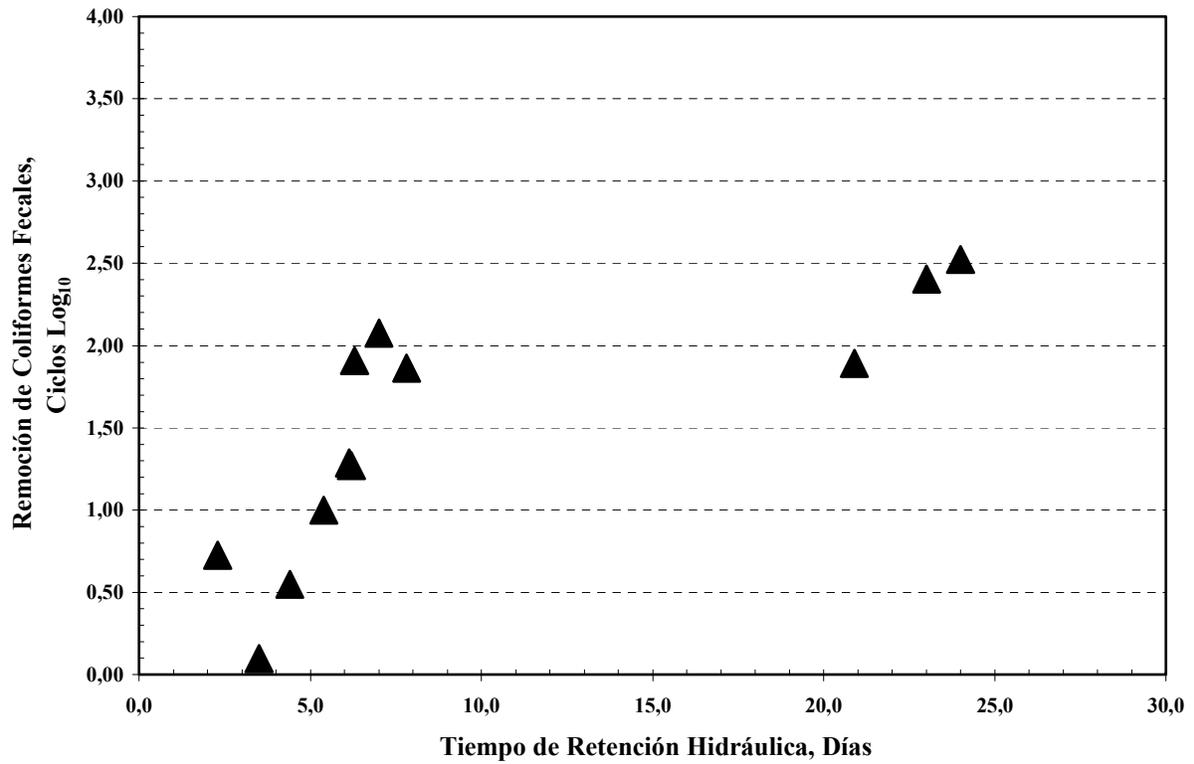


Figura 2-4: Remoción de *Escherichia coli* en Lagunas Primarias

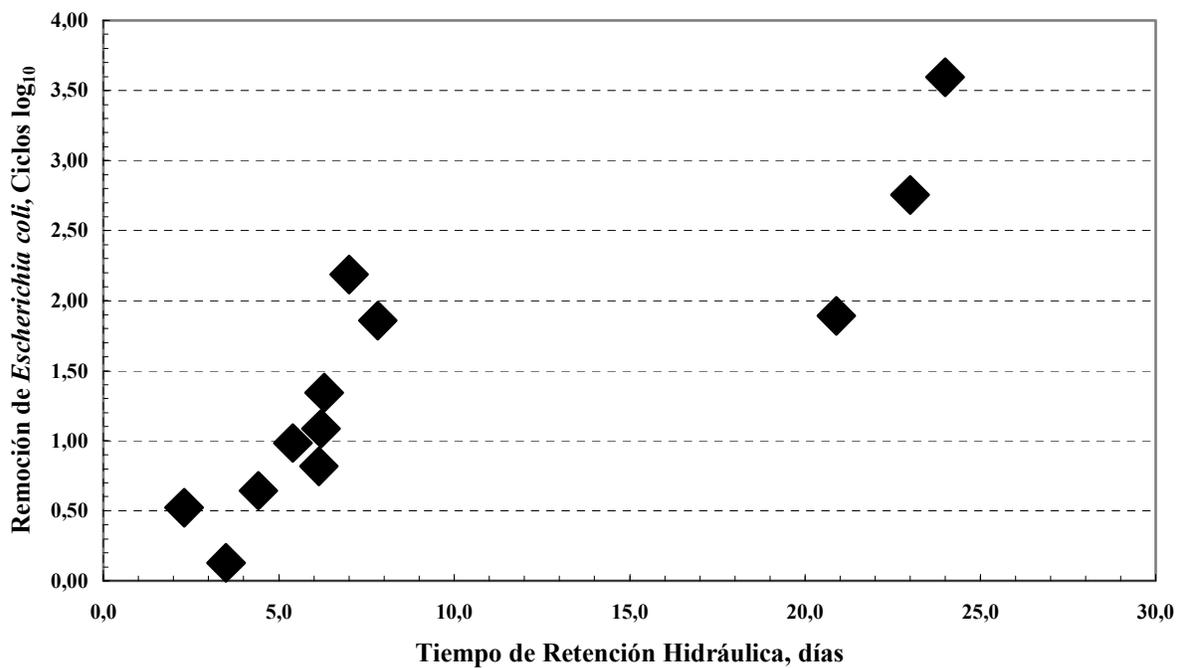


Figura 2-5: Remoción de Coliformes Fecales en Lagunas de Maduración

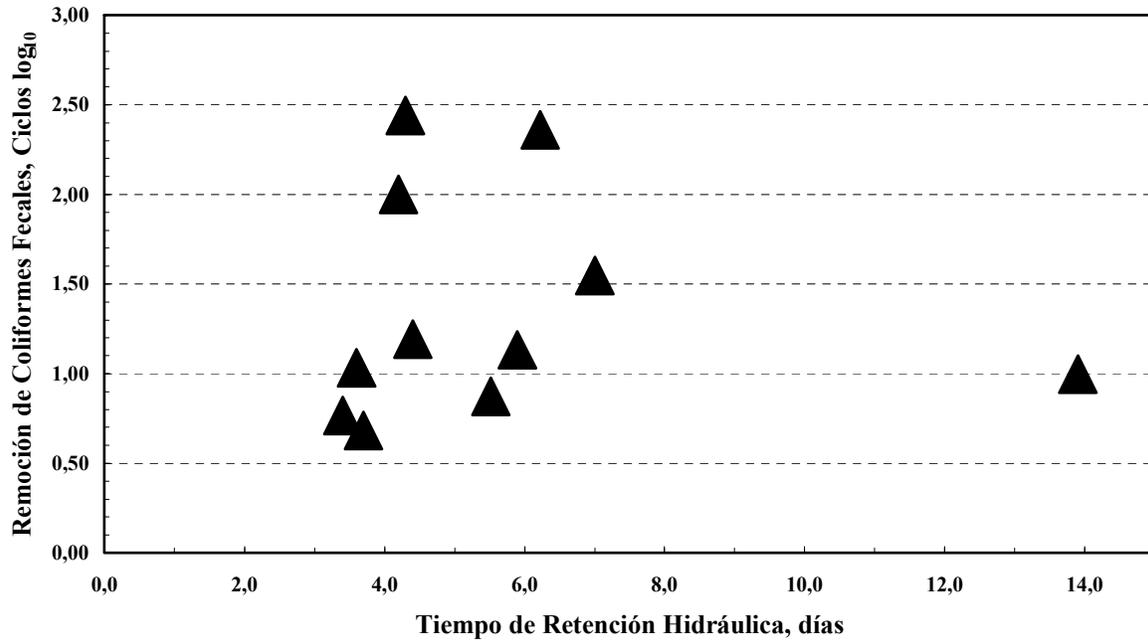
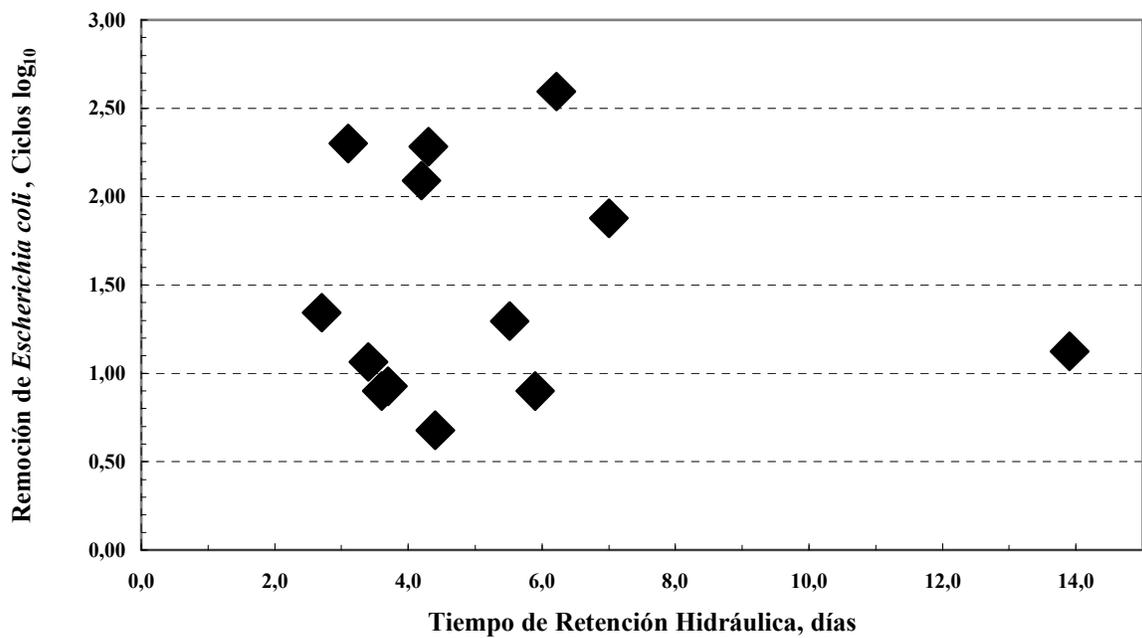
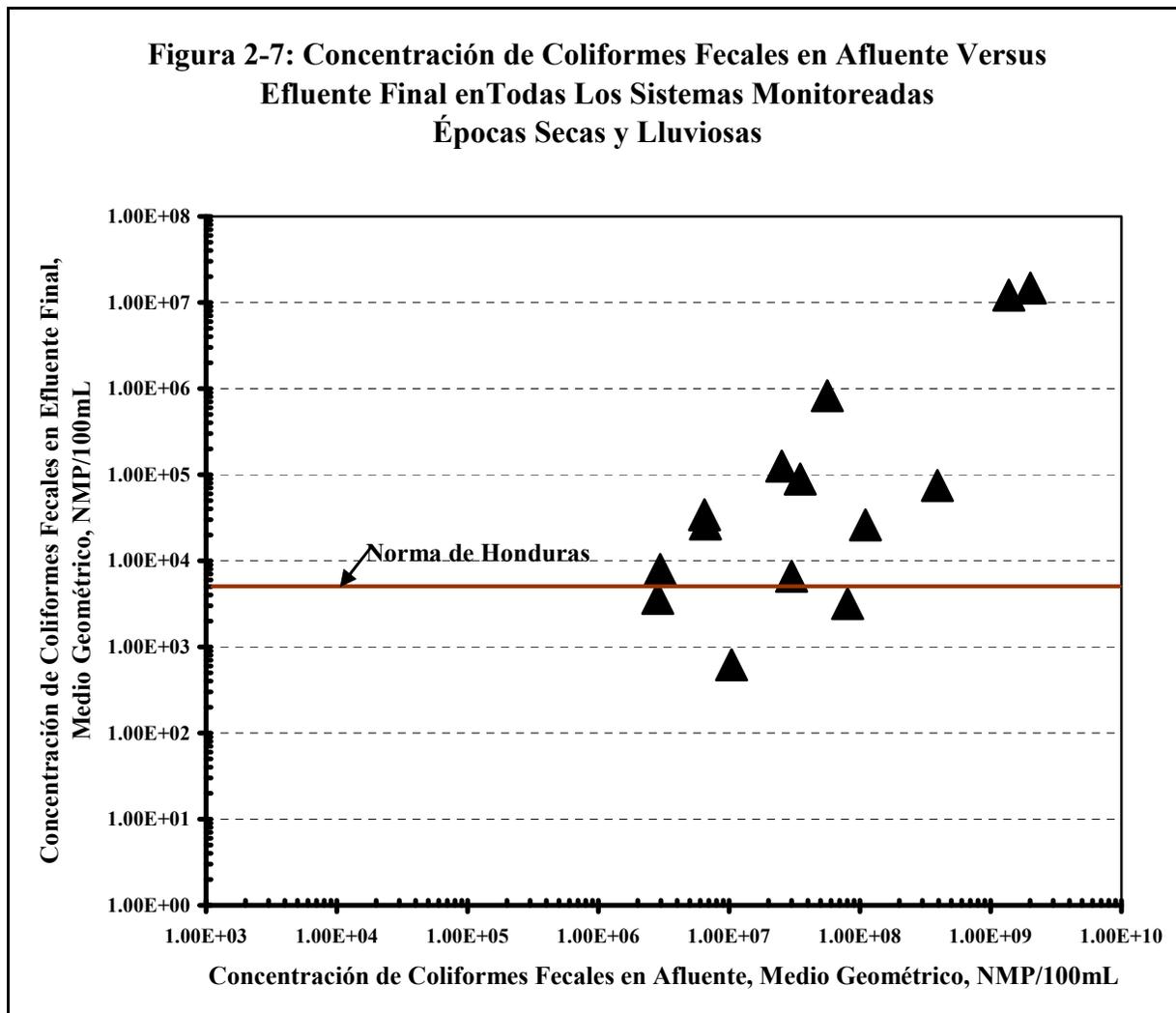


Figura 2-6: Remoción de *Escherichia coli* en Lagunas de Maduración





2.4.5 Remoción de Parámetros Convencionales: DBO₅ y SS

Los Cuadros 2-5 y 2-6 muestran los resultados de monitoreo de DBO₅ y sólidos suspendidos. En el Cuadro 2-5 se observa que, a pesar de que la mayoría de las lagunas primarias estaban sobrecargadas hidráulicamente y orgánicamente, la remoción de DBO₅ no-filtrada en lagunas primarias fue 50% o mayor en casi todos los sistemas. Finalmente, de los 11 sistemas monitoreados, 8 cumplieron con la norma Hondureña de DBO₅ de 50 mg/L. Es importante mencionar que en efluentes municipales se exprese el parámetro para el efluente final en términos de DBO₅ filtrada, lo que es más apropiado para efluentes de lagunas (Mara, *et al.*, 1992).

La remoción de SS es más problemática en sistemas de lagunas por la concentración de algas que típicamente se encuentra en los efluentes finales. Sin embargo, los resultados en el Cuadro 2-6 muestran una buena remoción: Por afluentes que varían entre 66—383 mg/L con un promedio de 207 mg/L, el rango de SS en los efluentes finales varía entre 24—135 mg/L, con un promedio aritmético de 72 mg/L. Solamente 3 sistemas excedían la norma Hondureña de 100 mg/L.

Cuadro 2-5: Remoción de DBO₅ en los Sistemas Monitoreadas

Sistema	Media Concentración de DBO ₅ mg/L					
	Afluyente	Efluente Laguna 1	Efluente Laguna 2	Efluente Laguna 2 Filtrada	Efluente Laguna 3	Efluente Laguna 3 Filtrada
<i>Época Seca:</i>						
Catacamas Este	400	131	91	91		
Catacamas Oeste	438	125	82	21		
Moroceli	220	60	51	30		
Pajuiles	712	201	134	45		
Tela	114	58	19		19	14
Villanueva I	140	66	53	39		
Villanueva II	200	107	93	82		
<i>Época Lluviosa</i>						
Catacamas Este	296	112	91	55		
Catacamas Oeste	294	110	52	28		
Danlí	205	75	46	37		
Juticalpa	177	110	86	49		
El Progreso	71	28	26	11		
Tela	62	43	24		24	13
Trinidad	76	42	21	12		

Cuadro 2-6: Remoción de Sólidos Suspendidos en los Sistemas Monitoreadas

Sistema	Media Concentración de Sólidos Suspendidos mg/L			
	Afluyente	Efluente Laguna 1	Efluente Laguna 2	Efluente Laguna 3
<i>Época Seca:</i>				
Catacamas Este	294	188	125	
Catacamas Oeste	271	80	59	
Moroceli	152	133	115	
Tela	66	51	19	24
Villanueva I	187	38	44	
Villanueva II	161	53	52	
<i>Época Lluviosa</i>				
Catacamas Este	266	160	135	
Catacamas Oeste	271	80	59	
Danlí	195	84	59	
Juticalpa	155	96	80	
El Progreso	137	45	52	
Tela	151	44	35	57

2.4.6 Características Físico-Químicas de los Lodos

El Cuadro 2-7 presenta los resultados de los parámetros de los lodos en las lagunas primarias. Debido a que ningún sistema tenía un desarenador en operación, se utilizó la relación de concentraciones entre sólidos volátiles y sólidos fijos, estimando la producción de sólidos arenosos por cada 1,000 m³ de afluente de aguas residuales que se presenta en el cuadro. Asimismo, con las mediciones del volumen de lodos acumulados por batimetría, se pudo estimar la producción de lodos por cada 1,000 m³ de afluente. Se nota que la producción de sólidos arenosos sin desarenadores fue estimada en un rango de 3.2—5.8% del volumen total de lodos acumulados, lo que es semejante a un rango típico que ha sido reportado en otros estudios de lagunas (Arceivala, *et al.*, 1970).

Cuadro 2-7: Resumen de Resultados para Lodos de Lagunas Primarias

Parámetro	Rango de Valores
Sólidos Totales, %	11.0—15.5
Sólidos Volátiles, %	15.5—31.4
Sólidos Fijos, %	68.0—84.5
Acumulación Estimada de Sólidos Arenosos, m ³ /1,000m ³	0.008—0.085
Acumulación Estimada de Lodos, m ³ /1,000m ³	0.213—0.548
Porcentaje de sólidos arenosos en lodos acumulados, %	3.2—5.8

2.4.7 Observaciones de Condición Física, Operación y Mantenimiento, y Sostenibilidad

El Cuadro 2-8 presenta los resultados de observaciones en el campo de la condición física, operación y mantenimiento, y sostenibilidad de los sistemas monitoreados. De las condiciones físicas, un problema en todos los sistemas es la falta de canaletas Parshall calibradas con su respectiva lectura de caudal a la vista. Se constató, que ningún sistema posee una tabla con registros donde se permita traducir la lectura en caudal; unido a esto se expone el hecho la mala construcción de estas estructuras, por lo que canaletas prefabricadas pueden ser la solución del problema. En la mayoría de los sistemas faltan desarenadores y canales de desvío, así como facilidades sanitarias para los operadores y un botiquín para los trabajadores. Finalmente, ningún sistema tiene un lugar físico reservado para el almacenaje de lodos secos o mojados después de la limpieza de lodos.

En términos de operación, ningún operador ha monitoreado sus caudales—tampoco puede con las canaletas Parshall existentes—ni ha tomado muestras de rutina (*in situ* o para mandar al laboratorio) para analizar el funcionamiento del sistema. Ninguna municipalidad ha tomado un catastro de las conexiones al sistema de alcantarillado para tener un registro de las cargas pasadas, presentes y futuras. Y nadie ha monitoreado la profundidad de lodos en lagunas primarias.

El mantenimiento físico fue adecuado en la mayoría de sistemas, pero muchas veces faltan herramientas adecuadas para, por ejemplo, la limpieza de natas. La mayoría de las instalaciones cuentan con personal adecuada, pero el personal frecuentemente requiere más capacitación sobre la operación y mantenimiento del sistema.

Cuadro 2-8: Condiciones Físicas, de Operación y Mantenimiento, y de Sostenibilidad de los Sistemas Monitoreados

Sistema	Condición Física	Monitoreo de Rutina	Mantenimiento	Personal	Planificación para Remoción de Lodos	Sostenibilidad
Catacamas Este	Sobrecargado Faltan canal de desvío, canaleta Parshall adecuada, y desarenador Faltan facilidades sanitarios y botiquín Necesita limpieza de lodos	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo de rutina No hay monitoreo de acumulación de lodos	Satisfactorio Carencia de equipo manual para limpieza del sistema	Hay personal permanente Personal requiere mayor capacitación	No hay planes ni presupuesto	Apoyo técnico y económico por parte de la municipalidad Aceptación pública
Catacamas Oeste	Faltan canal de desvío, y canaleta Parshall adecuada Faltan facilidades sanitarios y botiquín Cercos en mal estado Revestimiento en mal estado	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo No hay monitoreo de acumulación de lodos	Satisfactorio Carencia de equipo manual para limpieza del sistema	Hay personal permanente Personal requiere mayor capacitación	No hay planes ni presupuesto	Apoyo técnico y económico por parte de la municipalidad Aceptación pública
Danlí	Faltan rejilla, canaleta Parshall adecuada, y desarenador Faltan facilidades sanitarios y botiquín Necesita limpieza de lodos	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo No hay monitoreo de acumulación de lodos	Satisfactorio Carencia de sitio para disposición final de natas	Hay personal permanente Personal requiere mayor capacitación	No hay planes ni presupuesto	Apoyo <u>mínimo</u> técnico y económico por parte de la municipalidad Aceptación pública
Juticalpa	Falta canal de desvío y canaleta Parshall adecuada Falta caseta de operación con facilidades sanitarios y botiquín Falta revestimiento Acceso difícil en invierno	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo No hay monitoreo de acumulación de lodos	No es satisfactorio Carencia de sitio para disposición final de natas	Personal que mantiene periódicamente Personal requiere mayor capacitación con asignación de más tiempo para mantenimiento	No hay planes ni presupuesto	Apoyo <u>mínimo</u> técnico y económico por parte de la municipalidad Aceptación pública

Cuadro 2-8: A Continuación

Sistema	Condición Física	Monitoreo de Rutina	Mantenimiento	Personal	Planificación para Remoción de Lodos	Sostenibilidad
Moroceli	Faltan canaleta Parshall adecuada y desarenador adecuados Faltan facilidades sanitarios y botiquín Defectos en canal de desvío Mamparas demasiadas altas Erosión de taludes por escurrimiento de agua pluvial	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo No hay monitoreo de acumulación de lodos	Escaso Carencia de equipo manual para limpieza del sistema	No hay personal asignado de tiempo competo para mantenimiento Personal requiere mayor capacitación con asignación de más tiempo para mantenimiento	No hay planes ni presupuesto	<u>No existe</u> apoyo técnico ni económico por parte de la municipalidad Aceptación pública
Pajuiles	Faltan facilidades sanitarios y botiquín Falta canaleta Parshall adecuada y desarenador Falta acceso adecuado de vehículos	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo No hay monitoreo de acumulación de lodos	Escaso Carencia de sitio para disposición final de natas	No hay personal asignado de tiempo completo para mantenimiento Personal requiere capacitación con asignación de más tiempo para mantenimiento	No hay planes ni presupuesto	<u>No existe</u> apoyo económico por parte de la municipalidad <u>No existe</u> aceptación pública
El Progreso	Falta desarenador	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo No hay monitoreo de acumulación de lodos	Satisfactorio	Hay personal permanente Personal requiere capacitación	No hay planes ni presupuesto	Aceptación pública

Cuadro 2-8: A Continuación

Sistema	Condición Física	Monitoreo de Rutina	Mantenimiento	Personal	Planificación para Remoción de Lodos	Sostenibilidad
Tela	Faltan rejilla, canaleta Parshall adecuada, desarenador, canal de desvío, y revestimiento Faltan caseta de operación con facilidades sanitarios y botiquín Cercos permiten el acceso de animales Acceso difícil	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo No hay monitoreo de acumulación de lodos	Satisfactorio	Personal que mantiene 2 o 3 veces por semana	No hay planes ni presupuesto	Apoyo técnico y económico por parte de la municipalidad Aceptación pública
Trinidad	Falta canaleta Parshall adecuada Faltan facilidades sanitarios y botiquín Vertederos de salidas son mal diseñados y no funcionan	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo No hay monitoreo de acumulación de lodos	No es satisfactorio Carencia de sitio para disposición final de natas Falta el uso adecuado del desarenador	Hay personal permanente Personal requiere mayor capacitación	No hay planes ni presupuesto	Apoyo <u>mínimo</u> técnico y económico por parte de la municipalidad Aceptación pública
Villanueva	Sobrecargado Falta botiquín Faltan rejilla, canaleta Parshall adecuada, desarenador, y canal de desvío Mala repartición de caudales entre dos baterías en paralelo Necesita limpieza de lodos	No hay catastro No hay medición de caudales No hay muestreo No hay monitoreo de acumulación de lodos	Satisfactorio	Hay personal permanente	No hay planes ni presupuesto	Apoyo técnico y económico por parte de la municipalidad Aceptación pública

Adaptado de ECOMAC (2004) y visitas personales.

La sostenibilidad de la mayoría de los sistemas parece adecuada por el momento. La mayoría de los sistemas cuenta con un relativo apoyo técnico y económico por parte de la municipalidad, y también tiene una aceptación por parte del público. Sin embargo, hay bastantes problemas como la necesidad de instalar canaletas Parshall que funcionen, monitoreo de caudales, catastro de conexiones, capacitación de operadores, y planes para la expansión del sistema para acomodar el crecimiento de la población. Un punto muy importante es el hecho que ninguna instalación cuenta con un plan de monitoreo y limpieza de lodos en las lagunas primarias. Porque el costo de remoción de lodos puede ser significativo, especialmente si dejara la acumulación de ellos hasta que la profundidad prohíba su secado dentro de la laguna y tendrían que ser bombeados (Véase el Capítulo 8). La sostenibilidad de los sistemas a largo plazo dependerá mucho sobre el manejo adecuado de lodos cuando sea necesario limpiar las lagunas primarias.

2.5 Lecciones Aprendidas y Recomendaciones

2.5.1 Funcionamiento de Sistemas y Diseño de Procesos

La mayoría de los sistemas están funcionando en condiciones de cargas hidráulicas y orgánicas superiores a las usadas históricamente para su diseño—a pesar que tenían menos de 10 años de operación. Por lo menos 3 lagunas primarias, que fueron diseñadas como lagunas facultativas, estaban funcionando como lagunas anaeróbicas por la sobrecarga. El problema principal se manifiesta en la introducción de caudales y concentraciones de DBO_5 superiores a los considerados en diseño. Se concluye que, por la incertidumbre del catastro de conexiones y su crecimiento en las municipalidades, y de la variación de concentraciones de DBO_5 que puede ocurrir, es un error asumir aportes per cápita de dotación y DBO_5 en el diseño y en la planificación. Se debe diseñar y planificar usando mediciones de caudales y DBO_5 en campo, y se debe desarrollar un registro histórico de ambos en las municipalidades.

Relacionado a la sobrecarga por la acumulación de lodos en las lagunas primarias, se concluye que por lo menos tres lagunas estaban llegando a su límite de acumulación de lodos y en situación para extraerlos y secarlos por el método de secado—el menos costoso—en vez de los métodos de sacarlos mojados (Véase el Capítulo 8). Ningún sistema tiene monitoreo de acumulación de lodos ni un plan de su remoción. Los diseños y manuales de operación deben incluir una estimación de las tasas de acumulación de lodos y un método de remoción con una disposición final adecuada. La remoción de lodos de lagunas anaeróbicas es más difícil todavía que la remoción de lagunas facultativas por la profundidad de lodos encontrada, y por esta razón no se debe diseñar lagunas anaeróbicas en las municipalidades.

A pesar de las sobrecargas, la funcionalidad de los sistemas ha sido verdaderamente óptima frente a la remoción de los patógenos como huevos de helmintos, coliformes fecales, y *Escherichia coli*. Referente a reuso de efluentes tratados, todos los sistemas cumplen la norma de Categoría B, Riego Restringido, de la OMS, categorizado para uso en cultivos agrícolas que no se consumen crudos. Se concluye que se debe diseñar sistemas de dos baterías de lagunas facultativas en paralelo, seguido por un mínimo de una laguna de maduración; las lagunas facultativas deben tener un mínimo de 10 días de TRH, y las lagunas de maduración un mínimo de 5 días de TRH, para la vida útil del sistema. Con estas normas de diseño se debe obtener 100% remoción de huevos de helmintos, y aproximadamente 3 ciclos \log_{10} remoción de coliformes fecales o *E. coli*.

También, a pesar de las sobrecargas, y las fuertes diferencias de sistema a sistema, la remoción de DBO₅ y SS ha sido muy aceptable y típica de lagunas de estabilización en cualquiera parte del mundo (Arceivala, *et al.*, 1970; Mara, *et al.*, 1992; Oakley, *et al.*, 2000; Yáñez, 1992).

Tomando en cuenta la remoción de patógenos y parámetros convencionales, a pesar de los problemas mencionados, se concluye que la tecnología de lagunas de estabilización es noble y resistente a las fuertes diferencias de condiciones que se encuentra en las municipalidades. Es difícil creer que otras tecnologías de tratamiento podrían funcionar con tanto éxito como lagunas en remoción de patógenos y DBO₅ bajo las condiciones encontradas en las municipalidades.

2.5.2 Diseño Físico y Construcción

Los problemas principales de diseño físico son:

1. Falta de canal de desvío.
2. Falta de canaleta Parshall calibrada para medir caudales.
3. Falta de desarenador.
4. Falta de dispositivos para remoción y almacenaje de lodos (rampas y lechos de secado)
5. Falta de diseños estándares para dispositivos de entrada, salida, y división de caudales.
6. Falta de lagunas primarias en paralelo para remoción de lodos.
7. Falta de facilidades sanitarias con botiquín para los operadores.

Se discute estos problemas en detalle en los Capítulos 3, 6, 7 y 8.

Además, en varios lugares han ocurrido problemas serios con supervisión adecuada de construcción. Por ejemplo, ninguna canaleta Parshall hecho de concreto sirve para medir caudales como resultado de su mala construcción que prohíbe su calibración (Véase las fotos en Capítulos 3 y 6). Además, se observó que al menos tres canaletas Parshall prefabricadas no se pueden utilizar por la mala instalación de ellas: Dos de ellas no tenían tablas con valores de nivel, y el contratista cortó el fondo de otra para poder ubicarla más fácilmente entre la rejilla y el desarenador (se debe ser ubicada después del desarenador para controlar la velocidad en el desarenador como se discute en el Capítulo 3). En otro ejemplo una contratista no puso impermeabilización en los taludes interiores de la laguna primaria, y la laguna no pudo mantener su nivel después de llenarla como resultado de la infiltración. En la mayoría de los sistemas el diseñador original nunca ha visitado el sitio a fin de verificar la construcción versus su diseño y concluir sobre su operación.

Se concluye que hay una falla significativa en la supervisión de construcción que se debe mejorar para evitar estos problemas en el futuro.

2.5.3 Operación y Mantenimiento

Mientras el mantenimiento físico de la mayoría de las instalaciones fue adecuado, faltaba mucho en la operación de rutina de los sistemas, particularmente la medición de caudales con un registro histórico, el catastro de conexiones al alcantarillado, el muestreo de rutina, y la medición de la acumulación de lodos. En los sistemas sobrecargados, a pesar de los problemas obvios, las municipalidades no han iniciado ningún plan para enfrentar las sobrecargas a efecto que el sistema sea sostenible a largo plazo.

Es imposible, por ejemplo, analizar el comportamiento de un sistema de lagunas, y saber si están o estarán sobrecargados, sin tener un registro de los caudales. Que algo tan básico todavía no existe en las municipalidades es una reflexión de la falta de capacitación y conscientización, no solamente por parte de los operadores, sino de los alcaldes, ingenieros municipales, diseñadores, e ingenieros y técnicos del sector público que están involucrados con el financiamiento y regulación de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Se concluye que es necesario e urgente que las municipalidades empiezan operar sus sistemas más profundamente para poder anticipar problemas de sobrecargas hidráulicas y orgánicas, y acumulación de lodos en lagunas primarias.

2.5.4 Sostenibilidad

Las diferencias encontradas en los tiempos de retención hidráulica y carga orgánica superficial entre las municipalidades radican fundamentalmente en las acciones de operación y mantenimiento ofrecidas por los entes encargados. La mala administración de la cobertura de servicio, las condiciones de colección y transporte del sistema de alcantarillado sanitario, y el deficitario servicio de agua potable pueden redundar en bajos caudales entrando a los sistemas. También, la mala administración para controlar la cobertura, y el mal monitoreo y control de catastro y tipo de usuarios, pueden redundar en altos caudales entrando a los sistemas. No se puede dejar por alto la falta de monitoreo de los sistemas, especialmente lo referente a caudales, cargas¹, y acumulación de lodos.

Para que los sistemas de lagunas de estabilización tengan sostenibilidad a largo plazo, los entes encargados deben hacer lo siguiente:

1. Capacitar operadores, ingenieros municipales y responsables de entes públicos en el monitoreo, aspecto que hoy en día representa una seria responsabilidad. Se hace hincapié en el seguimiento de: catastro de conexiones, medición de caudales, cargas, y medición de la acumulación de lodos.
2. Desarrollar planes de limpieza de lodos que incluyen financiamiento del trabajo. Si esto está bien planeado, la municipalidad puede hacer la obra en vez de contratar una empresa privada.
3. Desarrollar planes de la expansión del sistema de tratamiento de forma que pueda balancear su eficiencia conforme al aumento de la población y sus conexiones al alcantarillado.
4. Desarrollar planes de tarifas que puedan cubrir los costos de la operación de la instalación, incluyendo la remoción y disposición final de lodos cada 5 a 10 años.

¹ Carga: Aquí se expresa como la concentración acumulada de las características físico-químicas y bacteriológicas. Se recomienda el monitoreo de los parámetros estipulados en los límites de calidad de aguas de descarga por ley y analizar su rendimiento o eficiencia de tratamiento.

CAPITULO 3: PRETRATAMIENTO Y MEDICIÓN DE CAUDALES

3.1 Introducción

En un sistema de tratamiento de aguas residuales a través de lagunas de estabilización, el pretratamiento sirve para lo siguiente (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, 1993; MOPT, 1991; Mara, *et al.*, 1992):

- i) Remover los sólidos grandes (gruesos) que flotan o están suspendidos. Estos sólidos gruesos consisten principalmente de papel, plásticos, trapos y tela, y otros desechos sólidos que pueden entrar al alcantarillado. Dependiendo sobre la abertura de las barras en una rejilla, los sólidos gruesos también pueden consistir de excretas humanas.
- ii) Remover los sólidos inorgánicos pesados, los que se llaman sólidos arenosos, que han entrado al alcantarillado. Estos sólidos entran al alcantarillado por las conexiones de tubería y los pozos de inspección y consisten principalmente de arena y otros sólidos que tienen una gravedad específica alrededor 2.5.

Los sólidos flotantes y gruesos pueden causar problemas nocivos en la operación de las lagunas: ellos ayudan la formación de nata que puede producir malos olores, sirven como un foco para la reproducción de insectos, y producen condiciones desagradables a la vista (Véanse las Fotos 3-1). Los sólidos arenosos pueden llenar la entrada de la laguna primaria (Véase la Foto 3-2), donde se impiden la mezcla del afluente con el contenido de la laguna, erosionan el revestimiento y los taludes interiores, y causan problemas de cortocircuitos hidráulicos, malos olores, y condiciones desagradables a la vista (Gloyna, 1971). También, los sólidos arenosos pueden contribuir significadamente al volumen de lodos que llena una laguna primaria, y como resultado la laguna necesitará limpieza con más frecuencia.

Como se discute en detalle adelante, la manera más apropiada de remover los sólidos arenosos y gruesos es por medio de rejillas y desarenadores horizontales, con el nivel de agua y la velocidad en los canales controlados por una canaleta Parshall prefabricada; la canaleta Parshall también sirve como el medidor de caudales. La Foto 3-3 y la Figura 3-1 muestran una instalación típica de una rejilla, un desarenador horizontal con dos cámaras, y una canaleta Parshall prefabricada.

3.2 Remoción de Sólidos Gruesos: Rejillas

Para la separación de sólidos gruesos se utilizan rejillas ubicadas transversalmente al flujo. Al pasar el agua, el material grueso queda retenido en el enrejado. El material debe ser retirado manualmente con un rastro y enterrado diariamente. La cantidad de material retenido varía dependiendo sobre la abertura entre las barras de las rejillas. Estudios en Brasil y Perú han encontrado cantidades de sólidos gruesos retenidos entre 0.008 y 0.038m³/1,000m³ en rejillas con aberturas entre 20 a 50 mm (Rolim, 2000; Viceministerio de Vivienda y Construcción, 1997). Utilizando estos rangos, y asumiendo un caudal por persona de 120 L/cápita-día, una población de 10,000 habitantes podría tener una producción de material retenido entre 0.01 y 0.05 m³/día (10—50 L/día). Sin embargo, el diseñador debe verificar la cantidad retenida a través de mediciones del campo de lagunas en operación que cuentan con rejillas.



Fotos 3-1: Los sólidos flotantes y gruesos pueden causar problemas nocivos en la operación de las lagunas: ellos ayudan la formación de nata que puede producir malos olores, sirven como un foco para la reproducción de insectos, y producen condiciones desagradables a la vista. Se deben ser removidos a través de rejillas en la entrada del sistema. (Foto arriba: Danlí, Honduras; abajo: Morocelí, Honduras)



Foto 3-2: Si los sólidos arenosos no están removidos, pueden llenar la entrada de la laguna primaria, donde impiden la mezcla del afluente con el contenido de la laguna, causando problemas de cortocircuitos hidráulicos con malfuncionamiento del sistema. También, pueden causar malos olores, condiciones desagradables a la vista, y erosión al revestimiento y a los taludes interiores como se ve en la foto arriba. Además, los sólidos arenosos pueden contribuir significadamente al volumen de lodos que llena una laguna primaria, con la consecuencia que la laguna necesitará limpieza con más frecuencia. La manera típica de remover los sólidos arenosos es por medio de desarenadores horizontales. (Chinendega, Nicaragua)



Foto 3-3: Una rejilla y un desarenador diseñados para una laguna facultativa, seguidos por una canaleta Parshall prefabricada para controlar el nivel de agua, la velocidad horizontal en el desarenador, y medir los caudales. Arriba de la rejilla hay una plataforma de drenaje para drenar los sólidos gruesos removidos con un rastro antes de enterrarlos. El desarenador tiene dos cámaras: Se desvía el caudal a una cámara y se drena la otra para sacar los sólidos arenosos. Este desarenador fue instalado porque la carga de arena fue excesiva y la laguna estaba llenando prematuramente con lodos arenosos. Nótese las pilas de los sólidos gruesos y arenosos sacados por el operador y la carretilla utilizada para llevar los sólidos a su lugar de enterramiento. (León, Nicaragua)

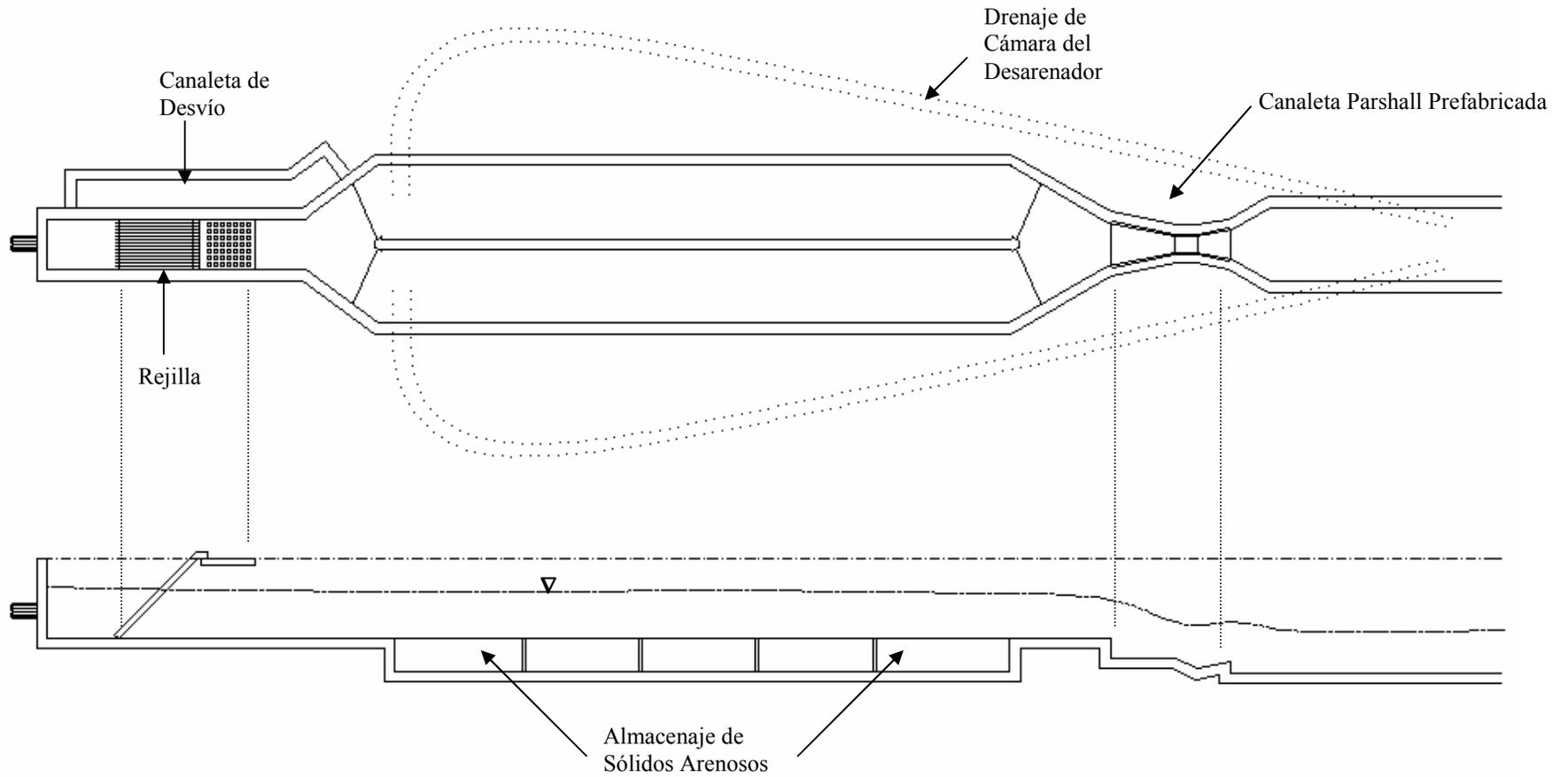


Figura 3-1: La Instalación Recomendada de Rejilla, Desarenador Horizontal con Dos Cámaras, y Canaleta Parshall para el Control de Velocidad y Medición de Caudal.

3.2.1 Diseño de Rejillas

El Cuadro 3-1 y la Figura 3-1 muestran las normas de diseño recomendadas y los detalles para rejillas en sistemas de lagunas. La Foto 3-4 muestra una instalación típica. La rejilla debe tener barras rectangulares con anchos de 5 a 15 mm y espesores de 25 a 40 mm. También debe tener una plataforma de drenaje para poder drenar los sólidos gruesos retenidos—que tienen una humedad de aproximadamente 80%—antes de disponerlos en una manera sanitaria (Rolim, 2000). Se recomienda una abertura entre las barras de 50 mm para que la mayoría de las heces humanas pasen por la rejilla sin ser retenidas (Véanse las Fotos 3.5); en esta manera el operador no tendrá que manejarlas con los riesgos altos de exposición a las enfermedades relacionadas a las excretas. El canal de aproximación antes de la rejilla debe tener un canal de desvío en el caso de una emergencia (Foto 3-6). La inclinación con la vertical de la rejilla varía entre 45 a 60° para que se remueva el material retenido fácilmente con un rastro. El material de construcción de las barras y la plataforma de drenaje debe ser resistente a la corrosión; han utilizado acero inoxidable, acero galvanizado, y aluminio en la construcción (Fotos 3-7).

Cuadro 3-1: Normas de Diseño para Rejillas Manuales

Parámetro	Norma Recomendada
Forma de barra	Rectangular No debe utilizar barras de refuerza
Ancho de barra	5—15 mm
Espesor de barra	25—40 mm
Espaciamiento (abertura) entre barras	25—50 mm 50 mm recomendado para que las heces humanas pasen por las barras
Inclinación con la vertical	45—60°
Plataforma de drenaje	Suficiente para el almacenamiento temporal del material retenido en condiciones sanitarias
Canaleta de desvío (By-pass)	Suficiente para desviar el caudal máximo durante una emergencia
Material de construcción de barras y plataforma de drenaje	Acero inoxidable o galvanizado; aluminio
Velocidad de aproximación	0.45 m/s
Tiempo de retención en canal de aproximación	≥ 3 s
Largo de canal de aproximación	≥ 1.35 m
Velocidad a través de las barras	≤ 0.6 m/s para caudal promedio ≤ 0.9 m/s para caudal máximo
Pérdida de carga máxima	0.15 m
Cantidades de material retenido	0.008—0.038 m ³ /1,000 m ³
Disposición final de residuos	Solución técnica utilizando métodos sanitarios

Adaptado de Reynolds y Richards, 1996; Rolim, 2000; y Viceministerio de Vivienda y Construcción, 1997.

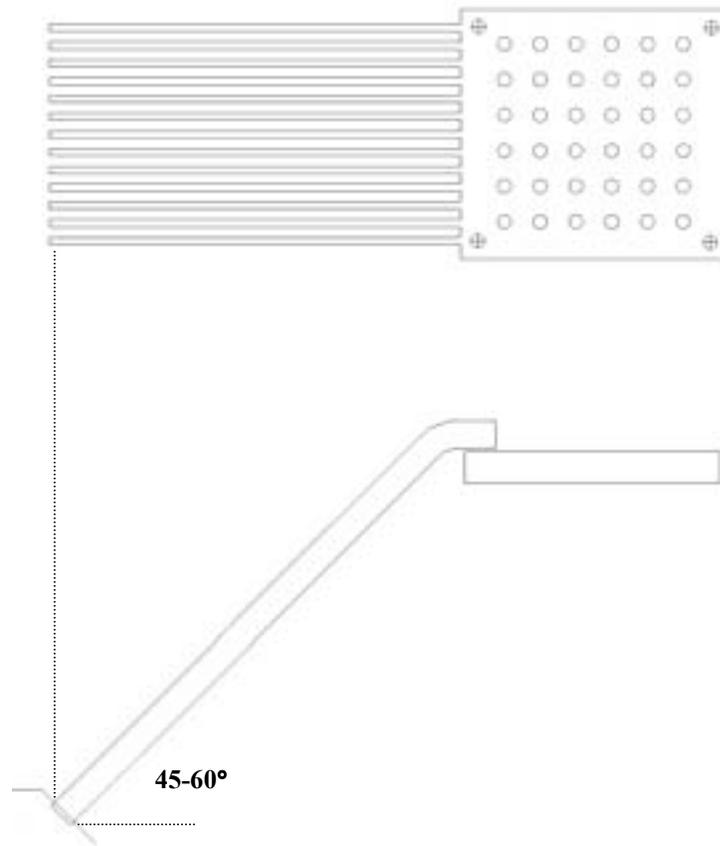


Figura 3-2: Detalle de una Rejilla de Metal con Plataforma de Drenaje.



Foto 3-4: Una rejilla bien diseñada debe tener barras rectangulares con anchos de 5—15 mm y espesores de 25—40 mm, con una plataforma de drenaje para poder drenar los sólidos gruesos retenidos—que tienen una humedad promedio de 80%—antes de disponerlos en una manera sanitaria. Se recomienda una abertura entre las barras de 50 mm para que las heces humanas pasen por la rejilla sin ser retenidas (Véanse las Fotos 3.5). La inclinación con la vertical de la rejilla varía entre 45 a 60° para que se remueva el material retenido fácilmente con un rastro. El material de construcción de las barras y la plataforma de drenaje debe ser de metal y resistente a la corrosión, como acero inoxidable, acero galvanizado, o aluminio. (Urbanización Alta Vista, San Salvador, El Salvador)



Fotos 3-5: La remoción del material atrapado en la rejilla constituye una función clave para mantener el caudal interrumpido. Una rejilla tiene que ser limpiada diariamente: La foto superior muestra el nivel del agua 24 horas después de limpiar la rejilla; la foto inferior muestra el nivel después de limpiarla. Como un factor de seguridad la rejilla debería de haber tenido una canaleta de desvío (Véase la Foto 3-6 siguiente). Se nota que la mayoría de los sólidos retenidos son heces humanas, las cuales deben pasar por la rejilla para ser tratados en el sistema aguas abajo. (Urbanización Alpes Suiza, San Salvador, El Salvador)



Foto 3-6: El canal de aproximación antes de la rejilla debe tener una canaleta de desvío como se muestra arriba para desviar el afluente durante una emergencia cuando el operador no está disponible para limpiar la rejilla. Nótese en la foto que las rejillas son hechas de aluminio. La rejilla inclinada debería de haber tenido una plataforma de drenaje de metal. (Sanarate, Guatemala)

3.2.2 Dimensionamiento de Rejillas y el Canal de Aproximación

Se dimensiona la rejilla y el canal de aproximación antes de la rejilla con la siguiente ecuación adaptada de Mara (1976):

$$a_{canal} = \frac{Q_{max}}{0.6P_{max}} \cdot \left[\frac{a_b + e_b}{e_b} \right] \quad (3-1)$$

donde

- a_{canal} = ancho de canal de aproximación, m
- Q_{max} = caudal máximo, m³/s
- 0.6 = velocidad máxima a través de las barras, m/s
- P_{max} = profundidad máxima de agua en el canal cuando $Q = Q_{max}$, m
- a_b = ancho de barras, mm
- e_b = espaciamiento (abertura) entre barras, mm

La profundidad máxima, P_{max} , es determinada durante el diseño del desarenador como se muestra adelante en un ejemplo de diseño.



Fotos 3-7: La rejilla a la izquierda, mientras que tiene una abertura apropiada para que retenga los sólidos más gruesos y que permita pasar las heces humanas, y también una plataforma de drenaje adecuada, no debe ser construida de barras de refuerza. Las barras de refuerza, por la calidad de metal utilizada en su construcción, no duran por muchos años en un sistema de aguas residuales donde se favorece las condiciones de corrosión. Los sólidos en la foto izquierda deben ser enterrados inmediatamente para proteger la salud pública. (Izquierda: Granada, Nicaragua; Derecha: Choloma, Honduras)

Se calcula la velocidad en el canal de aproximación con la siguiente ecuación:

$$v = \frac{0.6}{\left(\frac{a_b + e_b}{e_b} \right)} \quad (3-2)$$

donde v = velocidad en el canal de aproximación, m/s

La Ecuación 3-2 asume que la velocidad máxima a través de la rejilla es 0.6 m/s, y, por lo tanto, la velocidad calculada, v , debe ser cerca de 0.45 m/s si se utilizan dimensiones de a_b y e_b típicas mostradas en el Cuadro 3-1.

Los canales de aproximación deben tener un tiempo de retención hidráulica mínimo de 3 segundos y un largo mínimo de 1.35 metros para asegurar una velocidad uniforme a través de las barras. Si el tiempo de retención hidráulica y el largo son menos, es muy probable que el canal tendrá turbulencia por las barras como se ve en las Fotos 3-8.

Se calculan las pérdidas de carga a través de la rejilla con la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, 1991):

$$h_f = \frac{1}{0.7} \cdot \left[\frac{v_R^2 - v_a^2}{2g} \right] \quad (3-3)$$

donde h_f = pérdida de carga, m
 v_R = velocidad a través de la rejilla, m/s
 v_a = velocidad en el canal de aproximación, m/s
 g = aceleración de gravedad, 9.81 m/s²

Se aplica la Ecuación 3-2 solamente cuando la rejilla está limpia (Metcalf & Eddy, 1991).

3.2.3 Disposición Final de los Sólidos Gruesos

Sin duda los desechos gruesos están muy contaminados con patógenos, y son excesivamente nocivos con malos olores y malas apariencias. Deben estar enterrados diariamente con el mínimo de manejo por el operador de la instalación. El diseño de la instalación de pretratamiento debe incluir un área reservado cerca de la rejilla donde el operador puede enterrar los sólidos gruesos como se ve en la Foto 3-9.



Fotos 3-8: Los canales de aproximación antes de la rejilla deben tener una velocidad de 0.45 m/s para que los sólidos arenosos no sedimenten y la velocidad a través de las barras no exceda 0.6 m/s. También, los canales deben tener un tiempo de retención hidráulica mínimo de 3 segundos y un largo mínimo de 1.35 metros para asegurar una velocidad uniforme a través de las barras. El canal a la izquierda tiene demasiada turbulencia para tener una velocidad uniforme. El canal a la derecha tiene suficiente largo para asegurar una velocidad uniforme sin turbulencia. (Foto izquierda: Urbanización en la Ciudad de Guatemala; Foto derecha: Trinidad, Honduras)



Foto 3-9: Una excavación al lado de la rejilla y el desarenador para enterrar los sólidos colectados de la rejilla y el desarenador. El diseño de la instalación de pretratamiento debe incluir un área reservado cerca donde el operador puede enterrar los sólidos arenosos y gruesos tan pronto como los saque con el mínimo de manejo. Los sólidos arenosos y gruesos siempre estarán contaminados con patógenos, y los sólidos gruesos de la rejilla son excesivamente nocivos con malos olores y malas apariencias. Es necesario enterrar los sólidos gruesos diariamente, mientras los sólidos arenosos requieren enterramiento solamente cuando se limpia la cámara del desarenador. (Urbanización Alta Vista, San Salvador, El Salvador)

3.3 Remoción de Sólidos Arenosos: Desarenadores

Las aguas residuales contienen, por lo general, concentraciones significativas de sólidos inorgánicos como arena, ceniza, y grava que tienen una gravedad específica entre 1.5 a 2.65; por convención se llaman estos "sólidos arenosos". Los sólidos arenosos provienen del alcantarillado y la cantidad producida es muy variable y depende de factores como la tasa de infiltración al alcantarillado, la condición del colector, la topografía, el tipo de suelo, y el porcentaje de las calles pavimentadas. También, la cantidad varía significativamente entre la época seca y la época lluviosa (Rolim, 2000; ASCE/WPCF, 1977).

El Cuadro 3-2 muestran las cantidades reportadas en varios estudios técnicos en América Latina, India, y los EE.UU. Donde existen datos para las épocas secas y lluviosas, siempre durante la época lluviosa, y especialmente durante una tormenta, la producción de sólidos arenosos sube significativamente. Estudios en los EE.UU. han mostrado que la relación entre el máximo diario de producción y el promedio diario de producción durante una tormenta puede llegar hasta 1,800 (ASCE/WPCF, 1977).

Cuadro 3-2: Cantidades de Sólidos Arenosos Encontradas en Aguas Residuales en América Latina, India y los EE.UU.

Lugar	Cantidades m ³ /1,000m ³	Relación de $\frac{\text{Máximo Diario}}{\text{Promedio Diario}}$
Brasil (1970) Época seca	0.015—0.029	
Época lluviosa	0.030—0.040	
Honduras (2003) (Estimado)	0.010—0.085	
India (1970) Promedio Diario	0.026—0.090	
Pico de la carga (Durante 1-2 horas)	0.370—0.740	
EE.UU. Promedio Diario	0.002—0.176	
Máximo Diario (Durante una tormenta)	0.006—3.900	1.0—1,800

Adaptado de Arceivala, *et al.*, 1970; Oakley, 2004; Rolim, 2000; y ASCE/WPCF, 1977.

Desgraciadamente, como la producción de sólidos gruesos, existen muy pocos datos publicados de la producción de sólidos arenosos de varios lugares en Centroamérica durante las épocas secas y lluviosas. El diseñador debe estimar la producción local usando mediciones del campo. Un punto para empezar la estimación sería los datos obtenidos del estudio de monitoreo de las lagunas de estabilización de Honduras presentados en el Cuadro 3-2.

Los sólidos arenosos, si entraran una laguna primaria, pueden causar todos los problemas mencionados anteriormente y mostraron en las Fotos 3-2 y 3-3. Como resultado, se recomienda en todas las instalaciones de lagunas el uso de desarenadores rectangulares con canaletas Parshall para el control de velocidad, y para medir los caudales (Figura 3-1 y Foto 3-3). El procedimiento de diseño se discute adelante.

3.3.1 Ecuaciones de Canaletas Parshall de Flujo Libre para el Diseño de Desarenadores

La Figura 3-3 muestra los detalles de una canaleta Parshall conectada al extremo de un desarenador rectangular.

La ecuación del caudal para una canaleta Parshall se define como la siguiente (Gloyna, 1971; Marais y van Haandel, 1996):

$$Q = 2.27 \cdot W(H_a)^{1.5} \quad (3-4)$$

donde Q = caudal, m³/s
 W = ancho de garganta de medidor Parshall, m
 H_a = profundidad de agua (carga) a punto A (Figura 3-2) medida desde la base de la canaleta Parshall, m

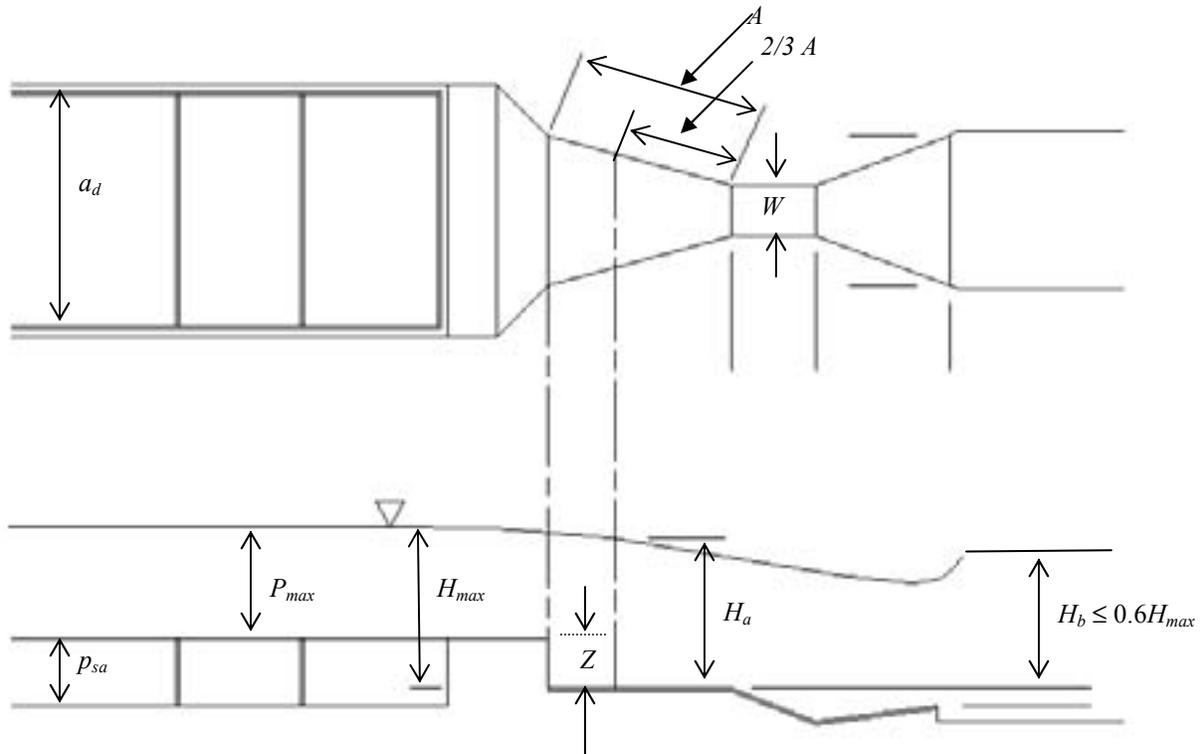


Figura 3-3: Una Canaleta Parshall al Extremo de Un Desarenador Rectangular

La carga aguas arriba de la canaleta Parshall en el canal del desarenador se define como (Gloyna, 1971):

$$H = 1.1H_a \quad (3-5)$$

donde H = la carga aguas arriba de canaleta Parshall en el canal del desarenador (Figura 3-2) medida con referencia a la base de canaleta Parshall, m

Combinando las Ecuaciones 3-4 y 3-5 se obtiene la siguiente relación:

$$Q = 2.27 \cdot W \left[\frac{H}{1.1} \right]^{1.5} \quad (3-6)$$

Al reacomodar la Ecuación 3-6 se obtiene la siguiente relación para la carga en el canal del desarenador (Figura 3-3):

$$H = \left[\frac{1.1 \cdot Q}{2.27 \cdot W} \right]^{0.667} \quad (3-7)$$

Para el caudal máximo, Q_{\max} , la Ecuación 3-7 resulta en

$$Q_{\max} = 2.27 \cdot W \left[\frac{H_{\max}}{1.1} \right]^{1.5} \quad (3-8)$$

donde H_{\max} = la carga máxima en el canal del desarenador cuando $Q = Q_{\max}$, m

Reacomodando la Ecuación 3-8 se obtiene la siguiente relación para la carga máxima en el desarenador:

$$H_{\max} = \left[\frac{1.1 \cdot Q_{\max}}{2.27 \cdot W} \right]^{0.667} \quad (3-9)$$

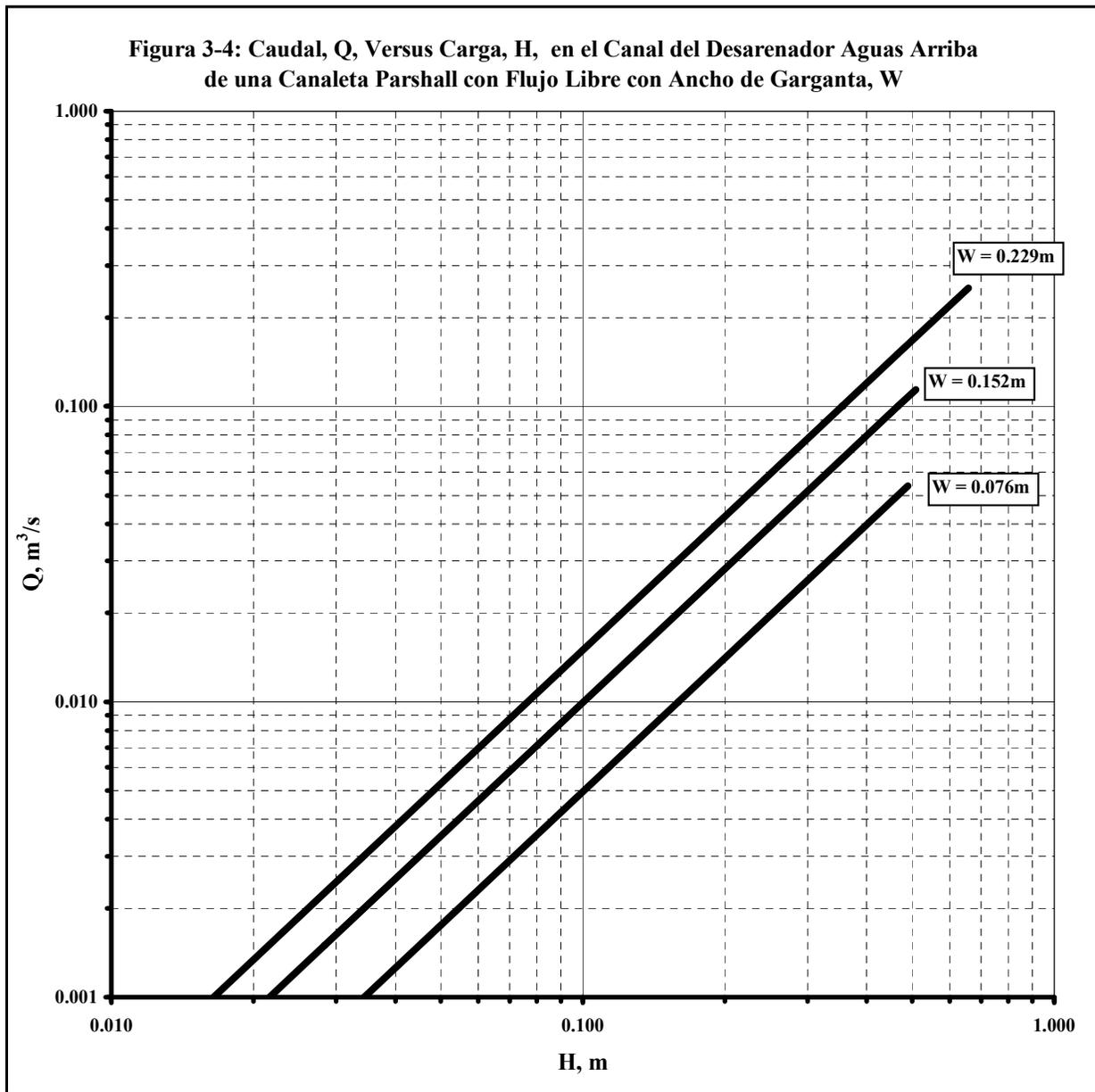
Las Ecuaciones 3-4 a 3-9 asumen que el flujo a través de la canaleta Parshall es libre. Para que exista la condición de flujo libre, la carga aguas abajo la canaleta Parshall (H_b en la Figura 3-3) tiene que ser igual o menos de 60% de la carga aguas arriba en el canal del desarenador medida con referencia a la base de la canaleta Parshall (H en la Figura 3-3). Para satisfacer esta condición se diseña la cota del canal aguas abajo la canaleta Parshall para las condiciones de caudal máximo, Q_{\max} , lo que da H_{\max} . El nivel de agua en el canal entonces tiene que ser ≤ 0.60 el nivel de H_{\max} como se ve en la Figura 3-3. Las Fotos 3-10 muestran ejemplos de canaletas Parshall en operación.

En la Figura 3-4 se presenta la relación entre Q y H para varios anchos de garganta de canaletas Parshall. Los límites de caudales para anchos de garganta diferentes se presenten en el Cuadro 3-3 abajo.

Cuadro 3-3: Rangos de Caudales para Canaletas Parshall con Flujo Libre

Ancho de Garganta, W m	Q_{\min}		Q_{\max}	
	m^3/s	$\text{m}^3/\text{día}$	m^3/s	$\text{m}^3/\text{día}$
0.076	0.0008	69	0.0538	4,648
0.152	0.0015	130	0.1104	9,539
0.229	0.0025	216	0.2519	21,764
0.305	0.0031	268	0.4556	39,364

Fuente: Marais y van Haandel, 1996.





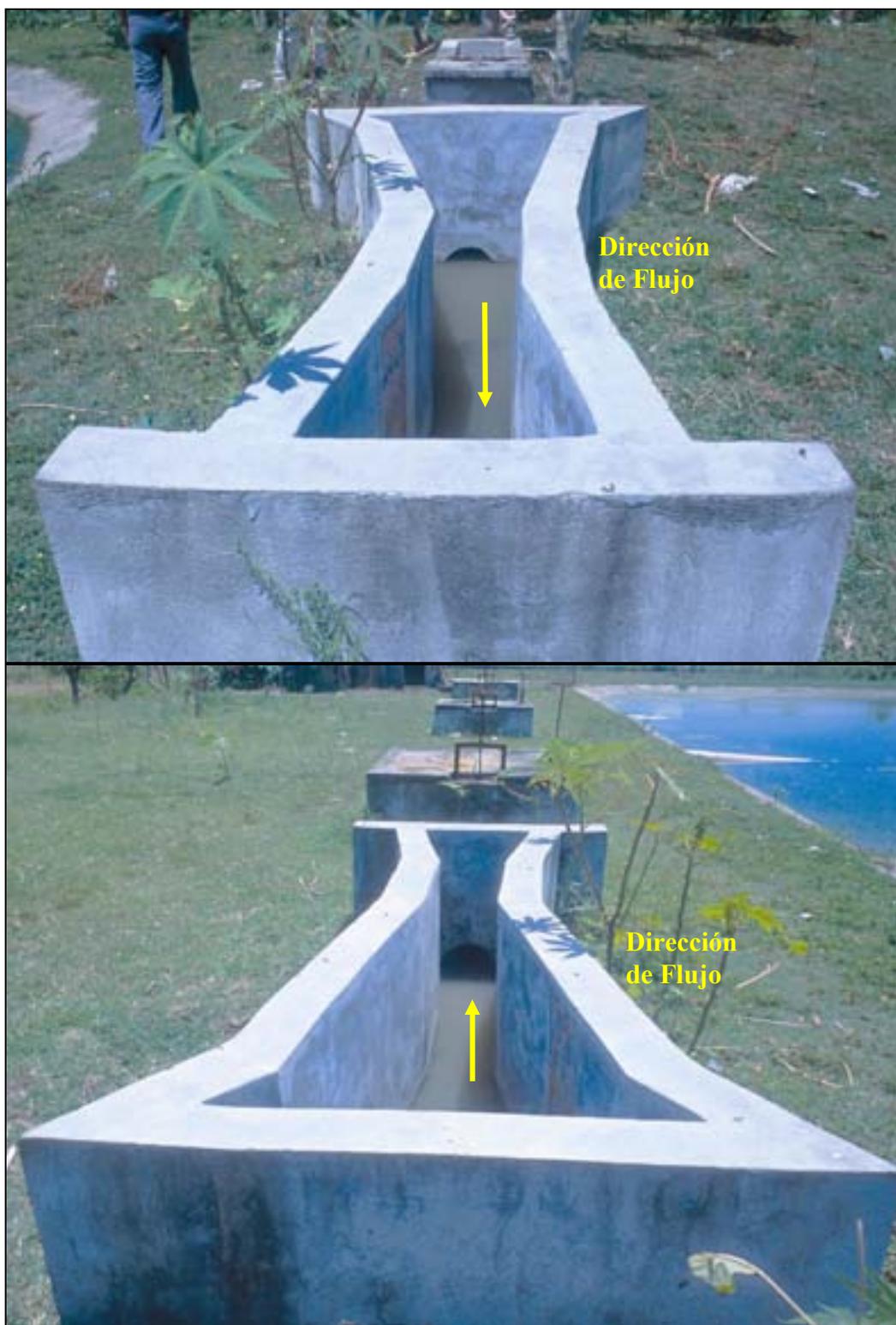
Fotos 3-10: Un ejemplo de una canaleta Parshall prefabricada instalada en un sistema de lagunas. El diseñador siempre debe requerir canaletas Parshall prefabricadas en el diseño y nunca canaletas Parshall hechas de concreto por los problemas de construcción y calibración como se muestran en las Fotos 3-12 y 3-13 adelante. (Masaya, Nicaragua)



Fotos 3-11: Ejemplos de canaletas Parshall prefabricadas con flujo libre. Para tener flujo libre, el canal aguas abajo la canaleta Parshall tiene que tener suficiente pendiente para que su carga máxima sea ≤ 0.60 la carga máxima en el canal del desarenador medida con referencia a la base de canaleta Parshall. (Foto izquierda: León, Nicaragua; derecha: Masaya, Nicaragua)



Fotos 3-12: Ejemplos de canaletas Parshall de concreto que no sirven por su mala construcción (nótese las dimensiones irregulares) y el hecho que no cuentan con flujo libre como se ve en las Fotos 3-11. Nunca se debe diseñar canaletas Parshall de concreto. (Foto izquierda: Catacamas, Honduras; derecha: Villanueva, Honduras)



Fotos 3-13: Otro ejemplo de la mala construcción de una canaleta Parshall de concreto que también no tiene flujo libre por el mal diseño del pendiente. (Choloma, Honduras)

3.3.2 Ecuaciones del Desarenador Rectangular

El resalto, Z , lo que es la diferencia de cota entre la canaleta Parshall y el canal del desarenador, como se muestra en la Figura 3-3, se determina con las siguientes ecuaciones (Babbitt y Baumann, 1958; Gloyna, 1971; Marais y van Haandel, 1996):

$$Z = \left[\frac{R^{1/3} - 1}{R} \right] \cdot 1.1 \left[\frac{Q_{\max}}{2.27W} \right]^{2/3} \quad (3-10)$$

$$Z = \left[\frac{R^{1/3} - 1}{R} \right] \cdot H_{\max} \quad (3-11)$$

$$Z = C_r \cdot H_{\max} \quad (3-12)$$

donde

$$C_r = \frac{R^{1/3} - 1}{R} \quad (3-13)$$

$$R = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \quad (3-14)$$

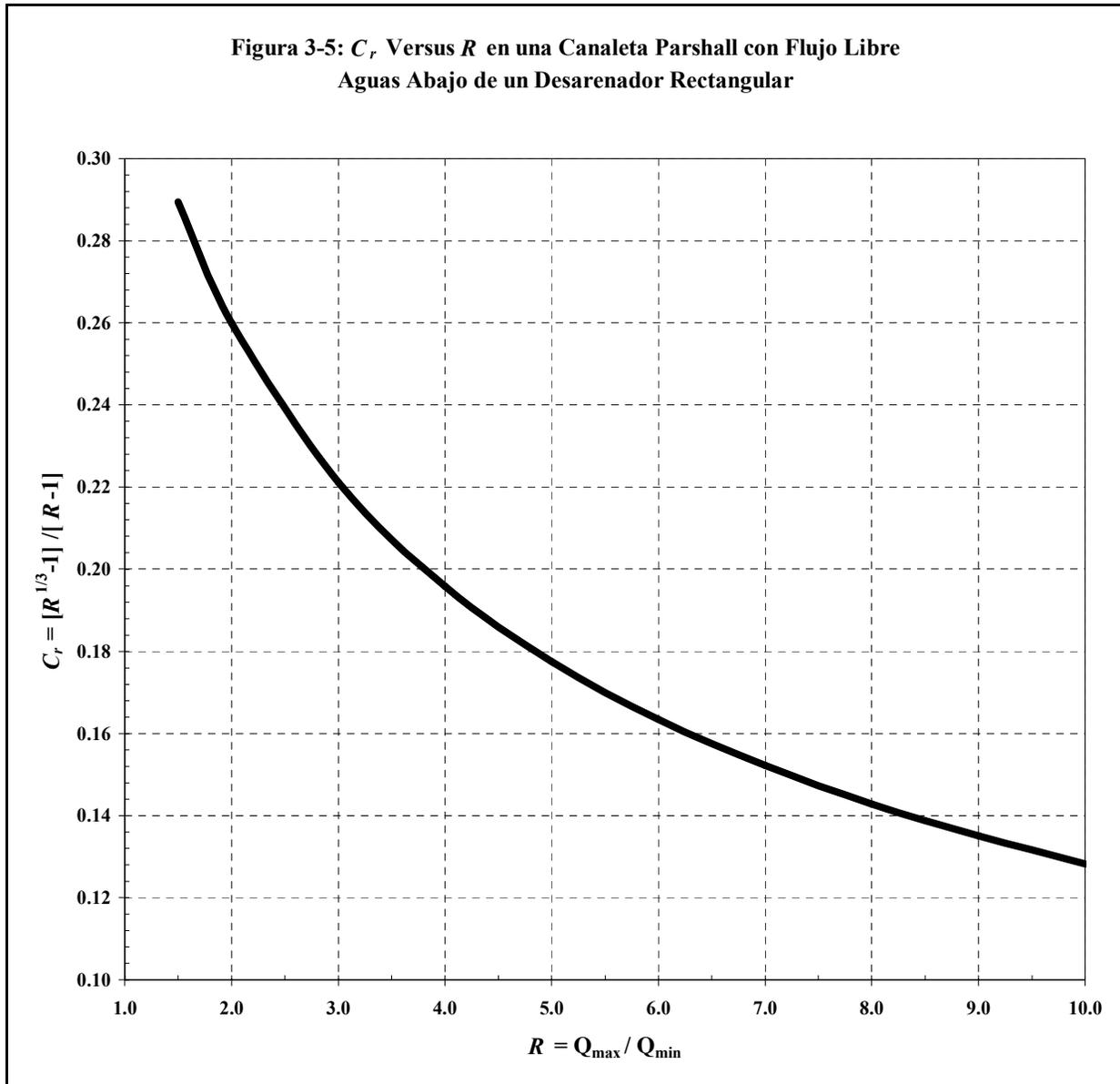
Z = resalto entre la cota del desarenador y la canaleta Parshall, m

La Figura 3-5, lo que fue desarrollado de las Ecuaciones 3-13 y 3-14, muestra la relación entre C_r y R para los rangos más probables encontrados en las municipalidades.

Después de calcular el resalto, Z , se determina la profundidad máxima de agua en el canal de desarenador con referencia a la cota del canal (no la carga máxima H_{\max}) con la siguiente relación:

$$P_{\max} = H_{\max} - Z \quad (3-15)$$

donde P_{\max} = la profundidad máxima de agua medida de la cota del canal de desarenador (Véase la Figura 3-2), m



Se calcula el ancho del canal de desarenador utilizando la Ecuación 3-16:

$$a_d = \frac{Q_{\max}}{P_{\max} \cdot v_{\max}} = \frac{Q_{\max}}{P_{\max} \cdot (0.3)} \quad (3-16)$$

donde a_d = ancho de desarenador, m
 v_{\max} = velocidad horizontal máxima a través del desarenador = 0.3m/s

El largo del desarenador se calcula utilizando el método de Marais y van Haandel (1996):

$$45 \cdot v_{\max} \leq L \leq 60 \cdot v_{\min} \quad (3-17)$$

donde v_{\max} = velocidad horizontal máxima, m/s
 v_{\min} = velocidad horizontal mínima, m/s
 L = largo de desarenador, m

La Ecuación 3-17 es basada en el criterio que la velocidad horizontal crítica para partículas de 0.2mm en diámetro con gravedad específica de 2.65 para evitar arrastre por el fondo del desarenador es 0.23 m/s (ASCE/WPCF, 1977; Marais y van Haandel, 1996).

Se recomienda que se selecciona 0.3 m/s para v_{\max} . Se calcula v_{\min} con las siguientes relaciones (Marais y van Haandel, 1996):

$$v_{\min} = v_{\max} \cdot C_v = 0.3C_v \quad (3-18)$$

$$C_v = 2.6C_r^{0.5}(1 - C_r) \quad (3-19)$$

donde v_{\min} = velocidad mínima en el desarenador, m/s
 C_v = relación de v_{\min}/v_{\max}

La Figura 3-6 muestra la relación entre C_v y R . Generalmente se concluye que la velocidad mínima no deber ser menos de 80% de la velocidad máxima, o 0.24 m/s si se selecciona v_{\max} como 0.3 m/s, lo que es arriba del valor mínima de 0.23 m/s para evitar arrastre por el fondo.

Entonces, la Ecuación 3-17 reduce a la siguiente para diseño:

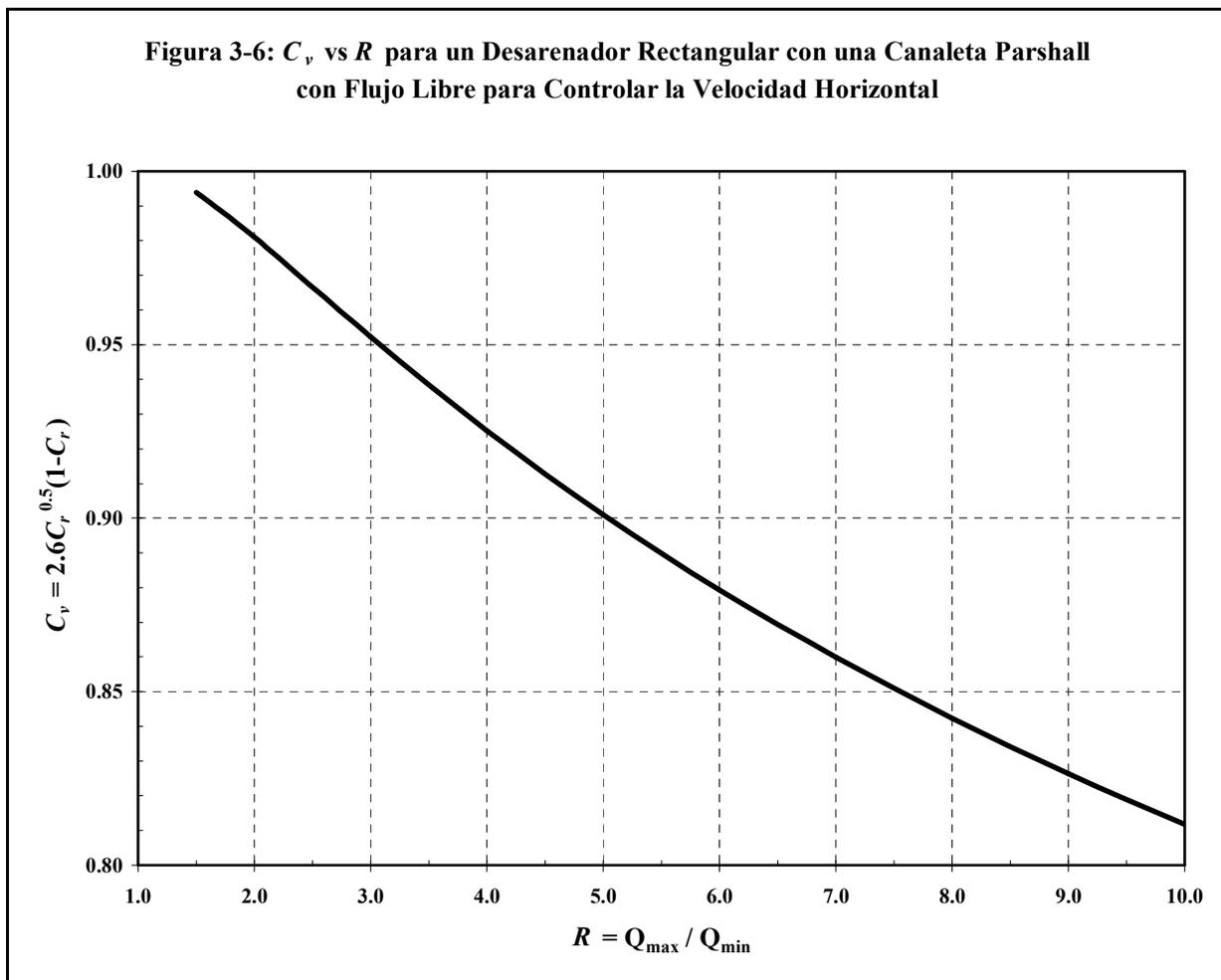
$$45 \cdot (0.3) \leq L \leq 60 \cdot (0.3C_v) \quad (3-20)$$

$$13.5\text{m} \leq L \leq 18 \cdot C_v \quad (3-21)$$

El volumen de sólidos arenosos acumulados en el desarenador se calcula con la Ecuación 3-22:

$$V_{sa} = \frac{t_{op} \cdot Q_{med} \cdot C_{sa}}{1,000} \quad (3-22)$$

donde V_{sa} = volumen de sólidos arenosos, m³
 t_{op} = tiempo de operación, días
 Q_{med} = caudal promedio, m³/día
 C_{sa} = carga de sólidos arenosos en las aguas residuales, m³/1,000m³



La profundidad de sólidos arenosos acumulados en el fondo del desarenador se calcula con la Ecuación 3-23 (Marais y van Haandel, 1996):

$$p_{sa} = \frac{t_{op} \cdot Q_{med} \cdot C_{sa}}{1,000 \cdot a_d \cdot L} = \frac{V_{sa}}{a_d \cdot L} \quad (3-23)$$

donde p_{sa} = profundidad de sólidos arenosos acumulados, m

Se calcula p_{sa} para determinar la profundidad de la cámara de almacenaje de sólidos arenosos al fondo de desarenador.

En el Cuadro 3-4 se presentan un resumen de las normas de diseño recomendadas para desarenadores horizontal.

Cuadro 3-4: Normas de Diseño Recomendadas para Desarenadores Horizontales

Parámetro	Norma Recomendada
Velocidad horizontal	$v_{max} = 0.3 \text{ m/s}$ $v_{min} \geq 0.80 v_{max}$
Velocidad de sedimentación	0.02 m/s (partículas de 0.2mm)
Forma de la sección transversal	Rectangular (Con un resalto entre la cota del desarenador y la de la canaleta Parshall)
Tiempo de retención hidráulica	$\leq 60\text{s}$ para v_{min} $\geq 45\text{s}$ para v_{max} $v_{max} = 0.3 \text{ m/s}$ $v_{min} = 0.3 C_v$
Largo de canal	$45 v_{max} \leq L \leq 60 v_{min}$ $13.5 \text{ m} \leq L \leq 18 C_v$
Sección de control de velocidad	Canaleta Parshall prefabricada con flujo libre
Carga en el canal aguas abajo la canaleta Parshall para asegurar flujo libre	$\leq 60\%$ de la carga en el desarenador
Número de canales	Dos en paralelo, cada uno con drenaje (Uno en operación y otro para limpieza)

Adaptado de Marais y van Haandel, 1996; Reynolds y Richards, 1996; Rolim, 2000; y Viceministerio de Vivienda y Construcción, 1997.

3.3.3 Disposición Final de los Sólidos Arenosos

Los sólidos arenosos, como los sólidos gruesos, siempre estarán contaminados con patógenos y el operador necesita mucho cuidado en su manejo cuando es necesario limpiar el desarenador. Se debe enterrar todos los sólidos arenosos inmediatamente después de sacarlos con el mínimo de manejo. El diseño de la instalación de pretratamiento debe incluir un área reservado para la disposición final de los sólidos arenosos. Las Fotos 3-14 muestran ejemplos del problema del manejo adecuado de los sólidos arenosos.

3.4 Procedimiento para el Diseño de Pretratamiento con Canaleta Parshall

El procedimiento de diseño del sistema de pretratamiento con rejilla, desarenador horizontal, y canaleta Parshall es el siguiente:

1. Determinar el caudal máximo, mínimo, y promedio en m^3/s para el diseño. Es esencial que los parámetros provengan de medidas del campo durante las épocas seca y lluviosa.
2. Seleccionar el ancho de garganta de canaleta Parshall usando el Cuadro 3-3.
3. Calcular la carga máxima en el canal del desarenador con referencia a la base de canaleta Parshall, H_{max} , utilizando la Ecuación 3-9:



Fotos 3-14: Los sólidos arenosos siempre estarán contaminados con patógenos y su disposición final requiere una solución sanitaria para proteger la salud de los operadores. En la foto arriba (León, Nicaragua) la pila de sólidos arenosos debería de haber enterrada; nótese también la cantidad de material producido que hubiera entrado una laguna primaria sin el desarenador. Una solución adecuada mostrada en la foto abajo (Urbanización en la Ciudad de Guatemala) es una fosa séptica construida específicamente para la disposición final de los sólidos arenosos.

$$H_{\max} = \left[\frac{1.1 \cdot Q_{\max}}{2.27 \cdot W} \right]^{0.667} \quad (3-9)$$

4. Calcular R y C_r de las Ecuaciones 3-13 y 3-14 o la Figura 3-5:

$$C_r = \frac{R^{1/3} - 1}{R} \quad (3-13)$$

$$R = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \quad (3-14)$$

5. Calcular el resalto, Z , de la Ecuación 3-12:

$$Z = C_r \cdot H_{\max} \quad (3-12)$$

6. Calcular la profundidad máxima de agua en el canal del desarenador, P_{\max} , medida de la cota del canal usando la Ecuación 3-15:

$$P_{\max} = H_{\max} - Z \quad (3-15)$$

7. Calcular el ancho del canal de desarenador utilizando la Ecuación 3-16:

$$a_d = \frac{Q_{\max}}{P_{\max} \cdot v_{\max}} = \frac{Q_{\max}}{P_{\max} \cdot (0.3)} \quad (3-16)$$

8. Determinar el factor de C_v de la Ecuación 3-19 o la Figura 3-6:

$$C_v = 2.6C_r^{0.5}(1 - C_r) \quad (3-19)$$

9. Escoger el largo del canal de desarenador con la Ecuación 3-21:

$$13.5\text{m} \leq L \leq 18 \cdot C_v \quad (3-21)$$

10. Calcular el volumen y la profundidad de sólidos arenosos acumulados con las Ecuaciones 3-22 y 3-23:

$$V_{sa} = \frac{t_{op} \cdot Q_{med} \cdot C_{sa}}{1,000} \quad (3-22)$$

$$p_{sa} = \frac{t_{op} \cdot Q_{med} \cdot C_{sa}}{1,000 \cdot a_d \cdot L} = \frac{V_{sa}}{a_d \cdot L} \quad (3-23)$$

11. Seleccionar la cota del canal aguas abajo de la canaleta Parshall para asegurar la carga es igual o menos de 0.60 de la carga en el canal del desarenador, todas medidas con referencia a la base de canaleta Parshall.
12. Determinar el ancho y abertura, a_b y e_b , de las barras de la rejilla.
13. Utilizando la Ecuación 3-1 se calcula el ancho, a_{canal} , del canal de aproximación antes de la rejilla:

$$a_{canal} = \frac{Q_{max}}{0.6P_{max}} \cdot \left[\frac{a_b + e_b}{e_b} \right] \quad (3-1)$$

14. Calcular la velocidad en el canal de aproximación y las pérdidas de carga a través de la rejilla con las Ecuaciones 3-2 y 3-3:

$$v_a = \frac{0.6}{\left(\frac{a_b + e_b}{e_b} \right)} \quad (3-2)$$

$$h_f = \frac{1}{0.7} \cdot \left[\frac{v_R^2 - v_a^2}{2g} \right] \quad (3-3)$$

15. Se termina el diseño con los parámetros físicos mostrados en los Cuadros 3-1 y 3-4.

3.5 Ejemplo 3-1: Diseño de Sistema de Pretratamiento para las Lagunas de Catacamas Este

Se requiere diseñar una rejilla, desarenador y canaleta Parshall para las lagunas de Catacamas Este. La Figura 3-7 muestran los resultados del monitoreo del caudal con el medidor de flujo área-velocidad por tres días seguidas, 24 horas por día (ECOMAC, 2004).

1. Determinar el caudal máximo, mínimo, y promedio para el diseño.

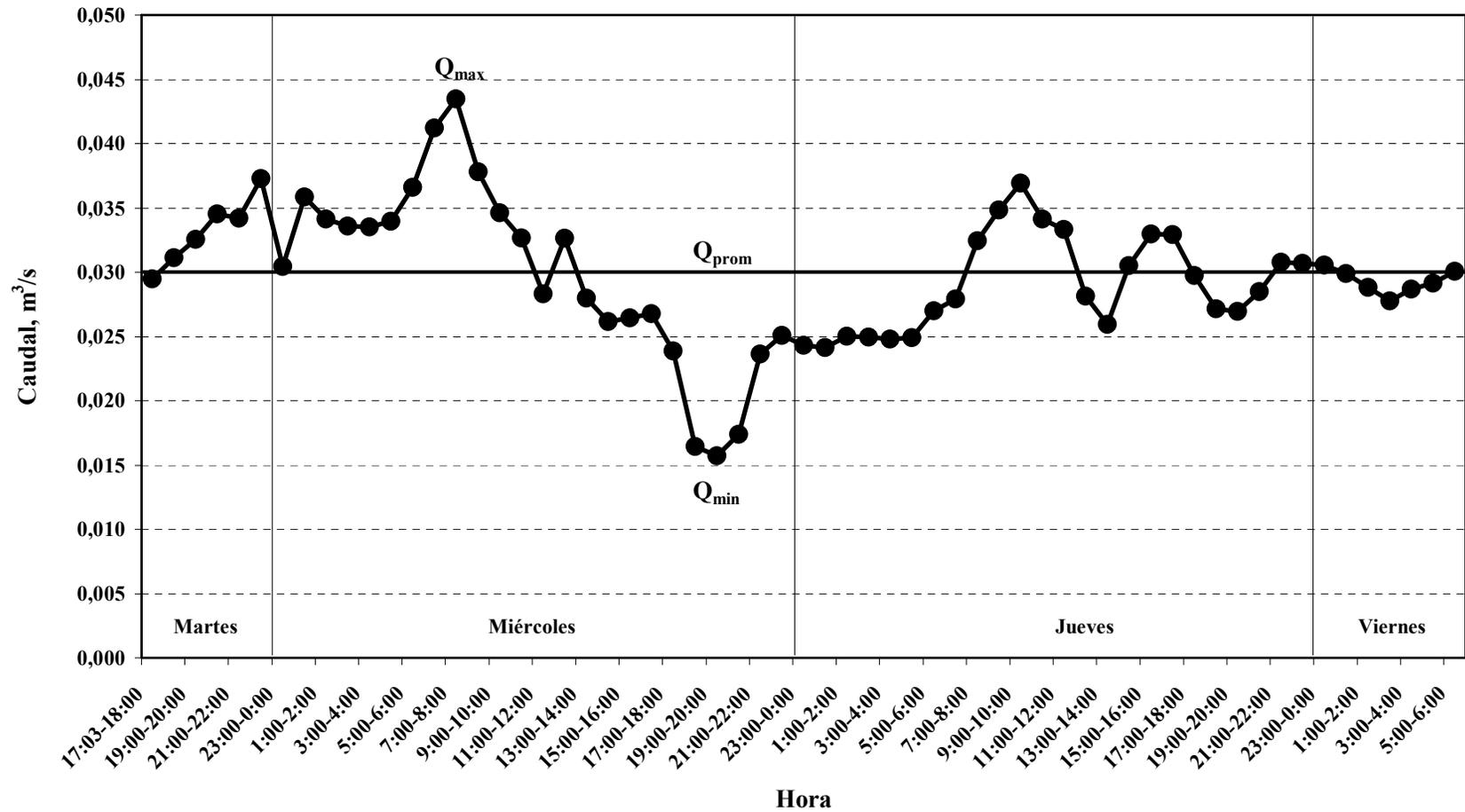
De Figura 3-7: $Q_{prom} = 0.03 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{max} = 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$; $Q_{min} = 0.015 \text{ m}^3/\text{s}$

Se asume que la relación de $Q_{max}/Q_{min} = 5$ en vez de 3 como un factor de seguridad durante la época lluviosa. Para el diseño, entonces, $Q_{max} = 0.075 \text{ m}^3/\text{s}$.

2. Seleccionar el ancho de garganta de canaleta Parshall.

$W = 0.152 \text{ m}$ (Cuadro 3-3)

**Figura 3-7: Medición de Caudales en Sistema de Lagunas de Catacamas Sector Este
(02-05/09/03)**



3. Calcular la carga máxima en el canal del desarenador utilizando la Ecuación 3-9 o la Figura 3-3.

$$H_{\max} = \left[\frac{1.1 \cdot Q_{\max}}{2.27 \cdot W} \right]^{0.667} = \left[\frac{1.1 \cdot (0.075)}{2.27 \cdot (0.152)} \right]^{0.667} = 0.385\text{m}$$

4. Calcular R y C_r de las Ecuaciones 3-13 y 3-14 o la Figura 3-5:

$$R = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} = \frac{0.075}{0.015} = 5; \quad C_r = \frac{R^{1/3} - 1}{R} = \frac{(5)^{1/3} - 1}{5} = 0.18$$

5. Calcular el resalto, Z , de la Ecuación 3-12:

$$Z = C_r \cdot H_{\max} = (0.18) \cdot (0.385) = 0.07\text{m}$$

6. Calcular la profundidad máxima de agua en el canal del desarenador, P_{\max} , medida de la cota del canal usando la Ecuación 3-15:

$$P_{\max} = H_{\max} - Z = 0.385\text{m} - 0.07\text{m} = 0.315\text{m}$$

7. Calcular el ancho del canal de desarenador utilizando la Ecuación 3-16:

$$a_d = \frac{Q_{\max}}{P_{\max} \cdot v_{\max}} = \frac{0.075}{(0.315) \cdot (0.3)} = 0.8\text{m}$$

8. Determinar el factor de C_v de la Ecuación 3-19 o la Figura 3-6:

$$C_v = 2.6C_r^{0.5}(1 - C_r) = 2.6 \cdot (0.18)^{0.5}(1 - 0.18) = 0.90$$

9. Escoger el largo del canal de desarenador con la Ecuación 3-21:

$$13.5\text{m} \leq L \leq 18 \cdot C_v \Rightarrow 13.5\text{m} \leq L \leq 18 \cdot (0.90) \Rightarrow 13.5\text{m} \leq L \leq 16.2\text{m}$$

Se selecciona $L = 15\text{m}$.

10. Calcular el volumen y la profundidad de sólidos arenosos acumulados con las Ecuaciones 3-22 y 3-23:

Se asume que el tiempo entre limpiezas, t_{op} , es 15 días y la carga de sólidos arenosos, C_{sa} , es $0.085 \text{ m}^3/1,000\text{m}^3$.

$$V_{sa} = \frac{t_{op} \cdot Q_{med} \cdot C_{sa}}{1,000} = \frac{(15d) \cdot (0.03m^3/s \cdot 86,400s/d) \cdot (0.085m^3/1,000m^3)}{1,000} = 3.3m^3$$

$$p_{sa} = \frac{t_{op} \cdot Q_{med} \cdot C_{sa}}{1,000 \cdot a_d \cdot L} = \frac{V_{sa}}{a_d \cdot L} = \frac{3.3m^3}{(0.8m) \cdot (15m)} = 0.275m$$

11. Se diseña la cota del canal aguas abajo de la canaleta Parshall para que la carga en el canal sea ≤ 0.60 de la carga en el desarenador (H_{max}), todas medidas con referencia a la base de canaleta Parshall, para asegurar flujo libre en la canaleta Parshall.

12. Determinar el ancho y abertura, a_b y e_b , de las barras de la rejilla.

$$a_b = 10mm; e_b = 50mm \text{ (Cuadro 3-1)}$$

13. Utilizando la Ecuación 3-1 se calcula el ancho, a_{canal} , del canal de aproximación antes de la rejilla:

$$a_{canal} = \frac{Q_{max}}{0.6P_{max}} \cdot \left[\frac{a_b + e_b}{e_b} \right] = \frac{0.075m^3/s}{0.6 \cdot (0.315m)} \cdot \left[\frac{10mm + 50mm}{50mm} \right] = 0.476m$$

14. Calcular la velocidad en el canal de aproximación y las pérdidas de carga a través de la rejilla con las Ecuaciones 3-2 y 3-3:

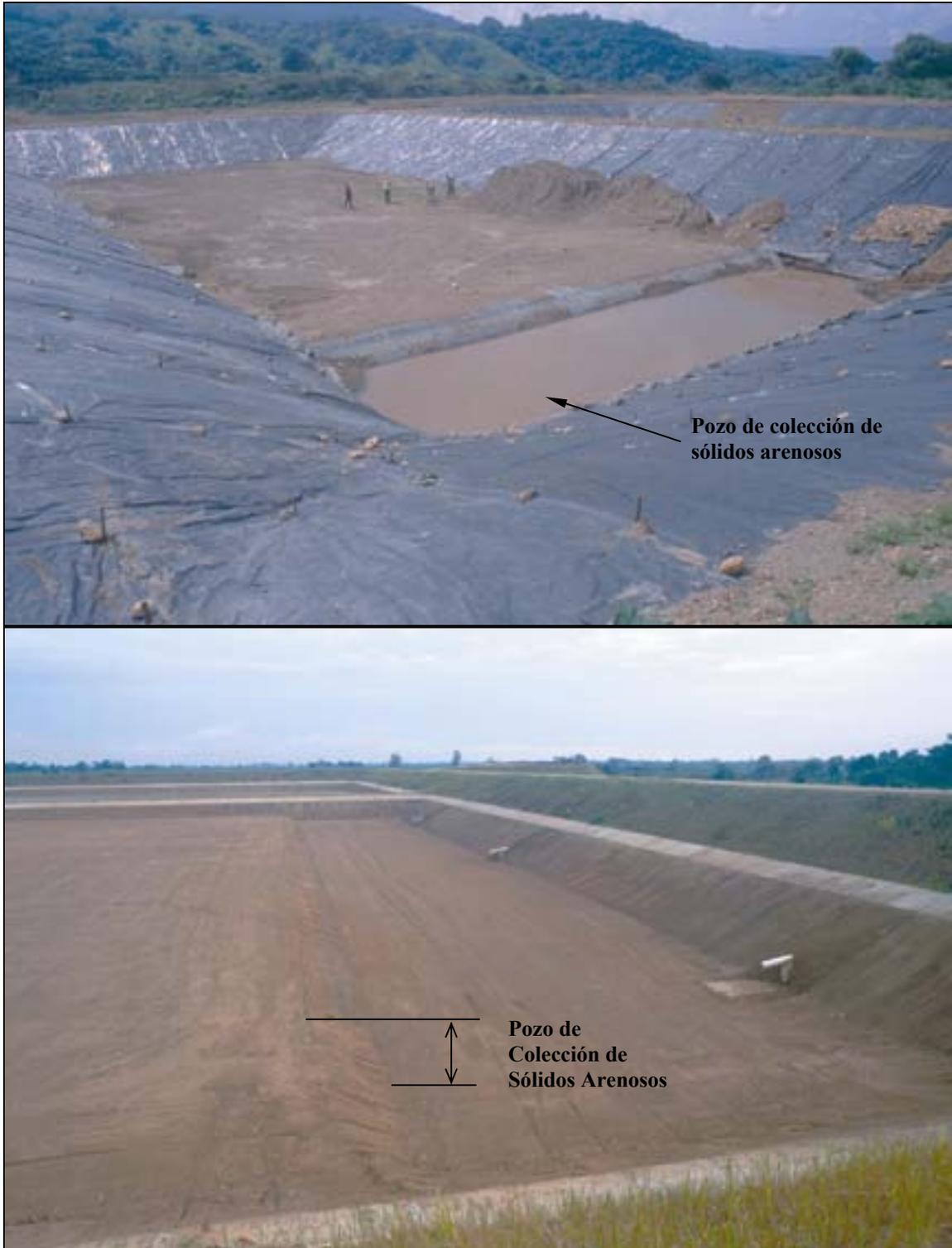
$$v_a = \frac{0.6}{\left(\frac{a_b + e_b}{e_b} \right)} = \frac{0.6}{1.2} = 0.5m/s$$

$$h_f = \frac{1}{0.7} \cdot \left[\frac{v_R^2 - v_a^2}{2g} \right] = \frac{1}{0.7} \cdot \left[\frac{(0.6)^2 - (0.5)^2}{2 \cdot (9.81)} \right] = 0.008m$$

15. Se termina el diseño con los parámetros físicos mostrados en los Cuadros 3-1 y 3-4.

3.6 Pozos de Colección de Sólidos Arenosos

En la primera edición de este manual se mencionó como alternativa en municipalidades pequeñas el uso de pozos de colección de arena en la entrada de las lagunas primarias (lagunas anaeróbicas o facultativas) (Véanse las Fotos 3-14). El propósito del pozo es almacenar los sólidos arenosos que entran la laguna en vez de tener que mantener un desarenador. Esta práctica no es recomendable porque los lodos orgánicos sedimentan con los sólidos arenosos y, como resultado, la remoción de lodos será más difícil todavía cuando sea necesaria—los lodos estarían tan profundos que no se pueden secar adecuadamente. Se discute este problema en detalle en el Capítulo 8.



Fotos 3-14: Ejemplos de pozos de colección de sólidos arenosos instalados en la entrada de la laguna primaria en vez de utilizar un desarenador. La foto arriba (Boca del Monte, Guatemala) es una laguna anaeróbica y abajo (El Paraíso, Honduras) una facultativa. Esta práctica no es recomendable por la dificultad de remover los lodos cuando sea necesario (Véase el Capítulo 8).

CAPÍTULO 4: TEORIA DE DISEÑO DE LAGUNAS DE ESTABILIZACION

4.1 Clasificación de Lagunas y Estrategias de Diseño

Las lagunas de estabilización son lagunas construidas de tierra diseñadas para el tratamiento de aguas residuales por medio de la interacción de la biomasa (principalmente bacterias y algas) como se muestra en la Figura 4-1. La función real del proceso es estabilizar la materia orgánica y remover los patógenos de las aguas residuales realizando una descomposición biológica natural; normalmente se diseña el proceso para la remoción de DBO, sólidos suspendidos, y coliformes fecales. En este manual el término lagunas de estabilización incluye lagunas anaeróbicas, facultativas, y lagunas de maduración.

El propósito de una laguna anaeróbica es remover un porcentaje de la carga orgánica (DBO) y la mayoría de los sólidos suspendidos bajo condiciones anaeróbicas por la acción de bacterias anaeróbicas, y por lo tanto disminuir el área requerida para el sistema total de lagunas (Mara *et al.*, 1992). Como consecuencia de la elevada carga orgánica, la profundidad de la laguna con mínima área, y el corto período de retención hidráulica, se mantiene el sistema ausente de oxígeno disuelto bajo condiciones anaeróbicas. La bacteria anaeróbica realiza un tratamiento de los desechos mediante una asimilación anaeróbica con la descomposición de materia orgánica y la producción de bióxido de carbono, metano y otros productos secundarios.

Las lagunas facultativas se caracterizan por tener una zona aeróbica en el estrato superior, donde existe la simbiosis entre algas y bacterias, y una zona anaeróbica en el fondo inferior (Véase la Figura 4-1). Existen dos mecanismos de adición de oxígeno al estrato superior: la fotosíntesis llevada a cabo por las algas, y la reeración a través de la acción del viento de la superficie. Las bacterias aeróbicas realizan un tratamiento de los desechos, particularmente la materia orgánica disuelta, mediante asimilación y oxidación de la materia orgánica con la producción de bióxido de carbono y productos secundarios de nutrientes como amoníaco y nitrato; las algas utilizan el bióxido de carbono y los nutrientes para producir oxígeno a través de la fotosíntesis. En los niveles más profundos existen condiciones anaeróbicas donde la descomposición ocurre como en una laguna anaeróbica.

Las lagunas de maduración se caracterizan como lagunas aeróbicas, donde se mantiene un ambiente aeróbico en toda su estrato. El propósito principal de las lagunas de maduración es proveer un período de retención hidráulica adicional para la remoción de los patógenos; también el de mejorar la calidad del efluente en términos de DBO.

Se diseña un sistema de lagunas para tener baterías de lagunas primarias (facultativas o anaeróbicas) en paralelo seguidas por dos o tres lagunas de maduración en serie como se presenta en los ejemplos en las Figuras 4-2 y 4-3. Se debe diseñar las lagunas primarias en paralelo para poder remover una de operación para la remoción de lodos mientras la demás queda operando. Se diseña lagunas anaeróbicas y facultativas para remover la DBO y SS y controlar el proceso de tratamiento; después, se diseña lagunas de maduración para remover patógenos aprovechando su remoción anterior en las lagunas anaeróbicas o facultativas.

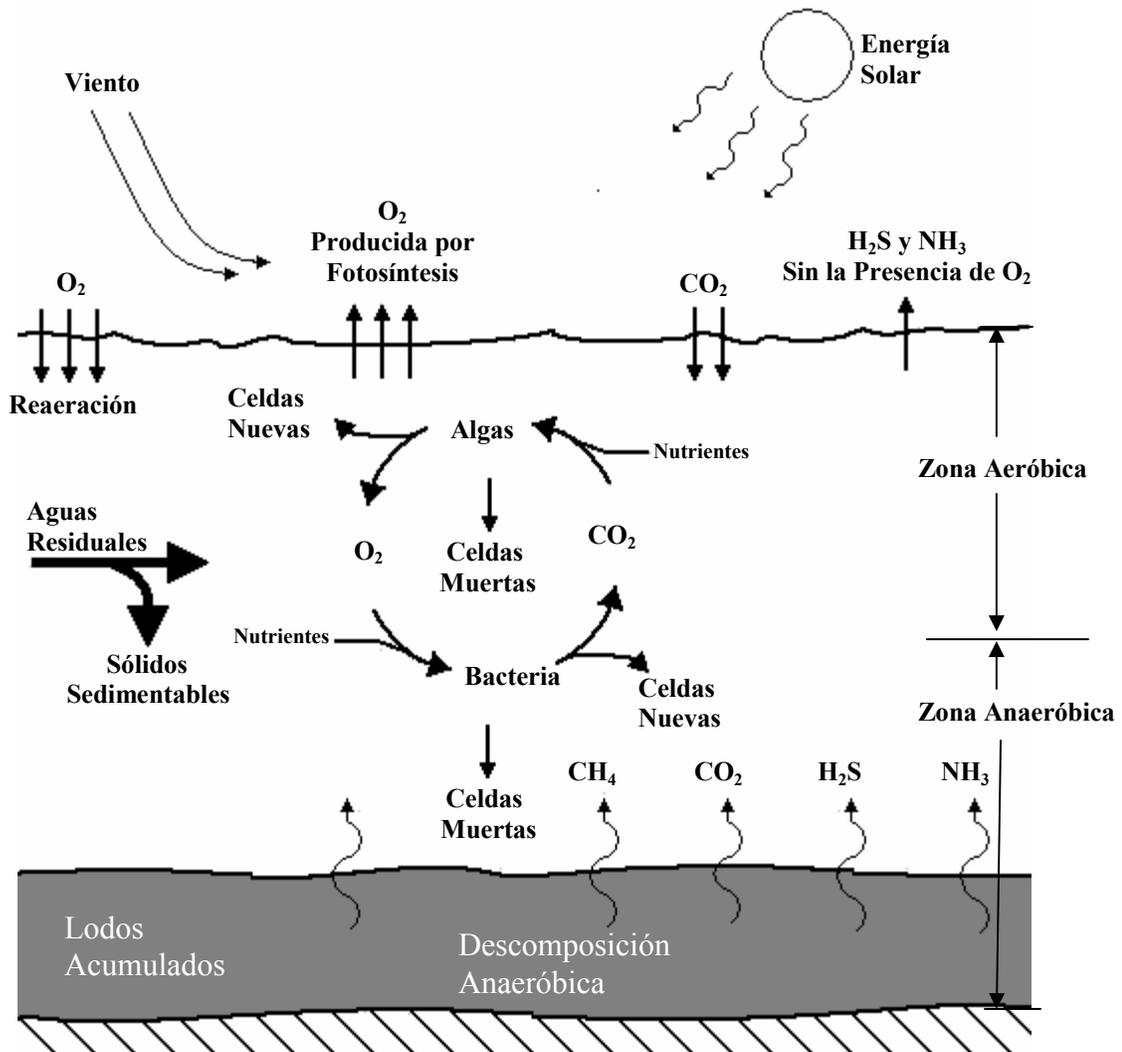


Figura 4-1: La interacción de bacterias y algas en las zonas aeróbicas y anaeróbicas en una laguna facultativa de estabilización.

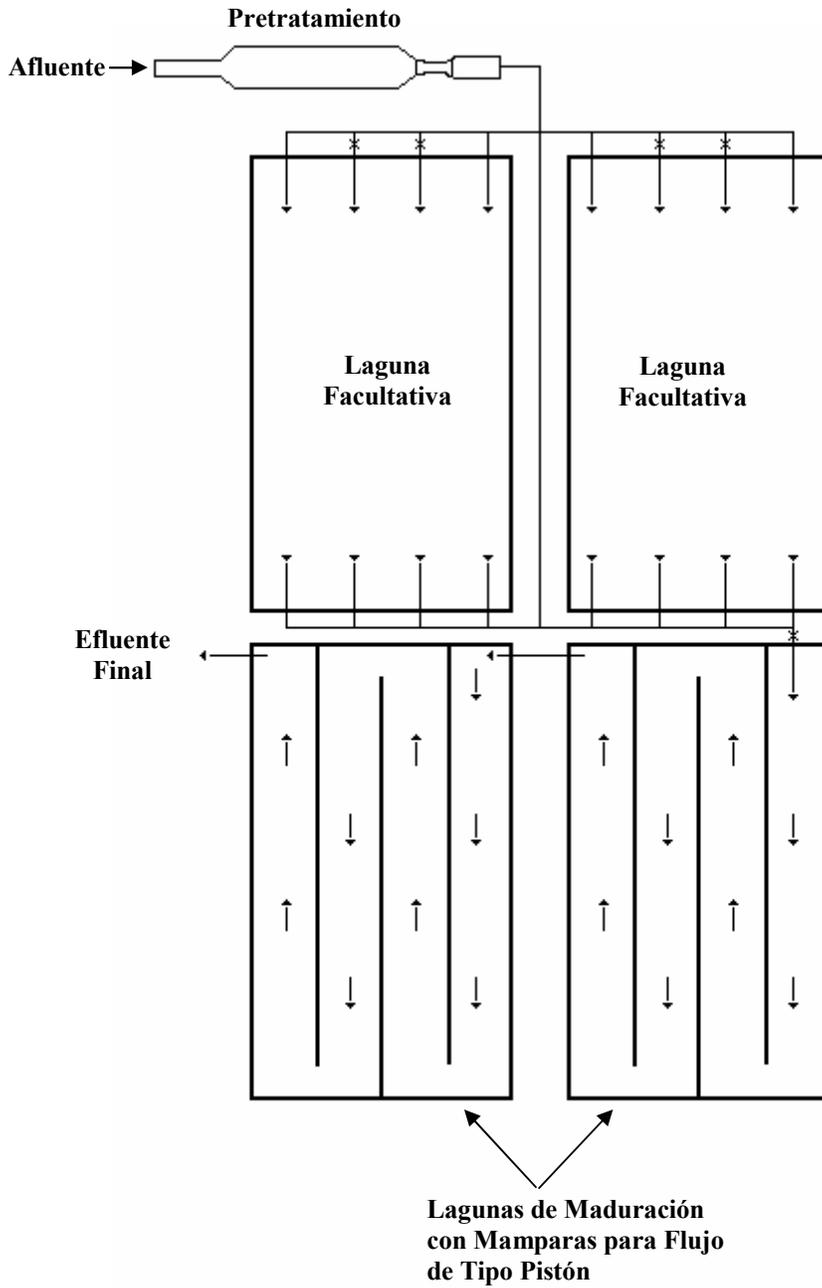


Figura 4-2: Dos lagunas facultativas en paralelo seguida por dos lagunas de maduración en serie. Se utiliza dos lagunas facultativas en paralelo para poder tener una fuera de servicio para la remoción de lodos.

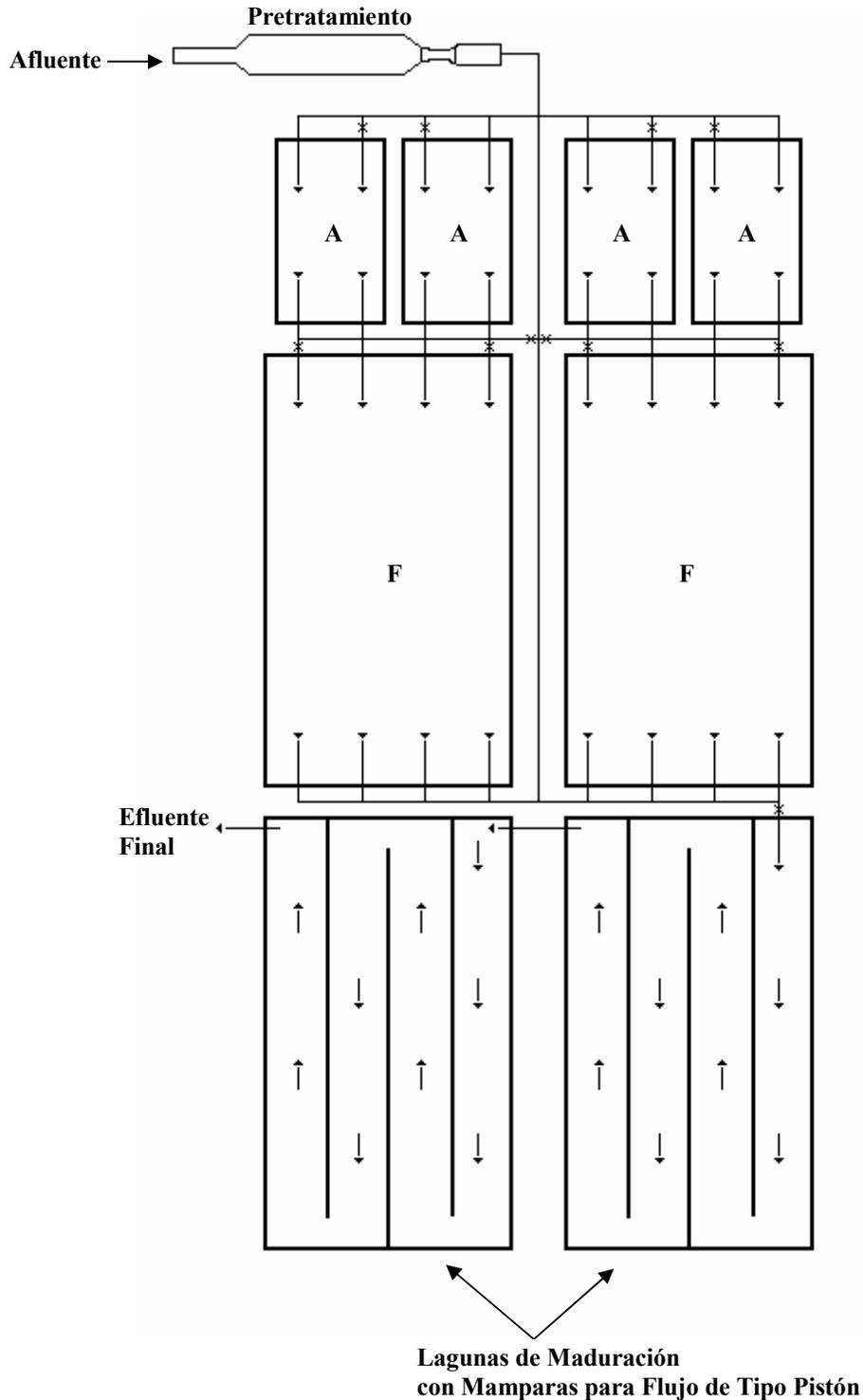


Figura 4-3: Dos baterías en paralelo de dos lagunas anaeróbicas y una facultativa, seguidas por dos lagunas de maduración en serie. Se utiliza lagunas en paralelo para poder tener una fuera de servicio para la remoción de lodos. Las lagunas anaeróbicas disminuyen el área total del sistema, pero requieren mucho mantenimiento y generalmente no se recomienda su uso en las municipalidades.

4.2 Lagunas Anaeróbicas

Las lagunas anaeróbicas son estanques de profundidad de 3.0 a 5.0 metros con un período de retención hidráulica de 1.0 a 5.0 días (Yáñez, 1992) Se presenta un diagrama del proceso de una laguna anaeróbica en la Figura 4-4.

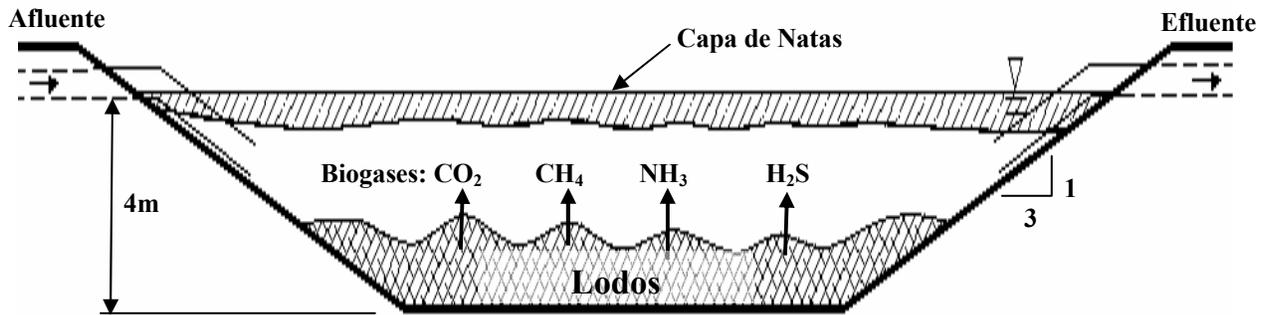


Figura 4-4: Un diagrama de una laguna anaeróbica. Los requisitos de operación y mantenimiento de las lagunas anaeróbicas no son recomendables, especialmente para las municipalidades.

El diseño de una laguna anaeróbica es basado en la carga volumétrica usando la siguiente ecuación (Arthur, 1983; Mara *et al.*, 1992):

$$V_A = \frac{DBO_o \cdot Q_{med}}{CV_A} \quad (4-1)$$

donde

- V_A = el volumen de laguna anaeróbica, m³
- DBO_o = la concentración inicial de DBO en el afluente, mg/L
- Q_{med} = el caudal promedio, m³/día
- CV_A = la carga volumétrica de DBO, g/m³-día

La literatura técnica muestra que el valor de CV_A debe estar entre 100 a 400 g DBO/m³-día. Se debe mantener la carga arriba de 100 g DBO/m³-día para tener condiciones anaeróbicas, y menos que 400 g DBO/m³-día para evitar malos olores causados por la conversión de sulfatos a sulfuro de hidrógeno (Mara, *et al.*, 1992; Yáñez, 1992); también se puede tener malos olores causados por la emisión de amoníaco. Típicamente se utiliza una carga máxima de 300 g DBO/m³-día para tener un factor de seguridad. El volumen de la laguna es determinado de la ecuación 4-1; se

recomienda que la profundidad debe estar entre 3.0 y 5.0 m—la más común es de 4 m. El tiempo de retención hidráulica nominal, TRH, se determina de la siguiente relación:

$$TRH = \frac{V_A}{Q_{med}} \quad (4-2)$$

donde TRH = el tiempo de retención hidráulica nominal, días

La eficiencia de las lagunas anaeróbicas es relacionada a la temperatura y el tiempo de retención hidráulica como se ve en el Cuadro 4-1 (Yáñez 1992). Se puede usar el Cuadro 4-1 para el diseño, usando una carga volumétrica, CV_A , de 300 g DBO/m³-día para temperaturas arriba de 20 ° C (Mara, *et al.*, 1992; Yáñez, 1992).

Cuadro 4-1: Relación entre Temperatura, Tiempo de Retención Hidráulica, e Eficiencia en Lagunas Anaeróbicas

Temperatura, °C	TRH, días	Remoción de DBO, %
10—15	4—5	30—40
15—20	2—3	40—50
20—25	1—2	50—60
25—30	1—2	60—80

Fuente: Yáñez (1992).

La formación de nata es un factor importante en la operación de lagunas anaeróbicas. Las natas cubren la superficie y ayudan al mantenimiento de condiciones anaeróbicas, disminuyendo la reaeración por el viento y manteniendo condiciones para tener una tasa alta de reacción por la retención de calor en la laguna. En la construcción es fundamental instalar pantallas o compuertas en la salida de la laguna para remover la nata antes de descargar a la laguna secundaria.

La remoción de sólidos suspendidos en el proceso de tratamiento anaeróbico es del orden de 70 por ciento (MOPT, 1991). Estos sólidos se acumulan en el fondo de las lagunas, donde están digeridos bajo las condiciones anaeróbicas, hasta que disminuyen el volumen y afectan el proceso anaeróbico; los gases de descomposición forman burbujas que causan una fracción de los lodos a subir, formando la nata de la superficie. Como se discute en detalle en el Capítulo 8, la acumulación estimada de lodos en el proyecto de monitoreo varía entre 0.224 a 0.548 m³ de lodos por 1,000 m³ de aguas residuales tratadas. Por el diseño con el tiempo de retención hidráulica de 1 a 3 días, el lodo de una laguna anaeróbica tiene que ser retirado con una frecuencia entre 2 a 5 años, dependiendo sobre el volumen de la laguna ocupado con lodos acumulados que se permita en el diseño. Se puede estimar la frecuencia de limpieza usando la siguiente relación:

$$n = \frac{1,000 \cdot FVL \cdot V_A}{TAL \cdot Q_{med} \cdot 365} \quad (4-3)$$

donde n = número de años de operación para la limpieza
 FVL = fracción del volumen de laguna ocupada con lodos (se utiliza 0.25—0.5)
 V_A = volumen de la laguna anaeróbica
 TAL = tasa de acumulación de lodos, $m^3/1,000 m^3$ (se utiliza 0.6 con factor de seguridad)
 Q_{med} = caudal promedio, $m^3/día$

La Fotos 4-1 y 4-2 muestran ejemplos de lagunas anaeróbicas en construcción y en operación.

El Cuadro 4-2 muestra las ventajas y desventajas de las lagunas anaeróbicas. Hay una controversia en la literatura técnica sobre el uso de lagunas anaeróbicas. Mientras Arthur (1983) y Mara *et al.* (1992) las recomiendan, Yánez (1992) dice que hay problemas con olores y mantenimiento, especialmente si tienen poca carga. Los resultados de Proyecto de Monitoreo de las Lagunas de Estabilización de Honduras muestran que la acumulación de lodos es un problema muy serio, especialmente en lagunas anaeróbicas con menos tiempo de retención hidráulica (Véase el Capítulo 8), y también que los huevos de helmintos puedan pasar por una laguna anaeróbica, probablemente resuspendidos por las burbujas. Debido las condiciones de las municipalidades en América Central, donde hay pocos recursos para operación y mantenimiento, y especialmente limpieza de lodos con más frecuencia, y los problemas con la prevalencia de infecciones de helmintos, se concluye que no se debe diseñar lagunas anaeróbicas: es una tecnología demasiado complicada que requiere personal más calificado, con costos más altos para la limpieza de lodos, más riesgos de malos olores, y más atención para su operación y mantenimiento.

Cuadro 4-2: Ventajas y Desventajas del Uso de Lagunas Anaeróbicas

Ventajas	Desventajas
Minimizar el área total del sistema de lagunas	Requerir personal más calificado
Reducir la carga orgánica si la carga está más alta que la carga normal de aguas residuales domésticos	El riesgo de malos olores de amoníaco y sulfuro de hidrógeno
Reducir las concentraciones de compuestos tóxicos por descomposición anaeróbicas	Requerir limpieza de lodos cada 2 a 5 años
	Requerir más difícil y costoso manejo de lodos, incluyendo el uso de lechos de secado, porque los lodos tienen que ser sacados mojados de la laguna.



Fotos 4-1: Dos lagunas anaeróbicas en paralelo diseñadas en Boca del Monte, Guatemala. La profundidad de 4 m es típica de lagunas anaeróbicas. El problema fundamental es la dificultad de remover los lodos cuando sea necesario: normalmente, por su profundidad, los lodos tienen que ser removidos mojados por bomba o draga, lo que es mucho más costoso que remoción por secado, como se discute en el Capítulo 8. Notase el dispositivo de drenaje en la foto abajo.



Fotos 4-2: Las lagunas anaeróbicas de Danlí, Honduras. Se ve claramente las burbujas llevando los lodos sedimentados a la superficie (los colores negros), que pueden también llevar los huevos de helmintos a la siguiente laguna. Estas lagunas están llenando con lodos y, por su profundidad, será difícil y costoso removerlos, un problema típico del uso de lagunas anaeróbicas.

4.3 Lagunas Facultativas

El propósito de las lagunas facultativas es remover la DBO bajo condiciones aeróbicas, aprovechando principalmente la simbiosis entre las algas y la bacteria; la laguna también contribuye a la remoción de patógenos a través del largo período de retención hidráulica típico en el diseño, que permite la sedimentación de huevos de helmintos, y la mortalidad de bacteria causado por el tiempo de retención hidráulica, por los rayos ultravioletas de la energía solar, y el aumento en pH por las actividades de las algas. Se presenta un diagrama de una laguna facultativa en la Figura 4-5. Se diseña una laguna facultativa en calcular i) la carga orgánica máxima superficial; ii) el área requerida con un factor de seguridad; y iii) el tiempo de retención hidráulica.

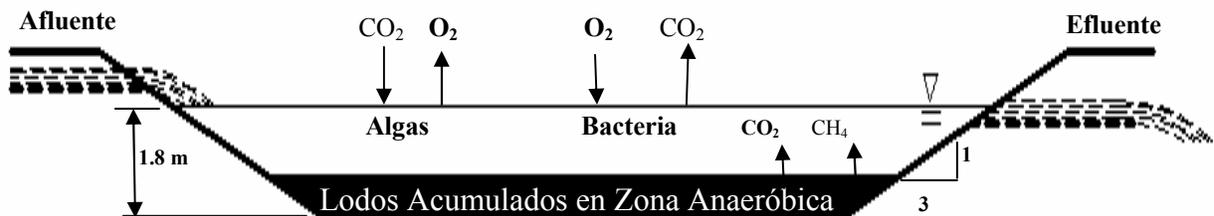
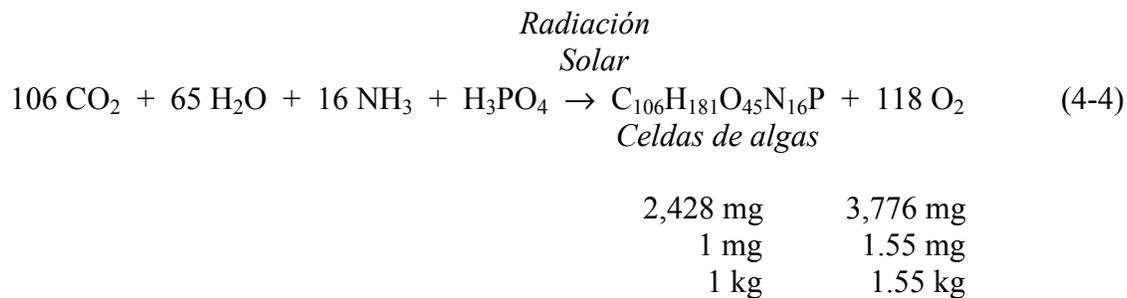


Figura 4-5: Un diagrama de una laguna facultativa con la zonas aeróbica, donde las algas consumen CO_2 y producen O_2 y la bacteria consume O_2 y produce CO_2 , y la zona anaeróbica donde los lodos acumulan y digieren, produciendo los gases de CO_2 y CH_4 .

4.3.1 La Carga Orgánica Superficial por el Método de Radiación Solar

El método más apropiado para el diseño de lagunas facultativas es el de la carga orgánica superficial, lo que depende sobre la cantidad de oxígeno producido por las algas en la laguna por la siguiente ecuación balanceada de fotosíntesis (Rittmann y McCarty, 2001):



La Ecuación 4-4 muestra que 1 kilogramo de algas produce 1.55 kilogramos de oxígeno.

La energía del sol requerida para producir un kilogramo de celdas de algas es de 24,000 kilo Joules (kJ) (Rittmann y McCarty, 2001). De la energía solar que radia la superficie de una laguna facultativa, solamente un porcentaje es utilizado por las algas como resultado de su eficiencia de conversión; la eficiencia de conversión varía entre las especies de algas y el rango ha sido reportado de 2 a 7% (Arceivala, *et al.*, 1970).

Se puede combinar la ecuación de fotosíntesis con la conversión de energía a celdas de algas y la eficiencia de conversión de energía solar por las algas para dar la siguiente ecuación de carga superficial máxima:

$$CS_m = \frac{(\text{Radiación Solar, kJ/ha - día}) \cdot (\text{Eficiencia de Conversión}) \cdot (1.55 \text{ kg O}_2 / \text{kg algas})}{24,000 \text{ kJ/kg algas producidas}} \quad (4-3)$$

donde CS_m = carga máxima superficial orgánica, kg O₂/ha-día

Utilizando una eficiencia de 3% de la conversión de energía solar por las algas, lo que da un factor de seguridad (Rittmann y McCarty, 2001), la Ecuación 4-3 reduce a la siguiente:

$$CS_m = (1.937E - 06) \cdot (RS) \quad (4-4)$$

donde RS = la radiación solar mínima diaria del año expresada como el promedio del mes, kJ/ha-día

La Administración de Aeronáutica y Espacio (NASA) de los EE.UU. tiene un sitio del web (<<http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=0>>) llamado Surface Meteorology and Solar Energy (Meteorología Superficial y Energía Solar), donde se puede obtener datos del promedio de 10 años de insolación solar en una superficie horizontal para cualquiera parte del mundo. Los datos están expresados por mes en unidades de kW-hrs/m²-día, y incluyen la disminución de insolación por las nubes existentes cada mes del año. Para obtener datos de un lugar, se pone las coordenantes de latitud y longitud.

Por ejemplo, las coordinantes de Catacamas, Honduras son: 14.8 ° N, 85.9 ° W. El Cuadro 4-3 muestra los datos del sitio de NASA de insolación solar en una superficie horizontal en kW-hrs/m²-día, lo que se cambia a unidades de kJ/ha-día por el factor de conversión de 1 kW-hrs/m²-día = 0.359999E+08 kJ/ha-día.

En el Cuadro 4-4 se presentan los resultados de la carga superficial máxima por mes utilizando la Ecuación 4-4. Se concluye que la carga superficial máxima para el diseño de lagunas facultativas en Catacamas no debe exceder 275 kg DBO₅/ha-día (Cuadro 4-4).

**Cuadro 4-3: Insolación Solar en Una Superficie Horizontal, Promedio de 10 Años
Catacamas, Honduras Latitud 14.8 ° N; Longitud 85.9 ° W.**

Mes	$\frac{\text{kW-hrs.}}{\text{m}^2\text{-día}}$	kJ/ha-día
E	4.36	1.57E+08
F	5.09	1.83E+08
M	5.85	2.11E+08
A	6.21	2.24E+08
M	5.63	2.03E+08
J	4.49	1.62E+08
J	4.28	1.54E+08
A	4.51	1.62E+08
S	4.63	1.67E+08
O	4.45	1.60E+08
N	4.15	1.49E+08
D	3.94	1.42E+08

Fuente: NASA (<http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?uid=0>)

Notase: $1 \text{ kW-hrs/m}^2\text{-día} = 0.359999\text{E}+08 \text{ kJ/ha-día}$

**Cuadro 4-4: Insolación Solar y Carga Superficial Máxima, CS_M
Catacamas, Honduras Latitud 14.8 ° N; Longitud 85.9 ° W.**

Mes	kJ/ha-día	Eficiencia de Algas	CS_M $\frac{\text{kg O}_2}{\text{ha-día}}$
E	1.57E+08	0.03	304
F	1.83E+08	0.03	355
M	2.11E+08	0.03	408
A	2.24E+08	0.03	433
M	2.03E+08	0.03	393
J	1.62E+08	0.03	313
J	1.54E+08	0.03	299
A	1.62E+08	0.03	315
S	1.67E+08	0.03	323
O	1.60E+08	0.03	310
N	1.49E+08	0.03	289
D	1.42E+08	0.03	275

Utilizando los datos de NASA, las Figuras 4-6 y 4-7 muestran, como ejemplos, la insolación y las cargas superficiales máximas para Catacamas, Choluteca, y La Ceiba, Honduras. Se concluye que, para la mayoría de los climas de Honduras, la carga superficial máxima para lagunas facultativas varía entre 275 a 350 kg DBO₅/ha-día, asumiendo una eficiencia de conversión de energía solar por las algas de 3%.

La Figura 4-8 presenta los resultados de las cargas superficiales medidas en el proyecto de monitoreo (los puntos negros) como función de la DBO₅ del afluente. También, la figura presenta curvas de tiempo de retención hidráulica que muestran la relación entre carga superficial y la DBO₅ del afluente. Se ve claramente que la mayoría de las lagunas facultativas estaban sobrecargadas, y también que la mayoría no tienen el mínimo tiempo de retención hidráulica recomendado de 10 días.

La Figura 4-8 también muestra que la DBO₅ del afluente es muy significativa en el diseño de una laguna facultativa: si la DBO₅ es 200 mg/L, un tiempo de retención de 10 días sería dentro del rango aceptable de la carga superficial máxima; pero, si DBO₅ del afluente es 300 mg/L, la laguna facultativa necesitaría un TRH de, por lo mínimo, 16 días para poder estar dentro de los rangos aceptables de cargas superficiales. Se concluye que es fundamental monitorear los caudales y la DBO₅ del afluente antes de diseñar una laguna facultativa para no seguir en cometer los errores del pasado.

4.3.2 Efectos de Viento y Temperatura en el Diseño de Lagunas Facultativas

No se incluye el efecto de reaeración por el viento en el diseño de lagunas facultativas porque, como discutió Oswald hace cuarenta años (1963), la ganancia del oxígeno por reaeración es solamente una fracción de la ganancia por fotosíntesis. Por ejemplo, el oxígeno disuelto dentro de una laguna tendría que tener un déficit de 10 mg/L—una condición en que la laguna tendría muy malos olores—para obtener una ganancia de 18 kg O₂/ha-día por reaeración, un factor insignificante relacionado las ganancias por fotosíntesis (Oswald, 1963).

Oswald (1957) presentó los siguientes coeficientes de temperatura para la genera de especies de alga *Chlorella* en lagunas facultativas:

Temperatura, ° C	Coficiente de Temperatura para Fotosíntesis
10	0.49
15	0.87
20	1.00
25	0.91
30	0.82
35	0.69

Asumiendo que la mayoría de algas en lagunas comportan como *Chlorella*, se concluye que para las temperaturas entre 20—30 °C, la tasa de fotosíntesis no cambia significativamente. Un problema potencial es temperaturas arriba de 30 °C, que pueden afectar la tasa de fotosíntesis de algas. Porque todos los sistemas monitoreados en Honduras tenían temperaturas entre 20—30 °C se concluye que temperatura no tiene un efecto significativo en el diseño utilizando el método de energía solar.

Figura 4-6: Insolación en una Superficie Horizontal Versus Mes

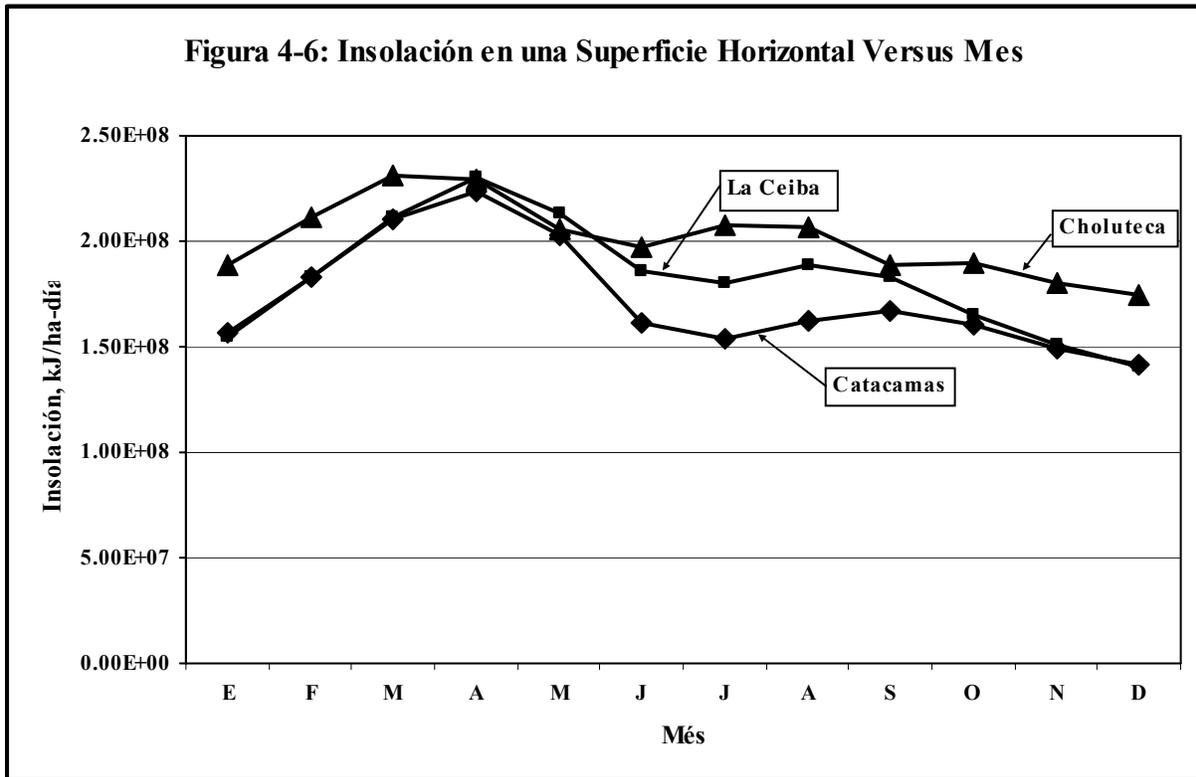
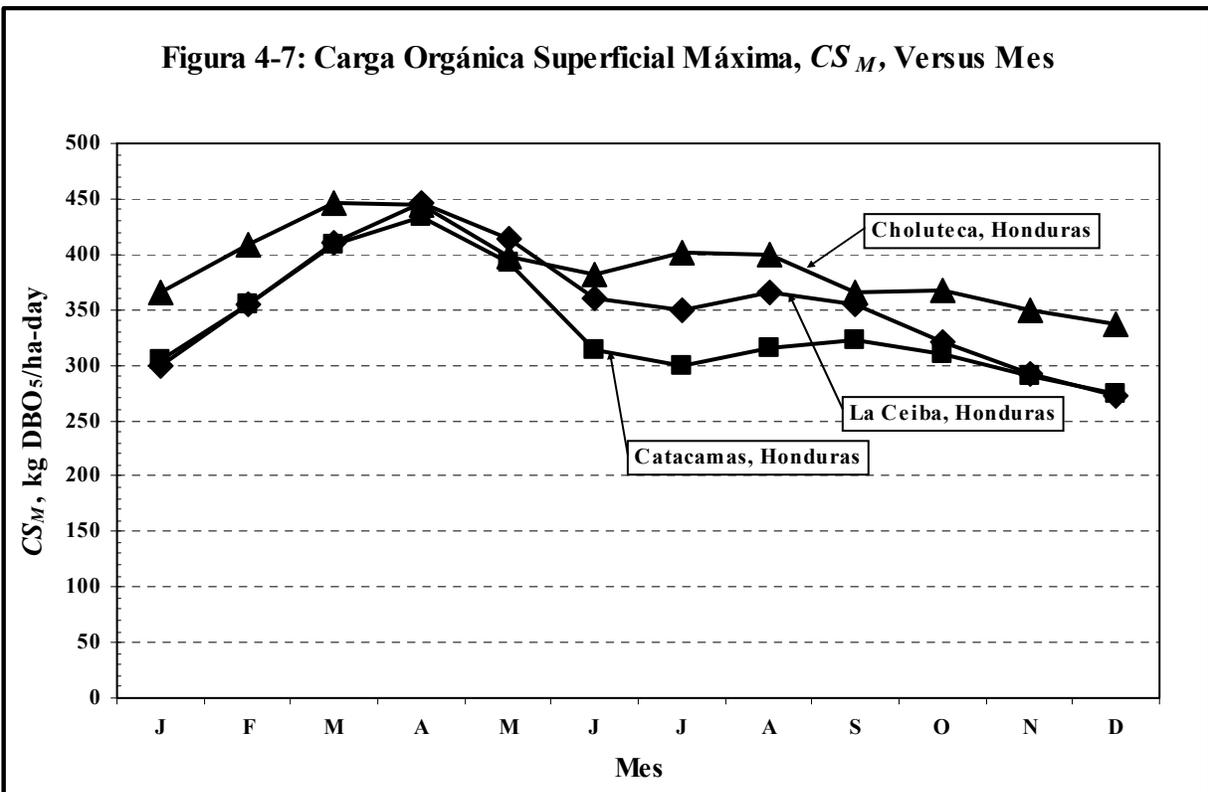
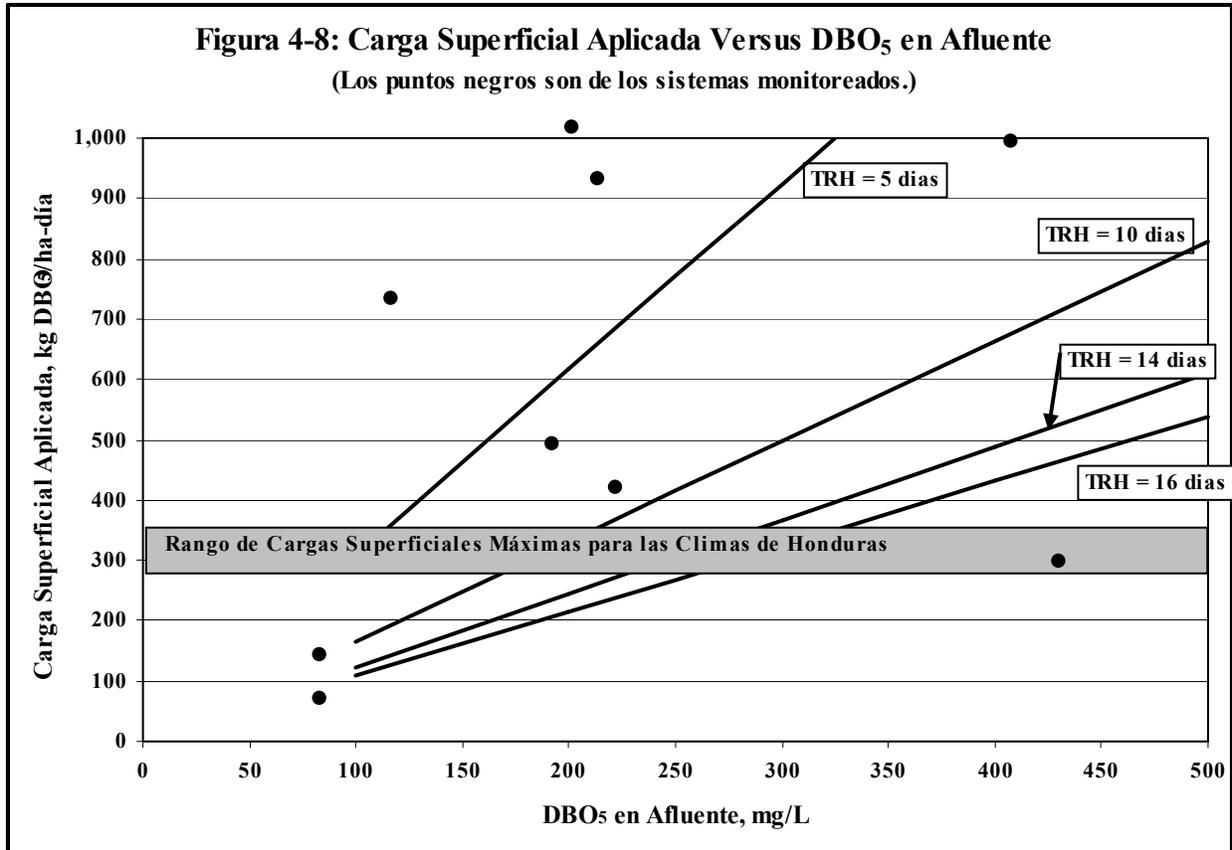


Figura 4-7: Carga Orgánica Superficial Máxima, CS_M , Versus Mes





4.3.3 El Dimensionamiento de Lagunas Facultativas

El área requerida se calcula con la siguiente ecuación:

$$A_F = \frac{10 \cdot L_A \cdot Q_{med}}{CS_M} \quad (4-5)$$

donde

- A_F = el área de la laguna facultativa, m²
- L_A = la concentración promedio de DBO₅ en el afluente, mg/L
- Q_{med} = el caudal promedio, m³/día
- CS_M = la carga superficial máxima, kg DBO₅/ha-día

El tiempo de retención hidráulica nominal se calcula con la Ecuación 4-6:

$$TRH_F = \frac{V_F}{Q_{med}} \quad (4-6)$$

donde

- TRH_F = tiempo de retención hidráulica nominal de la laguna facultativa, días
- V_F = volumen de laguna facultativa, m³

Se calcula el volumen de la laguna facultativa, V_F , de la siguiente ecuación desarrollada para una laguna con taludes interiores inclinados (U.S. EPA, 1983), lo que es realmente la ecuación para el volumen de un prismoide:

$$V_F = \frac{P}{6} \cdot [(l \cdot a) + (l - 2iP)(a - 2iP) + 4 \cdot (l - iP)(a - iP)] \quad (4-7)$$

donde V_F = volumen de la laguna facultativa, m^3
 P = la profundidad de la laguna, m
 l = largo de la laguna, m
 a = ancho de la laguna, m
 i = la relación horizontal/vertical del talud interior, que es normalmente de 3/1

Se recomienda una profundidad de 1.8 a 2.0 metros en las lagunas facultativas para mantener condiciones aeróbicas en el primer metro de profundidad y tener espacio por abajo para la acumulación de lodos. La profundidad más utilizada es 1.8 metros.

Se recomienda una relación de largo a ancho en lagunas facultativas de por los menos 2/1 y preferiblemente 3/1 para modelar flujo de tipo pistón.

4.3.4 Acumulación de Lodos en Lagunas Facultativas

La acumulación de lodos al fondo de una laguna facultativa puede afectar su funcionamiento, disminuyendo el volumen y por lo tanto el tiempo de retención hidráulica. Se debe calcular la acumulación en el diseño, y se debe medir la acumulación en la operación y mantenimiento de una laguna facultativa para poder preparar para la remoción de lodos. Siempre se debe diseñar, por lo menos, dos lagunas facultativas en paralelo para poder secar y remover los lodos de una mientras se mantiene la otra en operación.

La acumulación de lodos en lagunas facultativas monitoreadas en Honduras varía entre 0.2—0.55 $m^3/1,000 m^3$ de aguas residuales tratadas como se discutió en el Capítulo 2. Se recomienda que se estime la acumulación de lodos de la carga de sólidos suspendidos y caudal promedio utilizando la siguiente ecuación desarrollado en el Capítulo 8:

$$V_L = 0.00156 \cdot Q_{med} \cdot SS \quad (4-8)$$

donde V_L = volumen de lodos producidos anualmente, $m^3/año$
 Q_{med} = caudal promedio, $m^3/día$
 SS = sólidos suspendidos en el afluente, mg/L

El diseño debe recomendar la frecuencia de limpieza de lodos y el método más apropiado para hacerla. Como se discute en detalle en el Capítulo 8, se debe remover los lodos de lagunas facultativas cuando el volumen de lodos acumulados aproxima no más de 25% del volumen de la laguna.

4.3.5 Remoción de Coliformes Fecales y *Escherichia coli* en Lagunas Facultativas

Las Figuras 2-3 y 2-4 muestran que es posible remover de 2.0 hasta 2.5 ciclos \log_{10} de coliformes fecales y de 2.0 hasta 3.5 ciclos \log_{10} de *Escherichia coli* en lagunas facultativas con tiempos de retención nominales de 7 a 23 días. Como se discute adelante en Sección 4.4, la diferencia entre lagunas es por el régimen hidráulico en la laguna y los cortos circuitos hidráulicos. Si la laguna está bien diseñada hidráulicamente, con un tiempo de retención promedio que aproxima el TRH nominal mínimo de 10 días, se debe obtener una remoción de 2.0 ciclos \log_{10} de coliformes fecales y *E. coli* en lagunas facultativas a temperaturas igual a 25 ° C.

4.4 Lagunas de Maduración para Remoción de Patógenos

El propósito del uso de lagunas de maduración es el siguiente:

- i. Tener tiempo de retención adicional para la remoción de patógenos.
- ii. Mejorar la calidad del efluente final.
- iii. Servir como un factor de seguridad si las lagunas primarias tuvieran problemas en su funcionamiento.

Mientras hay varios modelos para la remoción de coliformes fecales en lagunas de maduración, ninguno sirve en la práctica experimentada en el monitoreo de sistemas en América Central (Oakley, *et al.*, 2000). Como resultado, se recomienda que se utilice reglas prácticas del Proyecto de Monitoreo de las Lagunas de Estabilización de Honduras para el diseño de lagunas de maduración.

4.4.1 El Uso de Mamparas para Modelar Flujo de Tipo Pistón y Mejorar el TRH Promedio

Las Figuras 2-5 y 2-6 muestran que se puede obtener una remoción de 1.0 a 2.6 ciclos \log_{10} en lagunas de maduración para coliformes fecales y *Escherichia coli* con tiempos de retención hidráulica nominal de 3 a 7 días. Las lagunas de maduración con mamparas (Catacamas Oeste, Morcelí, y Trinidad) tenían una remoción más que las otras lagunas y como resultado se recomienda el uso de mamparas en lagunas de maduración para modelar flujo de tipo pistón. Se recomienda una relación más de 20/1 de largo/ancho utilizando mamparas para mejorar el régimen hidráulico y aproximar flujo de tipo pistón en lagunas de maduración (Shilton y Harrison, 2003).

El Cuadro 4-5 presenta los resultados de varias investigaciones de sistemas de lagunas donde se midió el TRH promedio con trazadores. En todos los casos las lagunas sin mamparas—facultativas o de maduración—tenían un TRH promedio solamente entre 42 a 62% del TRH nominal. El estudio en Colombia de Lloyd, *et al.* (2003b) mostró que a pesar del uso de mamparas con una relación largo/ancho de 35/1, el viento pudo tener un efecto significativo en los cortos circuitos hidráulicos, mejorando el TRH promedio solamente de 1.06 a 1.26 días. Sin embargo, cuando ellos utilizaron rompevientos para controlar el efecto del viento, el TRH promedio subió hasta 1.86 días o 73.8% del TRH nominal. Se puede controlar el efecto del viento con el uso de mamparas transversales en vez de longitudinal (Shilton y Harrison, 2003) como se presenta en la Figura 4-9, lo que es el diseño más recomendado para las municipalidades en Honduras.

Cuadro 4-5: TRH Nominal y Promedio (Medido con Trazadores) Reportados para Lagunas de Estabilización de Varios Diseños

Lugar	Tipo de Laguna	TRH Nominal días	TRH Promedio días	TRH Promedio como porcentaje del TRH Nominal
Colombia ¹	Maduración			
	Sin mamparas	2.52	1.06	42.1
	Con mamparas (Largo/ancho = 35/1)	2.52	1.26	50.0
	Con mamparas y rompevientos	2.52	1.86	73.8
México ²	Facultativa			
	Sin mamparas	4.30	0.92	21.4
Perú ³	Facultativa			
	Número 1 sin mamparas	10.32	4.85	47.0
	Número 3 sin mamparas	5.65	2.77	49.0
	Maduración			
	Número 1 sin mamparas con caudales diferentes	15.26	6.98	45.7
		18.84	9.94	52.8
	13.13	5.86	44.6	
	Número 3 sin mamparas	3.23	2.02	62.5

1. Lloyd, *et al.*, 2003b.

2. Lloyd, *et al.*, 2003a.

3. Yáñez, 1984.

4.4.2 TRH Nominal Mínima en Lagunas Facultativas y de Maduración

Asumiendo una tasa de mortalidad del primer orden de coliformes fecales, se escribe la disminución de la concentración de ellos con las siguientes ecuaciones:

$$N = N_o e^{-k_b t} \quad (4-9a)$$

$$\ln \left[\frac{N}{N_o} \right] = -k_b t \quad (4-9b)$$

donde N_o = la concentración inicial de coliformes fecales, NMP/100mL
 N = la concentración final de coliformes fecales, NMP/100mL
 k_b = la constante de mortalidad del primer orden, días⁻¹
 t = tiempo de reacción, días

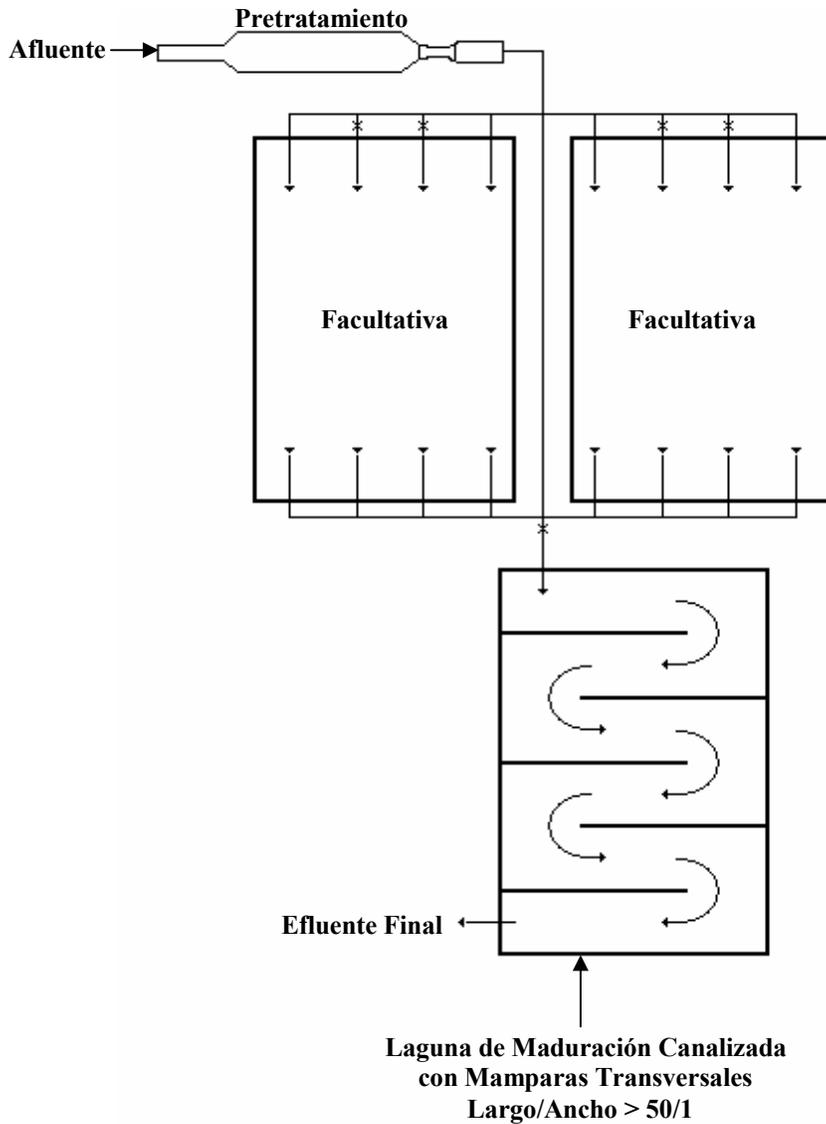


Figura 4-9: Una batería de dos lagunas facultativas en paralelo seguida por una laguna de maduración en serie. La laguna de maduración está canalizada con mamparas transversales con una relación largo/ancho más de 50/1 para aproximar flujo de tipo pistón sin efectos del viento. Este diseño es el más recomendado para las municipalidades.

El tiempo para remover 2.0 ciclos \log_{10} de coliformes fecales ($N = 0.01N_o$) se define como t_{99} (99% remoción) y se calcula así (Feachem, *et al.*, 1983):

$$\ln\left[\frac{0.01}{1.0}\right] = -4.6 = -k_b t_{99} \quad (4-10a)$$

$$t_{99} = \frac{4.6}{k_b} \quad (4-10b)$$

La constante de mortalidad del primer orden para coliformes fecales, k_b , es muy dependiente sobre la temperatura de la reacción y el tipo de laguna. León y Moscoso (1996) reportaron las siguientes relaciones desarrolladas en los estudios por CEPIS en las lagunas de San Juan, en Lima, Perú (León y Moscoso, 1996):

Lagunas Facultativas:

$$k_b = 0.477(1.18)^{T-20} \quad (4-11a)$$

Primera Laguna de Maduración:

$$k_b = 0.904(1.04)^{T-20} \quad (4-11b)$$

Segunda Laguna de Maduración:

$$k_b = 0.811(1.09)^{T-20} \quad (4-11c)$$

donde T = temperatura del agua, ° C

El Cuadro 4-6 muestra los valores de k_b y t_{99} para las temperaturas de 20, 25 y 30 ° C para lagunas facultativas y de maduración. Para lagunas facultativas, los cálculos muestran que a las temperaturas encontradas entre 20—25 ° C, lo más típico rango en las lagunas monitoreadas en Honduras, una laguna con un TRH nominal de 8 a 16 días debe obtener una remoción de 2.0 ciclos \log_{10} para coliformes fecales y *E. coli*. Se asume que el TRH nominal es 50% del TRH promedio como se presenta en los estudios de lagunas facultativas en el Cuadro 4-5.

Para lagunas de maduración, el Cuadro 4-6 muestra que, si la laguna está canalizada con mamparas con la relación largo/ancho > 20/1, sin efectos significativos del viento, un TRH nominal de solamente 6 a 7 días debe ser suficiente para remover 2.0 ciclos \log_{10} para coliformes fecales y *E. coli*. En la práctica se recomienda una relación largo/ancho > 50/1 con mamparas transversales para obtener este nivel de remoción.

Cuadro 4-6: Parámetros de Diseño para Remoción de Coliformes Fecales

Tipo de Laguna	T = 20 ° C	T = 25 ° C	T = 30 ° C
Facultativa			
k_b , días ⁻¹	0.563	1.09	No se aplica
t_{99} , días (= TRH Promedio)	8.2	4.2	TRH Nominal < 8-10 días y CS Aplicada > CS_m
TRH Nominal, días = 0.50 TRH Promedio	16.4	8.4	
Primera de Maduración			
k_b , días ⁻¹	0.940	1.10	1.34
t_{99} , días (= TRH Promedio)	4.9	4.2	3.4
TRH Nominal, días = 0.50 TRH Promedio	9.8	8.4	6.9
= 0.70 TRH Promedio ¹	7.0	6.0	4.9

1. Un TRH Nominal = 0.70 TRH Promedio es posible solamente con mamparas sin efectos significativos del viento con una relación largo/ancho > 20/1. En la práctica se recomienda una relación largo/ancho > 50/1.

El Cuadro 4-7 muestra los resultados de monitoreo en los sistemas de lagunas con la mejor remoción de coliformes fecales y *Escherichia coli*: Catacamas Oeste, Morocelí, El Progreso, y Trinidad. En las lagunas facultativas que tenían aproximadamente 2.0 ciclos \log_{10} de remoción, los factores principales fueron un TRH nominal grande de más de 20 días (Catacamas Oeste), un TRH nominal mínimo de 8 días con mamparas y una relación largo/ancho \approx 20/1 a 50/1 (Morocelí y Trinidad), y un TRH nominal mínimo de 8 días con entradas múltiples sumergidas (El Progreso). En las lagunas de maduración los factores principales de mejor remoción fueron el uso de mamparas con la relación largo/ancho más de 20/1, y con TRH nominales más de 6 días—lo que aproxima el mínimo mostrado en el Cuadro 4-6. Los resultados en el Cuadro 4-7 muestran, claramente, que en la práctica es posible aproximar t_{99} con los valores de TRH nominal presentados en el Cuadro 4-6.

Como resultado, para la remoción de coliformes fecales y *Escherichia coli*, se recomienda que para el diseño de proceso que se utilice un TRH nominal mínimo de 10 días en lagunas facultativas, y un TRH nominal mínimo de 7 días en lagunas de maduración, y que las lagunas de maduración sean canalizadas con mamparas con una relación largo/ancho mínima de 50/1 (lo que elimina los efectos del viento). Si sea posible, sería mejor utilizar dos lagunas de maduración en serie, cada una canalizada con mamparas, y que cada una cuenta con un TRH nominal mínimo de 7 días. Se debe diseñar las lagunas de maduración con una profundidad de 1.5 a 1.8 metros.

Las Fotos 4-3 a 4-6 muestran ejemplos de lagunas facultativas y de maduración en operación en América Central.

Cuadro 4-7:
Resultados de Monitoreo en las Lagunas con la Mejor Remoción de Coliformes Fecales y *Escherichia coli*

Sistema	Lagunas Facultativas						Lagunas de Maduración				
	TRH Nominal días	Carga Superficial <u>kg DBO</u> ha-día	Canalizadas con Mamparas	Rango de Temp. en Efluente ° C	Remoción Ciclos log ₁₀		TRH Nominal días	Canalizadas con Mamparas	Rango de Temp. en Efluente ° C	Remoción Ciclos log ₁₀	
					Coliformes Fecales	<i>E. coli</i>				Coliformes Fecales	<i>E. coli</i>
Catacamas Oeste											
Verano	23.0	300	No ¹	27—31	2.40	2.75	4.2	Si ²	27—30	2.00	2.09
Invierno	24.0	193	No ¹	24—28	2.52	3.60	4.4	Si ² L/A ≈ 20/1	24—28	1.19	0.68
Morocelí											
Verano	7.0	410	Sí L/A ≈ 50/1	22—26	2.08	2.19	7.0	Sí L/A ≈ 50/1	22—26	1.55	1.88
El Progreso											
Invierno	8.3	179	No ³	23—25	1.89	1.89	5.7	No ³	22—26	1.00	1.13
Trinidad											
Invierno	7.8	141	Sí L/A ≈ 20/1	21—27	1.86	1.86	6.2	Sí L/A ≈ 20/1	21—26	2.36	2.60

1. Las lagunas facultativas en Catacamas Oeste tienen entradas y salidas múltiples.
2. Las lagunas de maduración en Catacamas Oeste, a pesar que tienen mamparas, no tenían suficiente TRH Nominal para alcanzar a t_{99} en el invierno como se ve en el Cuadro 4-6; no se puede explicar porque alcanzaron al t_{99} en el verano, pero la más alta temperatura podría ser un factor (Cuadro 4-6).
3. Las lagunas facultativas en El Progreso tienen entradas y salidas múltiples sumergidas que minimizan cortos circuitos hidráulicos; a pesar que la laguna de maduración tiene entradas múltiples sumergidas, el TRH Nominal no es suficiente para remover 2 ciclos log₁₀ como se ve en el Cuadro 4-6.



Foto 4-3: Un buen ejemplo de una laguna facultativa bien diseñada y operada. La laguna no tiene malos olores ni crecimiento de plantas acuáticas. El color verde es causado por las algas que producen oxígeno por la fotosíntesis. (Masaya, Nicaragua)



Foto 4-4: Otro ejemplo de una laguna facultativa que está en buen funcionamiento. (Choloma, Honduras)



Foto 4-5: Un ejemplo de una laguna de maduración canalizada con mamparas para modelar flujo de tipo pistón. Las lagunas de maduración deben tener una relación de largo/ancho mínima de 20 a 1, y preferiblemente 50 a 1. (Masaya, Nicaragua)



Fotos 4-6: Otros ejemplos de lagunas de maduración que están canalizadas con mamparas. En la foto arriba la relación largo/ancho aproxima 20/1, y en la foto abajo 50/1. En la foto abajo las mamparas están demasiado arriba del nivel del agua y prohíben la insolación solar por la sombra que forman; deben estar más por abajo como en la foto arriba. (Foto arriba: Trinidad, Honduras; abajo: Morocelí, Honduras)

CAPITULO 5: NORMAS Y PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO DE PROCESO

5.1 Normas de Diseño

Como una norma general para las municipalidades, se recomienda diseñar un sistema de lagunas facultativas seguidas por lagunas de maduración como se presenta en la Figura 4-1. Las lagunas facultativas deben ser diseñadas en baterías en paralelo para poder sacar una fuera de servicio durante la remoción de lodos y la otra queda en operación. Dependiendo sobre el objetivo final de tratamiento, se puede tener una o dos lagunas de maduración en serie después las lagunas facultativas en paralelo. Por las dificultades en operación y en la remoción de lodos, no se recomienda el uso de lagunas anaeróbicas para tratamiento de aguas residuales en las municipalidades. En el Cuadro 5-1 se presentan las normas de diseño recomendadas para estos sistemas de lagunas de estabilización. Se utilizarán las normas al final en un ejemplo de diseño.

5.2 Procedimientos de Diseño del Proceso de un Sistema de Lagunas

El procedimiento del diseño del proceso de las lagunas es el siguiente:

1. El diseño global debe consistir de una batería de lagunas facultativas en paralelo seguida en serie de una o dos lagunas de maduración.
2. Se determina el caudal de diseño, lo que debe ser el caudal promedio diario, en monitorear los caudales del alcantarillado y en tomar un catastro de las conexiones existentes y proyectadas. No se debe asumir caudales per cápita para evitar el problema de las sobrecargas hidráulicas encontradas en el Proyecto de Monitoreo de Lagunas de Estabilización en Honduras.
3. Se determina la carga orgánica de DBO_5 en el afluente en monitorear las concentraciones de la DBO_5 en el alcantarillado con muestras compuestas. No se debe asumir un aporte per cápita ni una concentración promedio de DBO_5 . Los resultados del Proyecto de Monitoreo muestran que la DBO_5 en el afluente puede variar de 62 hasta 712 mg/L en las aguas residuales de las municipalidades.
4. Se diseña rejillas y desarenadores, y se estima la producción de sólidos arenosos, utilizando las normas y métodos de diseño presentadas en el Capítulo 3.
5. Se calcula la carga orgánica superficial máxima con la Ecuación 4-4:

$$CS_m = (1.937E - 06) \cdot (RS)$$

6. Calcular el área requerida de la laguna facultativa usando la Ecuación 4-5:

$$A_F = \frac{10 \cdot L_A \cdot Q_{med}}{CS_M}$$

Cuadro 5-1: Normas de Diseño del Proceso Recomendadas para Tratamiento de Aguas Residuales con Lagunas de Estabilización en las Municipalidades de Honduras

Parámetro	Norma Recomendada
1. Diseño global del sistema	Baterías de lagunas facultativas en paralelo seguidas por una o dos lagunas de maduración en serie.
2. Caudal de diseño	No se debe asumir caudales per cápita. Para evitar el problema de las sobrecargas hidráulicas encontradas en el Proyecto de Monitoreo, se debe monitorear los caudales en el alcantarillado y tomar un catastro de conexiones existentes y proyectadas.
3. DBO ₅ del afluente	No se debe asumir un aporte per cápita ni una concentración promedio. Para evitar el problema de las sobrecargas orgánicas encontradas en el Proyecto de Monitoreo, se debe monitorear la DBO ₅ en el alcantarillado con muestras compuestas.
4. Rejillas	Se debe diseñar rejillas para todos los sistemas de lagunas. Se diseñan las rejillas con las normas y los métodos discutidos en el Capítulo 3.
5. Desarenadores	Se debe diseñar desarenadores para todos los sistemas de lagunas. Se diseñan los desarenadores con las normas y los métodos discutidos en el Capítulo 3.
6. Producción de sólidos arenosos	De los valores estimados del Proyecto de Monitoreo, se utiliza un valor de 0.085 m ³ /1,000m ³ .
7. Carga superficial máxima de DBO ₅ en lagunas facultativas	$CS_M = (1.937E-06) \cdot RS$ <i>RS</i> es la radiación solar diaria expresada como el promedio del mes. Para los climas de Honduras <i>CS_M</i> varía entre 275—350 kg DBO ₅ /ha-día.
8. Tiempo de retención hidráulica nominal	Lagunas Facultativas: $TRH_F \geq 10$ días con entradas/salidas múltiples Lagunas de Maduración: $TRH_M \geq 7$ días, canalizadas con L/A $\geq 50/1$
9. Acumulación de lodos y frecuencia estimada de remoción	Para el diseño se utiliza: $V_{L-a} = 0.00156 \cdot Q_{med} \cdot SS$ Se debe recomendar remoción de lodos cuando el volumen de lodos acumulados alcance a 25% del volumen total de la laguna. Se estima la frecuencia de limpieza con la siguiente ecuación: $t_L = 0.25 \cdot \frac{V_F}{V_{L-a}}$ Después de estar en operación, se mide anualmente la producción de lodos en lagunas facultativas.
10. Dimensiones de lagunas	Una relación de largo/ancho de 3/1 mínima en facultativas, y de 50/1 mínima en lagunas de maduración con el uso de mamparas desviadoras. Taludes interiores de horizontal/vertical de 3/1. Profundidades de lagunas facultativas: 1.8—2.0m; de maduración: 1.5—1.8m
11. Remoción de huevos de helmintos	Se debe obtener 100% con una batería de facultativas en paralelo seguida en serie por una de maduración.
12. Remoción de coliformes fecales	Se debe obtener 3—y preferible 4—ciclos log ₁₀ de remoción con una batería de facultativas en paralelo seguida en serie por una de maduración.
13. Remoción de DBO ₅	Efluente final promedia de DBO ₅ filtrada ≤ 50 mg/L
14. Remoción de SS	Efluente final promedia de SS ≤ 75 mg/L

7. Dimensionar la laguna facultativa con una relación de largo/ancho de 3/1 mínimo con una profundidad de 1.8 a 2.0 m.
8. Calcular el tiempo de retención hidráulica nominal con las Ecuaciones 4-6 y 4-7:

$$TRH_F = \frac{V_F}{Q_{med}}$$

$$V_F = \frac{P}{6} \cdot [(l \cdot a) + (l - 2iP)(a - 2iP) + 4 \cdot (l - iP)(a - iP)]$$

9. Si $TRH_F \geq 10$ días, siga con el diseño de la laguna facultativa. Si no, recalculer el área y redimensionar la laguna hasta que $TRH_F \geq 10$ días. Se puede utilizar la Figura 4-8 como guía.
10. Calcular la acumulación de lodos utilizando la Ecuación 4-8:

$$V_{L-a} = 0.00156 \cdot Q_{med} \cdot SS$$

11. Calcular el tiempo de llenar 25% del volumen de la laguna con lodos acumulados—lo que es la frecuencia estimada de limpieza de lodos—utilizando la Ecuación 4-9:

$$t_L = 0.25 \cdot \frac{V_F}{V_{L-a}}$$

12. Dividir el área total calculada en dos lagunas facultativas, cada una con las mismas dimensiones de largo y ancho, y profundidad, para tener una batería de dos lagunas facultativas en paralelo.
13. Dimensionar una o dos lagunas de maduración en serie, con cada una con $TRH_M \geq 7$ días, utilizando las Ecuaciones 4-10 y 4-7:

$$V_M = TRH_M \cdot Q_{med}$$

$$V_M = \frac{P}{6} \cdot [(l \cdot a) + (l - 2iP)(a - 2iP) + 4 \cdot (l - iP)(a - iP)]$$

5.3 Ejemplo del Diseño de Proceso: Una Batería de Lagunas Facultativas Seguida en Serie de una de Maduración para Catacamas Este, Honduras

Se continua el Ejemplo 3-1 con el diseño de un sistema de lagunas para Catacamas Este. La siguiente información es aplicable:

Caudal promedio (Cuadro 2-1):	Medido como 2,592 m ³ /día en la época seca y como 2,639 m ³ /día en la época lluviosa
DBO ₅ del afluente(Cuadro 2-5):	Medida como 400 mg/L en la época seca y 296 en la época lluviosa
SS del afluente (Cuadro 2-6):	Medidos como 294 mg/L en la época seca y 266 mg/L en la época lluviosa
Infiltración al alcantarillado:	Incluida en las mediciones de caudal
Precipitación y evaporación:	No se considera en el ejemplo
Huevos de helmintos del afluente (Cuadro 2-2)	Medidos con un rango de 9—48 huevos/L
Coliformes fecales del afluente (Cuadro 2.3)	Medidos como 3.49 E+07 NMP/100 mL en la época seca y 2.52 E+07 NMP/100 mL en la época lluviosa
Profundidad de lagunas:	1.8 metros
Relación largo/ancho de laguna facultativa:	3/1
Relación largo/ancho de laguna de maduración:	50/1 (Canalizada con mamparas)
Período de diseño	Se considera solamente el presente

Solución:

1. El Propósito del Tratamiento:

Se asume que el propósito en orden de prioridad es remoción de patógenos, principalmente huevos de helmintos y coliformes fecales con el objetivo de cumplir la norma de la OMS de Categoría B de calidad de efluentes para riego, y después disminución de DBO₅ y SS. Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulica total nominal del sistema debe ser igual o mayor de 17 días, con $TRH_F \geq 10$ días y $TRH_M \geq 7$ días. Se diseña una batería de lagunas facultativas en paralelo seguida en serie de una laguna de maduración.

2. El caudal del diseño.

Se utiliza el caudal promedio entre las épocas secas y lluviosas:

$$Q_{med} = \frac{2,592 + 2,639}{2} = 2,615 \text{ m}^3 / \text{día}$$

3. La carga orgánica superficial máxima:

De los datos del Cuadro 4- 4 se determina que $RS = 1.42E+08$ kJ/ha-día para diciembre, el mes con mínimo radiación solar. Entonces,

$$CS_m = (1.937E - 06) \cdot (RS) = (1.937E - 06) \cdot (1.42E + 08) = 275 \text{ kg DBO}_5 / \text{ha - día}$$

4. Se calcula el área total de lagunas facultativas.

Se utiliza la DBO_5 promedia del afluente entre las épocas secas y lluviosas,

$$L_A = \frac{400 + 296}{2} = 348 \text{ mg/L}$$

$$A_F = \frac{10 \cdot L_A \cdot Q_{med}}{CS_M} = \frac{10 \cdot (348 \text{ mg/L}) \cdot (2,615 \text{ m}^3 / \text{día})}{275 \text{ kg DBO}_5 / \text{ha - día}} = 33,092 \text{ m}^2 = 3.3 \text{ ha}$$

5. Se dimensiona el área total de las lagunas facultativas:

$$l = 3 \cdot a; A_F = a \cdot l = \frac{l^2}{3}; l = \sqrt{3 \cdot A_F} = \sqrt{3 \cdot (33,092)} = 315 \text{ m}; \therefore a = \frac{315}{3} = 105 \text{ m}$$

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

$$\begin{aligned} V_F &= \frac{P}{6} \cdot [(l \cdot a) + (l - 2iP)(a - 2iP) + 4 \cdot (l - iP)(a - iP)] \\ &= \frac{1.8}{6} \cdot [(315) \cdot (105) + (315 - 2 \cdot 3 \cdot 1.8)(105 - 2 \cdot 3 \cdot 1.8) + 4 \cdot (315 - 3 \cdot 1.8)(105 - 3 \cdot 1.8)] \\ &= 55,523 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

6. Se calcula el tiempo de retención hidráulica.

$$TRH_F = \frac{V_F}{Q_{med}} = \frac{55,523 \text{ m}^3}{2,615 \text{ m}^3 / \text{día}} = 21.2 \text{ días} \geq 10 \text{ días}$$

Se nota que el tiempo de retención hidráulica nominal es tan largo como resultado de la DBO₅ promedio de 348 mg/L del afluente. La Figura 4-8 muestra que si la DBO₅ del afluente fuera 200 mg/L, el valor de TRH_F sería entre 10 y 14 días.

7. Se estima la acumulación de lodos por año en las lagunas facultativas. (Se asume el uso del desarenador diseñado en el Ejemplo 3-1.)

Se utiliza los SS promedios del afluente entre las épocas secas y lluviosas,

$$SS = \frac{294 + 266}{2} = 280 \text{ mg/L}$$

$$V_{L-a} = 0.00156 \cdot Q_{med} \cdot SS = 0.00156 \cdot (2,615 \text{ m}^3 / \text{día}) \cdot (280 \text{ mg/L}) = 1,142 \text{ m}^3 / \text{año}$$

8. Se proyecta la frecuencia de remoción de lodos cuando el volumen de lodos alcance 25% del volumen de la laguna.

$$t_L = 0.25 \cdot \frac{V_F}{V_{L-a}} = 0.25 \cdot \frac{(55,523 \text{ m}^3)}{(1,142 \text{ m}^3 / \text{año})} = 12.1 \text{ años}$$

Se nota que la proyección es solamente una estimación y que la acumulación de lodos tendría que ser medida dentro de la laguna cada año. Se nota también que la frecuencia de limpieza es mayor por el tiempo de retención hidráulica más largo de 20 días. Si el TRH_F fuera, por ejemplo, de 10 días, la frecuencia estimada de limpieza sería 6 años.

9. Se divide el área total de las lagunas facultativas a dos lagunas facultativas en paralelo.

$$A_F = A_{F1} + A_{F2} = 33,092 \text{ m}^2; A_{F1} = A_{F2} = 16,546 \text{ m}^2$$

$$\text{Para cada laguna en paralelo, } l = \sqrt{3 \cdot A_{F1}} = \sqrt{3 \cdot (16,546)} = 223\text{m}; \therefore a = \frac{223}{3} = 74.3\text{m}$$

10. Dimensionar la laguna de maduración con un tiempo de retención hidráulica de 7 días.

$$V_M = TRH_M \cdot Q_{med} = (7 \text{ días}) \cdot (2,615 \text{ m}^3 / \text{día}) = 18,305 \text{ m}^3$$

Utilizando la Ecuación 4-7 en una hoja electrónica se obtiene para la laguna de maduración:

$$A_M = 11,532 \text{ m}^2; P = 1.8 \text{ m}; l = 760\text{m}; a = 15\text{m}.$$

Se asume que la laguna de maduración está canalizada con mamparas para dar una relación largo/ancho = 50/1.

Se presentan los resultados del diseño en el Cuadro 5-2.

Cuadro 5-2: Resultados para el Diseño del Sistema de Catacamas Este

Parámetro	Lagunas Facultativas	Laguna de Maduración	Total
Caudal del diseño m ³ /día	2,615		
DBO ₅ del afluente mg/L	348		
CS_M kg DBO ₅ /ha-día	275		
Área, ha	Una batería de 2 en paralelo de 1.7 ha cada una para un área total de 3.4 ha	1.2	4.6
Profundidad, m	1.8	1.8	
Largo, m	223 cada una	760 (Canalizada)	
Ancho, m	75 cada una	15 (Canalizada)	
Volumen, m ³	55,523 total	18,304	
TRH, días	21.2	7.0	28.2
Acumulación de lodos, m ³ /año	1,142		
Frecuencia de limpieza de lodos	12.1 años		
Remoción de huevos de helmintos	>95—100%	100%	100%
Remoción de Coliformes Fecales o <i>Escherichia coli</i>	1.0—2.0 log ₁₀	2.0 log ₁₀	3.0—4.0 log ₁₀
Remoción de DBO ₅			>70% Total >80% Filtrada (DBO ₅ Filtrada < 50 mg/L)

CAPITULO 6: DISEÑO FISICO Y ASPECTOS DE CONSTRUCCION

6.1 Introducción

El diseño del proceso discutido anteriormente tiene que ser implementado a un diseño físico. El diseño físico es muy importante para el funcionamiento de una laguna como el diseño del proceso y puede afectar fundamentalmente la eficiencia del tratamiento. El diseño físico incluye factores como la selección del terreno; las dimensiones actuales de las lagunas compatibles con la topografía; el diseño de los taludes, incluyendo el revestimiento interior y la profundidad del bordo libre; el diseño de la entrada, salida, e interconexiones de las lagunas; la construcción de la ornamentación y aislamiento de las lagunas de acceso directo; y la construcción de las facilidades para el operador y vigilante. En el Cuadro 6-1 se presentan las normas recomendadas para el diseño físico de lagunas de estabilización. En la Foto 6-1 se presenta un ejemplo de como debe aparecer un sistema de lagunas bien diseñado y construido.

6.2 Selección del Terreno

El terreno seleccionado para la construcción de lagunas debe ser ubicado con respecto a la topografía, viviendas existentes y proyectadas, y la dirección del viento. El sitio seleccionado debe tener una topografía plana para minimizar el movimiento de tierra, y debe estar arriba del nivel de inundaciones. Siempre, si sea posible, se debe de aprovechar el flujo de gravedad para evitar el uso de bombeo, lo cual requiere mantenimiento y consumo de energía eléctrica: Hay dos sistemas de lagunas en Honduras abandonadas por problemas con la estación del bombeo—los sistemas de Choluteca y Nacaome. También, se debe tomarse en cuenta el drenaje del agua pluvial y la construcción de un sistema colector de escurrimiento para proteger las lagunas de erosión (véase las Fotos 6-2 y 6-3).

Se recomienda que se ubique un sistema de lagunas a una distancia mayor de 200 m, y preferiblemente mayor de 500 m, de la población a la que sirve (la existente y la proyectada) a favor de la dirección del viento; esta norma es para aliviar las preocupaciones del público de malos olores, y para disuadirlo de visitar las lagunas. Las lagunas deben ser ubicadas a una distancia mayor de 2 km de un aeropuerto, ya que las lagunas pueden atraer a las aves, y estas representarían un riesgo para la navegación aérea (Mara, *et al.*, 1992).

6.3 Investigaciones Geotécnicas

Los objetivos principales de una investigación geotécnica son los siguientes:

1. Asegurar el diseño adecuado del terraplén, incluyendo la inclinación de los taludes.
2. Determinar la permeabilidad del suelo para poder calcular la infiltración del agua de las lagunas.

Cuadro 6-1: Normas Recomendadas de Diseño Físico y de Construcción

Parámetro	Norma Recomendada
Selección del Terreno Topografía Distancia de población Distancia de un aeropuerto Orientación al viento	Terreno plano donde se evita el escurrimiento de agua pluvial y las inundaciones, y donde se puede aprovechar flujo por gravedad; no se debe utilizar bombeo. $\geq 200\text{m}$ y preferible $\geq 500\text{m}$ $\geq 2\text{ km}$ A favor de la dirección predominante para olores y ubicada para minimizar cortocircuitos hidráulicos causados por el viento.
Investigaciones Geotécnicas Diseño de taludes y terraplén Impermeabilización del fondo	Generalmente, 3/1 (horizontal/vertical) para taludes interiores, y de 1.5/1 a 2/1 para taludes exteriores, dependiendo sobre los resultados del estudio de mecánica de suelos. Se utiliza capas de arcilla, preferiblemente con $k < 10^{-9}$ m/s medida <i>in situ</i> , y cubierta con una capa final de suelo para proteger la arcilla.
Balance Hídrico	$Q_{med} \geq 0.001 \cdot A_T [(P - E) + I]$
Pretratamiento Rejillas Desarenador	Hechas de acero inoxidable o galvanizado. Dos cámaras en paralelo, cada una con drenaje y compuertas que sellan bien.
Medidor de Caudales	Una canaleta Parshall prefabricada después del desarenador; se la utiliza para medir caudales y controlar la velocidad horizontal en los canales de rejilla y desarenador.
Flujo Hidráulico Entradas y salidas	Lagunas facultativas: dispositivos múltiples de entrada y salida. Lagunas de maduración: una sola entrada y salida con mamparas desviadoras con $L/A \geq 50/1$ para aproximar flujo de tipo pistón.
Estructuras Hidráulicas Dispositivos de Repartición para Baterías de Lagunas en Paralelo Dispositivos de Repartición para Entradas Múltiples de Lagunas Entradas Salidas Descarga Final Dispositivo de Drenaje para Lagunas Primarias Vertedero de Demasías Canales de Desvío y Escurrimiento	Canal con tabique divisorio; distribuidor circular universal con compuerta divisoria; vertederos ajustables. Preferiblemente con compuertas ajustables, y vertederos o canaletas Parshall para medir cada división de caudal. Cajas divisorias con compuertas ajustables. Canales abiertos de concreto. Canales abiertos de concreto con compuerta de fondo ajustable para controlar la profundidad de descarga, y vertedero rectangular ajustable para controlar el nivel de agua en la superficie. Tubería abajo el nivel de agua para evitar la producción de espuma. Compuertas sencillas de abrir para el drenaje de lagunas facultativas o anaeróbicas para la remoción de lodos. Compuerta sencilla de abrir, cerrar, y ajustar. Canales abiertos. Si sea posible, el mismo canal podría servir para el desvío del caudales altos y el escurrimiento de agua pluvial.
Terraplén y Taludes Taludes interiores Corona de terraplén Rampas de acceso	Revestimiento de concreto. Suficiente ancho para acceso de camiones y maquinaria. Pavimentadas con concreto en todas las lagunas primarias para acceso de equipo para la limpieza de lodos.
Cercos	Hechos de alambre de púas.
Caseta de Operación	Almacenaje de herramientas, fuente de agua limpia, baño y ducha, laboratorio rudimentario. Deseable tener electricidad y teléfono.



Foto 6-1: Ejemplos de sistemas de lagunas bien diseñadas y mantenidas. Los terraplenes están mantenidos con el corte de hierbas en la orilla. Los taludes interiores tienen un revestimiento de concreto o mortero que sirve para controlar el crecimiento de plantas acuáticas y evitar la erosión por acción de olas. La superficie del agua no tiene materiales flotantes ni natas, y el nivel del agua está mantenido en el centro del revestimiento. (Foto arriba: Villanueva, Honduras. Foto abajo: Danlí, Honduras.)



Foto 6-2: El escurrimiento de agua pluvial tiene que ser controlado para proteger el terraplén y los taludes de una laguna. En esta laguna de maduración el escurrimiento de agua pluvial no fue controlado y está causando erosión al talud interior. (Zaragoza, El Salvador)



Fotos 6-3: Si la ubicación del sistema de lagunas está aguas abajo del escurrimiento de agua pluvial, se debe utilizar canales para el desvío del escurrimiento para evitar erosión de los taludes interiores (véase la Foto 6-2) y también una carga adicional de sólidos sedimentables llevados por el escurrimiento. (Santa Cruz de Yojoa, Honduras)

En una investigación geotécnica, se mide primero el nivel freático del agua subterránea. Después, se saca muestras del suelo, por lo menos 4 muestras por hectárea, hasta una profundidad de un metro más que la profundidad de la laguna; estas representan el perfil del suelo. Las muestras están analizadas para los siguientes parámetros del suelo (Mara, *et al.*, 1992):

1. La clasificación por tamaños de partículas.
2. El ensayo de Proctor modificado (la densidad máxima seca y la humedad óptima).
3. Los límites de Atterberg.
4. El contenido de materia orgánica.
5. El coeficiente de permeabilidad.

Se utilizan los datos de la investigación geotécnica para diseñar el terraplén y los taludes, y para determinar si la permeabilidad del suelo es adecuada para tener una tasa de infiltración aceptable al fondo de la laguna.

El suelo utilizado para la construcción del terraplén deberá estar compactado en capas de 150 a 250 mm hasta llega a un 90% de la densidad máxima seca (determinado por el ensayo de Proctor) (Mara, *et al.*, 1992). Después de la compactación, el suelo debe tener un coeficiente de permeabilidad determinado *in situ* de menos de 10^{-7} m/s (véase la discusión abajo). Se diseñan los taludes interiores del terraplén para que tengan una relación de 3 a 1 (horizontal a vertical). El diseño de los taludes exteriores está basado en un análisis de la mecánica de suelos usando los resultados de los ensayos de los suelos; dependiendo de los resultados, se puede variar de 1.5 a 1 de 2 a 1 (horizontal a vertical).

La determinación de la permeabilidad *in situ* del suelo de la base de la laguna es fundamental en calcular la infiltración, hacer un balance hídrico del sistema de lagunas, y determinar si el sistema necesitará una impermeabilización o no. Se utilizan los métodos del análisis de suelos para medir la permeabilidad y calcular la infiltración del sistema de lagunas (Cubillos, 1994).

6.4 Balance Hídrico

Para que un sistema de lagunas mantenga el nivel de líquido óptimo para una adecuada operación, es necesario que se cumpla el siguiente balance hídrico (Mara, *et al.*, 1992):

$$Q_{med} \geq 0.001 \cdot A_T [(P - E) + I] \quad (6-1)$$

donde

Q_{med}	=	el caudal promedio del afluente al sistema, m ³ /día
A_T	=	el área total del de las lagunas, m ²
P	=	la precipitación media mensual convertida en media diaria, mm/día
E	=	la evaporación media mensual convertida en media diaria, mm/día
I	=	la tasa de infiltración, mm/día

Si no se cumple el balance hídrico, se puede tener problemas muy serios en la operación y

mantenimiento de la laguna como se presentan en las Fotos 6-4. Los datos de evaporación y precipitación media mensuales de las estaciones meteorológicas principales son muy importantes utilizar en el balance hídrico. Se calcula la precipitación y evaporación media diaria para cada mes del año para determinar el mes crítico del uso de la Ecuación 6-1.

Se calcula la infiltración de la medición de la permeabilidad mencionada anteriormente. Se determina la permeabilidad máxima permisible de la Ley de Darcy (Mara, *et al.*, 1992):

$$k = \frac{Q_I}{86,400 \cdot A_b} \cdot \left[\frac{\Delta l}{\Delta h} \right] = \frac{(Q_{med} - 0.001 \cdot A_T [(P - E) + I])}{86,400 \cdot A_b} \cdot \left[\frac{\Delta l}{\Delta h} \right] \quad (6-2)$$

donde k = la permeabilidad máxima permisible, m/s
 Q_I = infiltración máxima permisible (= $Q_{med} - 0.001 \cdot A_T [(P - E) + I]$), m³/día
 A_b = el área de la base de la laguna, m²
 Δl = la profundidad de la capa debajo de la laguna al estrato más permeable, m
 Δh = la carga hidráulica (la profundidad de agua + Δl), m

Como una recomendación general, se puede consultar la información en el Cuadro 6-2 como una interpretación de los valores de permeabilidad medidos *in situ*.

Cuadro 6-2: Interpretaciones Generales de Valores de Permeabilidad, k , Medidos *In Situ*

Valor de k medido, m/s	Significado
$> 10^{-6}$	El suelo es demasiado permeable para poder llenar una laguna
$> 10^{-7}$	Ocurre infiltración pero no suficiente para prohibir el llenado de la laguna.
$< 10^{-8}$	Ocurre infiltración mínima.
$< 10^{-9}$	No hay mucho riesgo de contaminar agua subterránea.
$> 10^{-9}$	Se requiere estudios hidrogeológicos si se utiliza el agua subterránea para agua potable.

Adaptado de Mara y Pearson, 1998.

Si la permeabilidad medida es mayor que la máxima permisible, las lagunas necesitarán una impermeabilización para sellar bien el fondo. Mientras la impermeabilización puede ser de arcilla, suelo, o membranas sintéticas, lo más recomendable y más apropiada es de arcilla como se ve en las Fotos 6-5. La arcilla debe ser puesta en capas con un espesor total de, por los menos, 5 a 10 cm, y cubierta con una capa de suelo o arena para protegerla; también se puede utilizar una mezcla de arcilla con suelo o arena en vez de usar arcilla pura (US EPA, 1983). La tasa de infiltración de impermeabilización con arcilla en una laguna a largo plazo, después de un año de operación, ha sido reportada en los EE.UU. como 0.006 m³/m²-día, que fue aproximadamente 13% de la carga hidráulica (US EPA, 1983).



Fotos 6-4: Ejemplos de la importancia del balance hídrico. En las dos fotos las pérdidas por infiltración son excesivas y no se puede mantener el nivel de agua en las lagunas. Las dos lagunas faltan impermeabilización adecuada de arcilla. (Arriba: Zaragoza, El Salvador; abajo: La Ceiba, Honduras. Foto abajo cortesía de Ing. Iván Olivieri.)



Fotos 6-5: La impermeabilización de lagunas con arcilla es fundamental para poder mantener el balance hídrico y evitar infiltración excesiva con la posible contaminación del agua subterránea. La arcilla debe ser puesta en capas con un espesor total de, por los menos, 5 a 10 cm, y cubierta con una capa de suelo para protegerla. En este ejemplo el contratista no puso arcilla en los taludes interiores y las lagunas tenían infiltración excesiva como se ve en las Fotos 6-4. (La Ceiba, Honduras)

6.5 Pretratamiento y Medición de Caudales

Como se analizó en detalle en el Capítulo 3, cada instalación debe tener pretratamiento con i) rejillas hechas de acero inoxidable o acero galvanizado; ii) desarenadores con dos cámaras en paralelo, cada una con drenaje y compuertas que sellan bien; y iii) todos seguidos por una canaleta Parshall prefabricada que se utiliza no solamente para medir caudales, sino también para controlar la velocidad horizontal en los canales de la rejilla y el desarenador.

La medición de caudales es fundamental para poder determinar la carga hidráulica y orgánica al sistema de lagunas. Un registro de caudales permite la evaluación de la eficiencia del tratamiento, el diagnóstico de una laguna que no funciona bien, la determinación de la magnitud de infiltración y las conexiones ilegales al alcantarillado, y un cálculo aproximado de cuando el sistema de lagunas llegará a su capacidad de carga. Como se discutió en el Capítulo 3, el medidor más apropiado es la canaleta Parshall prefabricada. Las otras estructuras para medir caudales, como vertederos, no son tan apropiadas para aguas residuales porque se acumulan sólidos y por lo tanto requieren más mantenimiento.

Problemas encontrados frecuentemente en instalaciones que cuentan con desarenadores en América Central son los que los desarenadores son construidos sin drenaje en las cámaras, sin compuertas que sellan bien, sin una manera adecuada de controlar la velocidad horizontal, y sin un medidor de caudales que funciona. En general, estos problemas son parte de diseño y parte de falta de supervisión adecuada de la construcción de obras. Las Fotos 6-6 y 6-7 muestran ejemplos de estos problemas. La Foto 6-8 presenta un ejemplo de una canaleta Parshall prefabricada instalada correctamente.

6.6 Flujo Hidráulico

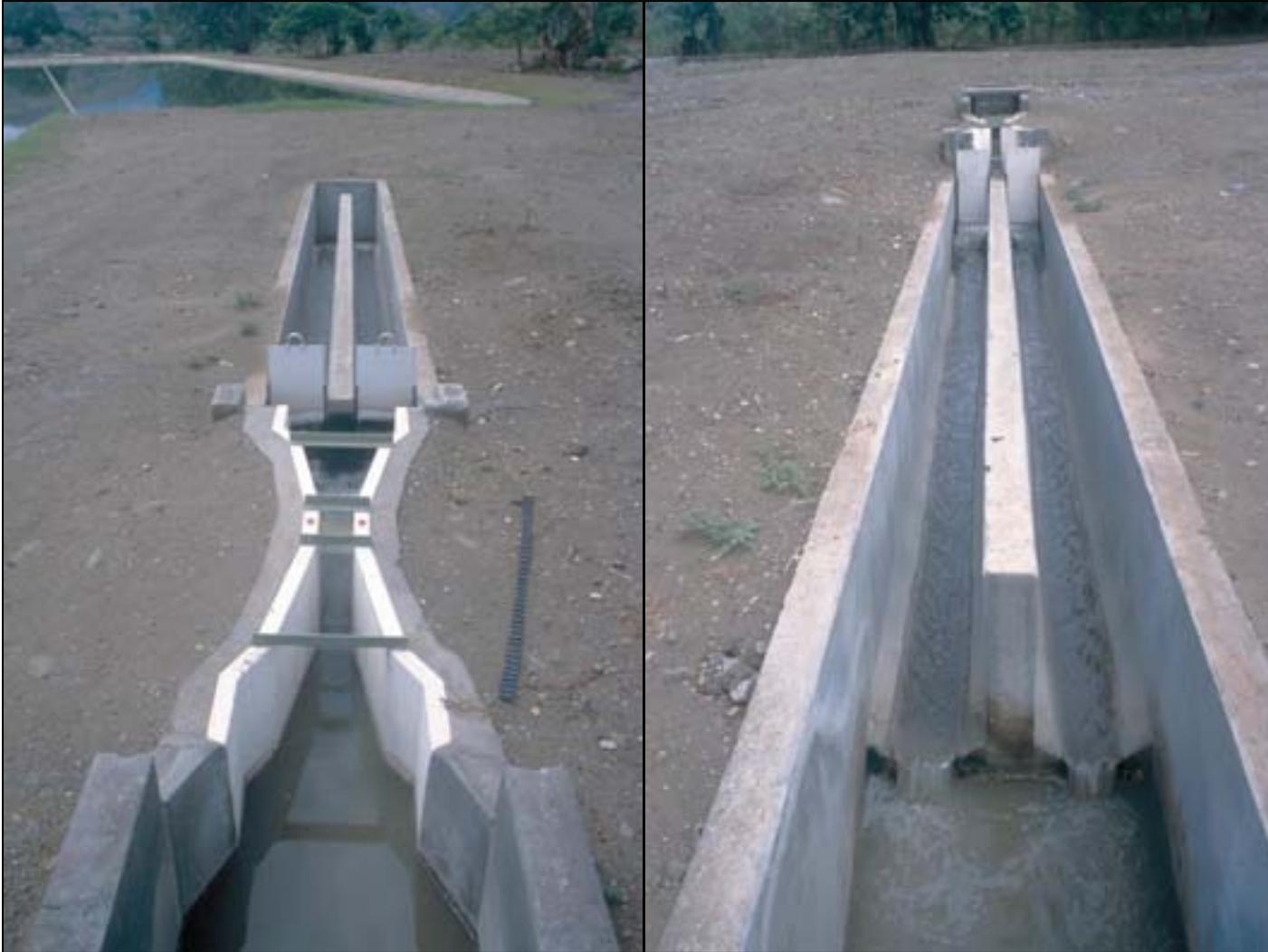
El diseño del flujo hidráulico es un factor clave para el funcionamiento de una laguna. El mejor tratamiento siempre será con un régimen hidráulico que se aproxime al flujo del tipo pistón (Mangelson y Watters, 1972; Shilton y Harrison, 2003). Sin embargo, si hay zonas hidráulicas muertas en la laguna, el tiempo de retención hidráulica será menor que el valor teórico calculado, afectando la eficiencia del proceso de tratamiento. Por lo tanto, el factor fundamental en el diseño hidráulico de una laguna es que el régimen hidráulico se aproxime al flujo del tipo pistón tanto como sea posible.

Las Fotos 6-8 muestran dispositivos de entrada con solamente una simple entrada con descarga arriba de la superficie del agua de la laguna. Los problemas con este tipo de diseño son la formación de zonas muertas en las esquinas de la laguna por la simple descarga, y turbulencia por la caída de agua que no promueve flujo de tipo pistón. Como resultado, las lagunas tienen cortos circuitos hidráulicos, lo que disminuye el volumen útil de la laguna y, entonces, su eficiencia de funcionamiento.

Para evitar los problemas de cortos circuitos hidráulicos y zonas muertas, se debe utilizar i) canales abiertos de entrada que descargan al nivel de agua; ii) dispositivos múltiples de entrada y salida en lagunas facultativas; y iii) una sola entrada y salida con mamparas desviadoras en lagunas de maduración.



Fotos 6-6: Este desarenador no tenía drenaje y la cámara fuera de servicio (lado izquierdo) estaba llena con agua estancada con problemas de natas flotantes, malos olores, y insectos. El operador tenía que abrir la compuerta y utilizar el desarenador con las dos cámaras en servicio—una operación en lo que no fue diseñado. Todos los desarenadores deben tener drenaje y compuertas que sellan bien. (Santa Cruz de Yojoa, Honduras)



Fotos 6-7: Este desarenador fue construido sin drenaje y, además, sin vertederos en la salida para controlar la velocidad horizontal. La canaleta Parshall prefabricado, lo que no se puede utilizar para medir caudales porque el contratista cortó el fondo para instalarla, debería de haber ubicada después del desarenador como se discutió en detalle en el Capítulo 3; en este caso no necesitarían vertederos adicionales. Este caso es típico de problemas encontrados con diseño y supervisión de construcción. (Trinidad, Honduras)



Foto 6-8: Una canaleta Parshall prefabricada, instalada correctamente, debe tener su respectiva lectura de caudal a la vista. La medición de caudales es fundamental para poder determinar la carga hidráulica y orgánica al sistema de lagunas. Un registro de caudales permite la evaluación de la eficiencia del tratamiento, el diagnóstico de una laguna que no funciona bien, la determinación de la magnitud de infiltración y las conexiones legales e ilegales al alcantarillado, y un cálculo aproximado de cuando el sistema de lagunas llegará a su capacidad de carga. (El Paraíso, Honduras)



Fotos 6-8: Dispositivos de entrada con una simple entrada arriba de la superficie causan zonas muertas en las esquinas y turbulencia por la caída de agua que no promueve flujo de tipo pistón. Como resultado, las lagunas tienen cortos circuitos hidráulicos, lo que disminuye el volumen útil de la laguna y, entonces, su eficiencia de funcionamiento. Se debe diseñar dispositivos múltiples de entrada y salida en lagunas facultativas y dispositivos sencillos con mamparas desviadoras en lagunas de maduración. (Foto arriba: Choluteca, Honduras. Foto abajo: Catacamas, Honduras)

La Figura 6-1 y la Foto 6-9 muestran canales abiertos de entrada que descargan al nivel de agua. Este tipo de dispositivo de entrada es preferible porque evita la turbulencia causada por una caída de agua si la entrada está arriba del nivel de superficie de la laguna. También, el caudal entrante tiene un choque con la masa de agua dentro de la laguna—lo que promueve flujo de tipo pistón como se ve en la Foto 6-9.

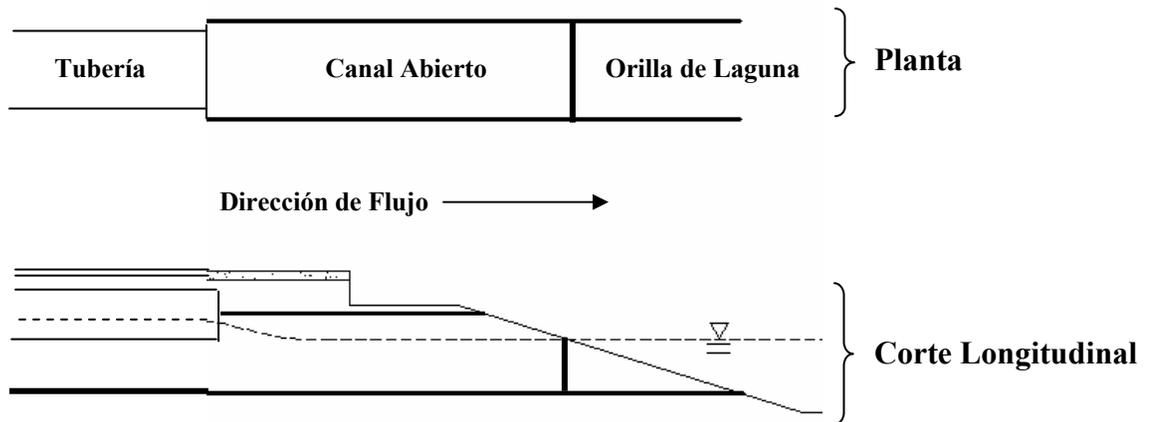


Figura 6-1: Las entradas en todas las lagunas deben ser de canales abiertos que descargan al nivel de agua, lo que promueve flujo de tipo pistón por el choque entre el caudal entrante y la masa de agua en la laguna.



Foto 6-9: Un buen ejemplo de una entrada con el canal abierto que entra la laguna facultativa al nivel de agua. Se ve claramente que la pluma de aguas residuales crudas que entra la laguna está aproximando al flujo de tipo pistón. (Granada, Nicaragua)

La Figura 6-2 y las Fotos 6-10 presentan ejemplos de dispositivos múltiples de entrada y salida en lagunas facultativas. No se utiliza mamparas en lagunas facultativas porque se necesita distribuir el afluente para aprovechar la máxima insolación solar que sea posible para la producción de oxígeno a través de fotosíntesis. También, las entradas y salidas múltiples en lagunas primarias promueven la distribución uniforme de lodos depositados al fondo de la laguna (Franci, 1999; Nelson, *et al.*, 2004).

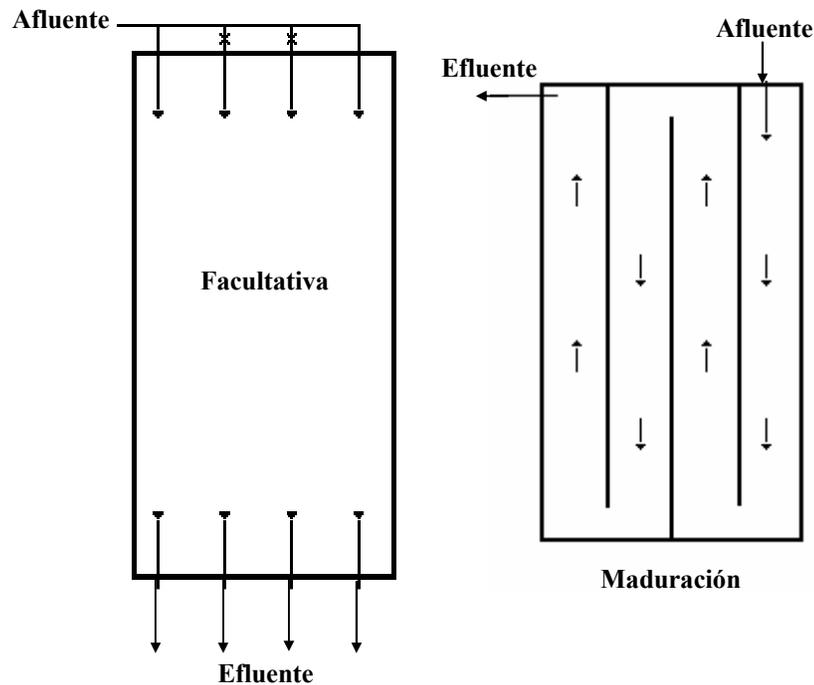
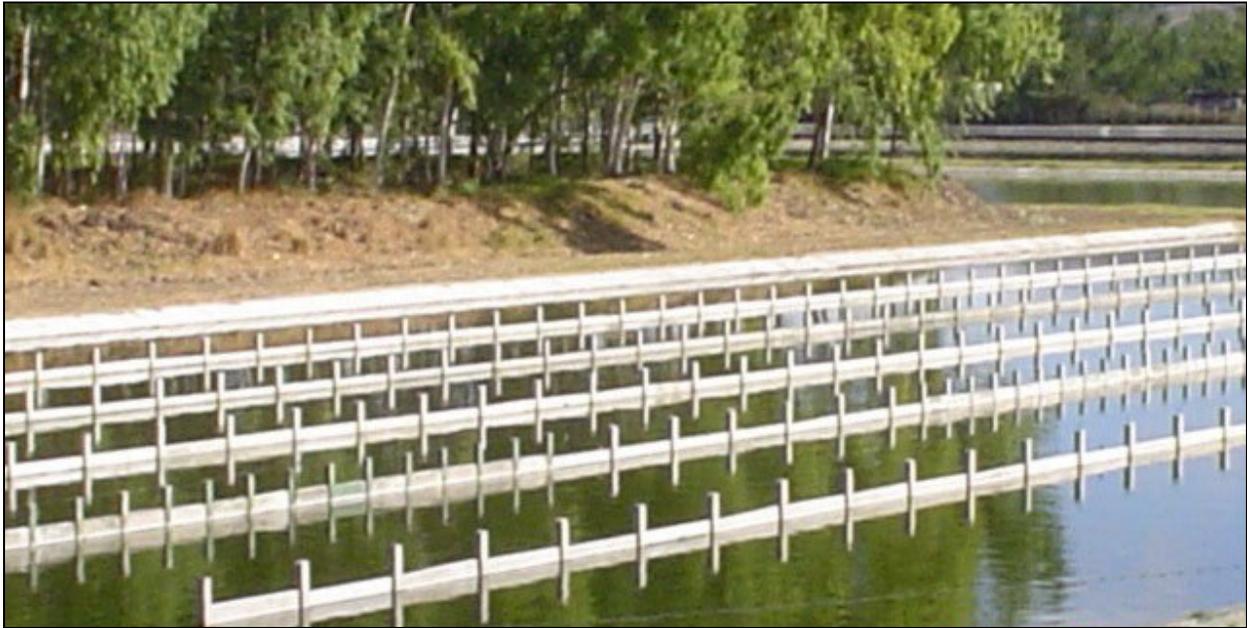


Figura 6-2: Las lagunas facultativas deben utilizar entradas y salidas múltiples para aproximarse al flujo de tipo pistón. Las facultativas requieren el aprovechamiento del área total para recibir la máxima insolación solar para fotosíntesis. También, las entradas y salidas múltiples promueven la distribución uniforme de lodos depositados en el fondo. En contraste, las lagunas de maduración deben utilizar una sola entrada y salida con mamparas desviadoras para maximizar todavía el régimen hidráulico del flujo de tipo pistón.

La Figura 6-2 y las Fotos 6-11 presentan ejemplos de una sola entrada y salida con mamparas desviadoras en lagunas de maduración. Porque lagunas de maduración no tienen los problemas de producción de oxígeno por fotosíntesis para satisfacer la carga orgánica superficial, o la acumulación alta de lodos al fondo, se utiliza las mamparas para maximizar más todavía el régimen hidráulico de flujo de tipo pistón. Investigaciones han demostrado que la instalación de mamparas desviadoras aproxima lo más posible el flujo de tipo pistón y se mejora los procesos de tratamiento (Mangelson y Watters, 1972; Shilton y Harrison, 2003). En el diseño se necesita solamente una simple entrada y salida. Se puede utilizar algo tan sencillo como una cerca alambrada cubierta con láminas de plástico para las mamparas desviadoras.



Fotos 6-10: Se utiliza entradas (foto arriba) y salidas (foto abajo) múltiples en lagunas facultativas para aproximarse al flujo de tipo pistón. No debe utilizarse mamparas desviadoras en las facultativas porque ellas requieren el aprovechamiento máximo del área para recibir la insolación solar; también los dispositivos múltiples promueven la distribución uniforme de lodos depositados. (Chinendega, Nicaragua)



Fotos 6-11: Ejemplos de lagunas de maduración que utilizan solamente una simple entrada y salida con mamparas desviadoras para aproximar el régimen hidráulico de flujo de tipo pistón. Las lagunas de maduración deben tener una relación de largo/ancho mínima de 50 a 1. En la foto arriba (Estelí, Nicaragua) los canales longitudinales dan una relación largo/ancho $\approx 100/1$. La foto abajo (Roatán, Honduras) muestra mamparas transversales, los cuales minimizan mejor los efectos del viento. (Foto arriba cortesía de Ing. Italo Gandini. Foto abajo cortesía de Ing. Bruce Henry.)

6.7 Estructuras Hidráulicas

Todas las estructuras hidráulicas deben ser diseñadas y construidas en una forma simple, evitando la utilización de válvulas y otros mecanismos que se deterioran con tiempo por corrosión y falta de uso (Yáñez, 1992). También, las estructuras como compuertas y vertederos deben ser fácilmente ajustables por el operador para poder controlar los procesos de funcionamiento en el sistema de lagunas.

6.7.1 Dispositivos de Repartición

La repartición de caudales es un factor clave en la operación de lagunas. Los resultados del Proyecto de Monitoreo mostraron que, como el caso de Villanueva, la mala división de caudal entre lagunas en paralelo puede causar una laguna estar sobrecargada. También, la repartición de caudal entre entradas múltiples es un factor clave para que la laguna no reciba la mayoría de la carga—hidráulica y orgánica—en solamente un lado de la laguna.

Todas las baterías de lagunas en paralelo deben tener repartidores de caudales ajustables en canales abiertos, preferiblemente con canaletas Parshall prefabricadas después de cada repartidor para poder medir el caudal exacto de la repartición. También, todas las lagunas facultativas con entradas múltiples deben contar con repartidores de caudales en canales abiertos; es preferible que el repartidor para entradas múltiples sea ajustable también para que el operador pueda hacer cualquier ajustamiento fino de la repartición. Las Fotos 6-12 y 6-13 presentan ejemplos de dispositivos de repartición.

6.7.2 Entradas y Salidas

Cada entrada y salida debe contar con canales abiertos para facilitar mantenimiento; el agua en el canal de entrada debe estar al mismo nivel de agua en la laguna para prohibir turbulencia y promover flujo de tipo pistón. Cada salida debe contar con una compuerta de fondo ajustable seguido por un vertedero rectangular ajustable con compuertas. La compuerta de fondo sirve para prevenir la salida de nata flotante, y para poder controlar la profundidad de la descarga. Muchas veces la concentración de sólidos suspendidos en forma de algas es menor abajo de la banda de algas (Mara, *et al.*, 1992). Porque la banda de algas puede existir hasta 60 cm de profundidad, se puede obtener la mejor calidad del efluente en poder descargar abajo este nivel. Finalmente, cada salida debe tener un vertedero ajustable con compuertas para poder controlar el nivel de agua en la laguna.

El vertedero rectangular de la salida se puede diseñar usando la siguiente ecuación (Mara, *et al.*, 1992):

$$q = 0.0567h^{3/2} \quad (6-3)$$

donde q = el caudal por metro de ancho de vertedero, L/s-m
 h = cabeza hidráulica aguas arriba del vertedero, mm

Las Figuras 6-3 y 6-4 muestran ejemplos de diseños de entradas, interconexiones, y salidas con compuertas de fondo y vertederos ajustables. Las Fotos 6-14 muestran los problemas que se encuentran en la operación de lagunas cuando no existen vertederos ajustables.



Fotos 6-12: Ejemplos de dispositivos para la repartición de caudales entre baterías de lagunas facultativas en paralelo. En la foto arriba (Masaya, Nicaragua), se utiliza un tabique divisorio ajustable, y en la foto abajo (Granada, Nicaragua), un tabique divisorio combinado con vertederos triangulares ajustables. Se debe medir los caudales a cada laguna para estar seguro de la repartición.



Fotos 6-13: Ejemplos de dispositivos para la repartición de caudales entre entradas múltiples en lagunas facultativas. En la foto arriba (Masaya, Nicaragua) se utiliza un tabique divisorio ajustable, y en la foto abajo (Chinendega, Nicaragua) se utiliza una cámara de repartición que no se puede ajustar—en este caso la cámara tiene que ser construida y nivelada con precisión. Se nota que en los dos casos se utilizan canaletas Parshall prefabricadas para medir la repartición precisamente entre lagunas en paralelo. Notase también el uso de canales abiertos para facilitar mantenimiento y el control de caudales.

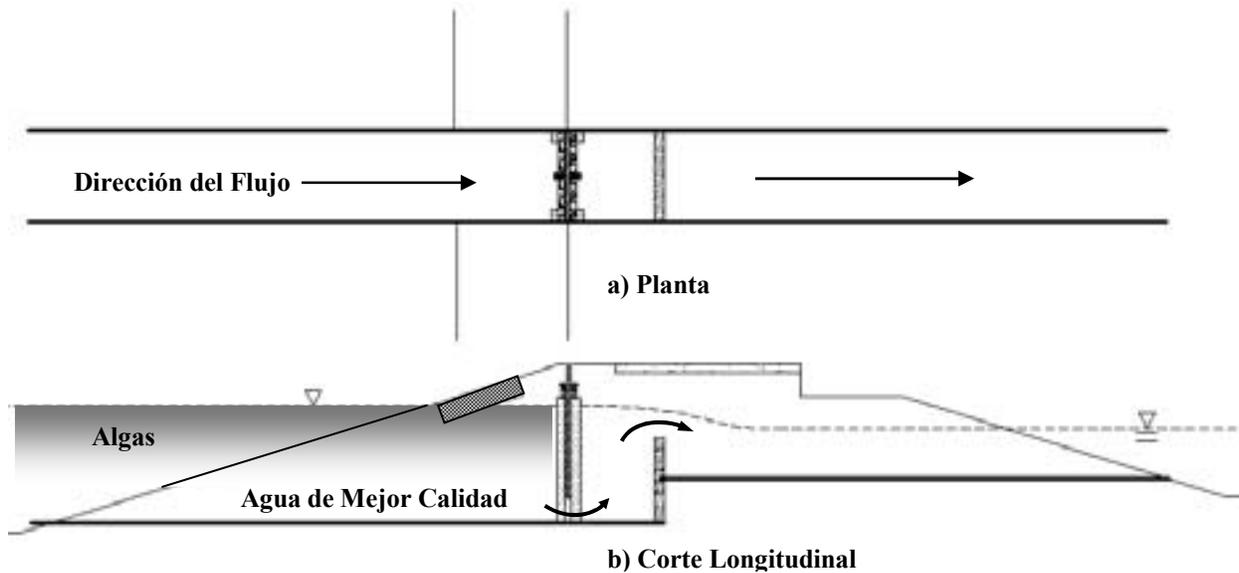


Figura 6-3: Cada salida, interconexión y entrada debe contar con canales abiertos para facilitar mantenimiento; el canal de entrada debe estar al mismo nivel de agua en la laguna para prohibir turbulencia y promover flujo de tipo pistón. Cada salida de debe contar con una compuerta de fondo ajustable que sirve para prevenir la salida de nata flotante y controlar la profundidad de descarga—muchas veces la concentración de sólidos suspendidos es menor abajo la banda de algas y se puede obtener una mejor calidad del efluente. Finalmente, cada salida debe tener un vertedero ajustable con compuertas para controlar el nivel de agua en la laguna.

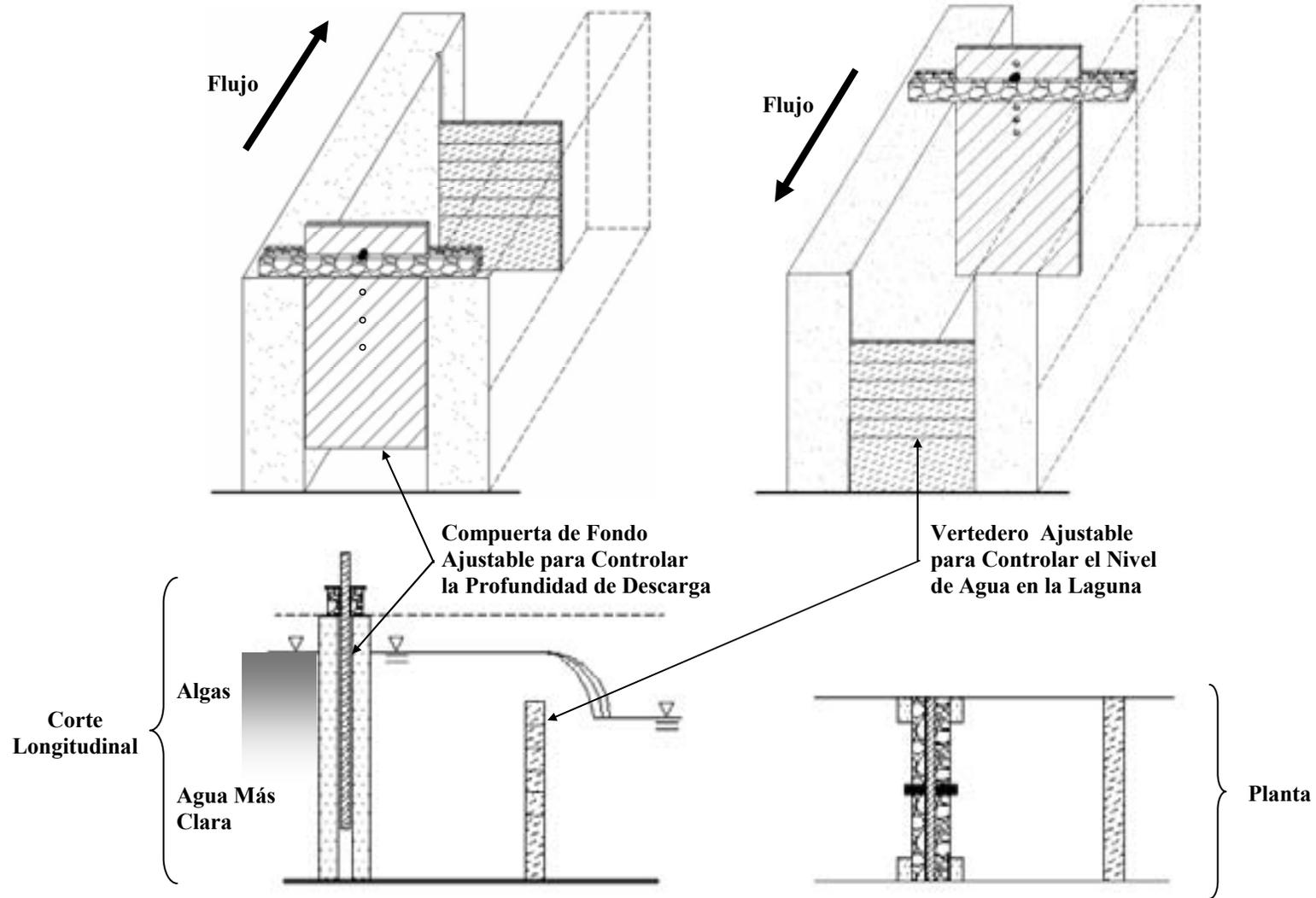
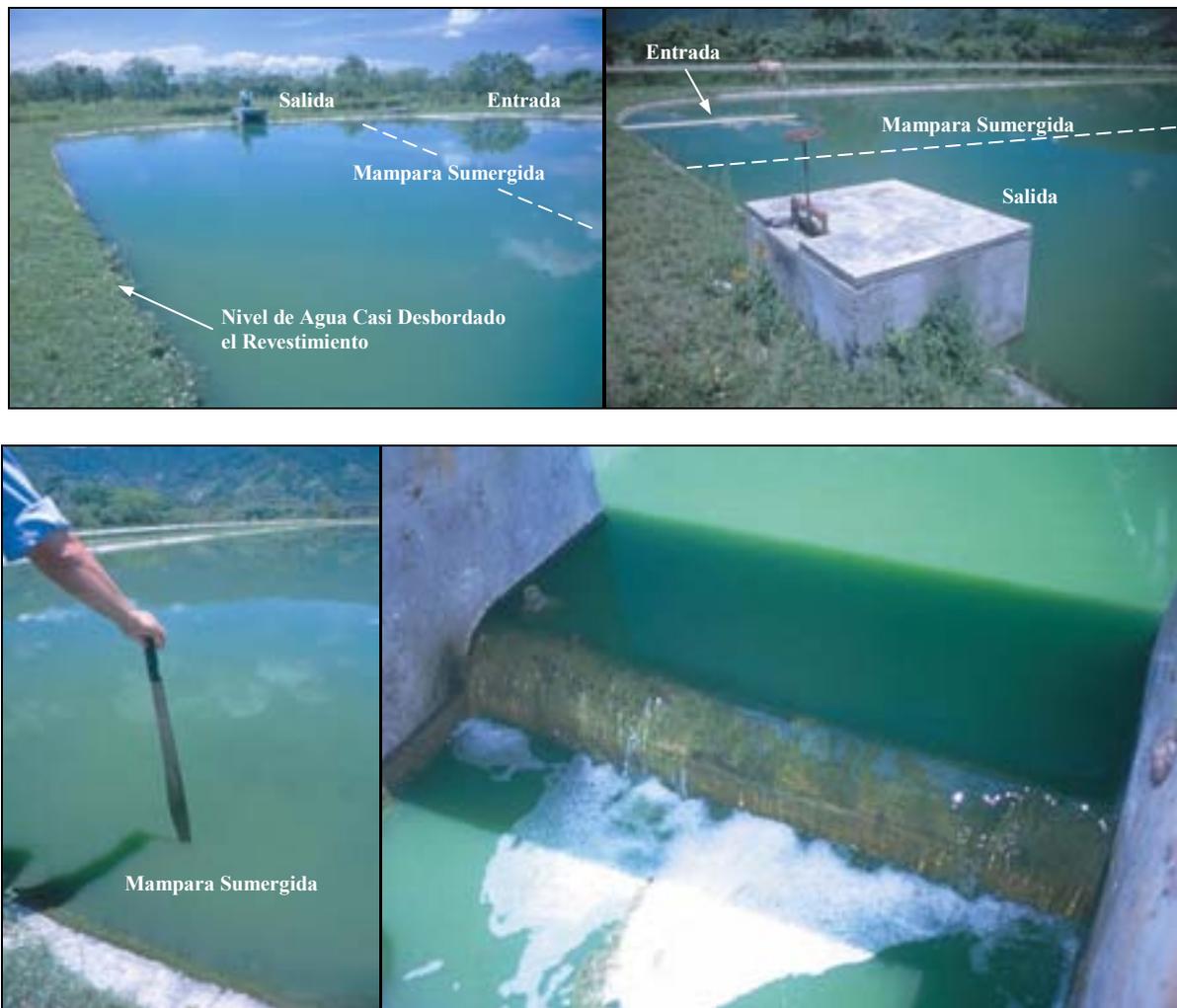


Figura 6-4: Los detalles del diseño físico de i) una compuerta de fondo ajustable para optimizar la calidad del efluente en términos de sólidos suspendidos causados por la banda de algas en la laguna; y ii) un vertedero rectangular ajustable para controlar el nivel de agua en la laguna. El vertedero ajustable utiliza una serie de compuertas de altura corta.



Fotos 6-14: Un ejemplo del mal diseño de los dispositivos de salida, especialmente el vertedero de la salida, en una laguna de maduración. El nivel de agua está casi desbordando el revestimiento de la laguna, y la mampara desviadora está sumergida. Como resultado, existe un corto circuito hidráulico fuerte que permite el afluente estar dirigido directamente por la salida, lo que niega el volumen entero de la laguna. El vertedero es hecho de concreto y no es ajustable, y está ubicado dentro de una caja de concreto con una tapadera pesada hecha de concreto. El operador no pudo ajustar el nivel de la laguna para poder controlar lo que estaba pasando. Las salidas deben contar con compuertas de fondo ajustables, vertederos ajustables, y canales abiertos para la operación y el mantenimiento. (Choloma, Honduras)

6.7.3 Dispositivos de Descarga Final

Algunos detergentes y otros agentes de actividad superficial, lo que se llaman los tensoactivos, que están en las aguas residuales no son biodegradables. Como resultado, si la descarga final está arriba del cuerpo receptor, se puede formar espuma por la turbulencia de la descarga como se ve en las Fotos 6-15. Mientras la espuma no es un problema serio desde el punto de vista de contaminación, es un problema visual y estético, y el público puede pensar que la instalación no está funcionando bien y está contaminando el cuerpo receptor. Además, si se quiere utilizar el efluente para riego la producción de espuma tiene que ser controlada.

La manera más apropiada controlar la producción de espuma en descargas finales es a través de uso de dispositivos que descargan abajo el nivel de agua como se presenta en la Figura 6-5 abajo.

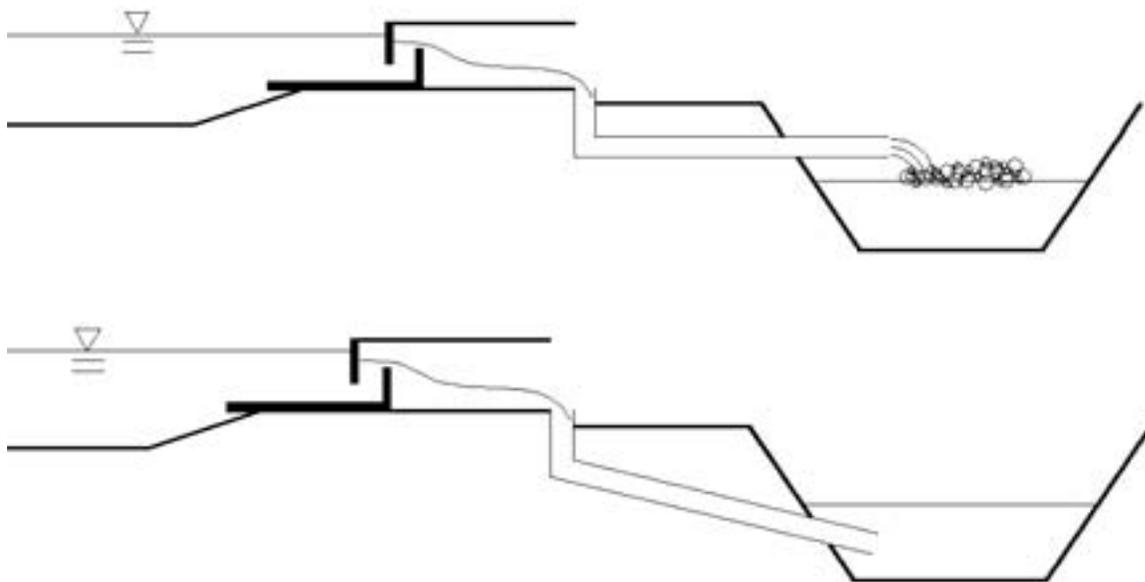


Figura 6-5: Un problema con la descarga del efluente final arriba del nivel de agua en el cuerpo receptor es la producción de espuma causada por detergentes y otros tensoactivos no biodegradables en las aguas residuales (Véase las Fotos 6-15). La manera más eficaz controlar la espuma es el uso de dispositivos de descarga final abajo el nivel de agua en el cuerpo receptor.



Fotos 6-15: Un ejemplo de la espuma que puede ser formada por la turbulencia cuando la descarga final está arriba del nivel de agua en el cuerpo receptor. La espuma es causada por los detergentes y otros tensoactivos no biodegradables en las aguas residuales. La manera de controlar la producción de espuma es de utilizar dispositivos de descarga abajo el nivel de agua como se presenta en la Figura 6-5. (Villanueva, Honduras)

6.7.4 Dispositivos de Drenaje en Lagunas Facultativas

Las Fotos 6-16 muestran un ejemplo de dispositivos de drenaje instalados en una batería de lagunas facultativas en paralelo. Los dispositivos utilizan compuertas para bajar el nivel de agua poco a poco, y están conectados por tubería a la laguna de maduración siguiendo la batería de lagunas facultativas. Los dispositivos de drenaje deben estar ubicados al lado de descarga de las lagunas facultativas para que los lodos sedimentados no suban en la descarga durante el drenaje.



Fotos 6-16: Un ejemplo de dispositivos de drenaje instalados en el lado de descarga de una batería de lagunas facultativas. Los dispositivos tienen compuertas lo que permiten el gradual drenaje cuando sea necesario para remover lodos acumulados. (Estanzuela, Guatemala)

6.7.5 Vertederos de Demasías y Canales de Desvío y Escurrimiento

Todos los sistemas deben contar con vertederos de demasías y canales de desvío para poder desviar un caudal excesivo durante tormentas para proteger la instalación. Los vertederos de demasías son estructuras localizadas a la entrada del sistema de lagunas con el objetivo de proteger el sistema contra la introducción de sobrecargas hidráulicas por aguas pluviales. Los vertederos permiten el desvío de las aguas residuales en eventos de alta pluviosidad. Debido a la infiltración e influjo de aguas pluviales al alcantarillado sanitario, los colectores conducen aguas combinadas, con gran cantidad de sedimentos producidos del escurrimiento superficial (INAA, 1996). De no desviar estas aguas, se pueden destruir los procesos biológicos y desbordar las estructuras de las entradas; además se acelera el proceso de llenado de las lagunas con materia inorgánica (sólidos arenosos), con el consecuente costo adicional por la remoción más frecuente de lodos del fondo. Una laguna facultativa en Nicaragua se llenó con sólidos arenosos en dos años por falta de desviar las aguas pluviales (INAA, 1997).

El diseño más sencillo de vertederos de demasías utiliza una compuerta sencilla a la entrada de un sistema de lagunas que descarga a una canaleta de desvío. Se sea posible, se puede combinar un canal de desvío de escurrimiento (Véase las Fotos 6-3) con el canal de desvío de caudales. Las Fotos 6-17 muestran ejemplos de vertederos de demasías y canales de desvío.



Fotos 6-17: Ejemplos de vertederos de demasías y canales de desvío para proteger el sistema de lagunas de sobrecargas durante tormentas. El vertedero a la izquierda es ajustable y el operador puede ajustarlo cuando sea necesario. Cuando el nivel de agua sube durante un caudal excesivo, un porcentaje del caudal es descargado al canal de desvío. (Foto izquierda: Granada, Nicaragua. Foto derecha: Danlí, Honduras)

6.8 Terraplén y los Taludes

6.8.1 Taludes Interiores

En la Figura 6-6 se muestra el diseño recomendado para el talud interior de una laguna. Se recomienda una relación de horizontal/vertical de 3/1, usando un revestimiento de concreto en la orilla; se puede cambiar esta relación si las investigaciones geotécnicas y de mecánica de suelos lo justifiquen. El borde libre del revestimiento debe cubrir, con un factor de seguridad, los niveles del agua encontrados en la operación de la laguna durante las épocas secas y lluviosas; generalmente el bordo libre mínimo varía entre 0.5—1.0 m (Rolim, 2000). Se puede calcular el borde libre por medio de la siguiente ecuación (Oswald, 1975):

$$F = (\log A_{med})^{1/2} - 1 \quad (6-4)$$

donde F = borde libre, m
 A_{med} = área del nivel medio de la laguna, m²

El revestimiento interior tiene dos propósitos importantes: i) la protección del talud de erosión causada por olas cuando hay vientos fuertes; y ii) evitar el crecimiento de plantas acuáticas en la orilla. Las Fotos 6-18 muestran los problemas con plantas acuáticas cuando no hay revestimiento adecuado. Las Fotos 6-19 muestran buenos ejemplos de lagunas con revestimiento adecuado con suficiente borde libre.

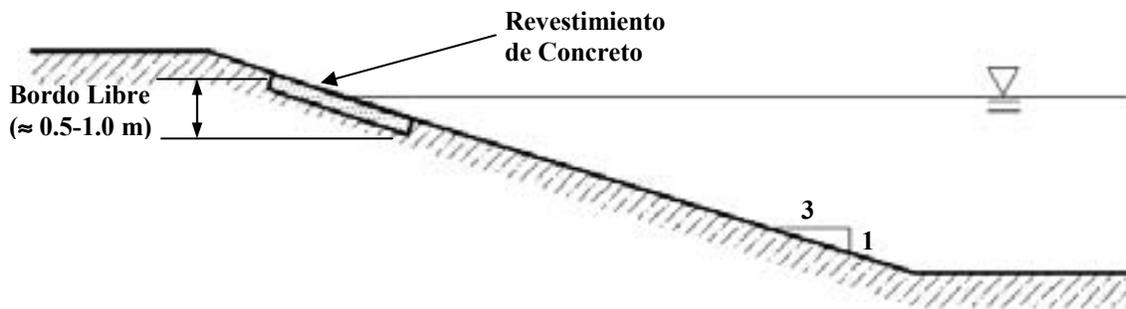


Figura 6-6: El diseño del talud interior debe incluir un revestimiento de concreto en la orilla para evitar el crecimiento de plantas acuáticas y erosión por la acción de olas. El borde libre del revestimiento debe cubrir los niveles de agua encontradas en la operación durante la época seca y lluviosa. Típicamente el talud interior tiene una relación de 3/1 (horizontal/vertical).



Fotos 6-18: En la foto arriba (Tela, Honduras) la laguna facultativa tiene problemas con el crecimiento de hierbas acuáticas en la orilla por falta de un revestimiento. En la foto abajo (Catacamas, Honduras) la deficiente construcción del revestimiento (notase las curvas de nivel) con insuficiente borde libre no previene el crecimiento de plantas acuáticas en la orilla.



Fotos 6-19: Ejemplos de revestimientos bien contruidos. La foto arriba (Catacamas, Honduras) es el nuevo revestimiento construido para la laguna con el mal revestimiento mostrado en la foto anterior después de una rehabilitación. La foto abajo muestra un revestimiento bien construido para una laguna de maduración (Catacamas, Honduras)

6.8.2 Taludes Exteriores

Los taludes exteriores, como se mencionó anteriormente, deben estar diseñados con una relación basada en la investigación geotécnica y la mecánica de suelos. Normalmente, la relación sería entre 1.5/1 hasta 2/1 (horizontal/vertical).

6.8.3 Terraplén y Rampas de Acceso

Se debe construir la corona del terraplén con una dimensión suficiente para permitir el acceso de camiones y maquinaria para mantenimiento. También, cada laguna facultativa en un sistema de lagunas debe incluir rampas para el acceso de maquinaria (cargadores frontales y volquetes) hasta al fondo de las lagunas para permitir la remoción de lodos como se muestra en la Figura 6-7 y las Fotos 6-20. Las rampas de acceso tienen que ser pavimentadas con concreto para que la maquinaria tenga tracción en bajar y subir. Se discutirá la remoción de lodos en el Capítulo 8.

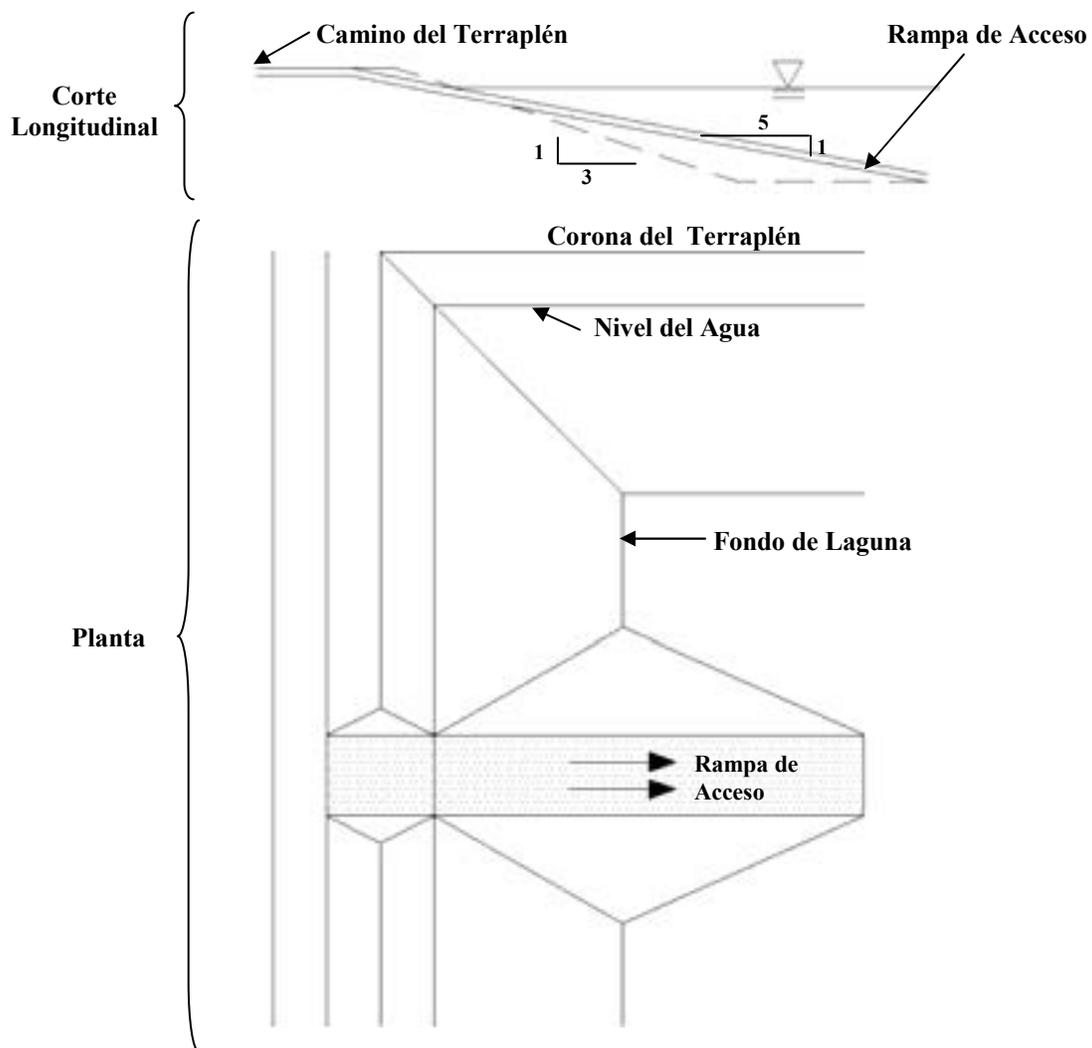


Figura 6-7: Cada laguna primaria debe incluir rampas de acceso hasta al fondo para maquinaria como cargadores frontales y volquetes para permitir la remoción de lodos. Las rampas tienen que ser pavimentadas para que la maquinaria tenga tracción sin dañar la impermeabilización y taludes de la laguna.



Fotos 6-20: Ejemplos de rampas de acceso en lagunas primarias para la remoción de lodos. (Foto arriba: laguna facultativa de Santa Cruz de Yojoa, Honduras; Foto abajo: Laguna anaeróbica de Danlí, Honduras)

6.8 Cercos

El área que comprende el sistema de lagunas debe ser cercada, preferiblemente con alambre de púas, para impedir la entrada de animales y de personas no autorizadas. Las Fotos 6-21 muestran el problema que puede ocurrir con la entrada de animales si el sistema de lagunas no tiene un cerco de seguridad.

6.9 Caseta de Operación

Cada sistema de lagunas requiere una caseta de operación como se ve en las Fotos 6-22. El propósito de la caseta es: 1) el almacenaje de herramientas, implementos, y equipo básico de laboratorio para operar las lagunas; 2) proveer un baño con ducha y vestidores; y 3) proveer un botiquín de primeros auxilios en caso de una emergencia. La casa debe tener una fuente de agua potable, un teléfono y preferiblemente una fuente de electricidad para tener luces en la noche. La caseta también puede ser utilizada por el vigilante que está encargado de la vigilancia de la instalación.



Fotos 6-21: El área que comprende la instalación de lagunas debe estar cercado, preferiblemente con alambre de púas, para prevenir la entrada de animales, que pueden dañar los taludes y servir como focos infecciosos, y la de personas no autorizadas. (Foto arriba: Tela, Honduras; Foto abajo: Choloma, Honduras)



Fotos 6-23: Cada sistema de lagunas requiere una caseta de operación para 1) el almacenaje de herramientas y equipo básico de laboratorio; 2) proveer un baño con ducha y vestidores; 3) proveer un botiquín de primeros auxilios para emergencias; y 4) proveer un lugar de trabajo para el vigilante. En la foto arriba (Choloma, Honduras) la instalación está bien cercada con puerta y la caseta de operación tiene electricidad. En la foto abajo (Danlí, Honduras) el operador/vigilante vive en la caseta.

CAPÍTULO 7: OPERACION Y MANTENIMIENTO

7.1 Introducción

La operación y mantenimiento de rutina de lagunas de estabilización son decisivos para el buen funcionamiento del sistema. Aunque la principal ventaja de tratamiento de aguas residuales con lagunas es su simplicidad operativa, eso no quiere decir que su operación y mantenimiento no son necesarios. En verdad un gran número de instalaciones de lagunas en Latinoamérica ha fracasado por fallas en las tareas de operación y mantenimiento (Yáñez, 1992; INAA, 1996). Este problema no es exclusivo de las lagunas: hay muchos problemas también en otros tipos de sistemas para el tratamiento de aguas residuales. Cualquier tecnología, desde la más complicada hasta la más sencilla, fracasará sin operación y mantenimiento adecuados. Ya que las lagunas requieren menos esfuerzos operativos que las otras tecnologías, la tarea clave es planificar los esfuerzos mínimos para que la instalación tenga éxito a largo plazo.

Para evitar un fracaso en la operación y mantenimiento adecuado de cualquier sistema de lagunas se requiere, por lo mínimo: personal de tiempo completo, personal calificado en los factores básicos de operación y mantenimiento; programas de monitoreo para operar la laguna y evaluar su eficiencia; y un plan adecuado para la remoción, tratamiento y disposición final de lodos cada cinco a diez años. El factor clave que puede tener un efecto decidido en dar más énfasis a operación y mantenimiento es el desarrollo y utilización de un manual de operación y mantenimiento para cada instalación.

7.2 Manual de Operación y Mantenimiento

Un manual de operación y mantenimiento debe contener información que sirva para el cumplimiento de los siguientes objetivos (Yáñez, 1992; INAA, 1996):

1. Uniformización de los procedimientos de operación y mantenimiento.
2. Procedimientos para la operación básica y la operación requerida para controlar el funcionamiento de la instalación.
3. Procedimientos de operación en condiciones de puesta en operación inicial y en condiciones de limpieza de lodos.
4. Procedimientos del mantenimiento rutinario.
5. Medidas higiénicas para operadores.
6. El número y tipo de personal de tiempo completo y tiempo parcial, incluyendo requisitos de capacitación, requerido en la instalación.
7. Procedimientos para detectar y analizar problemas operativos en el funcionamiento de las lagunas y solucionarlos.

En las siguientes secciones se discuten los aspectos más importantes que se deben incluir en el manual.

7.3 Operación Básica

7.3.1 Puesta en Marcha de una Laguna

El arranque de las lagunas facultativas puede presentar problemas debido a que las poblaciones de microorganismos responsables del tratamiento toman tiempo para desarrollarse. Teniendo esto en cuenta, se pueden tomar algunas precauciones muy sencillas para evitar complicaciones durante la puesta en marcha de las lagunas facultativas y de maduración:

1. Si el sistema de lagunas se ha diseñado para una población superior a la actual, se debe poner en marcha únicamente una parte del mismo. Generalmente el proyecto establece las lagunas que han de intervenir en el tratamiento en las distintas fases (MOPT, 1991).
2. Si sea posible, las lagunas deben llenarse inicialmente con agua del cuerpo receptor o de otra fuente de agua limpia. Esto con el objetivo de evitar que se generen condiciones sépticas de las aguas residuales si se llenara solamente con agua residual doméstica, y permitir el desarrollo de las poblaciones de microorganismos debido al tiempo de llenado de una laguna facultativa. En el caso que una fuente de agua limpia no existe, las lagunas facultativas y de maduración deben llenarse con las aguas residuales una vez y dejar sin cargar y descargar por 20 a 30 días (manteniendo pérdidas de agua por evaporación e infiltración con una capa de las aguas residuales); esto también con el objetivo de permitir el desarrollo de las poblaciones de microorganismos (Arthur, 1983; Mara, *et al.*, 1992).
3. Las lagunas deben llenarse de agua lo más pronto posible una vez construidas, para evitar que se agrieten debido a las lluvias o que crezcan malezas en el fondo. Debe eliminarse toda la vegetación del fondo y taludes antes de empezar el llenado (MOPT, 1991).

7.3.2 Medición de Caudales

La medida del caudal tiene una importancia decisiva para evaluar el funcionamiento de las lagunas. Es fundamental tener un registro de los caudales para determinar las cargas orgánicas y hidráulicas, el tiempo de retención hidráulica, y como resultado, la eficiencia del sistema de tratamiento y su capacidad. El operador debe registrar los caudales diariamente para tener una historia de los caudales para poder anticipar problemas. (Como se discutió en el Capítulo 2, había una falla significativa en todas las instalaciones monitoreadas en el Proyecto de Monitoreo por falta de medición de caudales.)

Durante épocas de lluvias y secas se debe realizar una medición de caudales más intensiva para obtener mejores datos del comportamiento hidráulico. La lectura del caudal se debe realizar en períodos de 2 horas durante 3 días consecutivos; luego se puede obtener el caudal promedio de ese período de muestreo. Se prefiere que esta actividad incluya sábado y domingo para conocer el comportamiento de los caudales aportes en fines de semana (INAA, 1996). Es importantísimo comparar la diferencia entre las épocas para conocer bien la infiltración de agua pluvial que puede dañar el proceso biológico de las lagunas.

El tipo de medidor de caudal recomendado es la canaleta Parshall prefabricada. Como se discutió en el Capítulo 3, ninguna canaleta Parshall construido de concreto que existe en Honduras sirve como resultado de los problemas de supervisión de construcción y calibración. (Véase las Fotos 3-12 y 3-13.) La única opción para resolver este problema, y una solución menos costosa también, es el uso de canaletas Parshall prefabricadas. En Nicaragua, por ejemplo, se utiliza canaletas Parshall prefabricadas de fibra de vidrio, que tienen un gráfico de calibración, en todos los sistemas de lagunas, no solamente en la entrada, sino en las particiones entre lagunas en paralelo y en las salidas finales (INAA, 1996). (Véase las Fotos 3-10, 3-11, y 6-13.)

7.3.3 Control de Niveles del Agua

Cada sistema de lagunas está diseñado para tener un nivel fijo de agua. Es la responsabilidad del operador a mantener este nivel o la laguna no funcionará como debería funcionar (Como se ve en las Fotos 6-14). Si el operador no puede mantener el nivel del agua del diseño con vertederos ajustables, la laguna tiene que ser evaluado para determinar la causa del problema.

7.3.4 Vertederos de Demasías

Para proteger el sistema de lagunas contra la introducción de sobrecargas hidráulicas por infiltración de aguas pluviales, el operador debe desviar el sistema cuando los caudales llegan al nivel de sobrecarga. Se determina este nivel a través de investigaciones que utilizan los datos de los caudales del registro y los resultados de los análisis del laboratorio de las cargas de sólidos arenosos durante épocas lluviosas.

La presencia de lluvias que incrementen el caudal hasta el nivel de sobrecarga, el operador, a través del sistema de compuertas, debe desviar el flujo hacia la obra de descarga de emergencia fuera del sistema. Una vez que el flujo se normalice, el operador debe realizar la operación a la inversa, abriendo la entrada hacia las lagunas y cerrando el desvío de emergencia. Esta operación requiere una mayor presencia y vigilancia del operador durante el período lluvioso, y por lo tanto, se debe programar un rol de trabajo para los operadores con 2 turnos de 12 horas en la época lluviosa (INAA, 1996).

7.3.5 Ajustamiento del Nivel de Descarga con la Compuerta de Fondo de Salidas

Es responsabilidad del operador ajustar el nivel de descarga de cada laguna para obtener un efluente de mejor calidad. El nivel puede cambiar semanalmente o mensualmente, dependiendo de la producción y concentración de algas en cada laguna. El operador, o el técnico del laboratorio, tienen que sacar muestras con profundidad del efluente y medir la concentración de sólidos suspendidos o de algas; con estos datos se puede determinar la profundidad óptima para ajustar la compuerta de fondo.

7.3.6 Detecciones Sensoriales: Olores y Colores

Las detecciones de malos olores y colores son muy importantes para conocer el grado de funcionamiento de las lagunas. El operador debe estar pendiente de los olores y los colores que sean extraños a los que deben existir normalmente en las lagunas.

Las lagunas facultativas y de maduración no deben tener olores fuertes si están funcionando bien. El color del agua residual en la entrada de una laguna facultativa normalmente debe ser

gris; el color de las aguas a la salida de las lagunas facultativas y de maduración es verde brillante por la concentración de algas presentes.

7.3.7 Medición de la Profundidad de Lodos

La única forma de verificar los cálculos de acumulación de lodos es efectuar mediciones en las lagunas primarias (facultativas o anaeróbicas) con una frecuencia de una vez por año. Se mide la acumulación de lodos al sumergir un palo suficiente largo para la profundidad de la laguna; sería 2.5m para una laguna facultativa. El palo debe tener un extremo revestido con tela blanca absorbente. Se introduce éste en la laguna cuidando que permanezca en posición vertical, hasta que alcance el fondo; entonces se retira y se mide la altura manchada con lodos, que queda fácilmente retenido en la tela (Mara, *et al.*, 1992). Se debe efectuar cuadrículas con una lancha en la superficie de la laguna para poder estimar la profundidad media y el volumen de lodos. Con los datos obtenidos se puede determinar la tasa de acumulación de los lodos y el volumen de lodos en la laguna. Antes que la profundidad de los lodos llega a 0.5m, y preferiblemente 0.3m, y antes de que se ocupen 25% del volumen de la laguna, se debe planificar una limpieza durante la próxima época de secas. Se discute en detalle la remoción de lodos en el Capítulo 8.

7.4 Mantenimiento Rutinario

El mantenimiento rutinario de la instalación de las lagunas debe ser el objetivo fundamental del operador. Si no se cuida diariamente de que este mantenimiento se realice, en poco tiempo la planta se deteriorará, con consecuencias funestas para el proyecto. El operador, por tanto, debe ser consciente de que su trabajo es muy importante para el funcionamiento adecuado del sistema.

7.4.1 Rejillas

Las limpiezas de las rejillas se debe ejecutar diariamente con el uso de rastrillos manuales (Véase las Fotos 3-5, 3-7, 3-9, y 7-1). El material retirado debe ser enterrado para evitar problemas de malos olores y la atracción de vectores como insectos y animales como roedores. El material debe ser recubierto con una capa de tierra de 0.1 a 0.3m de espesor (INAA, 1996). Se aconseja excavar un lugar para enterrar dicho material poco a poco, cubriéndolo diariamente con cal o tierra.

7.4.2 Desarenadores

El mantenimiento del desarenador consiste en agitar el material sedimentado dos veces al día, una vez en la mañana y otra en la tarde; el propósito de la agitación es liberar el material orgánica atrapada por los sólidos arenosos (INAA, 1996). Uno o dos veces por semana, o con una frecuencia mayor si el volumen acumulado de sólidos arenosos lo demanda, se debe cerrar la cámara en operación y drenarla, y después el material arenoso debe ser removido y enterrado sanitariamente (Véase las Fotos 7-1). El material puede ser enterrado en la misma excavación utilizada para enterrar el material de la rejilla.

A menudo se nota que en la mayoría de los sistemas que cuentan con desarenadores, los operadores no están operando correctamente el desarenador, como se ve en las Fotos 7-2. Parte del problema es el mal diseño o mala construcción del desarenador (véase las Fotos 6-6 y 6-7), y parte es un problema de capacitación del operador en la operación correcta de desarenadores (véase las Fotos 7-2).



Fotos 7-1: La responsabilidad del operador es limpiar la rejilla diariamente y el desarenador cuando sea necesario—típicamente una vez por semana. Sin embargo, es fundamental agitar los sólidos en el desarenador diariamente para que salgan los sólidos orgánicos a la laguna primaria y para que queden los sólidos inorgánicos en el desarenador. Los sólidos gruesos de la rejilla y los sólidos arenosos del desarenador deben ser enterrados y cubiertos. (León, Nicaragua)



Fotos 7-2: En la mayoría de las instalaciones que cuentan con desarenadores, los operadores no están operando correctamente el desarenador, como se ve en estas fotos. Parte del problema es el mal diseño o mala construcción del desarenador donde no se puede sellar ni drenar las cámaras, y parte es un problema de capacitación del operador en la operación correcta de desarenadores. En la foto a la izquierda (Trinidad, Honduras), el operador dejó las dos cámaras en operación por falta de una manera de sellar y drenar las cámaras. En la foto a la derecha (Granada, Nicaragua) no existían compuertas para cerrar las cámaras ni una manera de drenarlas.

7.4.3 Remoción de Natas y Sólidos Flotantes

La remoción de natas y sólidos flotantes se debe hacer diariamente o cuando sea necesario para que no se extiendan demasiado sobre el área superficial de las lagunas, donde se puede causar problemas de malos olores por su descomposición, y por la formación de lugares adecuados para la cría de insectos como se ve en las Fotos 7-3 y 7-4.

Por lo general, la dirección del viento hace que las natas y sólidos flotantes se acumulen en las esquinas de las lagunas (Véase las Fotos 7-3). El operador necesitará un desnatador y una carretilla para la limpieza de natas; estos desechos deben ser enterrados en el mismo lugar en donde se entierran los sólidos del desarenador y de la rejilla (Véase las Fotos 7-5). También, se deben mantener las pantallas de las salidas para que las natas y sólidos flotantes no salgan de la laguna en el efluente (Foto 7-6).

7.4.4 Céspedes, Vegetación y Malezas

El césped no debe llegar hasta el borde del agua para evitar problemas como se ve en las Fotos 7-7. El operador debe mantener una faja limpia de al menos 20cm por encima del borde del agua. La maleza debe ser retirada, sacada al aire y quemada o enterrada (Véase la Foto 7-7). Se debe presentar atención especial al surgimiento de jacintos y otras plantas acuáticas, las que deben ser extraídas, secadas y quemadas también.

Un problema especial que puede pasar de vez en cuando es el crecimiento rápido de lemnas, los cuales pueden llegar a una laguna llevadas por el viento, o traídas por aves o animales, como se ve en la Foto 7-8. La tarea del operador es removerlas tan rápido como sea posible antes de que cubran toda la superficie de la laguna (Foto 7-8). Es posible utilizar patos domésticos, específicamente patos Pekín que comen las lemnas, para ayudar en la limpieza de ellas.

7.4.5 Mosquitos, Moscas, Roedores y Otros Animales

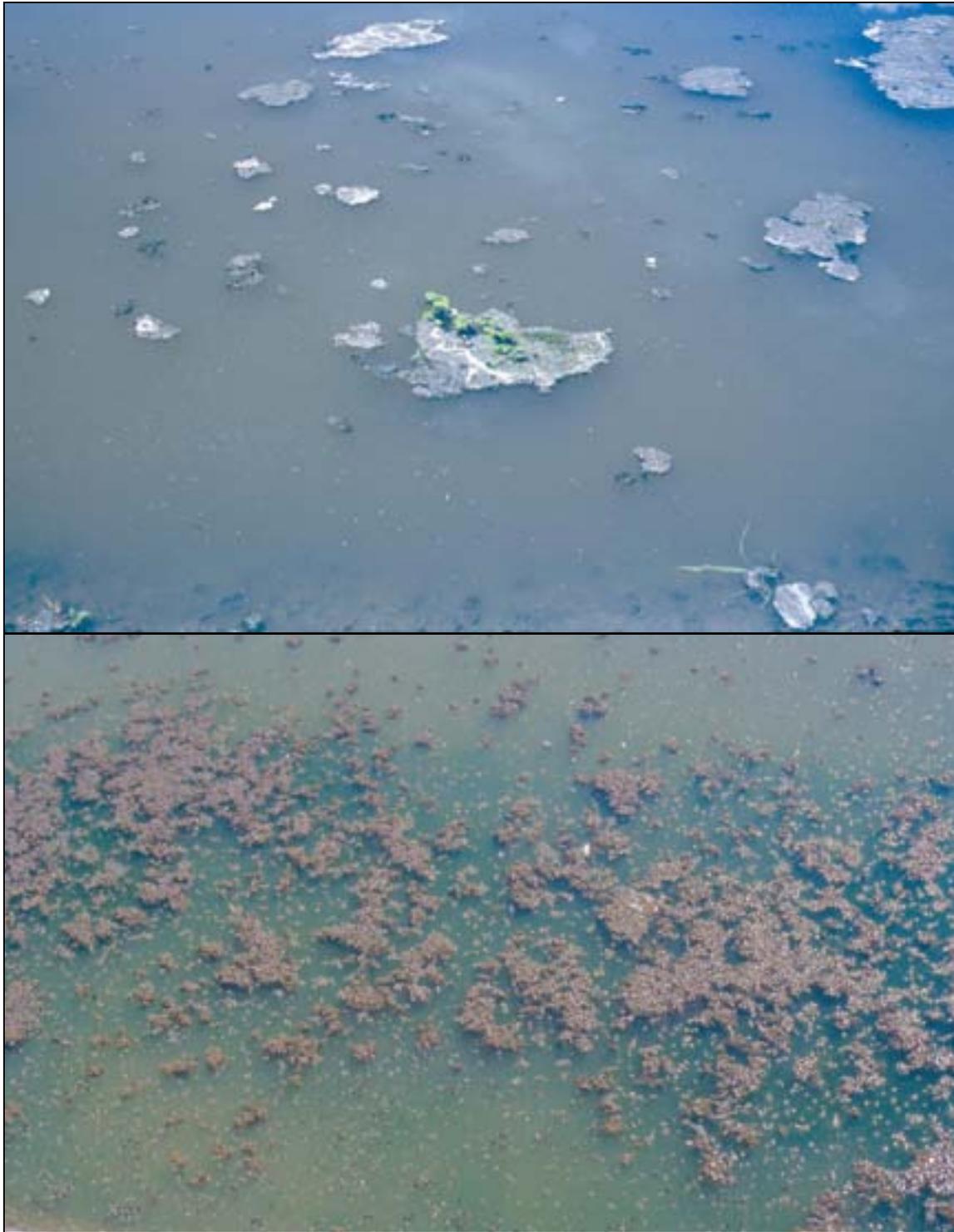
La proliferación de mosquitos, moscas, otros insectos, y roedores debe ser nula si se ha cumplido con la tarea de enterrar todo lo relacionado con el material flotante y el material orgánico. Los mosquitos y otros insectos pueden ser controlados manteniendo limpias y sin vegetación las márgenes de las lagunas. En el caso que los mosquitos depositen sus huevos en la orilla encima del revestimiento, se puede bajar el nivel del agua un poquito para que sequen.

Los anfibios y reptiles, principalmente sapos, tortugas, y de vez en cuando cocodrilos, pueden poblar significativamente lagunas facultativas y de maduración. Los sapos y tortugas normalmente no causan ningún problema (Fotos 7-9 y 7-10). Sin embargo, las tortugas pueden excavar atrás y abajo de los revestimientos (Fotos 7-11). Cuando existen poblaciones significativas de tortugas, el operador debe revisar el revestimiento con rutina y, cuando sea necesario, llenar las excavaciones de tortugas antes de que se dañen el revestimiento.

En Honduras hay 4 o 5 instalaciones que cuentan con cocodrilos en las lagunas de maduración (Foto 7-12). Ellos no deben causar ningún problema, y de hecho, pueden controlar las poblaciones de tortugas por su cazaría de ellas.



Fotos 7-3: Las natas y los sólidos flotantes usualmente se acumulan en las esquinas de las lagunas, principalmente llevados por el viento. El operador necesita de un desnatador y una carretilla para la limpieza de dichos sólidos. Si no los saca con frecuencia, las natas causarán malos olores debido a descomposición, y además servirán como un lugar adecuado para la reproducción de insectos. (Arriba: Trinidad, Honduras. Abajo: Villanueva, Honduras)



Fotos 7-4: Las natas y sólidos flotantes, si no son removidos, sirven como un foco para la cría de insectos. (Arriba: Villanueva, Honduras. Abajo: Guastatoya, Guatemala)



Fotos 7-5: Las natas y sólidos flotantes se acumulan en las esquinas de las lagunas, donde el operador puede sacarlos fácilmente con un desnatador y ponerlos en una carretilla. Después, se debe enterrarlos, o cubrirlos con una capa de suelo o cal. En la foto abajo los operadores ponen las natas recolectadas en un pozo y los cubren con cal para controlar olores. Cuando se llena la excavación se cubre con una capa de suelo. (Masaya, Nicaragua)



Fotos 7-6: En la foto a la izquierda, la salida de una laguna facultativa diseñada con una compuerta de fondo y un vertedero rectangular no tenía la compuerta y como resultado, los sólidos flotantes estaban saliendo con el efluente y la eficiencia de remoción de DBO_5 y coliformes fecales estaba baja (Catacamas, Honduras). La foto a la derecha muestra una pantalla circular utilizado para controlar la salida de natas en el efluente de una laguna facultativa (Chinendega, Nicaragua)



Fotos 7-7: En la foto arriba (Choluteca, Honduras) la laguna facultativa tiene problemas serios con el sobre-crecimiento de la maleza en la corona del terraplén y en la orilla. (Nótese el hombre en el centro de la foto.) Es un trabajo fundamental del operador a controlar el crecimiento de la maleza como se ve en la foto abajo donde una brigada de personal de la Administración Nacional de Agua y Alcantarillado (ANDA) de El Salvador corta las malezas en el terraplén de la laguna facultativa (Zaragoza, El Salvador)



Fotos 7-8: Un ejemplo de lemna, llevado por el viento o por aves, que ha cubierto la superficie de una laguna facultativa. El operador debe sacar la lemna tan pronto como pueda antes de que se cubra la laguna. Hay ejemplos del uso de patos domésticos—la especie se llama pato Pekín—para limpiar la lemna que ha contaminado las lagunas: los patos comen la lemna. (Morocelí, Honduras)



Foto 7-9: Se encuentran poblaciones de sapos en varias instalaciones. Ellos normalmente no causan problemas en el buen funcionamiento del sistema. (Trinidad, Honduras)



Fotos 7-10: Se encuentran poblaciones significativas de tortugas en la mayoría de las lagunas de maduración, y frecuentemente en las lagunas facultativas también. (Arriba: Danlí, Honduras; abajo: León, Nicaragua)



Fotos 7-11: Las tortugas pueden excavar atrás y abajo del revestimiento para depositar sus huevos. El operador debe monitorear la condición del revestimiento de rutina cuando hay poblaciones altas de tortugas. (Danlí, Honduras)



Foto 7-12: La presencia de cocodrilos es relativamente común en lagunas de maduración. Normalmente se encuentra solamente uno que vigila su territorio contra la llegada de más. Los cocodrilos cazan tortugas y, por lo tanto, pueden controlar la población de ellos. (Santa Cruz de Yojoa, Honduras)

7.4.6 Taludes

El operador deberá inspeccionar una vez por semana el estado de los taludes para verificar si ha ocurrido algún asentamiento o erosión. Los daños deben ser reparados con material arcilloso y cubierto con el césped protector en el talud exterior, y con el revestimiento en el talud interior.

7.4.7 Cercos y Caminos

Como se mencionó en Capítulo 6, el predio del sistema de lagunas de estabilización debe estar cercado, preferiblemente con alambre de púa, para impedir la entrada de animales domésticos y de personas no autorizadas. Cuando el estado de los cercos y caminos están en malas condiciones, el operador debe notificar las personas encargadas de reparar estas obras tan pronto como sea posible.

7.4.8 Implementos y Herramientas de Mantenimiento

El Cuadro 7-1 presenta un listado de equipos y herramientas básicas que se deben tener en la casa del operador (INAA, 1996)(Véase la Fotos 6-22).

7.5 Registros de Campo de la Operación Básica y Mantenimiento Rutinario

En el Cuadro 7-2 se muestra un ejemplo de los registros operacionales e informes de campo de la operación básica y mantenimiento rutinario que el operador debe registrar. En el Cuadro 7-3 se presenta de manera general las actividades de operación, mantenimiento y la frecuencia con que se deberán llevar a cabo.

7.6 Operación para el Control del Funcionamiento: Monitoreo Analítico

Los objetivos del proceso de lagunas facultativas son: 1) estabilizar la materia orgánica a través de la remoción de DBO; 2) la remoción de sólidos suspendidos en las aguas residuales crudas; y 3) la remoción de patógenos. Los objetivos principales del proceso de lagunas de maduración son: 1) la remoción de patógenos y coliformes fecales; y 2) la continuación de remoción de DBO. Para conseguir estos objetivos, es necesario efectuar una serie de mediciones y determinaciones analíticas, como:

1. La concentración de DBO en el afluente del sistema y en el efluente de cada laguna.
2. La concentración de sólidos suspendidos en el afluente de cada laguna facultativa como medida del potencial de acumulación de los lodos.
3. La concentración de sólidos suspendidos en el efluente de cada laguna para determinar las concentraciones de algas.
4. La concentración de huevos de helmintos y coliformes fecales en el afluente del sistema y en el efluente de cada laguna.
5. Mediciones de los caudales como fue mencionado anteriormente.

Cuadro 7-1: Implementos y Herramientas de Operación y Mantenimiento Requeridos para Un Sistema de Lagunas de Estabilización

Artículo	Cantidad	Uso
Guantes de hule	2 pares	Protección de operador
Botas altas de hule	2 pares	protección de operador
Capotes de hule	3	Protección de operador
Botiquín de primeros auxilios	1	Protección de operador
Salvavidas	2	Protección de operador
Uniforme de campo	2	Protección de operador
Casco protector	2	Protección de operador
Rastrillo para rejilla	2	Limpieza de natas
Pala	2	Entierro de natas, sólidos, etc.
Pico	2	Excavación para el entierro
Carretilla de mano	1	Transporte de natas, sólidos, etc.
Cortadora de césped	1	Mantenimiento de grama
Martillo	1	Mantenimiento en general
SERRUCHO	1	Mantenimiento en general
Escoba	1	Mantenimiento en general
Desnatador (3m. de largo)	2	Limpieza de natas
Lancha	1	Medición de lodos, muestreo, etc.
Manguera	1	Limpieza en general
Machete	2	Mantenimiento de césped
Destornillador	2	Mantenimiento en general
Baldes	2	Recolección de natas y sólidos
Llaves Stilson de 12"	2	Mantenimiento en general

Adaptado de INAA, 1996.

Cuadro 7-2: Observaciones de Campo en Lagunas de Estabilización

Instalación de Lagunas: _____

Fecha: _____ Hora: _____ Nombre del Operador: _____

Temperatura del Aire: _____ Estado del Tiempo: _____

Caudal (m^3 /día): _____ Estado de la Rejilla: _____

Estado del Desarenador: _____

Observación	Facultativa	Maduración	Comentarios
Color de Agua			
Olores			
Espumas y Natas			
Plantas en Taludes			
Plantas Acuáticas			
Erosión de Taludes			
Insectos			
Roedores			
Insectos			
Aves			
Reptiles			
Lodos Acumulados			
Nivel de Agua			
Entradas			
Salidas			
Otras Observaciones:			

**Cuadro 7-3:
Frecuencia de Actividades de Operación Básica y Mantenimiento Rutinario de Lagunas de Estabilización**

Actividad	Diario	Semanal	Cuando Sea Necesario	Observaciones
Operación Básica				
Medición de Caudales	x			Se registra diariamente. Se mide intensivamente durante las épocas secas y lluviosas.
Control de Niveles de Agua			x	Se registra los niveles.
Uso de Vertederos de Demasías			x	Durante sobrecargas hidráulicas.
Ajustamiento del Nivel de Descarga			x	Basado en las concentraciones de algas.
Detecciones Sensoriales			x	Hay que notar cambios en olores y colores.
Medición de Profundidad de Lodos			x	Una vez por año.
Mantenimiento Rutinario				
Rejillas	x			Se limpia las barras de material y enterrarlo.
Desarenadores	x	x		El material sedimentado debe ser agitado una vez por día y retirado semanalmente.
Natas y Sólidos Flotantes	x			Se utiliza un desnatador para retirar las natas y una carretilla para llevarlas al entierro.
Céspedes, Vegetación, Malezas			x	Se debe mantener una faja limpia.
Mosquitos, Moscas, Roedores			x	Deben ser controlados manteniendo limpias y sin vegetación las orillas de las lagunas.
Taludes, Cercos, Caminos			x	Deben revisarse por lo menos mensualmente.
Remoción de Lodos			x	Hay que tener 2 meses para secar los lodos dentro de la laguna, después sacarlos con un cargador frontal, y finalmente almacenarlos <i>en sitio</i> por un año.

Con los resultados de esta serie de mediciones se pueden calcular los siguientes parámetros de control para el funcionamiento de los procesos:

1. La carga hidráulica y el tiempo de retención hidráulica.
2. La carga orgánica superficial del proceso.
3. Las eficiencias de remoción de huevos de helmintos, DBO₅, y coliformes fecales.
4. La carga de sólidos suspendidos a la laguna facultativa y la tasa de acumulación de lodos.

7.6.1 Programa de Muestreo y Pruebas de Laboratorio

En el Cuadro 7-4 se presenta una lista para los parámetros de control de los procesos, la frecuencia del muestreo, y el lugar de muestreo. En el Cuadro 7-5 se presenta los requisitos del laboratorio para el análisis de cada parámetro. Para la realización del programa de muestreo y medición, se deben tomar en cuenta los siguientes aspectos (Yáñez, 1992):

1. El tipo de medición o análisis a efectuarse.
2. Los requisitos de preservación de las muestras.
3. El tiempo de espera hasta se llevan las muestras al laboratorio.
4. La variabilidad del parámetro y la precisión del análisis.
5. El uso práctico de la información.

La aplicación de técnicas de muestreos correctas es fundamental para obtener datos confiables. Una gran cantidad de estudios de lagunas de estabilización han producidos resultados prácticamente inutilizables debido a que las técnicas de muestreo aplicadas han diversas fallas (MOPT, 1991). Por lo tanto, es fundamental que los operadores reciban capacitación en la técnica de muestreo (Véase las Fotos 7-13 y 7-14); la función del operador es conseguir muestras representativas y tomar las precauciones necesarias para que lleguen al laboratorio de la manera requerida para su análisis (MOPT, 1991).

También es fundamental que el ingeniero supervisor de la instalación reciba capacitación para poder seleccionar un laboratorio para analizar los parámetros e interpretar sus resultados. El laboratorio seleccionado para los análisis debe estar a cargo de un técnico especializado en el muestreo para así minimizar los errores en los muestreos. Se analiza la capacitación de personal abajo en la sección denominada Personal Requerido.

Los parámetros y su frecuencia de muestreo que se presentan en los Cuadros 7-4 y 7-5 son los mínimos para tener la información básica del funcionamiento de un sistema de lagunas. Con la información obtenida se puede evaluar el funcionamiento de la instalación y calcular la eficiencia del proceso.

7.6.2 Presentación e Interpretación de los Resultados de Programas de Monitoreo

Es muy importante que el operador y el ingeniero supervisor sepan analizar los resultados que se van obteniendo y presentarlos de forma que resulten fácil de interpretar. En el Cuadro 7-6 se presenta la forma más apropiada para presentar los resultados e interpretarlos claramente.

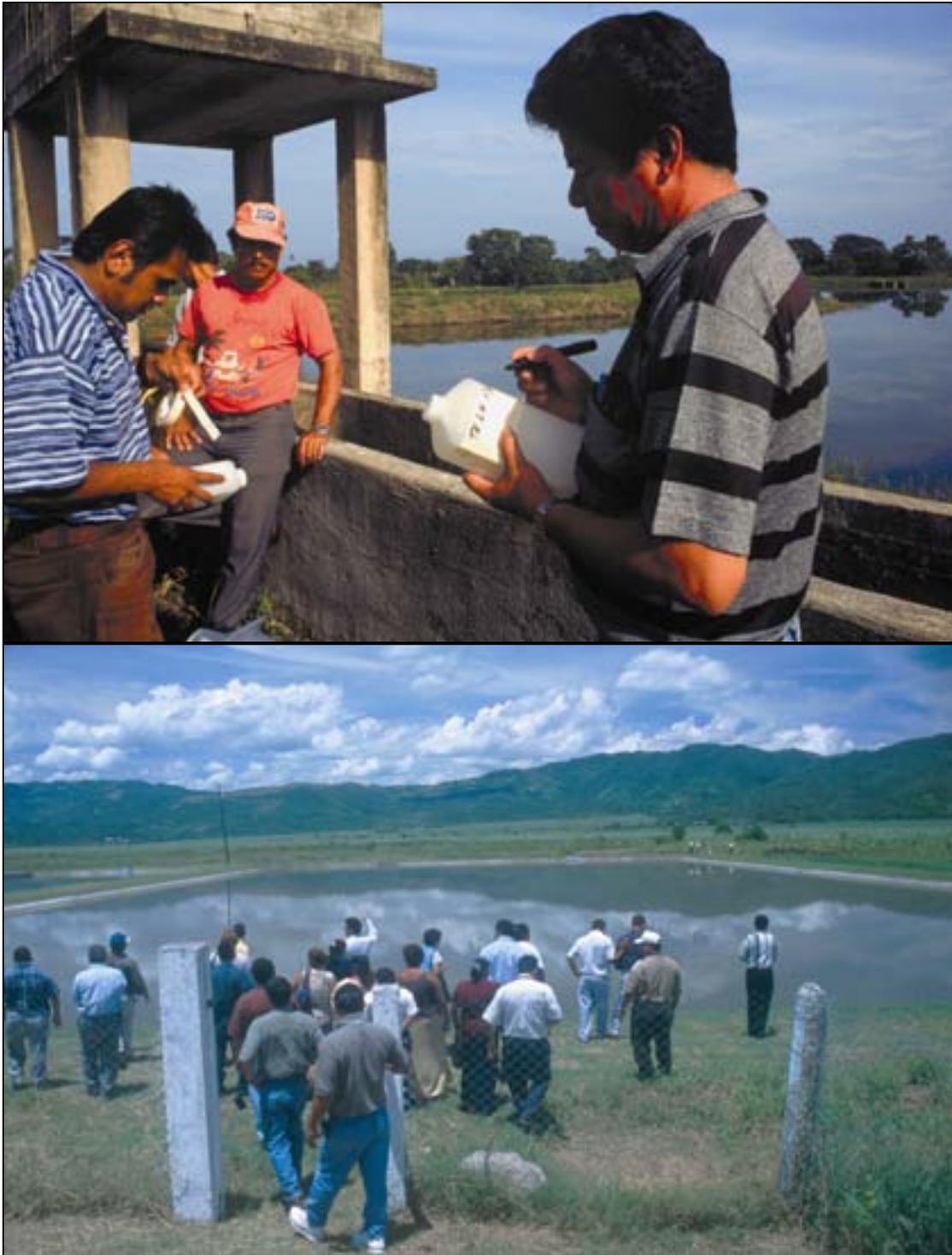
Cuadro 7-4: Programa Mínimo de Monitoreo y Determinaciones del Laboratorio en Lagunas de Estabilización

Parámetros	Frecuencia			Lugar de Muestreo en Cada Laguna para Una Facultativa y Una de Maduración en Serie			
	Diaria	Mensual	Anual	Aguas Residuales Crudas	Salida Facultativa	Salida Maduración	Lodos en Facultativa
Aspectos Físicos							
Temperatura (° C)	X			X	X	X	
Colores	X			X	X	X	
Olores	X			X	X	X	
Aspectos Hidráulicos							
Caudal (m ³ /día)	X			X	X	X	
Caudal Intensivo			X	X	X	X	
Análisis Físico-Químico							
Sólidos Suspendidos (mg/L)		X		X	X	X	
pH		X		X	X	X	
Sólidos Totales, Volátiles y Fijos en Lodos (%)			X				X
Análisis Bioquímicos							
DBO ₅ Total (mg/L)		X		X	X	X	
DBO ₅ Filtrada (mg/L)		X				X	
Análisis Microbiológicos							
Coliformes Fecales (NMP/100mL)		X		X	X	X	
Huevos de Helmintos en Efluente (Número./L)		X		X	X	X	
Huevos de Helmintos en Lodos (No./gramo seco)			X				X

Cuadro 7-5: Tipo de Muestreo y Preservación para el Análisis de Laboratorio

Parámetro	Tipo de Recipiente	Volumen Mínimo Recomendado para Una Muestra	Tipo de Muestra	Preservación	Período Máximo Recomendado de Preservación
Temperatura	Ningún	---	Puntual	Determinación <i>in situ</i>	Análisis Inmediato
pH	Plástico o Cristal	50mL	Puntual	Determinación Inmediata	Análisis Inmediato
DBO ₅	Plástico o Cristal	1,000mL	Compuesto en 24 horas	Enfriamiento a 4 °C	6 horas
Sólidos Suspendidos	Plástico o Cristal	200mL	Compuesto en 24 horas	Enfriamiento a 4 °C	7 días
Sólidos Totales, Volátiles, y Fijos en Lodos	Plástico o Cristal	25 gramos (≈ 250 mL)	Puntual	Enfriamiento a 4 °C	7 días
Coliformes Fecales	Plástico o Cristal (Esterilizado)	100mL	Puntual	Enfriamiento a 4 °C	6 horas
Huevos de Helmintos:					
Agua	Plástico o Cristal (Esterilizado)	5.0 L	Compuesto en 24 horas	Enfriamiento a 4 °C	24 horas
Lodos	Plástico o Cristal (Esterilizado)	1.0 L	Puntual	Enfriamiento a 4 °C	24 horas

Fuente: APHA, 1995.



Fotos 7-13: Todo el personal involucrado en el diseño, operación y mantenimiento, y monitoreo de lagunas necesitarán capacitación para que las lagunas tenga éxito a largo plazo. En estas fotos unos grupos de ingenieros y técnicos reciben capacitación en el muestreo y operación de lagunas de estabilización. (Arriba: Tela, Honduras; abajo: Villanueva, Honduras)



Fotos 7-14: Se recomienda una serie de cursos intensivos de capacitación, tanto en la práctica como en la teoría, para todo el personal involucrado en la operación de las lagunas. Sería muy importante institucionalizar los cursos en una entidad que podría ofrecerlos anualmente, preferiblemente en un sitio donde hay una laguna en operación. (Izquierda: Tela, Honduras. Derecha: Muestreo en Trinidad, Honduras)

Cuadro 7-6:
Cuadro de Resultados de Monitoreo de Una Laguna Facultativa y Una de Maduración en Serie

Nombre de la Instalación: _____ Fecha: _____ Firma de Encargado: _____

Parámetro	Unidad	Afluente	Fecha de Muestra	Laguna Facultativa	Efluente Facultativa	Laguna de Maduración	Efluente Maduración
Área	m ²						
Profundidad de Lodos	m						
Volumen de Lodos	m ³						
Volumen de Agua	m ³						
Caudal Promedio	m ³ /día						
Tiempo de Retención Hidráulica	Días						
Temperatura	° C						
pH	Unidad						
Sólidos Suspendidos	mg/L						
DBO ₅ Total	mg/L						
DBO ₅ Filtrada	mg/L						
Coliformes Fecales	NMP/100mL						
Huevos de Helmintos	Número/L						
Lodos:							
Sólidos Totales	%		_____	_____			
Sólidos Volátiles	%		_____	_____			
Sólidos Fijos	%		_____	_____			
Huevos de Helmintos	Número/gramo		_____	_____			

La mayor parte de los resultados que se obtienen se pueden representar fácilmente en forma de gráficas de las que se pueden extraer conclusiones prácticas del funcionamiento de la laguna. Sobre todo, la realización de las gráficas permite disponer de los resultados en una forma muy clara y sencilla de interpretar (MOPT, 1991).

En el Capítulo 2 se presentan los resultados del Proyecto de Monitoreo de las Lagunas de Estabilización en Honduras como ejemplo de los análisis de los resultados analíticos y su presentación.

7.7 Remoción de los Lodos en Lagunas Facultativas

En el Capítulo 8 se estudia en detalle la acumulación y remoción de lodos en lagunas primarias. La manera más económica de remover los lodos es la limpieza en seco, donde se vacía la laguna y se secan los lodos exponiéndolos al sol durante la época seca. Cuando los lodos tienen una humedad de alrededor del 20—30%, se puede utilizar un cargador frontal y camión volquete para removerlos.

Se recomienda que, para drenar la laguna, se desvíe el afluente a otra laguna en paralelo. Después de vaciar la laguna, se seca los lodos por un período entre uno y dos meses. La extracción de lodos con la maquinaria debe tomar menos de una semana. Los lodos removidos deben ser almacenados—en un sitio que no ofrezca peligro a la población y al medio ambiente—por un período de, por lo menos, un año para destruir los huevos viables de helmintos. Después de haberse removido los lodos, se llena la laguna vacía para recuperar la capacidad de tratamiento.

Es muy importante remover los lodos del fondo de las lagunas facultativas cuando se llega a una acumulación media de menos que 0.5 metros, y preferiblemente menos de 0.3m, como se discute en el Capítulo 8. Ya que se forman una capa muy dura resultado del secado por evaporación, si se lleguen a una profundidad de más que 0.5 m., será casi imposible secar y remover los lodos con maquinaria. Con una profundidad menos que 0.5 m. se secan los lodos fácilmente por medio de evaporación y la formación de agrietamientos.

Las experiencias del Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados con las 25 lagunas en Nicaragua muestran que las lagunas necesitarán una limpieza de lodos en promedio de cada 5 a 10 años (INAA, 1996). Por esta razón es fundamental diseñar lagunas facultativas en paralelo (para tener una laguna en operación cuando se limpia la otra) y planificar un programa de mediciones de las profundidades de lodos, remoción y tratamiento de lodos, y disposición final. Si no desarrolle y lleve a cabo esta planificación, las lagunas fracasarán en menos de 15 años de operación por la acumulación de lodos.

7.8 Personal Requerido

En vista de la inversión significativa en la construcción de lagunas, el hecho que el tratamiento de aguas residuales por lagunas es una tecnología relativamente nueva en Honduras, y que la carrera de ingeniería sanitaria no existe en las universidades hondureñas, hay una necesidad urgente de capacitación de personal (ingenieros y operadores) en todos los aspectos de diseño, monitoreo, operación y mantenimiento. Ya que no hay otra manera de desarrollar la infraestructura para manejar esta tecnología a largo plazo. Todas las lagunas construidas

fracasarán si no existe el personal capacitado para su operación y mantenimiento.

Para efectuar las labores de operación y mantenimiento de una manera eficiente, se debe contratar a un operador de tiempo completo por cada módulo de lagunas facultativas-maduración hasta un área total de 8 hectáreas (Cubillos, 1994; INAA, 1996). Cada instalación también necesitará un vigilante de tiempo completo, y un ingeniero supervisor de tiempo parcial. El ingeniero tiene que tener un presupuesto para el programa de monitoreo y las determinaciones del laboratorio. En el Cuadro 7-7 se presenta los requisitos de personal para cada módulo de lagunas facultativas-maduración en serie.

Se nota que las calificaciones de personal en el Cuadro 7-7 requieren de capacitación. Es recomendable una serie de cursos intensivos para capacitar personal involucrado en diseño, operación y mantenimiento de lagunas. Es muy importante institucionalizar los cursos en una entidad que pueda ofrecerlos anualmente. También se recomienda la formación de un centro de capacitación donde ingenieros, operadores y técnicos puedan obtener experiencia, tanto en la práctica como en la teoría.

7.9 Medidas Higiénicas para Operadores

Es fundamental capacitar a los operadores en los riesgos para la salud de su trabajo, en las medidas de seguridad que deberían tomar para prevenir accidentes e infecciones, y las medidas de primeros auxilios. Las siguientes medidas de seguridad han sido recomendadas por la Organización Mundial de la Salud para operadores de lagunas de estabilización (WHO, 1987):

1. La instalación debe contar siempre con una fuente de agua limpia, jabón y cloro. Es aconsejable utilizar toallas desechables de papel para evitar que, debido a la necesidad de transporte para la limpieza de las toallas de tela, éstas permanezcan demasiado tiempo sin lavar y pueden servir como un foco de infecciones.
2. La caseta de control debe contar con un botiquín en el que se incluya, como mínimo, tela adhesiva, algodón, alcohol, mercromina o similar, una solución detergente desinfectante, tijeras, y pinzas, y un repelente para mosquitos e insectos. También debe contar con extintores y un teléfono celular para emergencias.
3. El trabajador debe disponer de guantes y botas de hule, casco de trabajo, y al menos dos trajes de trabajo. Todas las prendas utilizadas en la instalación deben permanecer en ella al finalizar la jornada laboral.
4. Siempre que se vaya a comer o beber, se debe lavarse las manos con agua limpia y jabón. Si se hace alguna comida en el recinto de la instalación, se debe designar un área para ese fin, y evitar en todo momento comer a la vez que se está efectuando alguna labor que ponga en contacto a la comida con algún elemento que haya estado en contacto con desechos contaminados. Lo más recomendable es no comer cerca de desechos líquidos o sólidos depositados o almacenados.
5. Todas las herramientas de trabajo deben lavarse con agua limpia antes de ser guardadas después de haberlas usado.

**Cuadro 7-7:
Personal Requerido para la Operación y Mantenimiento de Sistemas de
Lagunas de Estabilización en Municipalidades hasta 100,000 Habitantes**

Personal	Número	≤ 8 Ha		≥ 8 Ha ≤ 16 Ha		Calificaciones ¹
		Tiempo Completo	Tiempo Parcial	Tiempo Completo	Tiempo Parcial	
Ingeniero Supervisor	1		0.25		> 0.25	Grado de Ingeniero Civil con capacitación en diseño, operación y mantenimiento de lagunas de estabilización. Capacitación en primeros auxilios, seguridad y salud ocupacional, monitoreo de aguas residuales, e interpretación de resultados del laboratorio y monitoreo. Capacitación y experiencia en financiamiento de operación de obras públicas.
Operador	1—2	X		X		Educación secundaria aprobada. Habilidades propias para labores de operación, mantenimiento y monitoreo básico de aguas residuales y lagunas de estabilización. Capacitación en primeros auxilios, seguridad y salud ocupacional, operación de lagunas, monitoreo de caudales, operación de desarenadores, y muestreo básico de aguas residuales.
Vigilante	1	X		X		Habilidades propias para labores de vigilante. Capacitación en primeros auxilios.
Especialistas	Varios		X		X	Cuando sea necesario contratar especialistas para varias actividades como muestreo de varios parámetros, muestreo de lodos, remoción de lodos, etc.

1. Todo el personal debe recibir capacitación periódicamente en primeros auxilios, seguridad y salud ocupacional, deben recibir vacunación contra tétanos, la fiebre tifoidea, y hepatitis A, y deben ser auscultado una vez por año por un médico que incluye análisis para infecciones intestinales con parásitos.

6. Los cortes, arañazos y contusiones que pueda sufrir el trabajador deben desinfectarse inmediatamente después de que se hayan producido.
7. Si el sitio dispone de electricidad, y el trabajador debe ocuparse del mantenimiento de equipos eléctricos, debería asegurarse de que sus manos, ropas y calzado estén siempre secos.
8. La entrada del sitio debe mantenerse cerrada cuando no existen visitas autorizadas. Se deben recordar los riesgos higiénicos para los visitantes si no están suficientemente informados.
9. La instalación debe disponer de una lancha, cuerda y por lo menos dos salvavidas.
10. El trabajador debe vacunarse contra el tétanos, fiebre tifoidea y otras posibles enfermedades que indiquen las autoridades sanitarias del área. También debe someterse a un chequeo médico por lo menos una vez por año que incluye análisis para infecciones de parásitos.
11. Todos los trabajadores deben recibir capacitación periódicamente en primeros auxilios, seguridad y salud ocupacional.

Se presentan las medidas anteriores en el Cuadro 7-8.

7-10 Problemas Operativos y su Solución

Las lagunas de estabilización pueden presentar problemas operativos que se manifiestan por una serie de dificultades que el operador debe ser capaz de reconocer para tomar las medidas correspondientes para solucionar el problema.

7.10.1 Señales del Buen Funcionamiento de las Lagunas Facultativas y de Maduración

Las señales de buen funcionamiento son los siguientes:

1. El agua del efluente tiene una coloración verde brillante.
2. La superficie del agua en la laguna está libre de natas y sólidos flotantes.
3. La ausencia de plantas acuáticas en la laguna y malezas en los taludes interiores.
4. La ausencia de malos olores en la laguna.

7.10.2 Problemas del Funcionamiento en Lagunas Facultativas y de Maduración

Los problemas de funcionamiento más frecuentes en las lagunas son la acumulación de natas y materias flotantes; aparición de malos olores; desarrollo de coloraciones café, gris/negro, amarillo/verde opaco, rosa o rojo, cual es una señal que la laguna no está funcionando bien; crecimiento de malezas; y la aparición de mosquitos y otros insectos (MOPT, 1991; WEF, 1990).

Cuadro 7-8:
Medidas Higiénicas y de Seguridad Recomendadas para
Una Instalación de Lagunas de Estabilización

1. La instalación debe contar siempre con una fuente de agua limpia, jabón y cloro. Es aconsejable utilizar toallas desechables de papel para evitar que, debido a la necesidad de transporte para la limpieza de las toallas de tela, éstas permanezcan demasiado tiempo sin lavar y pueden servir como un foco de infecciones.
2. La caseta de control debe contar con un botiquín en el que se incluya, como mínimo, tela adhesiva, algodón, alcohol, mercromina o similar, una solución detergente desinfectante, tijeras, y pinzas, y un repelente para mosquitos e insectos. También debe contar con extintores y un teléfono celular para emergencias.
3. El trabajador debe disponer de guantes y botas de hule, casco de trabajo, y al menos dos trajes de trabajo. Todas las prendas utilizadas en la instalación deben permanecer en ella al finalizar la jornada laboral.
4. Siempre que se vaya a comer o beber, se debe lavarse las manos con agua limpia y jabón. Si se hace alguna comida en el recinto de la instalación, se debe designar un área para ese fin, y evitar en todo momento comer a la vez que se está efectuando alguna labor que ponga en contacto a la comida con algún elemento que haya estado en contacto con desechos contaminados. Lo más recomendable es no comer cerca de desechos líquidos o sólidos depositados o almacenados.
5. Todas las herramientas de trabajo deben lavarse con agua limpia antes de ser guardadas después de haberlas usado.
6. Los cortes, arañazos y contusiones que pueda sufrir el trabajador deben desinfectarse inmediatamente después de que se hayan producido.
7. Si el sitio dispone de electricidad, y el trabajador debe ocuparse del mantenimiento de equipos eléctricos, debería asegurarse de que sus manos, ropas y calzado estén siempre secos.
8. La entrada del sitio debe mantenerse cerrada cuando no existen visitas autorizadas. Se deben recordar los riesgos higiénicos para los visitantes si no están suficientemente informados.
9. La instalación debe disponer de una lancha, cuerda y por lo menos dos salvavidas.
10. El trabajador debe vacunarse contra el tétanos, fiebre tifoidea y otras posibles enfermedades que indiquen las autoridades sanitarias del área. También debe someterse a un chequeo médico por lo menos una vez por año que incluye análisis para infecciones de parásitos.
11. Todos los trabajadores deben recibir capacitación periódicamente en primeros auxilios, seguridad y salud ocupacional.

Modificado de WHO, 1987.

7.10.3 Acumulación de Natas y Materiales Flotantes

La superficie de las lagunas debe estar libre de natas y materia flotante. La presencia de natas y material flotante causa problemas al impedir la transferencia de oxígeno a la laguna por la fotosíntesis (al restringir el paso de la luz), en causar malos olores por su descomposición, y en atraer mosquitos y otros insectos (Véase las Fotos 7-3 y 7-4). La presencia puede ser causada por los siguientes factores:

1. Falta de la eliminación de sólidos gruesos por la rejilla en la entrada de la instalación.
2. La flotación de lodos en producir en burbujeo muy activo que los lleve hasta la superficie. Esta puede ser parte del proceso normal o un señal de la sobre-acumulación de lodos al fondo si hay mucha flotación de lodos del fondo.
3. Falta de un mantenimiento adecuado.

La acumulación de natas y materia flotante se debe remover con un desnatador. Si la tasa de acumulación aumenta, se debe analizar para determinar la causa específica.

7.10.4 Malos Olores

Las razones más frecuentes de la aparición de malos olores son las siguientes:

1. Sobrecarga de DBO que causa condiciones anaeróbicas. La sobrecarga puede ser causada por un sobre-caudal, mal diseño, períodos de retención hidráulica demasiado bajos por cortocircuitos hidráulicos (Fotos 6-6 y 6-7) o sobre-acumulación de lodos, y la descomposición anaeróbica de lodos demasiado profundos al fondo de la laguna.
2. Presencia de químicos tóxicos de efluentes industriales que disminuyen las actividades biológicas.
3. La descomposición anaeróbica de natas y materia flotante no removida de la superficie de la laguna (Foto 7-2).
4. Un bloqueo de árboles o estructuras que causa una reducción de transferencia de oxígeno inducida por el viento (MOPT, 1991).

7.10.5 Coloraciones Anormales

Una laguna facultativa y de maduración normalmente tiene una coloración verde brillante en la salida. La entrada de una laguna facultativa puede tener una coloración gris/café hasta el intermedio, donde debe ser verde brillante. Las siguientes coloraciones son señales de mal funcionamiento de una laguna:

Café:	Reducción en actividad de fotosíntesis.
Gris/Negro:	Condiciones anaeróbicas.
Amarillo/Verde Opaco:	Presencia de algas azules-verdes; significa baja en pH y oxígeno.
Rosa o rojo:	Presencia de bacteria fotosintéticas del azufre, lo cual significa condiciones anaeróbicas.

7.10.6 Crecimiento de Malezas

El crecimiento de malezas acuáticas es causado por una profundidad de agua demasiado baja; no crecen las plantas acuáticas en lagunas con una profundidad más que 1.5 metros. Si hay crecimiento en la orilla, este es una señal de mal mantenimiento o falta de un revestimiento adecuado. El crecimiento de malezas en los taludes es causado por mal mantenimiento.

7.10.7 Mosquitos y Otros Insectos

Las lagunas no presentan problemas de mosquitos u otros insectos mientras se tengan las orillas y la superficie libres de plantas acuáticas y materia flotante, las cuales sirven como focos de reproducción de insectos. La solución es mantener siempre las lagunas limpias de plantas acuáticas y material flotante.

En el Cuadro 7-9 se presenta un resumen de los problemas de funcionamiento de lagunas y su solución.

Cuadro 7-9: Problemas de Funcionamiento de Lagunas de Estabilización y Su Solución

Síntoma	Causa	Solución
Acumulación de natas y sólidos flotantes	Falta de eliminación de sólidos gruesos por la rejilla. Flotación de lodos acumulados por burbujeo. Falta de limpieza con el desnatador.	Limpieza de la rejilla. Remoción de lodos acumulados. Mantenimiento adecuado con desnatador.
Crecimiento de lemna en la superficie.	Contaminación de lemna traída por viento, aves o animales.	Remoción de lemna con desnatadores o por la introducción de patos que comen lemna.
Malos olores	Condiciones anaeróbicas por sobrecarga orgánica. Descomposición de natas y material flotante. Presencia de químicos tóxicos.	Análisis de la causa de condiciones anaeróbicas: Caudal excesiva; descargas industriales; descomposición de lodos acumulados. Remoción de natas y material flotante. Hacer un monitoreo hasta que localice el problema.
Coloraciones Anormales: Verde Brilla Café Gris/Negro Amarillo/Verde Opaco Rosa/Rojo	Normal para lagunas facultativas y de maduración. Reducción en fotosíntesis. Condiciones anaeróbicas. Presencia de algas azules-verdes. Presencia de bacteria fotosintéticas del azufre por condiciones anaeróbicas.	Analizar para sobrecarga orgánica, químicos tóxicos. Analizar para sobrecarga orgánica. Significa baja en pH y oxígeno disuelto por sobrecarga o químicos tóxicos. Analizar para sobrecarga orgánica. Analizar para sobrecarga orgánica.
Crecimiento de Malezas	Demasiado baja la profundidad de agua. Falta de revestimiento. Falta de mantenimiento.	Control de nivel de agua. Construcción de revestimiento. Mantenimiento adecuado.
Mosquitos y Insectos	Focos de reproducción para sus larvas.	Remoción de plantas emergentes acuáticas y material flotante. Variación de nivel de agua para secar larvas en la orilla.

CAPITULO 8: REMOCIÓN DE LODOS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

8.1 Introducción

Los sólidos suspendidos que se sedimentan en las lagunas primarias (facultativas o anaeróbicas) se acumulan en el fondo como lodos donde, poco a poco por los años, se pueden afectar el funcionamiento del sistema a través de una reducción en el volumen útil, y, por lo tanto, el tiempo de retención hidráulica. Generalmente, los lodos tendrán que ser removidos con una frecuencia de 5 a 10 años en lagunas facultativas, y de 2 a 5 años en lagunas anaeróbicas. La remoción de lodos entonces es una tarea significativa y obligatoria, y su realización debe ser bien planeada con estudios de ingeniería y con los costos de limpieza amortizados por las tarifas cobradas. Hay casos, como el de Nicaragua, donde la falta de planeación y financiación adecuada resultó en la necesidad de pedir un préstamo de más de US \$1,000,000 (año 1995) del Banco Interamericano de Desarrollo para la remoción de lodos en 17 lagunas, o un promedio de US \$58,000 por laguna (Oakley, 1998). Mientras el costo por persona fue solamente un promedio de US \$5 por 10 años de operación (Oakley, 1999), el costo por laguna sin embargo sería un costo muy significativo para cualquiera municipalidad de Centroamérica. Si una municipalidad no planeara para la limpieza con anticipación, no tendría los recursos para la limpieza cuando sea necesaria.

Para que los sistemas de lagunas sean sostenibles, es necesario planear para la remoción de lodos desde el principio del diseño de sistema y continuamente durante su operación. Como objetivos la remoción de lodos debe minimizar costos, proteger la salud pública y el medio ambiente, permitir el funcionamiento adecuado del sistema durante el período de limpieza, y dar una solución adecuada para la disposición final de los lodos.

8.2 Etapas Esenciales en la Remoción de Lodos de Lagunas Primarias

Franci (1999), en su libro detallado de la remoción de lodos en las lagunas de Brasil, ha presentado una lista de las etapas esenciales en la planeación y remoción de lodos. En el Cuadro 8-1 se presentan una adaptación de sus etapas esenciales más orientada a la situación existente de las municipalidades de Centroamérica. A continuación se discute cada etapa en detalle.

8.2.1 Etapa 1: Estimación del Volumen de Lodos por Caudales, Concentraciones, y Años de Operación

En instalaciones que cuentan con un registro de caudales y datos de monitoreo durante sus años de operación, es posible, como el primer paso, estimar el volumen de lodos acumulados con las siguientes ecuaciones (Metcalf y Eddy, 1991):

Cuadro 8-1: Etapas Esenciales en la Remoción de Lodos de Lagunas Primarias

Etapa	Tarea
1	Estimación del volumen de lodos por los caudales, concentraciones de sólidos suspendidos, y los años de operación del sistema de lagunas.
2	Medición del volumen de lodos a través de estudios de batimetría.
3	Caracterización físico-química y microbiológica de lodo.
4	Estimación, a través de datos meteorológicos, el tiempo requerido de secar los lodos antes de sacarlos de la laguna.
5	Plan de trabajo: Desvío del afluente a otra laguna. Impacto del desvío en el funcionamiento del sistema Drenaje de laguna primaria. Secado de lodos. Método de sacar los lodos secados. Rellenado de la laguna limpiada. Disposición final de los lodos. Impactos ambientales del proyecto

Adaptado de Franci, 1999.

$$V_L = \frac{M_S}{\rho_{H_2O} \cdot GE_L \cdot ST} \quad (8-1)$$

donde

- V_L = volumen de lodos, m³
- M_S = masa de sólidos secos, kg
- ρ_{H_2O} = densidad de agua, 1,000 kg/m³
- GE_L = gravedad específica de los lodos
- ST = fracción de sólidos totales en los lodos expresada como decimal

La masa de sólidos acumulados diarios se calcula con la siguiente ecuación:

$$M_{S-d} = 0.001 \cdot Q_{med} \cdot SS \quad (8-2)$$

donde M_{S-d} = carga de sólidos en el afluente, kg/día

$$\begin{aligned}
 Q_{med} &= \text{caudal promedio del afluente, m}^3/\text{día} \\
 SS &= \text{concentración promedio de sólidos suspendidos, mg/L} \\
 0.001 &= \text{factor de conversión de mg/L a kg/m}^3
 \end{aligned}$$

Normalmente se asume que 65% de los sólidos totales son volátiles y 35% son fijos, y que a largo plazo aproximadamente 50% de los sólidos volátiles serán digeridas. La masa de sólidos producidos por año sería entonces:

$$M_{S-a} = 365 \cdot (0.35M_{S-d} + 0.65 \cdot (0.5)M_{S-d}) = 246 \cdot M_{S-d} \quad (8-3)$$

donde M_{S-a} = masa de sólidos producidos por año, kg/año

Combinando las Ecuaciones 8-2 y 8-3 se obtiene la masa por año en términos de caudal y concentración de SS:

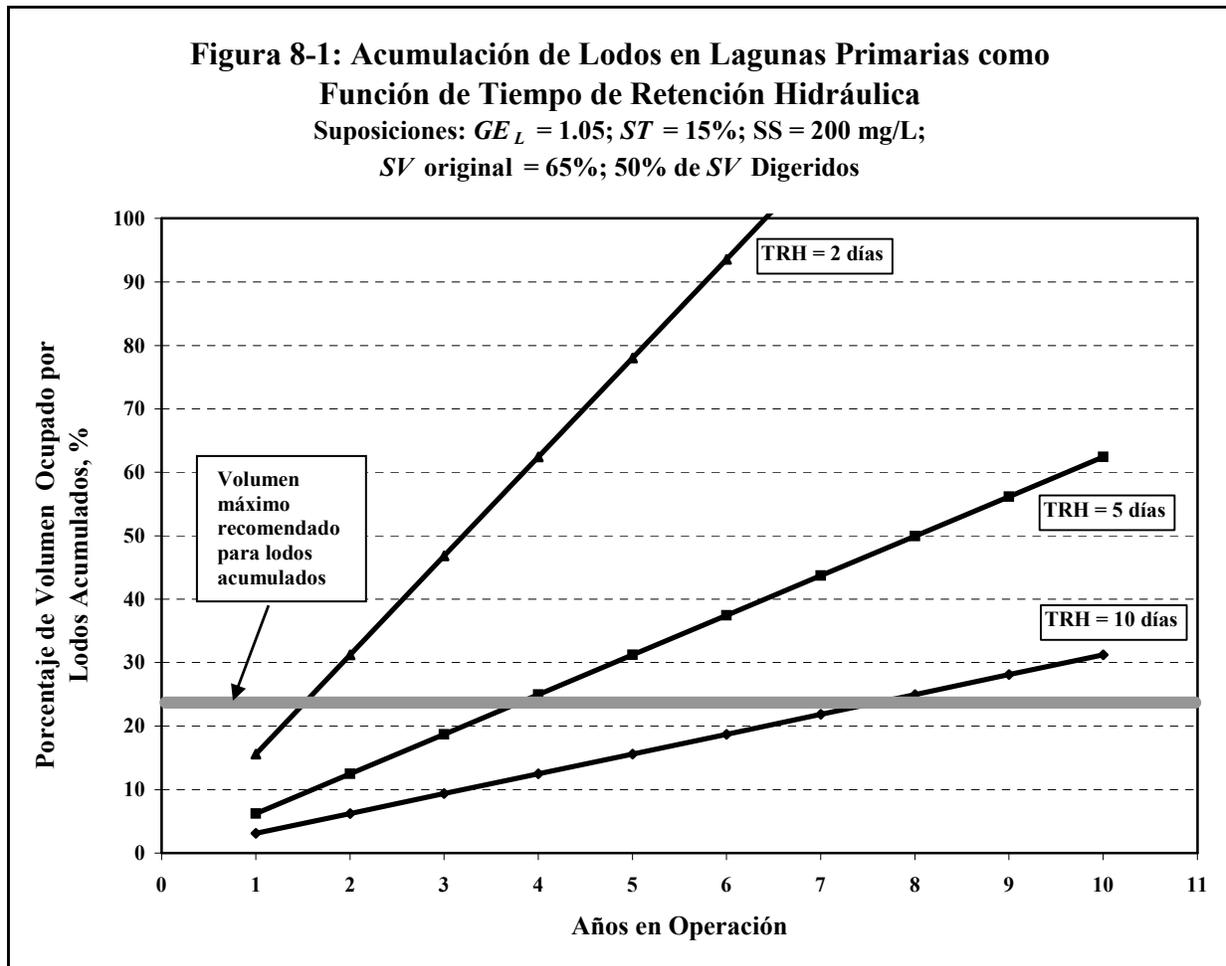
$$M_{S-a} = 0.246 \cdot Q_{med} \cdot SS \quad (8-4)$$

Se estiman que la gravedad específica de lodos digeridos en lagunas primarias es aproximadamente 1.05, y la concentración de sólidos totales de 15 a 20% (Viceministerio de Vivienda y Construcción, 1997). Usando estos valores con la Ecuación 8-1 y combinando con la Ecuación 8-4 da la siguiente relación para estimar el volumen de lodos producidos por año:

$$V_{L-a} = \frac{M_{S-a}}{\rho_{H_2O} \cdot GE_L \cdot ST} = \frac{0.246 \cdot Q_{med} \cdot SS}{1,000 \cdot (1.05) \cdot (0.15)} = 0.00156 \cdot Q_{med} \cdot SS \quad (8-5)$$

La Ecuación 8-5 asume que 100% de los sólidos suspendidos sedimentan en la laguna primaria y por lo tanto tiene un factor de seguridad porque se estima la eficiencia de remoción de SS es de alrededor 80% (Viceministerio de Vivienda y Construcción, 1997; Yáñez, 1992).

Porque el tiempo de retención hidráulica es relacionado al volumen de la laguna por la ecuación $V_{Laguna} = TRH \cdot Q_{med}$, se puede utilizar la Ecuación 8-5 para estimar el porcentaje de una laguna que estaría llenado con lodos acumulados como función del TRH nominal de la laguna. La Figura 8-1 muestra el porcentaje de la laguna que está ocupado por lodos acumulados versus tiempo como función del tiempo de retención hidráulico.



La Figura 8-1 muestra claramente que las lagunas facultativas con tiempos de retención de 10 días o más pueden operar por hasta 10 años sin llenar más de 25% del volumen de la laguna con lodos acumulados. (Como se como se estudia adelante, se recomienda limpiar la laguna antes que la acumulación de lodos llegue a 25% por volumen de la laguna y 0.5m de profundidad.) Además, un punto importante que se nota en la figura es que cualquiera laguna que tiene un tiempo de retención hidráulica mucho menor a 10 días puede tener problemas con acumulación de lodos en pocos años.

8.2.2 Etapa 2: Medición del volumen de lodos a través de estudios de batimetría.

El propósito principal de estimar el volumen de lodos acumulados en Etapa 1 es poder proyectar y programar la medición exacta del volumen en el campo con batimetría, lo que significa el inicio del proyecto de limpieza. Para poder dar su oferta exacta y planear su plan de trabajo, no solamente la limpieza sino la disposición final del volumen secado, el contratista tendrá que medir el volumen exacto de lodos que existen.

Se empieza con un estudio topográfico que delimita los predios de las lagunas primarias y efectúa la planialtimetría para lograr las áreas y niveles, especialmente el nivel de agua y la

profundidad original (sin lodos) de las lagunas. Se termina con la batimetría para lograr las profundidades de agua y lodos y, entonces, los volúmenes de agua y lodos acumulados (ECOMAC, 2004).

Se obtiene la batimetría de lagunas por medio del siguiente procedimiento (ECOMAC, 2004):

1. Utilizando una lancha y una reglilla graduada (o estadía graduada), se la sumerge hasta sentir contacto con el fondo considerando no forzar la reglilla hacia el fondo ya que se podría alterar el dato de la altura de los lodos.
2. Se registra el dato y la ubicación del punto en la laguna en la bitácora.

En lugar de una reglilla o estadía se puede utilizar un tubo claro graduado de plástico, y después de medir la altura se puede meterlo hasta al fondo para medir la profundidad del lodo exactamente y sacar un corazón de lodo para análisis (Arceivala, 1970; Nelson, *et al.*, 2004).

8.2.3 Etapa 3: Caracterización Física-Química y Microbiológica de Lodos

El Cuadro 8-2 muestran los parámetros físicos-químicos-microbiológicos necesarios para caracterizar los lodos para un proyecto de remoción.

Cuadro 8-2: Caracterización Física-Química-Microbiológica de Lodos

Parámetro	Unidad	Objetivo
Sólidos volátiles	%	Determinación de gravedad específica de sólidos.
Sólidos fijos	%	Determinación de gravedad específica de sólidos.
Sólidos totales	%	Determinación de gravedad específica de lodos, volumen de agua para remover por evaporación, y volumen final de lodos secados.
Huevos de Helmintos (Viables si sea posible)	$\frac{\text{Número}}{\text{gramo seco}}$	Disposición final y posible reuso de lodos.

El procedimiento a seguir para la recolección de lodos es el siguiente:

1. Se seleccionan los lugares de muestreo donde existe la mayor acumulación de lodos. Se debe sacar varias muestras en lugares diferentes para obtener el rango y promedio de valores posibles.
2. Se utiliza una draga especial diseñada para la recolección de sedimentos (ECOMAC, 2004), o un tubo diseñado especialmente para la recolección de muestras de lodos como se presentan en los estudios de Arceivala (1970) y Nelson, *et al.* (2004).

3. De acuerdo con los requisitos de los laboratorios que analizan las muestras, se ponen las muestras para los análisis de sólidos volátiles, fijos y totales en un tipo de recipiente especial, y las muestras para el análisis de huevos de helmintos en otro tipo especial.
4. El mismo día de recolección se mandan todas las muestras en una hielera al laboratorio apropiado para su análisis. Hasta la fecha el laboratorio del Centro de Estudios y Control de Contaminantes (CESCCO) es el único en Honduras que puede realizar los análisis de helmintos.

Los análisis de sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF) son importantes para determinar la gravedad específica de los sólidos (GE_S) a través de la Ecuación 8-6 (Metcalf y Eddy, 1971):

$$\frac{1}{GE_S} = \frac{SV}{1.0} + \frac{SF}{2.5} \quad (8-6)$$

donde GE_S = gravedad específica de los sólidos
 SV = porcentaje como decimal de sólidos volátiles en los lodos
 SF = porcentaje como decimal de sólidos fijos en los lodos

La Ecuación 8-6 asume que la gravedad específica de material orgánico es de 1.0 y de material inorgánico de 2.5.

Después de determinar la gravedad específica de los sólidos se calcula la gravedad específica de los lodos con la Ecuación 8-7:

$$\frac{1}{GE_L} = \frac{ST}{GE_S} + \frac{(1-ST)}{1.0} \quad (8-7)$$

donde GE_L = gravedad específica de los lodos
 ST = porcentaje como decimal de sólidos totales en los lodos
 $1-ST$ = porcentaje como decimal de humedad en los lodos

Después de calcular GE_L , y con el volumen de lodos medidos con la batimetría, se puede calcular directamente la masa de lodos secos en reacomodar la Ecuación 8-1:

$$M_S = V_L \cdot \rho_{H_2O} \cdot GE_L \cdot ST \quad (8-8)$$

En el Cuadro 8-3 se presentan los resultados del proyecto de monitoreo de las lagunas Honduras sobre los parámetros de lodos comparados con otros estudios técnicos reportados en la literatura técnica. Se nota que los resultados de Honduras son muy parecidos de lo que han encontrado en otros países de América Latina.

Cuadro 8-3: Características Físico-Químicas-Microbiológicas Típicas de Lodos en Lagunas Primarias

Parámetro	Rango de Valores Reportados			
	Honduras ¹	Brasil ²	México ³	India ⁴
Sólidos Totales, ST , %	11.6—15.5	8.4—22.0	11.2—17.1	13—28
Sólidos Volátiles, SV , %	23.9—31.4	35.8—41.8		17—31
Sólidos Fijos, SF , %	68.0—76.1	58.2—64.2		69—83
GE_S	1.708—2.028			
GE_L	1.049—1.076			1.11—1.165
Huevos de Helmintos Número/gramo seco	1—5,299	25—300	<100—500	
Acumulación Estimada de Arena $m^3/1,000m^3$	0.010—0.085			
Acumulación Estimada de Lodos $m^3/1,000m^3$	0.224—0.548			

1. ECOMAC (2000); 2. Franci (1999); 3. Nelson, *et al.* (2003); 4. Arceivala (1970).

8.2.4 Etapa 4: Estimación del Tiempo de Secado de Lodos

El mecanismo de secado de lodos es principalmente por evaporación dentro de la laguna drenada; también, dependiendo sobre la calidad de la impermeabilización del fondo, un porcentaje significativo de agua puede ser removido a través de infiltración (Franci, 1999; US EPA, 1987). Como resultado, es fundamental estimar la duración de secado y tratar de minimizarla, particularmente porque el sistema estará sobrecargado por el desvío del caudal de la laguna fuera de servicio a las otras lagunas que quedarán en operación. El tiempo de secado es una función i) del clima local (especialmente evaporación neta); ii) de la profundidad de lodos; iii) de la fracción de agua en los lodos que drene e infiltre por el fondo; iv) de la concentración de sólidos totales inicial y final de los lodos; y v) de la naturaleza de la superficie de los lodos (US EPA, 1987). Se puede expresar esta relación con la Ecuación 8-9 (US EPA, 1987):

$$t_s = \frac{P_o \cdot \left(1 - \frac{ST_o}{ST_f}\right) \cdot (1 - D)}{k_e \cdot (E_n - P_n)_{Min}} \quad (8-9)$$

donde

- t_s = tiempo de secado de lodos, días
- P_o = profundidad inicial de lodos, m
- ST_o = concentración de sólidos totales inicial expresada como decimal
- ST_f = concentración de sólidos totales final expresada como decimal
- D = porcentaje de agua removido por infiltración expresado como decimal
- k_e = factor de reducción de evaporación del agua de lodos versus un espejo de agua (varia entre 0.6 a 1.0)
- $(E_n - P_n)_{Min}$ = evaporación neta mínima de los meses contiguos considerados, n , m/día

La Ecuación 8-9 asume que los lodos están esparcidos por todo el área del fondo de la laguna con una profundidad uniforme. Si no, el tiempo de secado fuera más largo.

El porcentaje de agua removido por infiltración por el fondo, D , puede variar entre 25% hasta 75% en lechos de secado (US EPA, 1987); en lagunas primarias D es una función de la permeabilidad realizada en el fondo de la laguna (Franci, 1999). Normalmente se asume que D es igual a cero y la remoción de agua es exclusivamente por evaporación (Yáñez, 1992).

El término $(E_n - P_n)_{Min}$ en la Ecuación 8-9 es la evaporación neta mínima de los meses de la época seleccionada para el secado (típicamente dos o tres meses), lo que debe ser la época más seca del año. Como ejemplo, en el Cuadro 8-4 se presentan los datos de precipitación y evaporación promedio mensual de 20 años de monitoreo para la estación meteorológica El Modelo, que es la estación más cercana a las lagunas de Villanueva, Cortés. Las últimas dos columnas muestran la evaporación neta (en mm/mes y m/día), donde se ve que un secado de lodos deberá ser planeado durante los meses de marzo, abril y mayo. Se utilizaría la evaporación neta mínima del mes de marzo (m/día) en la Ecuación 8-9.

**Cuadro 8-4: Promedio Mensual (Años 1975—96) de Precipitación y Evaporación
Cuenca Ulua, Estación El Modelo, Latitud 15° 23' 50", Longitud 87° 59' 30"**

Mes	Temperatura °C	Precipitación, P mm	Evaporación, E mm	$E - P$ mm	$E - P$ m/día
Enero	24.1	73.4	89.9	16.5	0.0006
Febrero	24.7	49.7	107.8	58.1	0.0019
Marzo	25.9	38.0	150.3	112.3	0.0037
Abril	27.4	28.3	171.7	143.4	0.0048
Mayo	28.6	75.6	191.5	115.9	0.0039
Junio	28.3	144.7	166.3	21.6	0.0007
Julio	27.2	130.0	155.5	25.5	0.0009
Agosto	27.3	127.5	159.1	31.6	0.0011
Septiembre	27.2	143.5	137.4	-6.1	-0.0002
Octubre	26.3	101.9	119.6	17.7	0.0006
Noviembre	25.3	125.0	89.4	-35.6	-0.0012
Diciembre	24.7	103.2	83.8	-19.4	-0.0006

Fuente: Departamento de Servicios Hidrológicos y Climatológicos, Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, Gobierno de Honduras.

El término k_e en la Ecuación 8-9 es el factor de reducción de evaporación del agua de los lodos comparada a un espejo de agua. Los lodos forman una capa dura cuando empiezan a secar, lo que impide la evaporación de agua en las capas inferiores como se ve en las Fotos 8-1. Durante este período de secado se estima el valor de k_e de ser aproximadamente 0.6 (US EPA, 1987). Luego, cuando los lodos secan más, empiezan formar grietas, los cuales facilitan el secado (Véanse las Fotos 8-2). Con tiempo, después de formar muchas grietas, el valor de k_e se aproxima el valor 1.0 del espejo de agua (US EPA, 1987).



Fotos 8-1: Cuando los lodos empiezan a secar la capa superficial forma una capa dura que previene el secado de las capas inferiores como se ve en estas fotos de un lecho de secado. Mientras la capa superficial está seca (foto arriba), las capas inferiores mantienen su humedad como se ve después de meter un palo por adentro (foto abajo). (Ciudad de Guatemala)



Fotos 8-2: En el lecho de secado arriba los lodos están frescos y acaban de empezar secando con una capa superior duro que impide la evaporación de agua en las capas inferiores. Luego, después de secar más, los lodos empiezan formar grietas, los cuales facilitan el secado de las capas inferiores como se ve en la foto abajo. (San Juan Comalapa, Guatemala)

Una manera de mantener el valor de k_e más cercano a 1.0 es esparcir los lodos por todo el área del fondo de la laguna y voltearlos cada cierto tiempo durante el secado con un tractor agrícola con un arado o una barrena horizontal (US EPA, 1987).

Después de secar los lodos, se calcula su profundidad final, y entonces su volumen final para sacar y almacenar, con las Ecuaciones 8-10 (US EPA, 1987) y 8-11:

$$P_f = P_o \cdot \left(\frac{ST_o}{ST_f} \right) \quad (8-10)$$

$$V_f = P_f \cdot A_b \quad (8-11)$$

donde P_f = profundidad final de lodos, m
 A_b = área del fondo de la laguna, m²

Las Ecuaciones 8-10 y 8-11 asumen que los lodos estén esparcidos a una profundidad uniforme por todo el área del fondo.

Se presenta un ejemplo de una laguna primaria con los lodos esparcidos y secos en la Foto 8-3.



Foto 8-3: Un buen ejemplo de una laguna primaria con los lodos secos después de ser esparcidos y volteados periódicamente para facilitar el secado. Nótese la rampa para el acceso de equipo pesado. (Oroville, California, EE.UU.)

8.2.5 Etapa 5: Plan de Trabajo Usando el Método de Secado y Remoción con Equipo

Como se presenta en el Cuadro 8-1, el plan de trabajo debe incluir los siguientes factores:

Desvío del afluente a otra laguna

Dependiendo sobre el diseño de la instalación, el desvío puede ser a otra batería de laguna primaria en paralelo, o si no existe, a una laguna secundaria. El desvío debe ser por gravedad y no bombeo, y se debe especificar se sea necesario construir un canal temporáneo para el desvío, o si se pudiera utilizar los canales existentes.

Impacto del desvío en el funcionamiento del sistema

Se debe calcular el impacto del desvío en el funcionamiento del sistema, lo cual estaría sobrecargada durante un período de 2 o 3 meses. Porque el secado ocurre durante los meses más calurosos, el impacto debe ser mínimo porque las lagunas tendrán mayor capacidad de tratamiento durante esta época en términos de la carga orgánica.

Drenaje de laguna primaria.

Si existen, se efectúa el drenaje a través de dispositivos de drenaje. Si no, la manera más recomendable es el drenaje con sifón (Yáñez, 1992). Se debe drenar la laguna hasta alcanzar un nivel que permita la exposición de los lodos al ambiente.

Secado de lodos.

Se debe especificar los meses seleccionados y el tiempo máximo del secado, estimado por la Ecuación 8-9, y los métodos de esparcir y voltear los lodos para que el valor del factor de evaporación, k_e , aproxime 1.0 y los lodos secan en período más rápido que sea posible.

Método de sacar los lodos secados.

El método más apropiado de sacar los lodos es por cargadores frontales con rueda de goma o con orugas; en instalaciones pequeñas es posible también sacar los lodos manualmente con palas y caretillas. En algunos casos, dependiendo sobre el tamaño de la laguna, es posible sacar los lodos con una excavadora o draga. Es fundamental que el equipo no dañe la capa de arcilla al fondo de la laguna. Se calcula el volumen final de los lodos con las Ecuaciones 8-10 y 8-11.

Rellenado de la laguna limpiada y la puesta en marcha.

Se debe rellenar la laguna con agua del cuerpo receptor o de pozo y después arrancarla por redesar el afluente original de la laguna de desvío.

Disposición final de los lodos.

El Cuadro 8-5 presenta las normas de la OMS para el reuso de lodos en agricultura. Porque inicialmente todos los lodos estarán muy contaminados con huevos de helmintos, la mayoría del tiempo es mejor enterrar los lodos en trincheras o excavaciones con una cobertura mínima de 25 cm, sin exposición de trabajadores, y prohibir la siembra de cultivos de raíces comestibles encima de los lodos enterrados (Categoría C en el Cuadro 8-5). En el caso de reuso en las Categorías B o A, se debe reservar un área en la instalación donde se puede almacenar los lodos en pilas por un tiempo mínimo de un año. Antes de mover los lodos para cualquier reuso se debe verificar que no contienen huevos vivos de helmintos por un análisis microbiológico. Las Fotos 8-4 muestran ejemplos de lodos almacenados con el objetivo de reusarlos en agricultura.

**Cuadro 8-5:
Normas Microbiológicas de la OMS de Calidad de Lodos
Provedentes de Agua Residual Tratada para Reuso en Agricultura**

Categoría y Condición de Reuso	Grupo Expuesto	Promedia de Una Serie de Muestras de los Lodos Antes del Período de Reuso	
		Helminthos Intestinales ¹ Número Huevos/1,000g Peso mojado (Media Aritmética)	Coliformes Fecales NMP/100g Peso mojado (Media Geométrica)
<u>Categoría A</u> Reuso No Restringido: Cultivos que se consumen crudos: campos deportivos; parques públicos.	Trabajadores Consumidores Público	≤ 1	≤ 1,000
<u>Categoría B</u> Reuso Restringido: Cultivos de cereales, praderas, forrajeros, y árboles.	Trabajadores	≤ 1	Ninguna Norma Recomendada
<u>Categoría C</u> Reuso Restringido: Antes de sembrar los cultivos, se entierra los lodos en trincheras con una cobertura mínima de 25 cm de suelo; encima de las trincheras se prohíbe la siembra de cultivos de raíces comestibles; todo sin exposición de trabajadores.	Ninguno	No se aplica	No se aplica

1. Especies de *Ascaris*, *Trichuris*, y Anquilostomas.

Fuente: Mara y Cairncross, 1989.



Fotos 8-4: Ejemplos de lodos secos que están almacenados en zonas especiales reservados para ellos en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Por el riesgo de los huevos de helmintos, los lodos deben ser almacenados por los menos un año y, antes de cualquier uso o disposición final, analizados por huevos viables de helmintos. (Foto arriba: Planta de tratamiento de Chico, California, EE.UU.; abajo: Planta de tratamiento de San Juan Comalapa, Guatemala)

Impactos Ambientales del Proyecto

Se debe hacer un estudio de los impactos ambientales del proyecto para asegurar la salud pública y el medio ambiente estarán protegidos. Un problema potencial es la contaminación de equipo pesado, camiones, herramientas, botas y ropa de trabajadores con huevos viables de helmintos y otros patógenos. El contratista necesitará un programa de higiene ocupacional para evitar este problema.

8.3 Estudio de Caso: Remoción de Lodos de las Lagunas Primarias de Villanueva, Cortés

8.3.1 Antecedentes

Las lagunas de Villanueva, Cortés, construidas en 1992-93 y inundadas por el huracán Mitch, han estado en operación continua por 7 años. La Figura 8-2 muestra el sistema, lo que consiste de dos baterías en paralelo de una laguna facultativa seguida por una de maduración (ECOMAC, 2004). El sistema fue monitoreado en abril de 2003 como parte del Proyecto de Monitoreo de las Lagunas de Estabilización de Honduras. Se notaba durante el monitoreo que, a pesar que la remoción de los parámetros de DBO₅, SS y huevos de helmintos fue aceptable y típica de otras sistemas, las lagunas facultativas estaban sobrecargadas hidráulicamente y orgánicamente, y requerían una limpieza de lodos (ECOMAC, 2004).

8.3.2 Resultados de Estudio de Batimetría

Las Figuras 8-3 y 8-4 y el Cuadro 8-6 muestran los resultados del estudio de batimetría de las lagunas facultativas (ECOMAC, 2004). El volumen de lodo medido es significativo—23.4% del volumen total en Facultativa I y 28.5% en Facultativa II—y ha llegado el límite recomendado para su acumulación (Figura 8-1).

Cuadro 8-6: Resultados de Estudio de Batimetría en las Lagunas Facultativas de Villanueva, Cortés, Año 2003

Parámetro	Batería	
	Facultativa I	Facultativa II
Largo, m	85	85
Ancho, m	50	50
Área, m ²	4,250	4,250
Profundidad sin lodos, m	1.8	1.8
Volumen sin lodos, m ³	6,408	6,408
Volumen medido de lodos, m ³	1,500	1,827
Porcentaje del volumen de laguna llenado con lodos acumulados, %	23.4	28.5

Fuente: ECOMAC, 2004.

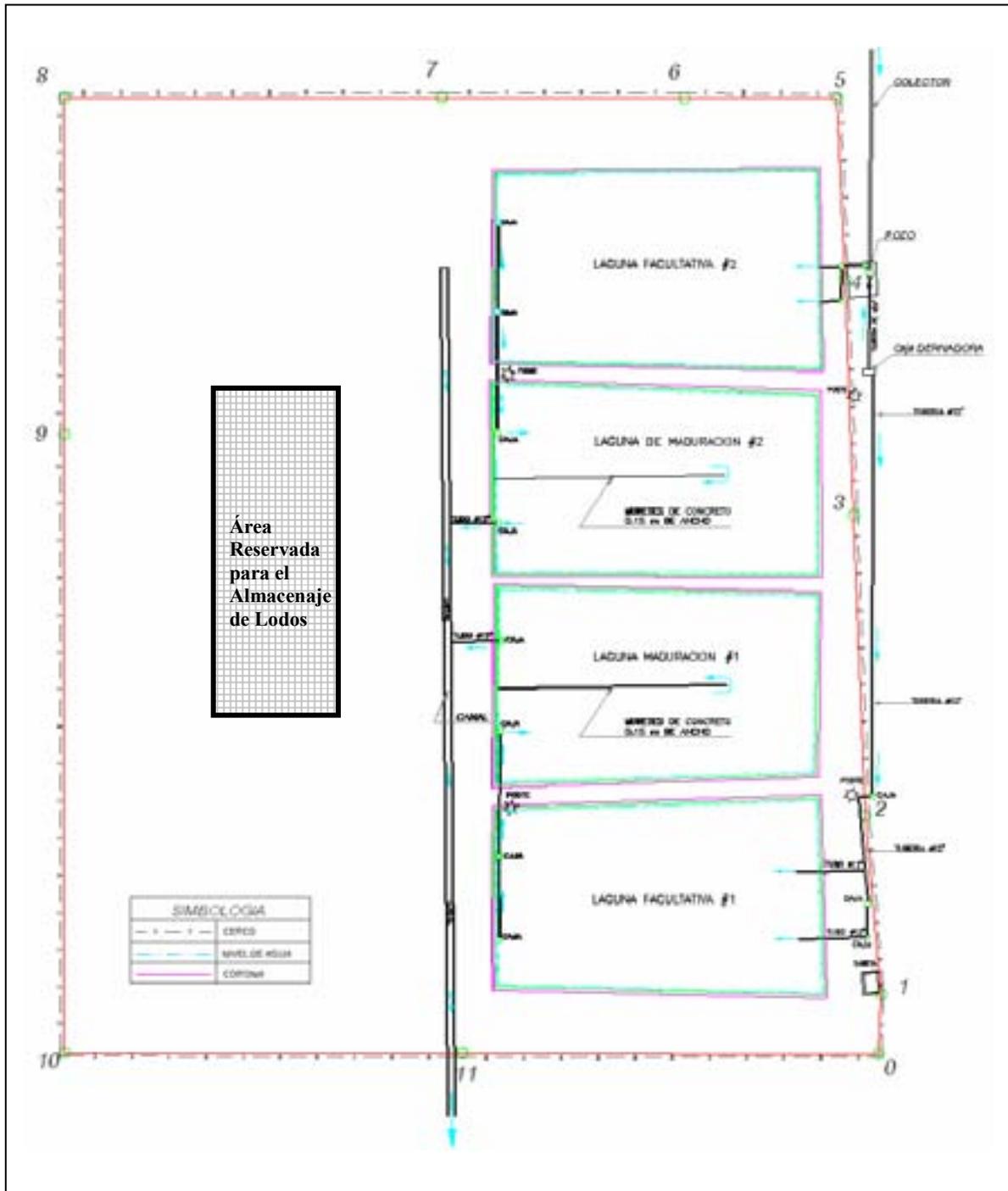


Figura 8-2: Instalación de las Lagunas de Estabilización de Villanueva, Cortés

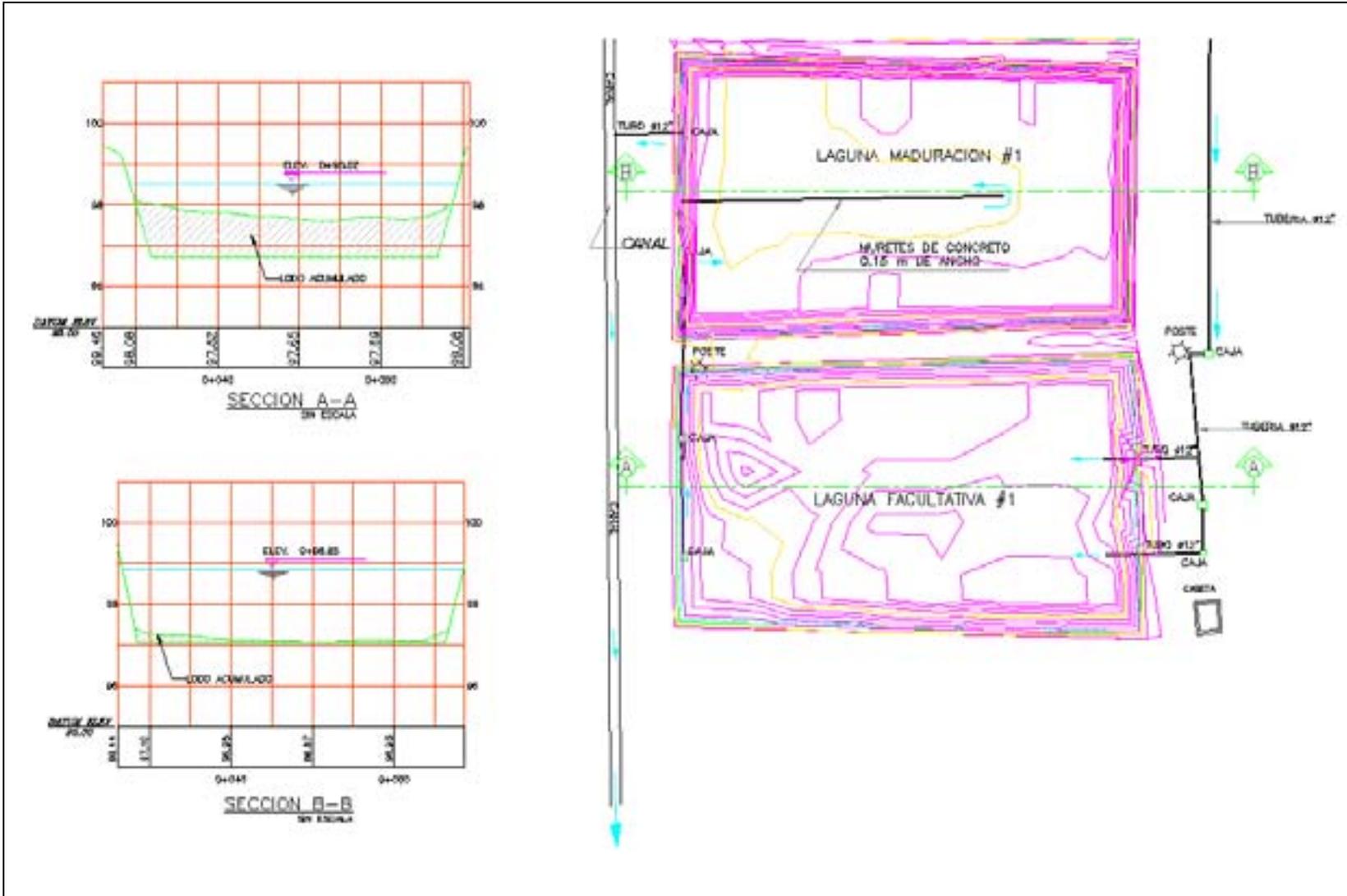


Figura 8-3: Resultados del Estudio de Batimetría de la Laguna Facultativa I, Villanueva, Cortés

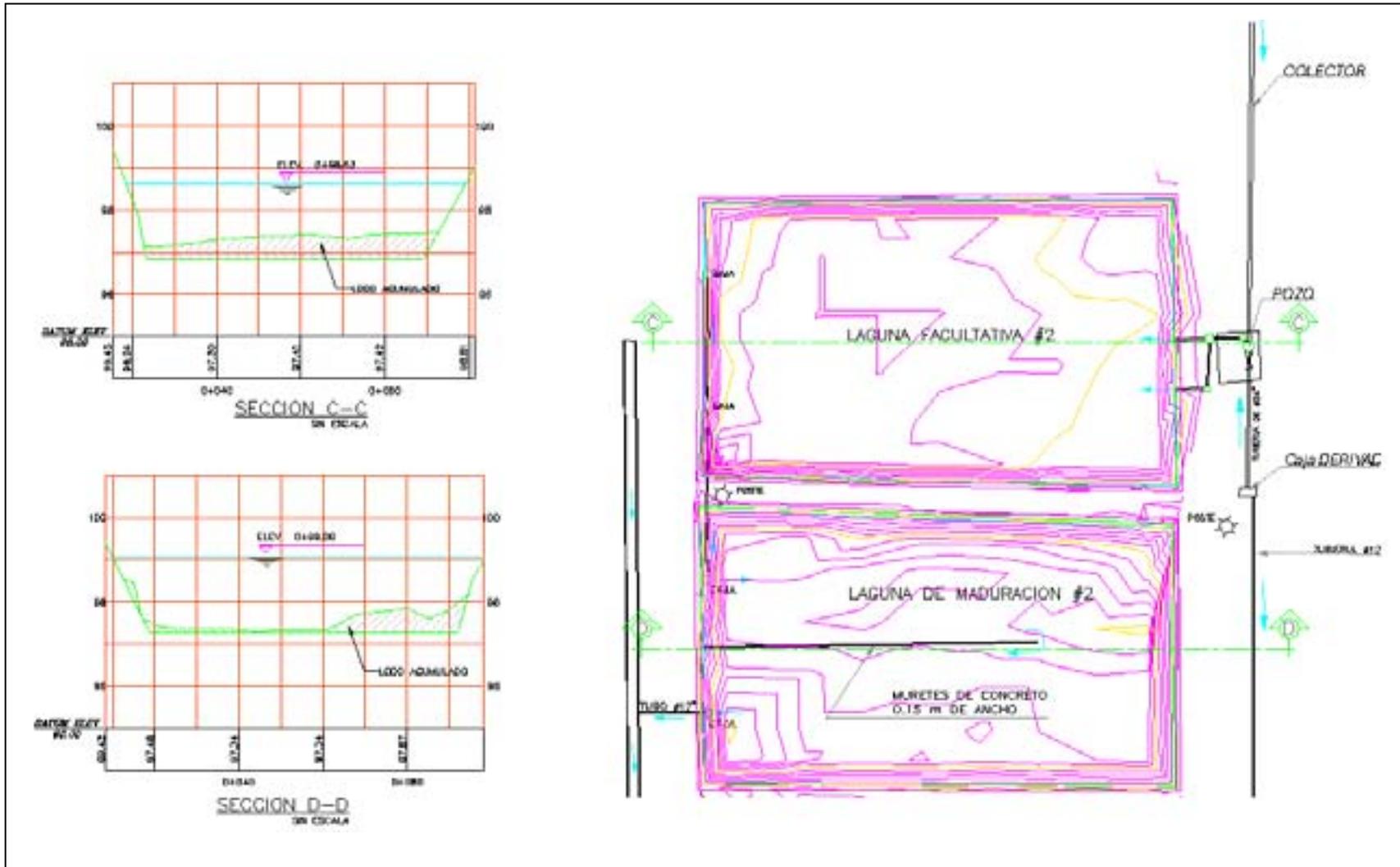


Figura 8-4: Resultados del Estudio de Batimetría de la Laguna Facultativa II, Villanueva, Cortés

8.3.3 Caracterización Física-Química y Microbiológica de los Lodos

Se presentan los resultados de los análisis de lodos en el Cuadro 8-7. Se ve que la Facultativa II tiene una concentración más alta de sólidos fijos, lo que indica un desequilibrio en cuanto a la repartición de caudales entre las dos baterías, con la Facultativa II recibiendo más caudal, y entonces más sólidos arenosos entran la II que la I. También, por la acumulación de lodos mostrada en el Cuadro 8-5 se ve que la II está recibiendo más carga de sólidos suspendidos.

Cuadro 8-7: Resultados de Análisis de Lodos en las Lagunas Facultativas Villanueva, Cortés, Año 2003

Parámetro	Concentración Promedia de Tres Muestras	
	Facultativa I	Facultativa II
Sólidos Totales (ST_o), %	11.0	11.1
Sólidos Volátiles (SV), %	28.6	15.5
Sólidos Fijos (SF), %	71.4	84.5
Huevos de Helmintos, No./gramo seco	638	839

Fuente: ECOMAC, 2004.

De los datos en el Cuadro 8-6 se puede calcular la gravedad específica de los sólidos y los lodos, y la masa de sólidos secos en cada laguna así:

1. Calcular la gravedad específica de sólidos y lodos en cada laguna utilizando las Ecuaciones 8-6 y 8-7:

Facultativa I:

$$\frac{1}{GE_S} = \frac{SV}{1.0} + \frac{SF}{2.5} = \frac{0.286}{1.0} + \frac{0.714}{2.5} = 0.572; GE_S = 1.74$$

$$\frac{1}{GE_L} = \frac{ST}{GE_S} + \frac{(1-ST)}{1.0} = \frac{0.11}{1.74} + \frac{0.89}{1.0} = 0.953; GE_L = 1.05$$

Facultativa II:

$$\frac{1}{GE_S} = \frac{SV}{1.0} + \frac{SF}{2.5} = \frac{0.155}{1.0} + \frac{0.845}{2.5} = 0.493; GE_S = 2.028$$

$$\frac{1}{GE_L} = \frac{ST}{GE_S} + \frac{(1-ST)}{1.0} = \frac{0.111}{2.028} + \frac{0.889}{1.0} = 0.943; GE_L = 1.06$$

2. Calcular la masa de sólidos secos en cada laguna utilizando la Ecuación 8-8:

Facultativa I:

$$M_S = V_L \cdot \rho_{H_2O} \cdot GE_L \cdot ST = (1,500\text{m}^3) \cdot (1,000 \text{ kg/m}^3) \cdot (1.05) \cdot (0.110) = 173,250 \text{ kg} = 173.2 \text{ toneladas}$$

Facultativa II:

$$M_S = V_L \cdot \rho_{H_2O} \cdot GE_L \cdot ST = (1,827\text{m}^3) \cdot (1,000 \text{ kg/m}^3) \cdot (1.06) \cdot (0.111) = 214,965 \text{ kg} = 215.0 \text{ toneladas}$$

8.3.4 Estimación del Tiempo de Secado y Volumen Final de Lodos

1. Calcular el área del fondo de cada laguna con la Ecuación 8-12:

$$A_b = (l - 2iP) \cdot (a - 2iP) \quad (8-12)$$

donde A_b = área del fondo, m^2
 l = largo de la laguna, m
 a = ancho de la laguna, m
 P = profundidad de la laguna vacía de lodos, m
 i = relación horizontal/vertical del talud interior (generalmente $i = 3/1$)

Facultativa I y II:

$$A_b = (l - 2iP) \cdot (a - 2iP) = (85\text{m} - (2) \cdot (3) \cdot (1.8\text{m})) \cdot (50\text{m} - (2) \cdot (3) \cdot (1.8\text{m})) = 2,909 \text{ m}^2$$

2. Calcular la profundidad de lodos esparcidos por todo el fondo de las lagunas para el secado:

Facultativa I:

$$P_o = \frac{V_L}{A_b} = \frac{1,500\text{m}^3}{2,909\text{m}^2} = 0.52 \text{ m}$$

Facultativa II:

$$P_o = \frac{V_L}{A_b} = \frac{1,827\text{m}^3}{2,909\text{m}^2} = 0.63 \text{ m}$$

3. Determinar el valor de $(E_n - P_n)_{Min}$ de los datos del Cuadro 8-4:

$$(E_n - P_n)_{Min} = 0.0037 \text{ m/día}$$

4. Calcular el tiempo de secado utilizando la Ecuación 8-9 y asumiendo los lodos serán secados hasta el valor de los sólidos totales, ST_f , llega a 20%, el valor mínimo que permite sacar los lodos con equipo pesado (Franci, 1999). Se calcula entre las posibilidades de $k_e = 0.6$ (lodos no volteados) y 1.0 (lodos volteados de rutina). También, porque es posible que el drenaje puede remover fácilmente hasta 25% del agua removida de los lodos en una laguna sellada con arcilla a través de infiltración (Franci, 1999), se calcula con $D = 0$ y 0.25.

Facultativa I:

i) $k_e = 0.6$, $D = 0$:

$$t_S = \frac{P_o \cdot \left(1 - \frac{ST_o}{ST_f}\right) \cdot (1 - D)}{k_e \cdot (E_n - P_n)_{Min}} = \frac{(0.52\text{m}) \left(1 - \frac{0.11}{0.20}\right)}{(0.60)(0.0037\text{m/día})} = 105 \text{ días} > 90 \text{ días máximos}$$

ii) $k_e = 1.0$; $D = 0$:

$$t_S = \frac{P_o \cdot \left(1 - \frac{ST_o}{ST_f}\right) \cdot (1 - D)}{k_e \cdot (E_n - P_n)_{Min}} = \frac{(0.52\text{m}) \left(1 - \frac{0.11}{0.20}\right)}{(1.0)(0.0037\text{m/día})} = 63 \text{ días}$$

Facultativa II:

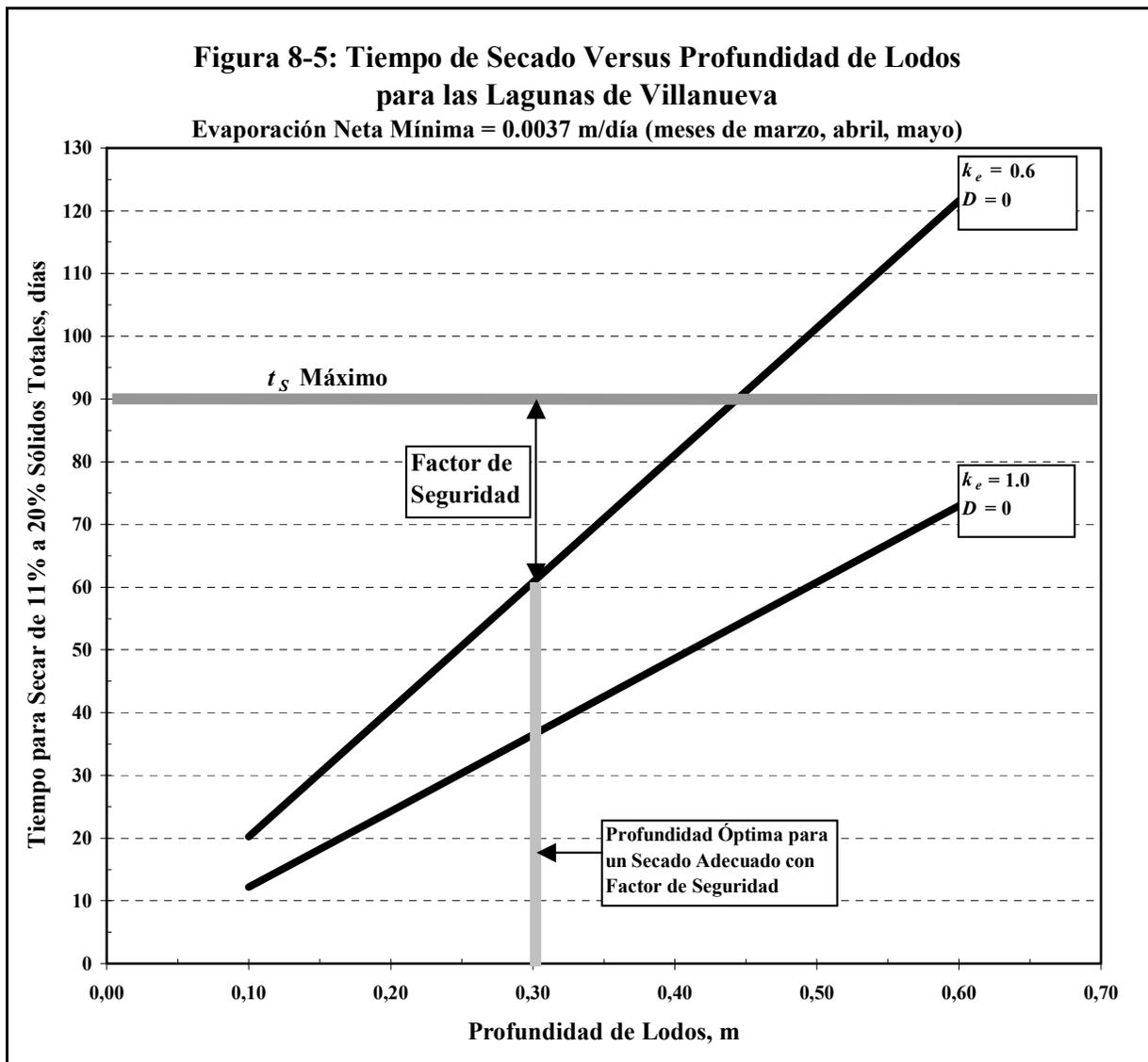
i) $k_e = 0.6$; $D = 0$:

$$t_S = \frac{P_o \cdot \left(1 - \frac{ST_o}{ST_f}\right) \cdot (1 - D)}{k_e \cdot (E_n - P_n)_{Min}} = \frac{(0.63\text{m}) \left(1 - \frac{0.111}{0.20}\right)}{(0.60)(0.0037\text{m/día})} = 126 \text{ días} > 90 \text{ días máximos}$$

ii) $k_e = 1.0$; $D = 0$:

$$t_S = \frac{P_o \cdot \left(1 - \frac{ST_o}{ST_f}\right) \cdot (1 - D)}{k_e \cdot (E_n - P_n)_{Min}} = \frac{(0.63\text{m}) \left(1 - \frac{0.11}{0.20}\right)}{(1.0)(0.0037\text{m/día})} = 76 \text{ días}$$

Los cálculos sugieren que la acumulación de lodos ha llegado casi al límite que permitiera su secado adecuado por evaporación sin infiltración; si existiera infiltración, el secado pasaría más rápido dentro de los límites de los meses de evaporación neta máxima. Por lo tanto, será muy importante esparcir los lodos por todo el fondo y voltearlos de rutina para que el valor de k_e approxime 1.0. En la Figura 8-5 se presentan la relación de tiempo de secado versus profundidad de lodos para $k_e = 0.6$ y 1.0 con $D = 0$ para los datos meteorológicos de Villanueva. Se concluye de la Figura 8-5 que la profundidad óptima para la próxima limpieza debe ser alrededor de 0.3m. En este caso el tiempo de secado, asumiendo el peor escenario con $k_e = 0.6$ y $D = 0$, sería 60 días con 30 días reservadas como un factor de seguridad (Figura 8-5).



5. Calcular el volumen final de lodos después del secado con las Ecuaciones 8-10 y 8-11.

Facultativa I:

$$P_f = P_o \cdot \left(\frac{ST_o}{ST_f} \right) = 0.52 \cdot \left(\frac{0.11}{0.20} \right) = 0.286 \text{ m}$$

$$V_f = P_f \cdot A_b = 0.286 \text{ m} \cdot (2,909 \text{ m}^2) = 832 \text{ m}^3$$

Facultativa II:

$$P_f = P_o \cdot \left(\frac{ST_o}{ST_f} \right) = 0.63 \cdot \left(\frac{0.111}{0.20} \right) = 0.350 \text{ m}$$

$$V_f = P_f \cdot A_b = 0.350 \text{ m} \cdot (2,909 \text{ m}^2) = 1,017 \text{ m}^3$$

Volumen Final para las Facultativas I y II:

$$V_{f(I+II)} = 832 + 1,017 = 1,849 \text{ m}^3$$

8.3.5 Plan de Trabajo

Desvío de Afluente y Su Impacto en el Funcionamiento del Sistema

Porque cada laguna ha llegado a su límite de acumulación de lodos, se recomienda drenar las dos lagunas juntas y desviar el afluente a las dos lagunas de maduración por un período máximo de 2 a 3 meses. Se puede justificar el desvío de las dos concurrentes por las siguientes razones:

- i) El volumen de las lagunas de maduración es igual del volumen de las facultativas y, por lo tanto, el funcionamiento de ellas deben ser parecidos a las lagunas facultativas.
- ii) Los datos de monitoreo de las lagunas facultativas muestran que están funcionando bien en términos de remoción de DBO_5 , sólidos suspendidos, y huevos de helmintos, a pesar que están sobrecargadas (ECOMAC, 2004). Como resultado, y especialmente porque están sobrecargadas, sería mejor desviar el caudal entre dos lagunas en paralelo en vez de una sola.

Drenaje de las Lagunas Facultativas

Se drena las lagunas utilizando un sifón en una esquina del lado de la descarga del efluente; si no existe suficiente carga para utilizar un sifón, se puede utilizar una bomba. Se drena la laguna desde la esquina para que la descarga no se lleve los lodos, la mayoría los cuales deberían estar depositados lejos de la esquina. El agua drenada debe ser descargada a la laguna de maduración.

Una vez que la laguna está vacía con la superficie de los lodos expuesta, se puede aprovechar el período de secado para construir un dispositivo de drenaje y una rampa para el acceso de equipo pesado.

Secado de Lodos

Se debe utilizar un tractor agrícola con arado o barrena horizontal para esparcir los lodos por todo el área del fondo de la laguna. También, se debe voltear los lodos cada cierto tiempo para maximizar el valor de k_e .

Limpieza de Lodos

Cuando los lodos están suficiente secos, se mete un cargador con rueda o oruga para la recolección de los lodos. Un cargador debe poder remover y poner en camiones el volumen final calculado, $1,800 \text{ m}^3$, fácilmente en 2 o 3 días de trabajo si los lodos estén suficiente secos. Como un punto de referencia, para las lagunas de San Juan en Lima, Perú, se utilizó un bulldózer D-6 en 20 horas de trabajo para mover y acondicionar $1,800 \text{ m}^3$ de lodos secos de una laguna de 2 hectáreas; el costo total fue US \$2,600, o US \$1.33/ m^3 (Julio Moscoso, CEPIS, comunicación personal).

Rellenado de las Lagunas

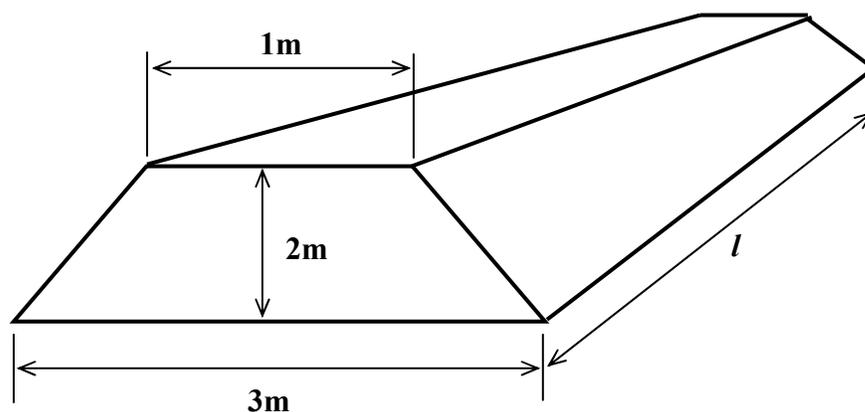
Una vez limpiadas, las dos lagunas deben estar rellenas inmediatamente con agua limpia y los caudales redirigidos a su diseño original.

Disposición Final de Lodos

Los lodos, por su contaminación con huevos de helmintos, deben estar almacenados por 1 año mínimo en la instalación. Antes de moverlos para cualquier uso o disposición diferente, se deben analizarlos para huevos vivos de helmintos.

El área requerida para el almacenaje de los lodos secados:

Se asume que los lodos estarán almacenados en pilas de 2 m de profundidad con el ancho de la base de 3 m y el ancho de la capa de 1 m como se ve en la sección transversal abajo (También véase las Fotos 8-4):



El largo, l , requerido de la pila sería

$$l = \frac{1,849\text{m}^3}{\left(\frac{3\text{m} + 1\text{m}}{2}\right) \cdot (2\text{m})} = 462 \text{ m}$$

Se podría utilizar 6 pilas, por ejemplo, de cada una con 77 m de largo. Con 0.5 m de espacio entre las pilas, el área requerida sería solamente 1,578 m² (77m x 20.2m), lo que sería menos que la mitad del área de una laguna facultativa. Se muestra esta área en la Figura 8-2.

Impactos Ambientales

El contratista debe desarrollar un programa de higiene ocupacional que incluye el lavado higiénico de equipo pesado, herramientas, botas y ropa de trabajadores para proteger la salud pública y evitar la transmisión de enfermedades relacionadas a excrementos, especialmente las de helmintos intestinales.

8.3.6 Comentario

Este estudio de caso muestra claramente la importancia de anticipar la acumulación de lodos y planear bien para su remoción antes de que llegue al límite de poder secarlos adecuadamente durante la época evaporación neta máxima. Si tuviera que removerlos mojados (por ser demasiado profundos para secar) con otros métodos discutidos adelante, el costo de remoción subiría significativamente. Todos los diseños de lagunas y los manuales de operación deben incluir planes detallados para la remoción de lodos, tomando en cuenta las condiciones meteorológicas locales.

El caso de Villanueva muestra claramente que cuando el sistema está sobrecargado, empeora el problema del manejo de los lodos acumulados. Tan pronto como sea posible la municipalidad de Villanueva debe programar la instalación de una canaleta Parshall prefabricada para medir los caudales y anticipar una expansión del sistema, y un desarenador para minimizar la carga de sólidos arenosos que llega a las lagunas primarias sobrecargadas.

8.4 Otros Métodos para Remover los Lodos Acumulados

El Cuadro 8-8 muestran todos los métodos que han sido utilizados para la remoción de lodos en lagunas primarias. Se puede clasificar los métodos entre los que requieren que la laguna esté fuera de servicio, y los que permiten que la laguna quede en operación (Franci, 1999). Con la excepción del método analizado en detalle en este capítulo—el secado completo con recolección con equipo—todos los demás métodos requieren lechos de secado y manejo adecuado de lixiviados porque el lodo sería todavía un líquido en vez de un sólido cuando se lo remueve de la laguna. Sin duda, la necesidad de lechos de secado con drenaje de lixiviado añade costos adicionales, manejo más complicado de lodos y lixiviados, y riesgos más altos de contaminación ambiental—el lixiviado estaría más contaminado que aguas residuales crudos en términos de DBO y concentraciones de patógenos. Sin embargo, si es posible que las lagunas primarias

Cuadro 8-8: Métodos para Remover los Lodos Acumulados de Lagunas Primarias

Método	Ventajas	Desventajas
<u>I. Laguna Fuera de Operación</u>		
Secado completo y recolección con equipo	Simplicidad de operación Método más económico	Tiempo de secado largo Laguna fuera de servicio
Secado parcial con empuje y bombeo o empuje y recoge con excavadora	Una solución apropiada cuando los lodos están demasiado profundos para secar completamente	Tiempo de secado largo Laguna fuera de servicio Necesidad de lechos de secado Manejo de lixiviados
<u>II. Laguna en Operación</u>		
Descarga hidráulica por tubería	Simplicidad operacional Bajo costo Laguna queda en operación	Carga hidráulica requerida Instalación del sistema Dispositivo de descarga tiene tendencia pegar Necesidad de lechos de secado Manejo de lixiviados
Camión de vacío	Simplicidad operacional Lodo transportado en el camión Laguna queda en operación	Costo de equipo Alcance de manguera Personal calificado Necesidad de lechos de secado Manejo de lixiviados
Draga	Laguna queda en operación	Costo de equipo Personal calificado Necesidad de lechos de secado Manejo de lixiviados
Bombeo por balsa	Laguna queda en operación	Costo de equipo Personal calificado Necesidad de lechos de secado Manejo de lixiviados

Adaptado de Franci (1999).

han llegado a su límite para el secado completo, como el caso de Villanueva, se recomienda un análisis de costos de todos los métodos, incluyendo el tratamiento y disposición final de los lodos y lixiviados, para seleccionar la solución más apropiada con menos costos.

Se pueden recomendar dos métodos adicionales para el caso de Villanueva si no se puede secar los lodos completamente: i) el secado parcial con empuje y bombeo o empuje con recoge con excavadora; y ii) el uso de camiones limpia fosa séptica.

El secado parcial sería una solución *in situ* si el secado completo estuviera atrasando. En este método se construye un sumidero en la esquina de la laguna donde permanecen la mayoría de lodos. En el pozo se pone una bomba sumergida de desplazamiento positivo para lodos de altas concentraciones de sólidos totales. Luego, se empuja los lodos por todo el fondo de la laguna hacia el sumidero con un tractor o excavadora de oruga, los cuales pueden mover a través de lodos mojados. Finalmente, se bombea continuamente los lodos a un lecho de secado construido cerca de la laguna; el lecho debe tener drenaje de lixiviado que pasa directamente a otra laguna para su tratamiento. Si los lodos han llegado a una consistencia más sólida que líquida, sería posible utilizar una excavadora para sacarlos; en este caso el operador de la excavadora tiene que ser capacitado en la excavación de lodos de lagunas.

El uso de camiones de vacío es factible si el equipo esté disponible y las mangueras alcanzan los lodos depositados. La municipalidad de León, Nicaragua, por ejemplo, ha utilizado un camión de vacío para sacar los sólidos arenosos del desarenador de la laguna facultativa de León (Fotos 8-6). Sin embargo, este método todavía requiere un lecho de secado con tratamiento de los lixiviados porque la concentración de sólidos totales en los lodos sería igual de lo que existe dentro de la laguna. Este método tiene la ventaja que la laguna puede quedar en operación.

Las Fotos 8-5 y 8-6 muestran ejemplos de algunos de los otros métodos mencionados.

8.5 Remoción de Lodos en las Lagunas de Estabilización en Estelí, Nicaragua

En el año 2003, como parte del Proyecto Integrado Estelí-Ocotal, que se realiza dentro del marco del Programa Regional para la Reconstrucción de América Central (PRRAC) financiado por la Unión Europea, se llevó a cabo la remoción de lodos en las lagunas de estabilización de la ciudad de Estelí, Nicaragua. Este trabajo es el único documentado en América Central sobre la remoción de lodos, y se presenta el estudio con los resultados en detalle en el Anexo IV.

Se experimentaron con el retiro de lodos secados a mano y con maquinaria, y también con el retiro de lodos mojados utilizando una balsa con bomba centrífuga. Los costos de remoción de lodos en las lagunas de Estelí (solamente la remoción de las lagunas y no la disposición final) varían entre € 1.45 a 2.90/m³, lo que hubiera sido en el año 2003 entre US \$ 1.70 a 3.40/m³ (1€ = 1.17 US \$). Estos costos no incluyeron la construcción de una laguna de secado utilizada con el retiro de lodos mojados con bombeo.



Fotos 8-5a: Un ejemplo del secado parcial con empuje por una excavadora y bombeo con una bomba sumergida de desplazamiento positivo. La bomba fue colocada en un sumidero construido por el contratista y los lodos bombeados a un lecho de secado al lado de laguna primaria (Véase las fotos seguidas). La excavadora solamente está empujando los lodos hacia el pozo de bombeo. (Municipalidad de Biggs, California)



Fotos 8-5b: El lecho de secado recibiendo los lodos bombeados de la laguna primaria (foto arriba) y los lodos dos meses después de secar (foto abajo). El lecho de secado fue construido con un drenaje para los lixiviados, lo que llevaba los lixiviados a la otra laguna en operación. Después de secar los lodos fueron llevados a un relleno sanitario. (Biggs, California)



Fotos 8-6: Otros métodos de remover lodos de lagunas primarias incluyen bombeo con camiones de vacío, los cuales son típicamente utilizados para la limpieza del alcantarillado en ciudades grandes, y dragas flotando en una balsa (foto abajo). Los dos métodos requieren la construcción de lechos de secados para los lodos y manejo de lixiviados. (Foto arriba: León, Nicaragua; abajo: Ciudad de Sacramento, California)

REFERENCIAS

- APHA (American Public Health Association), *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th Edition, American Public Health Association, Washington, D.C., 1995.
- Arceivala, S. J., *et al.* *Waste Stabilization Ponds: Design, Construction & Operation in India*, Central Public Health Engineering Research Institute, Nagpur, India, 1970.
- Arridge, H., *et al.*, *Vibrio Cholerae 01 and Salmonellae Removal Compared with the Die-Off of Faecal Indicator Organisms in Waste Stabilization Ponds in Northeast Brazil*, *Water Science and Technology*, Vol. 31, No. 12, pp. 249-256, 1995.
- Arthur, J. P., Notes on the Design and Operation of Waste Stabilization Ponds in Warm Climates of Developing Countries, Technical Paper No. 7, The World Bank, Washington, D.C., 1983.
- ASCE/WPCF (American Society of Civil Engineers/Water Pollution Control Federation), *Wastewater Treatment Plant Design*, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 36, New York, 1977.
- Babbitt, H. E. and Baumann, E. R., *Sewerage and Sewage Treatment*, Eighth Edition, John Wiley & Sons, New York, 1958.
- Bern, C., *et al.*, Epidemiologic Studies of *Cyclospora cayetanensis* in Guatemala, *Emerging Infectious Diseases*, Vol. 5, No. 6, pp. 766-774, November-December, 1999.
- Cairncross, S. and Feachem, R., *Environmental Health Engineering in the Tropics*, Wiley, New York, 1993.
- Carranza, G., *Selección Apropriada de Tecnologías de Tratamiento para Aguas Residuales Domésticas*, Tesis presentada a la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos, Guatemala, 1997.
- Castro de Esparza, M. L., *et al.*, Estudio Preliminar de la Remoción de *Vibrio cholerae* en Aguas Residuales Tratadas Mediante Lagunas de Estabilización, CEPIS/OPS, 27 de enero de 1992. (<http://www.cepis.org.pe/eswww/fulltext/repind57/epr/epr.html>)
- CEPIS/OPS (Centro Panamericano para Ingeniería Sanitaria/Organización Panamericana de la Salud), *Regional Project, Integrated Systems for the Treatment and Recycling of Waste Water in Latin America: Reality and Potential*, Lima, 2000.
- Cisneros, B. *et al.* (Sin Fecha) *Manual de Diseño de Lagunas de Estabilización*, Comisión Nacional del Agua, Distrito Federal, México.
- Czysz, W., *et al.*, *Manual de Disposición de Aguas Residuales*, CEPIS, OPS/OMS, Lima, Perú, 1991.

Cubillos, A., *Lagunas de Estabilización*, Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT), Mérida, Venezuela, 1994.

Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York, *Manual de Tratamiento de Aguas Negras*, Editorial LUMUSA, México, 1993.

ECOMAC, Informes de Monitoreo: Lagunas de Estabilización en Honduras, (11 Volúmenes) Proyecto Monitoreo de Sistemas de Estabilización de Tratamiento de Aguas Negras, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos), Mobile District, Tegucigalpa, 2004.

Egocheaga, L. y Moscoso, J. *Una Estrategia para la Gestión de las Aguas Residuales Domésticas*, CEPIS/OPS, Lima, 2004.

Feachem, R.G. *et al.*, *Sanitation and Disease: Health Aspects of Excreta and Wastewater Management*, The World Bank, Washington, D.C., 1983.

Fiore, A., Hepatitis A Transmitted by Food, *Clinical Infectious Diseases*, Vol. 38, pp. 705-715, 2004.

Franci, R. (Coordenação), *Gerenciamento do Lodo de Lagoas de Estabilização Não Mecanizadas*, Rede Cooperativa de Pesquisas, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.

Girard de Kaminsky, R., *El Parasitismo en Honduras*, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, OPS/OMS, Serie de Diagnósticos No. 14, Tegucigalpa, 1996.

Gloyna, E. F., *Waste Stabilization Ponds*, World Health Organization, Geneva, 1971.

Ho, A. Y., *et al.*, Outbreak of Cyclosporiasis Associated with Imported Raspberries, Philadelphia, Pennsylvania, 2000, *Emerging Infectious Disease*, Volume 8, No. 8, pp. 783-788, August 2002.

INAA (Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados), *Guía de Operación y Mantenimiento de Lagunas de Estabilización*, Departamento de Calidad del Agua, Gerencia de Normación Técnica, Managua, Nicaragua, 1996.

León, G. y Moscoso, J., *Curso de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales*, CEPIS, OPS/OMS, PUB96.20, Lima, Perú, 1996.

Lloyd, B. J., Leitner, A. R., Vorkas, C. A., y Guganesharajah, R. K., Under-Performance Evaluation and Rehabilitation Strategy for Waste Stabilization Ponds in Mexico, *Water Science and Technology*, Vol. 48, No. 2, pp. 35-43, 2003a.

Lloyd, B. J., Vorkas, C. A., y Guganesharajah, R. K., Reducing Hydraulic Short-Circuiting in Maturation Ponds to Maximize Pathogen Removal Using Channels and Wind Breaks, *Water Science and Technology*, Vol. 48, No. 2, pp. 153-162, 2003b.

- Mangelson, K. y Watters, G., Treatment Efficiency of Waste Stabilization Ponds, *Journal of the Sanitary Engineering Division*, Vol. 98, No. SA2, American Society of Civil Engineers (ASCE), pp. 407-425, 1972.
- Mara, D., *Sewage Treatment in Hot Climates*, John Wiley & Sons, New York, 1976.
- Mara, D. and Cairncross, S., *Guidelines for the Safe Use of Wastewater and Excreta in Agriculture and Aquaculture*, World Health Organization, Geneva, 1989.
- Mara, D. *et al.*, *Waste Stabilization Ponds: A Design Manual for Eastern Africa*, Lagoon Technology International, Leeds, England, 1992.
- Mara, D. and Pearson, H., *Design Manual for Waste Stabilization Ponds in Mediterranean Countries*, Lagoon Technology International, Leeds, England, 1998.
- Marais, G. v. R. y van Haandel, A. C., Design of Grit Channels Controlled by Parshall Flumes, *Water Science and Technology*, Vol. 33, No. 3, pp. 195—210, 1996.
- McGarry, M. y Pescod, M., Waste Stabilization Pond Criterion for Tropical Asia, Proceedings of the 2nd International Symposium on Waste Treatment Lagoons, pp. 114-132, University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA, 1970.
- Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*, Third Edition, McGraw-Hill, New York, 1991.
- Metcalf & Eddy, *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*, Fourth Edition, McGraw-Hill, New York, 2003.
- Middlebrooks, E. J., *et al.*, *Wastewater Stabilization Lagoon Design, Performance and Upgrading*, Macmillan, New York, 1982.
- MOPT (Ministerio de Obras Públicas y Transportes), *Depuración por Lagunaje de Aguas Residuales: Manual de Operadores*, Monografías de la Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y el Medio Ambiente, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, España, 1991.
- Nelson, K., Jiménez Cisneros, B., Tchobanoglous, G., y Darby, J., Sludge Accumulation, Characteristics, and Pathogen Inactivation in Four Primary Waste Stabilization Ponds in Central Mexico, *Water Research*, Vol. 38, pp. 111—127, 2004.
- Oakley, S. M., *Manual de Diseño, Operación y Mantenimiento para Lagunas de Estabilización en Centroamérica*, AIDIS/AGISA, ERIS/USAC, INFOM, UNICEF, OPS/OMS, CARE, Guatemala, 1998.
- Oakley, S. M. *Lagunas de Estabilización para Tratamiento de Aguas Negras: Las Experiencias de Honduras, Nicaragua, El Salvador y Guatemala*, Red Regional de Agua y Saneamiento de Centro América (RRAS-CA), Tegucigalpa, Honduras, Agosto, 1998.

Oakley, S. M., Pocasangre, A., Flores, C., Monge, J., Estrada, M., Waste Stabilization Pond Use in Central America: The Experiences of El Salvador, Guatemala, Honduras, and Nicaragua, *Water Science and Technology*, Vol. 42, Nos. 10-11, pp. 51-58, 2000.

Oakley, S. M., Monitoring of Wastewater Stabilization Ponds in Honduras, Proceedings of the XXIX Inter-American Congress of Sanitary and Environmental Engineering, Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria (AIDIS), San Juan, Puerto Rico, August 2004.

Organización Panamericana de Salud (OPS), *Las Condiciones de Salud en las Américas*, Publicación Científica No. 569, Volumen I y II, Washington, D.C., 1998.

Organización Panamericana de Salud (OPS), *Las Condiciones de Salud en las Américas*, Publicación Científica No. 587, Volumen I y II, Washington, D.C., 2002.

Oswald, W. J. and Gotaas, M., Photosynthesis in Sewage Treatment, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 122, pp. 73-105, 1957.

Oswald, W. J., Fundamental Factors in Stabilization Pond Design, *Advances in Biological Waste Treatment*, W. W. Eckenfelder and B. J. McCabe Editors, Macmillan, New York, pp. 357-393, 1963.

Reynolds, T. D. y Richards, P. A., *Unit Operations and Processes in Environmental Engineering*, Second Edition, PWS Publishing Company, Boston, 1996.

Rittmann, B. E. and McCarty, P. L. *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, McGraw-Hill, New York, 2001.

Rolim, S., *Sistemas de Lagunas de Estabilización*, McGraw-Hill, Bogotá, 2000.

Sáenz, R., *Lagunas de Estabilización y Otros Sistemas Simplificados para El Tratamiento de Aguas Residuales*, Manual DTIAPA No. C-14, Segunda Edición, CEPIS, Lima, Perú, 1985.

Salazar, D., *Guía para el Manejo de Excretas y Aguas Residuales Municipales*, Programa Ambiental Regional para Centroamérica (PROARCA/SIGMA), Guatemala, 2003.

Savioli, L., *et al.*, Intestinal Parasitic Infections: A Soluble Public Health Problem, *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*, 86, pp. 353-354, 1992.

Shilton, A. and Harrison, J., *Guidelines for the Hydraulic Design of Waste Stabilization Ponds*, Institute of Technology and Engineering, Massey University, Palmerston North, New Zealand, 2003.

Shuval, H.I. *et al.*, *Wastewater Irrigation in Developing Countries: Health Effects and Technical Solutions*, Technical Paper No. 51, The World Bank, Washington, D.C., 1986.

U.S. EPA, *Design Manual: Municipal Wastewater Stabilization Ponds*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-625/1-83-015, Washington, D.C., 1983.

U.S. EPA, *Design Manual: Dewatering Municipal Wastewater Sludges*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA-625/1-87/014, Cincinnati, Ohio, 1987.

Viceministerio de Vivienda y Construcción, *Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales*, Reglamento Nacional de Construcciones, Norma de Saneamiento S.090, Lima, Perú, 1997.

WEF (Water Environment Federation), *Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants*, Manual of Practice No. 11, Volume II, Second Edition, Alexandria, Virginia, USA, 1990.

WHO (World Health Organization) *Wastewater Stabilization Ponds: Principles of Planning and Practice*, WHO EMRO Technical Publication No. 10, World Health Organization, Regional Office for the Eastern Mediterranean, Alexandria, Egypt, 1987.

WHO (World Health Organization) *Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture*, Technical Report Series No. 778, World Health Organization, Geneva, 1989.

WHO/UNICEF, *Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report*, WHO/UNICEF, Joint Monitoring Programme for Water Supply and Sanitation, Geneva, 2000.

Yáñez, F., Reducción de Organismos Patógenos y Diseño de Lagunas de Estabilización en Países en Desarrollo, XIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), Santiago, Chile, noviembre de 1984.

Yáñez, F., *Lagunas de Estabilización: Teoría, Diseño, Evaluación, y Mantenimiento*, Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, Ministerio de Salud Pública, Quito, Ecuador, 1992.

Anexo I: Inventario de Lagunas de Estabilización en Honduras

Lagunas de Estabilización en las Municipalidades de Honduras

Instalación	Diseño	Condición
1. Amaratéca	Facultativa/Maduración	En operación. Muy poco mantenimiento.
2. Catacamas Este	Facultativa/Maduración	En operación. Mantenimiento aceptable.
3. Catacamas Oeste	Facultativa/Maduración 2 baterías	En operación. Mantenimiento aceptable
4. Ceiba Este	Facultativa/Maduración 2 baterías	En operación.
5. Ceiba Oeste	Aireada/Maduración	En operación. Sobrecargada. Mantenimiento aceptable.
6. Choloma	Facultativa/Maduración	En operación. Mantenimiento aceptable.
7. Choluteca	Facultativa/Maduración	Estación de bombeo. Abandonada después del Huracán Mitch y ahora en operación.
8. Danlí	Anaeróbica /Facultativa 2 anaeróbicas en paralelo	En operación. Mantenimiento aceptable
9. Juticalpa	Facultativa/Maduración 2 baterías	En operación sin mantenimiento adecuado. Estuvo abandonada.
10. Morocelí	Facultativa/Maduración	En operación. Muy poco mantenimiento
11. Nacaome	Facultativa/Maduración	Estación de bombeo. En operación. Estuvo abandonada.
12. Olanchito	Facultativa/Maduración	Abandonada.
13. Pajuiles	Facultativa/Maduración	En operación sin mantenimiento.
14. El Paraíso	Facultativa/Maduración	En operación.
15. El Progreso	Facultativa/Maduración 2 baterías	En operación. Estación de bombeo.
16. Puerto Cortés	Anaeróbica/Facultativa/Maduración 3 baterías	Estación de bombeo. Por iniciar construcción en 2004.
17. Roatán	Aireada/Facultativa	Estación de bombeo.
18. Santa Cruz de Yojoa	Facultativa/Maduración	En operación. Mantenimiento adecuado.
19. Tela	Anaeróbica/Facultativa/Maduración (La anaeróbica funciona como una facultativa por la carga baja.)	En operación. Mantenimiento aceptable. Estación de bombeo.
20. Trinidad	Facultativa/Maduración	En operación. Mantenimiento aceptable.
21. Villanueva	Facultativa/Maduración 2 baterías	En operación. Estuvo abandonada. Sobrecargada. Mantenimiento aceptable.

Anexo II: Recomendaciones del Comité Técnico Consejero Sobre el Proyecto de Monitoreo

SEMINARIO
RESULTADOS DE PROGRAMA DE MONITOREO DE LAGUNAS DE
ESTABILIZACIÓN EN HONDURAS
Tegucigalpa, 2 de Junio del 2,004

CAPITULO I:
SELECCIÓN DE PROCESOS, DISEÑO FISICO, y ESPECIFICACIONES TECNICAS

A. Selección de Procesos

Tomar las previsiones necesarias para las futuras ampliaciones de las plantas y para el secado de los lodos, aprovechando la ley de ordenamiento territorial, para evitar que existan futuras urbanizaciones en las zonas adyacentes.

Que se realicen los estudios geológicos y se hagan las pruebas de infiltración para cada diseño, pruebas de suelo, bancos de préstamo y distancias de acarreo.

Considerar las posibilidades para que las aguas del efluente sean utilizadas para el re-uso, especialmente en el riego, considerando el cumplimiento con las normas de calidad de agua para riego (OPS). Esto debe observarse como alternativa desde la fase de diseño.

Contemplar que las estructuras de salida de las lagunas tengan un diseño que permitan el vaciado completo de la laguna, como una alternativa de secado de lodos.

A partir de los lodos extraídos, desarrollar condiciones de espacio para la producción de compost.

Cuando se hagan los diseños se debe considerar la construcción de un vertedor de exceso de caudal para evitar la sobrecarga de las lagunas en épocas de altas precipitaciones pluviales.

Normar los procesos de diseño, a fin que se proceda a realizar revisiones de los mismos (Implementar una oficina especializada de tratamiento de aguas dentro de SANAA o ente regulador la responsabilidad de sistematizar los diseños.)

Reglamentar el pago de las inversiones fuera de sitio al momento de análisis de tarifas o cálculos de recuperación de la inversión, con esto se protege además la sostenibilidad de las acciones de operación y mantenimiento.

Investigación e identificación de los efluentes de las industrias, de forma que estas establezcan un pretratamiento respetando las normas de calidad de descargas en alcantarillado sanitario; con esto se garantiza que estos efluentes no inhiban el tratamiento biológico en las lagunas.

B. Diseño Físico

Reglamentar las conexiones ilícitas, la investigación de aguas lluvias y la caracterización de industrias.

Considerar la construcción de obra de medición de caudal, rejilla y desarenador, garantizando la operación diaria de la laguna con personal entrenado

Mantener en el cargo al personal de operación, sin que sean afectados por aspectos políticos.

Se debe considerar la medición de caudales a la entrada y salida, para el concluir sobre el balance hídrico en la laguna

Investigación de las condiciones climatológicas, considerando la precipitación, radiación solar, temperatura, velocidad y dirección del viento.

El periodo de retención en las lagunas facultativas sea de 10 días como mínimo, teniendo como referencia la remoción de patógenos especialmente helmintos.

Cuando no se disponga de terreno para expansión de tratamiento, se debe de optar por lagunas aireadas, a manera de una transición tecnológica, considerando el aspecto de decantación de sólidos posterior a la aeración.

Antes del diseño, practicar una evaluación ambiental para cada proyecto implicando las condiciones socioeconómicas del lugar.

Poner especial atención en la construcción de taludes, corona y rampas de acceso para remoción de lodos.

Construir la caseta de vigilancia con todos los servicios y equipo necesario para el desarrollo del trabajo; Esta debe estar estratégicamente ubicada dependiendo del tipo de lagunas operadas.

En cuanto al manejo de natas, es muy importante se considere la distancia del punto de deposición final y un equipo de traslado que reduzca el esfuerzo físico del operador.

Considerar el crecimiento de la población y el desarrollo de la comunidad, para optimizar la selección de procesos de tratamiento.

Para futuros diseños se recomienda que los procesos mínimos sea de dos módulos paralelos con entradas múltiples y cada uno con dos unidades en serie ideal tres.

El tiempo de retención mínimo será de tres días para lagunas anaeróbicas.

Considerar aspectos paisajísticos en los alrededores de las obras.

C. Especificaciones Técnicas

Que se revisen las normas y que se agregue el indicador de eficiencia de remoción de helmintos

Revisar el límite coliform fecal.

Que se certifiquen los laboratorios de análisis de calidad de agua

Que se definan los parámetros de control de procesos y se establezca la frecuencia y metodología de análisis del laboratorio.

Integrar un grupo interdisciplinario para la creación de las normas.

Estandarizar los procesos del muestreo y monitoreo

El diseño, y construcción deberán ser realizados con todas las especificaciones y por personal especializado.

CAPITULO II: PATÓGENOS INDICADORES Y NORMAS

A. Propuesta para Patógenos Indicadores

La propuesta del grupo esta encaminada a que se realicen los análisis de los patógenos *Streptococcus fecalis* y *Cryptosporidium* spp. por las siguientes razones:

1. Ambos grupos están normalizados por organizaciones de carácter internacional como la Organización Mundial de la Salud (OMS)
2. Los análisis son fáciles de realizar y los costos son bajos

Adicionalmente, se propone que se realice un Estudio Epidemiológico detallado de los Patógenos existentes en un sistema de tratamiento (lagunas de estabilización) en el ámbito nacional y determinar cual de ellos es el que presenta mayor incidencia y realizar las respectivas caracterizaciones de los cuerpos receptores

Tomando en cuenta que una de las limitantes existentes en el país es la falta de equipo de laboratorio especializado, el grupo somete a consideración de los organizadores del evento la inquietud de solicitar a un organismo internacional, en este caso AID, la donación de un equipo para la investigación de protozoarios patógenos, tanto para la zona norte como para la zona central mediante un convenio de asistencia del laboratorio receptor (personal capacitado, realización de análisis y monitoreo, resultados, etc) y ente donador (equipo, insumos, etc) por tiempo determinado.

B. Normas

Revisión de la Norma Actual para definir los parámetros y sus valores máximos permisibles según el tipo de descarga (industrial y domestico).

Caracterizar el cuerpo receptor

Agilizar la aprobación propuesta de la Norma Técnica para el re-uso de las aguas

Estandarizar los métodos de muestreo y análisis

Incluir dentro de la Norma Técnica la estandarización anterior

Revisión periódica de la Norma Técnica, por lo menos cada 5 años

CAPITULO III: SUSTENTABILIDAD

A. Aspectos Financieros

Prefactibilidad:

En esta etapa se deben considerar:

- 1) Calculo de la relación costo beneficio (ex ante)
- 2) Gestión financiera (ex ante)
- 3) Estudios de línea de base (determinar impactos sociales y calidad de vida).

Fortalecer la capacidad de las municipalidades en el aspecto del manejo administrativo y técnica de las direcciones que manejan los sistemas de servicios públicos. Esto permitirá crear las plataformas de información, planificación y gestión por parte de los técnicos involucrados además de conciencia y responsabilidad.

Los diseños de las plantas de tratamiento deberán ser de acorde a las capacidades instaladas en el gobierno local y la capacidad de los que serán responsables de la operación y mantenimiento de los sistemas. Esto preverá improvisaciones y futuras consecuencias negativas e inversiones muertas.

Descentralización de la prestación de los servicios es una alternativa que asegura el mantenimiento de los sistemas.

B. Acciones Operativas

Diseñar, preparar y validar manuales de operación de operación y mantenimiento para cada proyecto y las propiedades de cada medio ambiente y gobierno local en el que se inserta el proyecto.

Manual de operación
Manual de mantenimiento
Manual de seguridad e higiene
Manual de contingencias

Características de los manuales, del operador y registros:

Manuales:

Deben ser altamente descriptivos, ilustrados, con lenguaje sencillo, gráficos, atractivos y que puedan ser utilizados en el campo.

Perfil del operador directo:

El operador de los sistemas debe tener mínimo una formación de educación primaria (preferiblemente secundaria) y que posea un agudo sentido común y agilidad de acción en la resolución de problemas y contingencias.

Libro de registro:

Debe existir un libro de registro de todas las actividades administrativas y técnicas, problemas y contingencias diarias que permitan registrar los eventos para poder modificar la planificación de corto plazo y conocer los sucesos de monitoreo y operación que dan paso el buen funcionamiento de la planta de tratamiento. En caso de tener problemas, estos se registraran permitiendo la implementación de acciones correctivas en tiempo real. También favorece el análisis estadístico por parte del ingeniero responsable del sistema, para determinar parámetros de seguimiento y monitoreo.

C. Consideraciones Ambientales

Hecho: Las plantas de tratamiento en si mismas ya son una medida de mitigación de las ciudades en procura de tener un mejor ambiente.

Supuestos: La sustentabilidad ambiental es un efecto secundario del desarrollo de actividades financieras y operativas; por ende, este componente de sustentabilidad estará sujeto a las acciones de planificación y regulación oportunas.

D. Factibilidad Ambiental:

La municipalidad deberá desarrollar estudios previos a la construcción de la obra para viabilizar el sistema de acuerdo al marco jurídico regulatorio de la SERNA y otros entes normadores institucionales. Esta actividad podrá ser financiada y coordinada por el organismo ejecutor o la municipalidad con financiamiento externo.

La factibilidad ambiental depende de las características físicas, biológicas y susceptibilidad a desastres naturales. El estudio previo determinará el sitio ideal para poder ejecutar una obra de bajo impacto, que sea sustentable y evitando problemas legales.

E. Construcción

La supervisión encargada de la obra debe ser estricta en el cumplimiento de las medidas de mitigación por parte de la municipalidad.

La municipalidad deberá supervisar la implementación del plan de seguridad e higiene en el sitio de la construcción, particularmente en lo que respecta a la seguridad de los trabajadores del contratista.

La construcción deberá llevar a cabo las especificaciones técnicas de construcción a fin tener obras seguras y estandarizadas.

F. Evaluación y Monitoreo

Monitorear el proceso de mantenimiento y operación a través del cumplimiento de manual de operación y mantenimiento (reglamento y/o ordenanzas).

Medición de parámetros de calidad integral ambiental mediante protocolos validados y certificados de los afluentes y efluentes, controlando y regulando su calidad sobre la base de normas ya establecidas para la nación.

Monitoreo de la biodiversidad que coloniza el sistema y sus impactos adversos. Este diagnóstico será la base de las decisiones de manejo de aquellas poblaciones que son adversas para la sustentabilidad del sistema de tratamiento.

Establecer convenios de cooperación interinstitucional para llevar a cabo el monitoreo de calidad integral.

Planificar y ejecutar reuniones periódicas entre las municipalidades que manejan plantas de tratamiento para transferencias de información y generar economías de escala.

Tomar muy en consideración que la capacitación es un eje transversal en todas las modalidades de sustentabilidad, en su orientación a los diferentes niveles de administración y operatividad, en las instituciones ejecutoras como en el ámbito municipal.

Anexo III: Técnica para la Determinación y Cuantificación de Huevos de Helmintos

Técnica para la Determinación y Cuantificación de Huevos de Helmintos

1. Objetivo

Determinar y cuantificar huevos de helminto en lodos, afluentes y efluentes tratados.

2. Campo de aplicación

Es aplicable para la cuantificación de huevos de helminto en lodos, afluentes y efluentes de plantas de tratamiento.

3. Definiciones

- 3.1. 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 formas y tamaños variados.
- 3.2. Platielmintos: gusano dorsoventralmente aplanado, algunos de interés médico son: *taenia solium*, *hymenolepis nana* e *II. diminuta*, entre otros.
- 3.3. Nematelmintos: gusanos de cuerpo alargado y forma cilíndrica. Algunas especies enteroparásitas de humanos y animales son: *Ascaris lumbricoides*, *Toxocara canis*, *Enterobius vermicularis* y *Trichuris trichiura*, entre otros.
- 3.4. Método difásico: técnica de concentración que utiliza la combinación de dos reactivos no miscibles y donde las partículas (huevos, detritus), se orientan en función de su balance hidrofílico-lipofílico.
- 3.5. Método de flotación: técnica de concentración donde las partículas de interés permanecen en la superficie de soluciones cuya densidad es mayor. Por ejemplo la densidad de huevos de helminto se encuentra entre 1.05 a 1.18, mientras que los de flotación se sitúan entre 1.1 a 1.4.

4. Fundamento

Utiliza la combinación de los principios del método difásico y del método de flotación, obteniendo un rendimiento de un 90%, a partir de muestras artificiales contaminadas con huevos de helminto de áscaris.

5. Equipo

- Centrífuga: con intervalos de operación de 1,000 a 2,500 revoluciones por minuto
- Periodos de operación de 1 a 3 minutos
- Temperatura de operación 20 a 28 ° C
- Bomba de vacío: adaptada para control de velocidad de succión 1/3 hp
- Microscopio óptico: con iluminación Köheler
- Aumentos de 10 a 100 x; planta móvil; sistema de microfotografía

- Agitador de tubos: automático, adaptable con control de velocidad
- Parrilla eléctrica: con agitación
- Hidrómetro: con intervalo de medición de 1.1 a 1.4 g/cm³
- Temperatura de operación: 0 a 4 °C

6. Reactivos

- Sulfato de zinc heptahidratado
- Ácido sulfúrico
- Éter etílico
- Etanol
- Agua destilada
- Formaldehído

6.1. Sulfato de zinc heptahidratado

- fórmula
- sulfato de zinc 800 g
- agua destilada 1,000 ml

PREPARACION

Disolver 800 g de sulfato de zinc en 1,000 ml de agua destilada y agitar en la parrilla eléctrica hasta homogeneizar, medir la densidad con hidrómetro. Para lograr la densidad deseada agregar reactivo o agua, según sea el caso.

6.2. Solución alcohol-ácido

- fórmula
- ácido sulfúrico 0.1 N 650 ml
- etanol 350 ml

PREPARACION

Homogeneizar 650 ml de ácido sulfúrico al 0.1 N, con 350 ml del etanol para obtener un litro de la solución alcohol-ácida. Almacenarla en recipiente hermético.

7. Material

- Garrafones de 8 litros
- Tamiz N° 100 de (160 μ) de poro
- Probetas graduadas (1 litro y 50 ml)
- Gradillas para tubos de centrifuga de 50 ml
- Pipetas de 10 ml de plástico
- Aplicadores de madera
- Beaker de dos litros
- Guantes de plástico
- Beaker de un litro
- Propipetas

- Magneto
- Cámara de conteo Doncaster
- Celda Sedgwich-Rafter

8. Condiciones de la Muestra

1. Se transportarán al laboratorio en hieleras con bolsas refrigerantes o bolsas de hielo.
2. Los tiempos de conservación en refrigeración y transporte deben reducirse al mínimo.
3. Si no es posible refrigerar la muestra líquida, debe fijarse con 10 ml de formaldehído al 4% o procesarse dentro de las 48 horas de su toma.
4. Una muestra sólida debe refrigerarse y procesarse en el menor tiempo posible.

9. Interferencias

La sobreposición de estructuras y/o del detritus no eliminado en el sedimento, puede dificultar su lectura, en especial cuando se trata de muestras de lodo. En tal caso, es importante dividir el volumen en alícuotas que se consideren adecuadas.

10. Precauciones

1. Durante el procesado de la muestra, el analista debe utilizar guantes de plástico para evitar riesgo de infección.
2. Lavar y desinfectar el área de trabajo, así como el material utilizado por el analista.

11. Procedimiento

1. Muestreo

- a. Preparar recipientes de 8 litros, desinfectándolos con cloro, enjuagándolos con agua potable a chorro y con agua destilada.
- b. Tomar 5 litros de la muestra (ya sea del afluente o del efluente)
- c. En el caso de que la muestra se trate de lodo, preparar en las mismas condiciones recipientes de plástico de 1 litro con boca ancha.
- d. Tomar X gramos de materia fresca (húmeda) que corresponda a 10 g de materia seca.

2. Concentrado y centrifugado de la muestra

- a. La muestra se deja sedimentar durante tres horas o toda la noche
- b. El sobrenadante se aspira por vacío sin agitar el sedimento.
- c. Filtrar el sedimento sobre un tamiz de N° 100 de (160 μ), enjuagando también el recipiente donde se encontraba originalmente la muestra y lavar enseguida con 5 litros de agua (potable o destilada).
- d. Recibir el filtrado en los mismos recipientes de 8 litros.
- e. En caso de tratarse de lodos, la muestra se filtrará y enjuagará en las mismas condiciones iniciando a partir del inciso c.
- f. Dejar sedimentar durante tres horas o toda la noche.
- g. Aspirar el sobrenadante al máximo y depositar el sedimento en una botella de centrífuga de 250 ml, incluyendo de 2 a 3 enjuagues del recipiente de 8 litros.

- h. Centrifugar a 400 g por 3 minutos (1,400 a 2,000 rpm por 3 minutos, según la centrífuga).
- i. Decantar el sobrenadante por vacío (asegurarse de que exista la pastilla) y resuspender la pastilla en 150 ml de $ZnSO_4$ con una densidad de 1.3.
- j. Homogeneizar la pastilla con el agitador automático, o aplicador de madera.
- k. Centrifugar a 400 g por tres minutos (1,400 a 2,000 rpm por 3 minutos)
- l. Recuperar el sobrenadante vertiéndolo en un frasco de 2 litros y diluir cuando menos en un litro de agua destilada.
- m. Dejar sedimentar por 3 horas o toda la noche.
- n. Aspirar al máximo el sobrenadante por vacío y resuspender el sedimento agitado, verter el líquido resultante en 2 tubos de centrífuga de 50 ml y lavar de 2 a 3 veces con agua destilada el recipiente de 2 litros.
- o. Centrifugar a 480 g por 3 minutos (2,000 a 2,500 rpm por 3 minutos según la centrífuga)
- p. Reagrupar las pastillas en un tubo de 50 ml y centrifugar a 40 g por minutos (2,000 a 2,500 rpm por 3 minutos)
- q. Resuspender la pastilla en 15 ml de solución de alcohol-ácido (H_2SO_4 0.1 N) + C_2H_5OH a 33-35% y adicionar 10 ml de éter etílico.
- r. Agitar suavemente y abrir de vez en cuando los tubos para dejar escapar el gas (considerar que el éter es sumamente inflamable y tóxico).
- s. Centrifugar a 660 g por 3 minutos (2,500 a 3,000 rpm por 3 minutos, según la centrífuga)
- t. Aspirar al máximo el sobrenadante para dejar 1 ml de líquido, homogeneizar la pastilla y proceder a cuantificar.

3. Identificación y cuantificación de la muestra

- a. Distribuir todo el sedimento en una celda de Sedgwich-Rafter o bien en una cámara de conteo Doncaster.
- b. Realizar un barrido total al microscopio.

12. Cálculos

1. Para determinar las rpm de la centrífuga utilizada, la fórmula es:

G: fuerza relativa de centrifugación

K: constante cuyo valor es 89.456

R: radio de la centrífuga (spindle to the centre of the bracker) en cm

La fórmula para calcular g es:

2. Para determinar los resultados en número de huevecillos por litro, es importante tomar en cuenta el volumen y tipo de la muestra analizada.

13. Formato

No aplica.

Anexo IV: Experiencias en el Retiro de Lodos en las Lagunas en Estelí, Nicaragua

EXPERIENCIA EN EL RETIRO DE LODOS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN ESTELÍ, NICARAGUA



Ingenieros Arturo Coca (Director del Proyecto) e Italo E. Gandini (Experto Europeo)
Proyecto Integrado Estelí – Ocotal, Nicaragua
Programa Regional para la Reconstrucción de América Central (PRRAC)

Tegucigalpa

HONDURAS

Enero de 2005

EXPERIENCIA EN EL RETIRO DE LODOS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN EN ESTELÍ, NICARAGUA

Ingenieros Arturo Coca (Director del Proyecto) e Italo E. Gandini (Experto Europeo)
Proyecto Integrado Estelí – Ocotal, Nicaragua
Programa Regional para la Reconstrucción de América Central (PRRAC)

CONTENIDO

1. Introducción
2. Características de las lagunas de estabilización de Estelí
3. Determinación del volumen de lodos
4. Procedimiento de extracción por vía seca
5. Procedimiento de extracción por vía húmeda
6. Características de los lodos
7. Uso de los lodos
8. Costos
9. Conclusiones

1. Introducción

En los sistemas de tratamiento de aguas residuales (STAR) se producen lodos como resultados de la acción metabólica de los diferentes microorganismos que participan en la descomposición de la materia orgánica y de la sedimentación de los sólidos inorgánicos propios del agua residual (AR) cruda y de la mineralización de dicha materia orgánica.

En STAR compactos, tipo lodos activados o reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB en sus siglas en inglés), el retiro de los lodos o su recirculación, se realiza con una frecuencia corta de horas o días con volúmenes bajos y concentraciones del orden del 2 al 5%.

En STAR donde se utilizan lagunas el retiro de los lodos es menos frecuente y generalmente se realiza en un tiempo no menor a 5 años.

Esto último representa dos elementos a tener en cuenta en el diseño: un volumen para el tratamiento, adicional al requerido y la gestión para su retiro del cuenco de la laguna, unido a su disposición y utilización posterior.

Las ventajas que se obtienen en el manejo de los lodos son el menor volumen ($0.4 - 0.6 \text{ m}^3$ de lodos mojados / 1000 m^3 de AR contra $2.6 - 3.9 \text{ m}^3$ de un tratamiento secundario con digestión de lodos) y menor concentración de patógenos dado lo prolongado de su permanencia dentro de la laguna.

En el desarrollo del Proyecto Integrado Estelí – Ocotal que se realiza dentro del marco del Programa Regional para la Reconstrucción de América Central (PRRAC) financiado por la Unión Europea, se lleva adelante el Programa de Rehabilitación, Mejoramiento y Ampliación (RMA) del Sistema de Recolección y Tratamiento de las Aguas Residuales de la Ciudad de Estelí (ver Figura 1), localizada al norte Nicaragua.

Este programa contempla el incremento de la cobertura de la oferta de Saneamiento del radio urbano de la Ciudad de Estelí, entendiendo éste como la recolección y el tratamiento de las aguas servidas, de un 45% a casi un 100% de la población actual. Esto equivale a pasar de una población atendida de 45,000 habitantes a cerca de 100,000 habitantes en la hora actual, con proyecciones de atender en lo que a tratamiento se refiere, hasta 170,000 habitantes en el año 2020.

El tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Estelí que operaba al inicio del proyecto era el de lagunas de estabilización conformado por tres unidades en paralelo (ver Figura 2) cada una con una laguna primaria (facultativa) seguida de una laguna secundaria (aerobia).

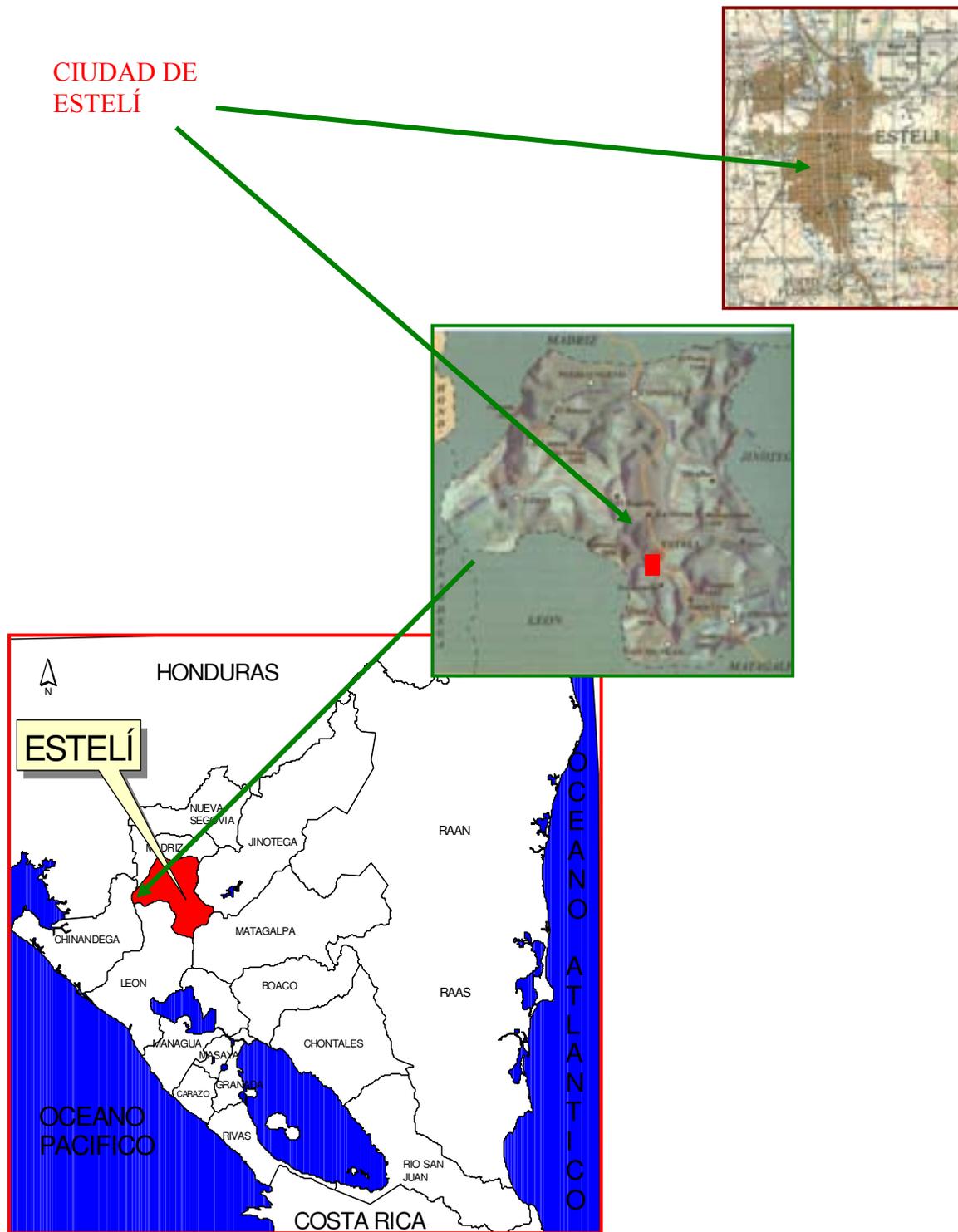


Figura 1—Ubicación de la ciudad de Estelí en Nicaragua



**Figura 2—Sistema de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Estelí
(antes de la RMA)**

Para llevar a cabo los trabajos de RMA del STAR fue necesario determinar la cantidad de lodos depositados en cada una de las seis lagunas, definir la forma como debían ser retirados y su disposición final.

Los trabajos de RMA del STAR consistieron básicamente en cambios en las estructuras de entrada y salida de todas las unidades, construcción de desagüe de las unidades del módulo A, impermeabilización de las lagunas del módulo A y construcción de Reactores Anaeróbicos Abiertos (RAA).

2. Características de las lagunas de estabilización de Estelí

Las características geométricas de las lagunas se muestran en el Cuadro N° 1.

CUADRO N° 1
DIMENSIONES DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE ESTELÍ

Unidad de tratamiento	Laguna primaria A	Laguna primaria B	Laguna primaria C	Laguna secundaria A	Laguna secundaria B	Laguna secundaria C
Largo (m)	187.00	177.50	183.50	135.00	130.50	132.00
Ancho (m)	61.75	53.00	57.00	52.75	48.00	51.30
Relación l/a	3.03	3.35	3.22	2.56	2.72	2.57
Largo (m) a la mitad	181.00	171.50	177.50	130.80	126.30	127.80
Ancho (m) a la mitad	55.75	47.00	51.00	48.55	43.80	47.10
Largo (m) en el fondo	175.00	165.50	171.50	126.60	122.10	123.60
Ancho (m) en el fondo	49.75	41.00	45.00	44.35	39.60	42.90
Profundidad (m)	2.00	2.00	2.00	1.40	1.40	1.40
Área (m ²)	11,547	9,408	10,460	7,121	6,264	6,772
Área media (m ²)	10,091	8,061	9,053	6,350	5,532	6,019
Área fondo (m ²)	8,706	6,786	7,718	5,615	4,835	5,302
Volumen (m ³)	20,206	16,145	18,129	8,899	7,753	8,435

3. Determinación del volumen de lodos

La determinación del volumen de lodos que se había depositado en cada una de las lagunas se realizó mediante batimetría del fondo de las lagunas, es decir la medición de la altura de los lodos acumulados utilizando para ello una barca que se desplazaba sobre una cuadrícula definida previamente y una regla graduada.

El estudio de batimetría se realizó durante una semana, se definieron superficies o cuadrículas de 10 metros (10 m por 10 m) en cada una de las lagunas. Se midió la altura de lodos en los puntos

de intercepción o ejes de las cuadrículas, las que definían o marcaban utilizando sogas que cruzaban de extremo a extremo y se movían de acuerdo a la dirección de la medición (ver Figura 3). Seguidamente se trazo el perfil del manto de lodos con las alturas medidas y se cálculo el volumen de lodos, en la cuadro 2 se detalla los resultados de la batimetría.

CUADRO N° 2
RESULTADOS DE MEDICIONES DE LODOS (BATIMETRÍA)

Módulo	Lagunas primarias			Lagunas secundarias			Total	
	Volumen de la laguna (m ³)	Volumen medido de lodo (m ³)	Porcentaje de volumen ocupado por los lodos (%)	Volumen de la laguna (m ³)	Volumen medido de lodo (m ³)	Porcentaje de volumen ocupado por los lodos (%)	Volumen medido de lodo (m ³)	Porcentaje de volumen ocupado por los lodos (%)
A	20.206	5.163,40	25,6	8.899	2.133,44	24	7.296,84	25
B	16.145	3.572,03	22,1	7.753	1.086,05	14	4.658,08	19,5
C	18.129	2.205,85	12,2	8.435	714,86	8,5	2.920,71	11
Total	54.480	10.941,28	20,1	25.087	3.934,35	15,7	14.875,63	18,7



Figura 3 – Operadores movilizándose en una laguna para medir la altura de lodos

4. Procedimiento de extracción por vía seca

Los trabajos de RMA se iniciaron con el módulo A comenzando por la extracción y disposición de los lodos de la laguna primaria y de la laguna secundaria.

- ✓ Utilizando maquinaria pesada
- ✓ De forma manual, con palas y caretillas

Las etapas cumplidas para el retiro de los lodos fueron:

- a. Interrupción de la unidad y sobrecarga de las otras dos unidades
- b. Reducción del volumen de agua mediante evaporación
- c. Reducción del volumen de agua mediante sifonamiento y bombeo (ver Figura 4)
- d. Secado de los lodos a la intemperie (ver Figuras 5)
- e. Retiro con maquinaria (ver Figuras 6 y 7)
- f. Retiro utilizando mano de obra (ver Figuras 8 y 9)

Las condiciones climatológicas durante el periodo fueron favorables en el sentido de no haberse presentado lluvias y tener una buena exposición solar.



Figura 4 – Extracción de agua por bombeo de laguna secundaria “A”

Figuras 5 – Lodos secándose a la intemperie en la laguna secundaria “A”



El tiempo que tomó cada actividad se presenta a continuación:

Año	2002	2003				
Mes	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May
a. Interrupción de la unidad y sobrecarga de las otras dos unidades						
b. Reducción del volumen de agua mediante evaporación						
c. Reducción del volumen de agua mediante sifonamiento y bombeo						
d. Secado de los lodos a la intemperie						
e. Retiro con maquinaria						
f. Retiro a mano						

Es importante recordar las dimensiones de las dos lagunas del módulo A en el cual se llevó a cabo este primer retiro de lodos:

Unidad de tratamiento	Laguna primaria A	Laguna secundaria A
Largo (m)	187.00	135.00
Ancho (m)	61.75	52.75
Relación l/a	3.03	2.56
Largo (m) a la mitad	181.00	130.80
Ancho (m) a la mitad	55.75	48.55
Largo (m) en el fondo	175.00	126.60
Ancho (m) en el fondo	49.75	44.35
Profundidad (m)	2.00	1.40
Área (m ²)	11,547	7,121
Área media (m ²)	10,091	6,350
Área fondo (m ²)	8,706	5,615
Volumen (m ³)	20,206	8,899

4.1 Retiro de lodos con maquinaria

Se utilizó maquinaria pesada en el primer tercio de la laguna primaria, donde se encontraba construidos unos desarenadores, o sea que la profundidad del lodo es mayor, lo que implicó una capa muy “gruesa” (más de 1 metro) haciendo el lodo muy difícil de secar.

No fue necesario dejar deshidratar totalmente los lodos, sólo hasta que los equipos puedan entrar en la laguna y que puedan maniobrar las palas mecánicas y tractores. El rendimiento por día es muy bueno (aproximadamente 170 m³/d). El costo por metro cúbico fue de 1,89 €. El inconveniente de éste método es que daña la capa impermeable de las lagunas, lo que implica un costo adicional para restablecer la capa, lo que comúnmente se hace con arcilla.



Figura 6 – Recogiendo lodos con maquinaria en la laguna primaria “A”



Figura 7 – Retirando lodos de la laguna primaria “A”

4.2 Retiro de los lodos manual

El lodo tiene que tener una consistencia de terrones para que pueda sacarse fácilmente, esto sólo se logró en las zonas donde la capa de lodos es delgada, hasta aproximadamente unos 40 cm. Una gran ventaja de éste método es que no se daña la capa impermeable del fondo de las lagunas. El rendimiento por día es regular (aproximadamente 68 m³/d). El costo por metro cúbico fue de 2,4 €.



Figuras 8 – Cargando lodos con carretilla y pala en laguna secundaria “A”



Figura 9 – Retirando lodos con carretilla de la laguna secundaria “A”

5. Procedimiento de extracción por vía húmeda

Continuando con el programa de RMA de los tres módulos del STAR era necesario buscar otra forma de retiro de los lodos de los dos faltantes (módulos B y C), que permitiera no depender de las condiciones meteorológicas para su extracción, ya que en el caso del módulo “A” los lodos no habían secado lo suficiente cuando se aproximaba la época de lluvias (mayo – octubre), lo que resultaba ser un factor determinante para la ejecución de las obras que se debían acometer.

Se optó por hacer el retiro por vía húmeda para lo cual se previeron en los pliegos de la licitación correspondiente a los trabajos de RMA de los módulos “B” y “C”, la construcción de un estanque para el recibo y secado de lodos, la utilización de una balsa con equipo de bombeo para la extracción y tubería de impulsión desde ésta hasta el estanque.

Las características de este sistema eran:

- Estanque (ver Figuras 10)
 - Volumen = 10.692.6 m³
 - Largo del fondo = 118,4 m
 - Largo de la superficie = 138,8 m
 - Ancho del fondo = 58,8 m
 - Ancho de la superficie = 78,3 m
 - Profundidad = 1,2 m
 - Relación de taludes = 1:1 (45°)

- Balsa (ver Figuras 11)
 - Largo = 8 m
 - Ancho = 6 m
 - Material = metálico

- Bomba (ver Figuras 11)
 - Tipo = centrífuga
 - Caudal = 400 gpm
 - Cabeza = 30 m

- Cabezal de succión (ver Figura 12)
 - Diámetro = 8 pulgadas
 - Largo = 4 m
 - Abertura = 1 pulgada

- Manguera de impulsión sobre el agua (ver Figura 13)
 - Material = Plástico flexible
 - Diámetro = 4 pulgadas
 - Flotadores = Barriles metálicos

- Tubería de impulsión (ver Figura 14)
 - Tipo = riego desarmable
 - Material = aluminio
 - Diámetro = 5 pulgadas
 - Longitud = variable (máximo = 350 m)



Figuras 10 – Construcción de estanque o lagunas para lodos



Figuras 11 – Balsa con bomba centrífuga para la extracción de lodos “vía húmeda”



Figura 12 – Cabezal de succión para bombeo de lodos acuosos



Figuras 13 –Manguera de impulsión sobre el agua



Figura 14 – Tubería de impulsión

El procedimiento establecido originalmente era el siguiente:

- Extraer los lodos de las cuatro lagunas (dos módulos cada una con una laguna primaria y una secundaria) en un tiempo no mayor a 1.5 meses.
- Iniciar con uno de los módulos sacándolo de servicio (se inició con la laguna primaria del módulo “B”)
- Bombear los lodos del fondo sin abatir previamente el nivel de agua.
- Recibir el agua lodo en el estanque (ver Figuras 15).
- Dejar sedimentar los lodos en el estanque durante un periodo no inferior a dos semanas.
- Retirar el agua del estanque hacia la salida del sistema.
- Dejar secar los lodos a la intemperie (ver Figura 16)
- Retirar.

El procedimiento de bombeo se inició previo los ajustes de varios elementos tales como el cabezal de succión y la manguera de impulsión colocadas sobre el agua.

Para comprobar que la balsa estaba “barriendo” toda la superficie del fondo se tendieron cables de acero (de 3/16 pulgadas) empotrados en los costados de la laguna cada 4 metros. Se abrió un orificio ubicado en la descarga de la bomba para verificar que se estaba sacando lodo y no sólo agua.



Figuras 15 – Lodos acuosos depositándose en la laguna de secado



Figura 17– Lodos secándose en la laguna

El procedimiento funcionó y se pudo extraer lodo e impulsarlo hasta el estanque de lodos, sin embargo, el rendimiento era muy bajo ($102 \text{ m}^3/\text{día}$) pues se extraía mucha agua, motivo por el cual se optó por reducir el tirante de agua (ver Figura 18) de la laguna.



Figura 18– Reducción de nivel de agua en la laguna primaria “A”

Esta reducción mejoró la eficiencia de extracción, pero no lo suficiente para permitir continuar con este procedimiento ya que llevaría mucho tiempo y retrasaría la continuidad de los trabajos, por tal motivo se optó por volver al método utilizado en el módulo A, es decir, sacar el agua y dejar secar a la intemperie los lodos (ver Figura 19), para su posterior retiro.



Figura 19 – Midiendo el volumen de lodos para sacarlos con maquinaria

6. Características de los lodos

Con el propósito de conocer las características de los lodos se realizaron ensayos de laboratorio para determinar tanto su composición química como biológica.

Los análisis que se realizaron son:

- ✓ Determinación de huevos de helmintos (muestra tomada el 05/03/2003 y análisis realizado en el laboratorio del CIRA – UNAN). *Módulo “A”*.
- ✓ Determinación de contenido de humedad (muestra tomada el 05/03/2003 y análisis realizado en el CIRA – UNAN). *Módulo “A”*.
- ✓ Determinación de las características físico químicas de los lodos (macronutrientes, micronutrientes, capacidad de intercambio catiónico, etc). Estas muestras se captaron cuando se estaban secando los lodos en las lagunas del módulo “A” el 05/03/2003 y las muestras se analizaron en el laboratorio de la Universidad Nacional Agraria (UNA) en el laboratorio de suelos y aguas. *Módulo “A”*.
- ✓ Determinación de cromo total: Las muestra se captaron de los depósitos de lodos que se extrajeron del módulo “A” en el 2003, la muestra fue captada el 30/06/2004 y el análisis realizado en los laboratorios del CIRA – UNAN. Se tomaron estas muestras para no tener sospechas que los lodos pudiesen contener cromo por alguna descarga de alguna tenería artesanal.

El muestreo para los lodos del módulo “A”, se realizó a la entrada y salida de la laguna primaria y secundaria. La muestra se tomó considerando una “columna de lodo”, para que la muestra fuese representativa (ver Figura 20).



Figura 20– Toma de muestra de los lodos de la laguna primaria “A” (entrada)

Es importante mencionar que de acuerdo los resultados de la UNA, con respecto a los macro y micronutrientes, los lodos extraídos de las lagunas del módulo “A” tienen muy buenas características para ser aprovechados como acondicionador de suelos (ver Cuadro 3).

De acuerdo a los resultados del cuadro 3, los macro y micro elementos en su mayoría se clasifican en el rango “alto” requeridos para suelos.

Con respecto a los análisis de huevos de helmintos (ver Cuadro 4), en la laguna primaria se hallaron huevos de éstos parásitos. Es importante mencionar que estos lodos tenían aproximadamente 60 días de secado al tomar la muestra, pero cuando éstos se comenzaron a retirar fue un mes más tarde y como medida preventiva no se utilizaron para cultivos de hortalizas.

**CUADRO 3 –
RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LOS LODOS DEL MÓDULO DE LAGUNA “A”**

Parámetro determinado	Lugar de toma de muestras				
	Entrada laguna primaria	Salida laguna primaria	Entrada laguna secundaria	Salida laguna secundaria	
pH	6,8	7,1	6,8	7,3	
Materia orgánica (%)	12,7	12,4	12,5	8,09	
Nitrógeno (%)	0,63	0,62	0,62	0,4.	
Potasio	(meq/100 g de suelo)	0,2	0,21	0,21	0,38
Calcio		2,67	2,88	2,8	3,06
Magnesio		1,64	1,5	1,53	1,87
Sodio		No detectado	No detectado	No detectado	No detectado
Capacidad de intercambio catiónico		46,79	44,84	47,44	41,36
Hierro	(mg/l)	17	31	14	63
Cobre		8	9	11	28
Zinc		4	7	8	10
Manganeso		16	30	11	50
Plomo		7,9	33,59	50,24	64,51
Fósforo		43,37	35,88	62,32	52,33
Azufre		193	217	223	231
Retención de humedad	CC	77	65	70	50
	IP	33	58	36	39
Plasticidad	LIP	88	66	75	49
	LSP	121	124	111	88
Partículas (%)	Arcilla	69,09	45,32	33,33	34,31
	Limo	13,76	46,43	61,45	30,87
	Arena	17,13	8,24	5,21	34,81
Clase textual	Arcilloso	Arcilla limosa	Franco arcillo limoso	Franco arcillo	

CUADRO 4 – RESUMEN DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LODOS

Lugar de la toma de muestra	Huevos de helmintos (H/g)*		Cromo total (µg/g)**
	Entrada	Salida	
Laguna primaria "A"	44	5	15,309
Laguna secundaria "A"	0	0	No se determinó
Laguna primaria "B"	No se determinó porque el CIRA actualmente ya no está realizando éste análisis (en lodos ni aguas) y no se conoce otro laboratorio confiable que realice esta determinación en Nicaragua.		18,431
Laguna primaria "C"			12,684
Laguna de secado de lodos			15,844

* H/g = huevos de parásitos de helmintos por gramo de muestra

** µg/g = Micro gramo de cromo por gramo de muestra

Del Cuadro 4, se observa que las concentraciones de cromo total son muy bajas, en comparación con los valores límites fijados por el Ministerio de Agricultura y Alimentación de España², que es de 1.000 a 1.200 (µg/g) para lodos destinados a utilizarse en actividades agrarias.

En el Cuadro 5 se presentan los resultados de los porcentajes de humedad determinados a las diferentes muestras de lodos.

CUADRO 5 – PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LOS LODOS

Porcentaje de humedad	Lugar de muestreo			
	Entrada laguna primaria	Salida laguna primaria	Entrada laguna secundaria	Salida laguna secundaria
Lodo superficial	78,24	66,01	72,55	42,89
Lodo en la parte inferior de la columna	75,47	63,1	65,71	79,03
Promedio	78,9	64,6	69,1	61

² http://www.fertiberia.com/información_fertilización/legislación/lodos/Real_Decreto.html

7. Uso de los lodos

Los lodos provenientes del módulo “A” fueron utilizados como acondicionar de suelo para cultivo de arboles frutales, jardines y café. Otra parte de lodos se utilizó en un vivero donde se cultivan plantas medicinales y se tiene información de los rendimientos de las plantas mejoraron muy notoriamente.

Los provenientes de los módulo “B” y “C” permanecen una parte en el estanque y otra en los terrenos del STAR y serán utilizados en la fertilización de los árboles y jardines que ahí se construirán.

8. Costos

	A		B		C	
	Primaria	Secundaria	Primaria	Secundaria	Primaria	Secundaria
Tiempo desde la último retiro de lodos (años)	9	9	5	5	4	4
Volumen según batimetría (m ³) (V _b)	5.163	2.133	3.572	1.086	2.206	715
Volumen retirado a mano (m ³)	453	1.073	0	0	0	0
Volumen retirado con máquina (m ³)	2.460	0	2.357	1.054	1.154	0
Volumen retirado con bombeo (m ³)	20	0	2.043	0	0	0
Volumen total retirado (V _r)	2.933	1.073	4.400			
Diferencia entre V _b y V _r	2.230	1.060	-828	32	1.152	715
Relación entre retirado y batimetría (%)	43%	50%	123%	97%	52%	0%
Costo del retiro a mano (€)	1.087,2	2.575,2	-	-	-	-
Costo del retiro con máquina (€)	4.723,2	-	4.784,71	2.139,6	2.342,6	0
Costo del retiro con bombeo (€)	-	-	2.962,4	-	-	-
Costo unitario del retiro a mano (€/m ³)	2,4	2,4	-	-	-	-
Costo unitario del retiro con maquina (€/m ³)	1,92	-	2,03	2,03	2,03	-
Costo unitario del retiro con bombeo (€/m ³)	-	-	1,45 (2,9) ¹	-	-	-

(1) Suponiendo un 50% del lodo medido en la batimetría

9. Conclusiones

- ◇ La forma de retiro de los lodos y las consecuencias que esto conlleva es una labor que se debe tener muy presente en el momento de elaborar el diseño del STAR.
- ◇ Las condiciones climáticas deben analizarse con detenimiento para estimar el tiempo requerido para el secado de los lodos.
- ◇ El retiro con maquinaria de los lodos ya desecados puede traer como resultados el deterioro de la impermeabilización del fondo.

- ◇ Previo al retiro a mano de los lodos se debe realizar ensayos de huevos de helmintos.
- ◇ Para el retiro a mano de los lodos desecados se deben tomar medidas para proteger al personal.
- ◇ El retiro a mano evita el posible deterioro de la impermeabilización.
- ◇ El retiro de lodos por vía húmeda es aconsejable pues se evita la sacada de servicio de la unidad.
- ◇ Para el retiro por vía húmeda es necesario contar con el equipo de bombeo apropiado.
- ◇ El retiro por vía húmeda debe ser contemplado cuando el equipo (balsa y bomba), se puedan utilizar para el retiro de lodos en varias lagunas.