

# Los sistemas de saneamiento de aguas en Tabasco

Optimización de procesos sustentables  
para la nueva regulación ambiental

Gaspar López Ocaña  
Nancy Estrada Pérez  
Carlos Alberto Torres Balcázar  
Rudy Solís Silván



UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

---

*Los sistemas de saneamiento  
de aguas en Tabasco*

*Optimización de procesos sustentables  
para la nueva regulación ambiental*

---

COLECCIÓN

JOSÉ N. ROVIROSA

*Biodiversidad, desarrollo sustentable y trópico húmedo*

---

*Guillermo Narváez Osorio*

Rector

*Arturo Garrido Mora*

Director de la División Académica  
de Ciencias Biológicas

---

*Los sistemas de saneamiento  
de aguas en Tabasco*

*Optimización de procesos sustentables  
para la nueva regulación ambiental*

---

*Gaspar López Ocaña  
Nancy Estrada Pérez  
Carlos Alberto Torres Balcázar  
Rudy Solís Silván*



**UNIVERSIDAD JUÁREZ  
AUTÓNOMA DE TABASCO**

♦  
"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



Primera edición digital, 2026

© Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

[www.ujat.mx](http://www.ujat.mx)

Para su publicación esta obra ha sido dictaminada por el sistema académico de “doble ciego”. Los juicios expresados son responsabilidad del autor o autores. El contenido de esta obra no podrá utilizarse para entrenar modelos de inteligencia artificial sin el consentimiento expreso de sus autores (o herederos) y de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

ISBN: 978-607-606-753-6

Maquetación y diseño de portada: Jazmín Zapata de la Cruz

Corrección y cuidado de la edición: Martín Eduardo Martínez y autores

*Hecho en Villahermosa, Tabasco, México*

# Índice

---

Agradecimientos .....	8
Presentación .....	9
<b>Capítulo 1</b>	
El saneamiento de agua sustentable .....	11
<b>Capítulo 2</b>	
Cumplimiento en materia ambiental de los sistemas de tratamiento .....	15
Regulación de descargas a cuerpos receptores .....	17
Regulación de descargas en sistemas de alcantarillado .....	20
Regulación del agua de reúso .....	21
Regulación de lodos y biosólidos generados de las aguas residuales .....	22
<b>Capítulo 3</b>	
El tratamiento de agua residual en Tabasco.....	24
<b>Capítulo 4</b>	
Características de las aguas residuales.....	30
<b>Capítulo 5</b>	
Trenes típicos de plantas de tratamiento que operan en Tabasco .....	34
PTAR con tanque Imhoff .....	35
PTAR con lagunas de estabilización .....	36
PTAR con humedales artificiales .....	38
PTAR con sistemas convencionales .....	39
PTAR con reactores anaerobios .....	41
PTAR con reactores RAFA .....	43

## **Capítulo 6**

<b>La evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales .....</b>	<b>45</b>
Evaluación física de las unidades de tratamiento.....	47
Caracterización volumétrica de las aguas residuales.....	48
Evaluación hidráulica de las unidades de tratamiento de la PTAR .....	49
Evaluación del equipo de bombeo.....	50
Eficiencia requerida del sistema y de proceso.....	52
Estimación de gastos teóricos para el diseño de PTAR .....	53

## **Capítulo 7**

<b>Optimización de procesos de sistemas de tratamiento recomendados para el estado de Tabasco .....</b>	<b>54</b>
Tren de tratamiento con tanque séptico-humedal artificial .....	56
Tren de tratamiento con RAFA-FBAH-ciénega.....	81
Tren de tratamiento con HAFL-HAFS-ciénega.....	108
Tren de tratamiento con laguna aireada-facultativa .....	128
<b>Consideraciones.....</b>	<b>143</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>144</b>
<b>Semblanzas.....</b>	<b>148</b>
<b>Glosario.....</b>	<b>152</b>

## Agradecimientos

---

Agradecemos la colaboración del Laboratorio de Tecnología del Agua de la DACBiol-UJAT, a los organismos operadores de los municipios y el estado por permitirnos contribuir a la mejora de los sistemas implementados para el saneamiento de sus aguas.

De manera especial, extendemos nuestro agradecimiento a los jóvenes que han sido parte de este trabajo como prestadores de servicio social, prácticas profesionales, tesistas de licenciatura, maestría y doctorado, pues al haber sido formados en nuestro Laboratorio de Tecnología del Agua, son el pilar para la conservación de este recurso para las futuras generaciones.

Finalmente, deseamos agradecer a nuestra alma mater, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ciencias Biológicas, por formarnos y brindarnos el cobijo necesario para la realización de este proyecto.

## Presentación

---

En el estado de Tabasco, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) están siendo abandonadas por haber cumplido con su vida útil y cada vez está decreciendo el número de plantas en operación. Ahora, con la nueva regulación ambiental, no solo se requieren de sistemas con bajos costos de instalación, operación y mantenimiento, sino también se requiere dar paso a la implementación de sistemas sustentables que puedan cumplir con los límites máximos permisibles que establece la nueva regulación ambiental (NOM-001-SEMARNAT-2021).

Los sistemas de tratamiento que se han implementado en Tabasco están conformados por tratamientos primarios, reactores anaerobios de primera y segunda generación (tanque Imhoff y reactores anaerobios de flujo ascendente), sistemas convencionales (lodos activados y filtro percolador), sistemas naturales (lagunas de estabilización y humedales artificiales) y sistemas híbridos que son la combinación de estas tecnologías con variantes de humedales artificiales.

Esta obra presenta recomendaciones para la optimización de las PTAR que todavía cuentan con vida útil, para que puedan cumplir con la nueva regulación ambiental, o aquellas que se deseen reconfigurar para continuar en operación. Los autores comparten experiencias de evaluaciones de los diversos sistemas de tratamiento que se encuentran en el estado, basándose principalmente en análisis hidráulicos, de procesos y de infraestructura existentes, aunados a recomendaciones de operación y mantenimiento. Por lo tanto, se presenta la memoria de cálculo de la ingeniería básica para dichos sistemas.

Por lo anterior, el presente documento brinda información actualizada y técnica relacionada a la mejora de las operaciones y procesos unitarios y nuevas mejoras implementadas en los trenes de tratamiento de aguas residuales más típicos del estado. La recopilación de datos de PTAR del estado —y las recomendaciones aquí expuestas— fue generada a través de investigaciones realizadas en el Laboratorio de Tecnología del Agua de la DACBiología-UJAT desde 2005 a la fecha.

Es importante considerar esta obra como apoyo para nuestros alumnos de licenciatura y posgrado que están interesados en las líneas de saneamiento de aguas residuales, pues se abordan temas directos en apoyo a materias como Operaciones y Procesos Unitarios y Diseño de Plantas de Aguas Residuales, las cuales se imparten en Ingeniería Ambiental y en la Maestría en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental de la División Académica de Ciencias Biológicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Del mismo modo, el presente material contribuirá a los organismos operadores de la entidad, estudiantes y profesores de otras instituciones para el estudio, opinión y propuesta de la optimización de sistemas de saneamiento rescatando la infraestructura existente, lo cual permite tener una alternativa para la mejora del tratamiento de aguas residuales rumbo a la sustentabilidad, así como una estrategia de mitigación/adaptación ante el cambio climático.

Capítulo 1

# El saneamiento de agua sustentable

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales en todo el mundo son insuficientes para atender las descargas de aguas residuales que genera la población mundial que hoy supera los 8,000 millones de habitantes, de acuerdo con las estimaciones más recientes de las Naciones Unidas (Worldometers, 2022). Estos sistemas están diseñados y construidos para tratar afluentes urbanos, rurales, de servicio o industriales, cuyos contaminantes contienen típicamente materia orgánica, patógenos, metales, nutrientes, compuestos tóxicos y contaminantes prioritarios, por lo que es necesario biodegradar, eliminar y separar dichas sustancias del agua antes de que se incorporen a los cuerpos receptores, devolviendo las mejores condiciones para no afectar los ecosistemas y la salud pública.

Aunque desde décadas pasadas se ha visto la necesidad de hacer un uso racional y eficiente de nuestros recursos naturales, como es el agua, la problemática o crisis del agua que hoy en día se ha presentado en México nos obliga a adoptar y desarrollar sistemas de tratamientos basadas en el desarrollo sustentable, es decir, amigables con el ambiente, económicos, factibles y socialmente aceptados, según lo establecido por la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (Comisión Bruntland, 1987). La escasez de agua que está afectado el desarrollo de la industria, la agricultura y los asentamientos humanos nos obliga a hacer un uso eficiente del agua, orientándonos hacia el ahorro y a un menor consumo de esta, por lo que la ingeniería sanitaria y ambiental de los diferentes órdenes de gobierno deben redoblar esfuerzos en la optimización de sus procesos y control de fugas, el reciclaje y el reúso del agua para diversos fines escalonados.

En México se busca aplicar la mejor tecnología técnica y económicamente disponible: BATEA (Best Available Technology Economically Available), adoptando soluciones en función a las necesidades de cada sitio (tipo de agua residual y calidad deseada en el efluente). BATEA establece que “se deben prevenir las descargas contaminantes al ambiente, reducirlas al mínimo y transformar estos a sustancias inocuas, adoptando el mejor tratamiento práctico y disponible” (Moeller y Escalante, 2021).

Frente a la crisis hídrica y con el objetivo de implementar la sustentabilidad, tanto la población como la industria deben priorizar la eliminación de contaminantes por selección de materias primas, modificando procesos, adoptando tecnologías limpias, monitoreando continuamente el sistema (gastos y concentración) y separar des-

cargas para tratar por separado y recuperar materiales para reúso, en medida de lo posible.

Los sistemas de tratamiento hoy están clasificados en función de las etapas de depuración, como son pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario (figura 1). El pretratamiento es aplicado para la eliminación de partículas gruesas voluminosas, arenas, grasas y aceites, homogenización y regulación de caudal. El tratamiento primario, por su parte, elimina sólidos sedimentables y suspendidos. El tratamiento secundario elimina materia orgánica soluble y sólidos coloidales no sedimentables. Finalmente, el tratamiento terciario elimina sustancias o materiales específicos (CONAGUA, 2019a).

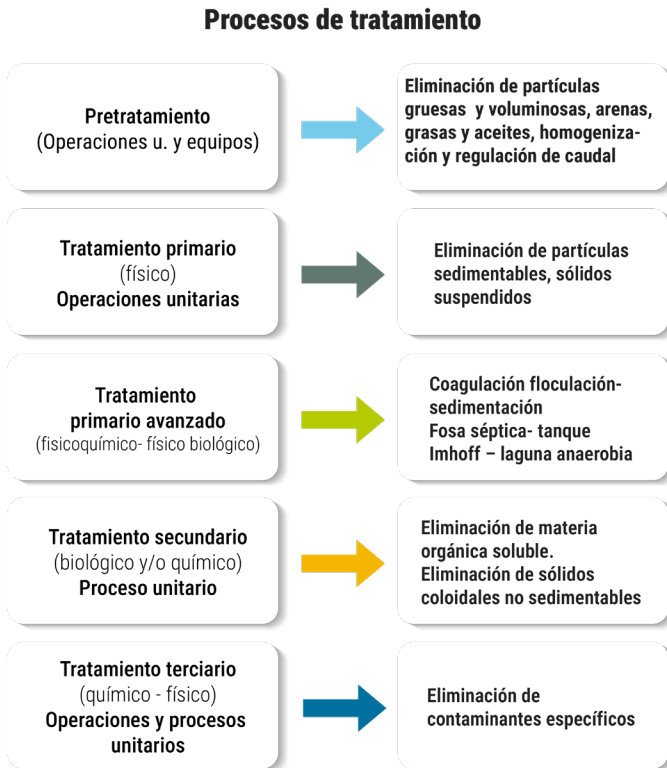


Figura 1. Procesos de tratamiento de aguas residuales y su función principal.

Fuente: elaboración propia.

Los sistemas de saneamiento para adaptarse a la sustentabilidad deben presentar eficiencias óptimas para cumplir con los criterios de descarga de la NOM-001-SEMARNAT-2021, además de mostrar viabilidad económica en operación y mantenimiento, que no utilicen sustancias químicas, generar ahorros en consumo de energía, amigables y armónicos con el ambiente, que contribuyan a la disminución y mitigación de los gases de efecto invernadero, faciliten la captura de carbono y establezcan una mejora en los ecosistemas con un impacto ambiental benéfico. En este sentido, las tecnologías naturales, las lagunas de estabilización, los humedales artificiales y las híbridas que contemplen una interacción de las naturales con convencionales son tendencias para implementarse como la alternativa más viable en comunidades urbanas, rurales y descentralizadas, pues generalmente mejoran el paisaje y biodiversidad de las áreas aledañas a este tipo de proyectos.

Capítulo 2

**Cumplimiento en materia  
ambiental de los sistemas  
de tratamiento**

El recurso agua en México se protege desde la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. El artículo 4 funda que: “toda persona tiene derecho a la protección de la salud”. En el artículo 27 se establece que “la propiedad de las tierras y aguas comprendida dentro de los límites del territorio nacional corresponde originalmente a la nación”. En este mismo, se establece que “se dictarán las medidas necesarias para evitar la destrucción de los elementos naturales y los daños que la propiedad pueda sufrir en perjuicio de la sociedad”. En el artículo 73 se confieren facultades al Congreso de la Unión para expedir leyes sobre el uso y aprovechamiento de las aguas de jurisdicción federal. El artículo 89 confiere poderes al presidente de la república para “promulgar y ejecutar las leyes que expida el Congreso de la Unión, proveyendo en la esfera administrativa a su exacta observancia”. El artículo 115 fija las bases del establecimiento del municipio libre. La fracción III indica los servicios públicos que están a cargo de los municipios y, en primer lugar, se menciona a los sistemas de agua potable y alcantarillado.

Se han promulgado leyes específicas para la protección de los recursos naturales y ecosistemas tales como la Ley Federal para Prevenir y Controlar la Contaminación Ambiental (1971), Ley Federal de Aguas (1972), Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (1988).

En la actualidad, las normas oficiales mexicanas (NOM) tienen aplicaciones directas en la protección de cuerpos receptores, los sistemas de alcantarillado, el agua tratada para su reúso y en las condiciones sanitarias para la disposición de los lodos provenientes de los sistemas de tratamiento. A continuación, se describen cada una de ellas discutiendo los contaminantes que regulan.

## **Regulación de descargas a cuerpos receptores**

La Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021 se actualizó a partir de marzo de 2022. Esta establece los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. Estos están definidos como contaminantes básicos, patógenos, parásitos, metales pesados y cianuros. También se establecen frecuencias de muestreo, análisis y métodos para su determinación. A continuación, en la tabla 1 se establecen los contaminantes básicos y en la tabla 2 los metales y cianuros.

Tabla 1

Límites permisibles de contaminantes básicos, patógenos y parásitos en diferentes cuerpos receptores

Parámetros (*) (mg/L, excepto cuando se especifique)	Ríos, arroyos, canales, drenes				Embalses, lagos y lagunas				Zonas marinas mexicanas				Suelo					
	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.	P.M.	P.D.	V.I.
Temperatura (°C)	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
Grasas y aceites	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21	15	18	21
SST	60	72	84	20	24	28	20	24	28	30	36	42	100	120	140	20	24	28
DQO	150	180	210	100	120	140	85	100	120	60	72	84	150	180	210	60	72	84
COT*	38	45	53	25	30	35	21	25	30	15	18	21	38	45	53	15	18	21
NT	25	30	35	15	25	30	25	30	35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	15	25	30
PT	15	18	21	5	10	15	15	18	21	NA	NA	NA	NA	NA	NA	5	10	15
H. de Helm. (huevos/litro)	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1								
E. coli. (NMP/100 ml)	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	250	500	600	50	100	200
E. fecales* (NMP/100 ml)	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	250	400	500	50	100	200
pH (UpH)	6-9																	
Color verdadero	Longitud de onda																	
	436 nm																	
	525 nm																	
	620 nm																	
Tox. aguda (UT)	2 a los 15 minutos de exposición																	
N.A.: no aplica; P.M.: promedio mensual; P.D.: promedio diario; V.I.: valor instantáneo; NMP: número más probable; UpH: unidades de pH; UT: unidades de toxicidad																		
* Si cloruros es menor a 1000 mg/L se analiza y reporta DQO.																		
* Si cloruros es mayor o igual a 1000 mg/L se analiza y reporta COT.																		
* Si la conductividad eléctrica es menor a 3500 µS/cm se analiza y reporta E. coli.																		
* Si la conductividad eléctrica es mayor o igual a 3500 µS/cm se analiza y reporta Enterococos fecales.																		
Las determinaciones de conductividad eléctrica y de cloruros no requieren la acreditación y aprobación de la entidad correspondiente.																		

**Tabla 2**  
*Límites permisibles para metales y cianuros en diferentes cuerpos receptores*

Parámetros (mg/L)	Ríos, arroyos, canales, drenes						Embalses, lagos y lagunas						Zonas marinas mexicanas						Suelo													
	P.M.		P.D.		V.I.		P.M.		P.D.		V.I.		P.M.		P.D.		V.I.		P.M.		P.D.		V.I.		P.M.		P.D.		V.I.			
	Riego de áreas verdes						Infiltración y otros riegos						Cársstico																			
Arsénico	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2	0.1	0.15	0.2			
Cadmio	0.2	0.3	0.4	0.1	0.15	0.2	0.2	0.3	0.4	0.05	0.075	0.1	0.1	0.15	0.2	0.05	0.075	0.1	0.1	0.15	0.2	0.05	0.075	0.1	0.1	0.15	0.2	0.05	0.075	0.1		
Cianuro	1	2	3	1	1.5	2	2	2.50	3	2	2.5	3	1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2	1	1.5	2		
Cobre	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6	4	5	6		
Cromo	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	1	1.25	1.5	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1		
Mercurio	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.01	0.015	0.02	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01	0.005	0.008	0.01		
Níquel	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4	2	3	4		
Plomo	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.5	0.75	1	0.5	0.75	1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4		
Zinc	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20	10	15	20		
<b>Parámetros medidos de manera total</b>	P.M.: promedio mensual P.D.: promedio diario V.I.: valor instantáneo																															

Fuente: NOM-001-SEMARNAT-2021.

## Regulación de descargas en sistemas de alcantarillado

La Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado (no ha sido actualizada), y esta tiene el objetivo de prevenir y controlar la contaminación de las aguas municipales que a través del alcantarillado municipal llegarán a un sistema de tratamiento. Aquí se establece que no se deben descargar o depositar en el alcantarillado sustancias o residuos peligrosos conforme lo establecen las normas oficiales mexicanas correspondientes. Del mismo modo, esta norma faculta a municipios para fijar condiciones particulares a responsables de descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado de manera individual o colectiva, estableciendo: 1) nuevos LMP de descarga de contaminantes, y 2) LMP para parámetros adicionales no contemplados en esta norma, debiendo estar sustentado por estudios específicos, presentados por los afectados o por el municipio competente (tabla 3).

**Tabla 3**

*Límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes básicos y metales en alcantarillado*

Parámetros (mg/L, excepto cuando se especifique otra)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Temperatura (°C)			40
Sólidos sedim. (ml/L)	5	7.5	10
pH (UpH)			6-10
Grasas y aceites	50	75	100
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8

Parámetros (mg/L, excepto cuando se especifique otra)	Promedio mensual	Promedio diario	Instantáneo
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Fuente: NOM-002-SEMARNAT-1996.

## Regulación del agua de reúso

La Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, aplica LMP de contaminantes en aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público; protege al medio ambiente y la salud poblacional. Si el servicio al público se realiza por terceros, estos son responsables del cumplimiento, desde la producción (tratamiento) hasta su reúso o entrega (conducción y transporte) (tabla 4).

**Tabla 4**

*Límites máximos permisibles (LMP) de contaminantes en agua de reúso*

Tipo de reúso	Promedio mensual				
	Col. fecales NMP/100 ml	Huevos de helmintos (h/L)	Grasas y aceites mg/L	DBO5 mg/L	SST mg/L
Servicios al público con contacto directo	240	≤ 1	15	20	20
Servicios al público con contacto indirecto u ocasional	1,000	≤ 5	15	30	3

Fuente: NOM-003-SEMARNAT-1997.

## Regulación de lodos y biosólidos generados de las aguas residuales

La Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, de protección ambiental, establece especificaciones y LMP de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final. Los LMP de metales pesados se establecen en la tabla 5.

**Tabla 5**

*Límites máximos permisibles (LMP) para metales pesados en biosólidos*

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1,200	3,000
Cobre	1,500	4,300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2,800	7,500

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002.

Los LMP de patógenos y parásitos en los lodos y biosólidos se establecen en la tabla siguiente.

**Tabla 6**

*Límites máximos permisibles (LMP) para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos*

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1,000	Menor de 3	Menor de 10

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
C	Menor de 2,000,000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables; NMP: número más probable.

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002.

El aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la tabla 7, y su contenido de humedad hasta el 85 %.

**Tabla 7**

*Aprovechamiento de biosólidos*

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase B y C
Excelente o bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase C
Excelente o bueno	C	Usos forestales Mejoramientos de suelos Usos agrícolas

Fuente: NOM-004-SEMARNAT-2002.

Capítulo 3

# El tratamiento de agua residual en Tabasco

En el caso de Tabasco, el tratamiento de aguas residuales está compuesto en su mayoría por sistemas de tratamiento primario. Los sistemas secundarios de tratamiento no son suficientes para dar cobertura a las principales localidades del estado.

Para el año 2006, el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Tabasco (SAPAET), reportó que existían 93 plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que fueron construidas en el periodo de 1975 a 2006, teniendo un gasto de diseño (Qd) de 2201 L/s, pero en operación con un gasto (Qo) de 1015 L/s. Las PTAR en operación eran 60 y fuera de operación 33 (93 PTAR en total); de las que operaban 30 estaban a cargo de SAPAET, 58 por los ayuntamientos y 5 por particulares. Las tecnologías de tratamiento en ese periodo fueron lagunas de estabilización (13), tanque Imhoff (48), biofiltros anaerobios (17), lodos activados (6), filtro biológico (1), filtros rociadores (2), humedales artificiales (2), zanja de oxidación (1) y reactores anaerobios de flujo ascendente RAFA (3) (SAPAET, 2006; CONAGUA, 2006).

Para el año 2012, la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS) realizó la actualización de las PTAR en el estado, reportando que en operación se encontraban 139 sistemas con un Qd de 4353 L/s y operando con un Qo de 1766 L/s. Las tecnologías reportadas fueron tanques Imhoff (65), biofiltros (22), RAFA (13), lagunas de estabilización (13), humedales artificiales (9), lodos activados (7), bioenzimáticos (5), filtros rociadores (2), biodigestor (1), lagunas aireadas (1), zanja de oxidación (1) (CEAS, 2012).

Para el año 2016, la CONAGUA actualizó el inventario de las PTAR en Tabasco, reportando que el número de PTAR es de 138, teniendo una capacidad instalada de Qd 4437.93 L/s, con un Qo de 2565.43 L/s, estando activas 80, de baja 1 y fuera de operación 57. Las tecnologías de tratamiento instaladas son: anaerobio (3), biológico (6), filtros rociadores (10), humedales artificiales (6), lagunas aireadas (2), lagunas de estabilización (15), lodos activados (7), primario avanzado (2), primario o sedimentación (1), RAFA (4), RAFA + humedal (2), bioenzimático (4), tanque Imhoff (69), Tanque Imhoff + filtro biológico (5), tanque Imhoff + humedal (1) y zanja de oxidación (1) (CONAGUA, 2016).

En el último inventario de CONAGUA (2020), se reportó que Tabasco cuenta con un total de 69 PTAR en operación, con una capacidad instalada de 2776 L/s y Qo de 2009 L/s, siendo los procesos anaerobio (6), biológicos (3), biodiscos (1), filtros percoladores (1),

humedales artificiales (6), lagunas aireadas (2), lagunas de estabilización (9), otros (1), lodos activados (3), primario avanzado (1), RAFA + filtro biológico (1), RAFA + humedal artificial (1), tanque Imhoff (28), tanque Imhoff + filtro biológico (2) y tanque Imhoff + Wetland (4) (CONAGUA, 2020).

Con estos antecedentes, podemos observar que actualmente el estado de Tabasco presenta una crisis en el saneamiento de las aguas residuales, pues en los últimos diez años, en los que se alcanzó el mayor número de PTAR en el estado (2012-2022), estas se han reducido en un 49.64 %. Para 2016 se alcanzó el máximo  $Q_0$  con 2565.43 L/s y para 2020 el  $Q_0$  fue de 2009 L/s, reduciéndose un 21.69 %, lo cual pone en riesgo la calidad y biodisponibilidad del recurso agua de las fuentes de abastecimiento para agua potable, ya que estas, generalmente, son los cuerpos receptores de las aguas residuales.

Una revisión de los gastos de operación actual de plantas potabilizadoras en el estado (tabla 8), muestran que en la actualidad el abastecimiento de agua potable es de 11,045.5 L/s, y que estas, después de ser usadas por diversas actividades humanas, típicamente se convierten en aguas residuales en alrededor de un 80 %, por lo que se estima que se estarían generándose alrededor de 8,836.4 L/s (tabla 9). Bajo esta estimación de aguas residuales y considerando el  $Q_0$  actual de las PTAR en operación a 2020, solo se trata el 22.73 % del agua residual generada en el estado. Con ello corroboramos la crisis y vulnerabilidad de nuestras fuentes de abastecimiento de agua potable. Bajo el análisis anterior se sugiere, en primera instancia, lograr la operación del 100 % de las PTAR ya instaladas, para posteriormente dar pie a instalar sistemas con mayor cobertura en el manejo y tratamiento de las aguas residuales en comunidades urbanas y rurales de nuestro estado.

**Tabla 8**

*Abastecimiento de agua potable estimado a 2020 en Tabasco (Q en L/s)*

Municipio	Cabecera	Localidades	Total
Balancán	85	258	343
Cárdenas	350	570	920
Centla	80	45	125
Centro	2,090	1,753	3,843
Comalcalco	135	455	590

Municipio	Cabecera	Localidades	Total
Cunduacán	100	568	668
Emiliano Zapata	50	311.5	361.5
Huimanguillo	95	362	457
Jalapa	50	174	224
Jalpa	60	185	245
Jonuta	50	145	195
Macuspana	300	599	899
Nacajuca	80	612	692
Paraíso	100	186	286
Tacotalpa	50	281	331
Teapa	312	173	485
Tenosique	200	181	381
Estado	4,187	6,858.5	11,045.5

Fuente: elaboración propia a partir de datos de suministro por potabilizadoras y pozos operados en las localidades urbanas y rurales.

Como consecuencia de la falta de sistemas de tratamiento para las principales localidades del estado, se están teniendo efectos inmediatos en los cuerpos receptores como ríos, arroyos, lagunas, humedales naturales, zona costera y suelos; entre estos podemos considerar la afectación a comunidades bióticas de los cuerpos receptores (animal y vegetal), la pérdida de calidad de vida en ecosistemas, zona urbana y zona conurbana, y pérdida en la valoración económica de las áreas de asentamientos humanos por efectos directos de los xenobióticos.

**Tabla 9**

*Aguas residuales estimadas para 2020 en Tabasco (Q en L/s)*

Municipio	Cabecera	Localidades	Total
Balancán	68	206.4	274.4
Cárdenas	280	456	736
Centla	64	36	100
Centro	1,672	1,402.4	3,074.4
Comalcalco	108	364	472
Cunduacán	80	454.4	534.4
Emiliano Zapata	40	249.2	289.2

Municipio	Cabecera	Localidades	Total
Huimanguillo	76	289.6	365.6
Jalapa	40	139.2	179.2
Jalpa	48	148	196
Jonuta	40	116	156
Macuspana	240	479.2	719.2
Nacajuca	64	489.6	553.6
Paraíso	80	148.8	228.8
Tacotalpa	40	224.8	264.8
Teapa	249.6	138.4	388
Tenosique	160	144.8	304.8
Estado	3,349.6	5,486.8	8,836.4

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, es importante reiterar los problemas típicos que se presentan en las PTAR son:

- Falta de seguimiento a los proyectos y obras que han iniciado en un periodo y se deben de concluir en otro, pues no hay continuidad entre los periodos de gestión gubernamental, ya sea municipal, estatal o federal.
- Abandono de obras que no inician operación por problemas técnicos, operativos, políticos, sociales, etc.
- Falta de asignación de recursos a las PTAR para su mantenimiento preventivo, correctivo y su adecuada operación después de su arranque.
- Cambio de los diseños originales durante el periodo de construcción sin tomar en cuenta el proyecto ejecutivo inicial (justificados y no justificados).
- Construcción de obras sin contar con proyectos ejecutivos integrales serios que deben de incluir múltiples disciplinas que aseguren la viabilidad, seguridad y eficiencia del proyecto y que incluyan: estudios estructurales, estudios geotécnicos, estudios hidrológicos, estudios funcionales, estudios de proceso, proyectos eléctricos y mecánicos, estudio de impacto ambiental, proyección financiera y análisis de costos, plan de operación y mantenimiento y cumplimiento normativo, además de falta de personal capacitado y especializado para

la correcta operación de los sistemas, lo que generalmente está asociado a los salarios bajos.

- Poca armonía de colaboración entre los organismos reguladores y operativos (federal, estatal y municipal).

Capítulo 4

# Características de las aguas residuales

Tabasco se integra por cuatro regiones productivas. En ese sentido, se identificaron las características de aguas residuales por los municipios que las componen. “La región Centro: la integran los municipios Centro, Nacajuca y Jalpa de Méndez; Chontalpa: Huimanguillo, Cárdenas, Comalcalco, Paraíso y Cunduacán; Sierra: Teapa, Jalapa y Tacotalpa; Pantanos: Centla, Jonuta y Macuspana y los ríos: Emiliano Zapata, Balancán y Tenosique” (Gobierno del Estado de Tabasco, 2022).

De marzo de 2022 a abril de 2023 el Laboratorio de Tecnología del Agua de la DACBIOL-UJAT realizó monitoreos de calidad del agua de las descargas de las principales cabeceras municipales de las regiones de Tabasco. Los resultados del monitoreo de aguas residuales para las diferentes regiones del estado de Tabasco se muestran en la tabla 10.

Con estos resultados podemos establecer que las regiones de la Sierra y Pantanos presentan características de agua residual con concentración media, según lo establece Tchobanoglous (Metcalf y Eddy, 2003), pues los rangos de  $\text{DBO}_5$  están entre 220 y 400 mg/L y entre 500 y 1000 mg/L para DQO. Las aguas residuales presentes en las regiones de Centro, Chontalpa y Ríos están en la categoría de aguas residuales con concentración alta del criterio establecido por Tchobanoglous (2003), es decir, las concentraciones de  $\text{DBO}_5$  son mayores a 400 mg/L y mayores a 1000 mg/L para la DQO.

De esta forma, la relación  $\text{DBO}/\text{DQO}$  para las aguas residuales en las regiones de Tabasco están en un rango de 0.37 a 0.44. Crites y Tchobanoglous (2000), establecen que si la relación  $\text{DBO}/\text{DQO}$  está entre 0 y 0.3, el agua es de difícil degradación, por lo que el tratamiento debe ser fisicoquímico por su toxicidad; si el agua ( $\text{DBO}/\text{DQO}$ ) está en un rango de 0.3 a 0.5, esta es de difícil degradación, siendo el tratamiento fisicoquímico o anaerobio el que mejor les favorece. Finalmente, si el agua es de 0.5 a 1.0 o más ( $\text{DBO}/\text{DQO}$ ) esta es de fácil degradación, las tecnologías más recomendadas para su tratamiento son las aerobias o naturales. A continuación, la figura 2 presenta un agua de fácil degradación.

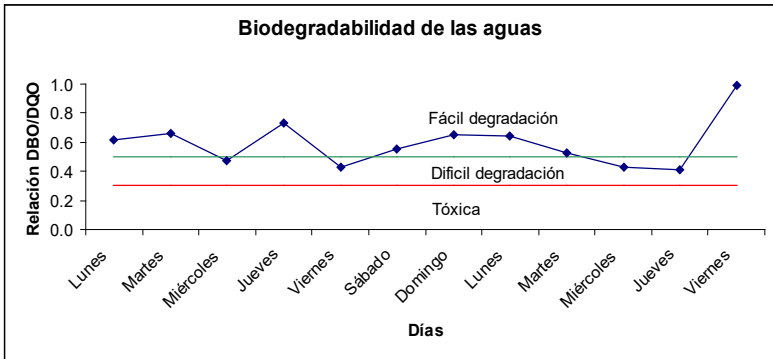


Figura 2. Biodegradabilidad de las aguas residuales de la localidad de Morelos, Macuspana, Tabasco.  
Fuente: Escobedo et al. (2010).

Con estos resultados podemos ordenar, de mayor a menor concentración de contaminantes, en: Centro, Chontalpa, Ríos, Sierra y Pantanos, correspondiendo esta contaminación a la población presente en cada localidad, así como al poder adquisitivo y uso de sustancias en las actividades antropogénicas dentro de sus hogares.

Es importante aclarar que generalmente las aguas residuales cambian sus características en función de modificaciones de consumo, poder adquisitivo, establecimiento de industrias y crecimiento poblacional, entre otros factores, por lo que siempre será necesario implementar estudios de calidad del agua con variaciones estacionales para conocer contaminantes atípicos, variaciones de carga y caudal, de manera que se permita seleccionar la mejor combinación de operaciones y procesos unitarios para establecer la mejor vía para el tratamiento de aguas residuales en cada caso particular.

Tabla 10

## Características de las aguas residuales domésticas en las regiones del estado de Tabasco (N=10)

Parámetro	Unidad	Método	Centro (N=3)		Chontalpa (N=5)		Sierra(N=3)		Pantanos (N=3)		Ríos (N=3)	
			X	DE	X	DE	X	DE	X	DE	X	DE
Temperatura del agua	°C	SM 2550	26.9	0.9	25.1	4.1	25.8	1.1	28.6	0.1	28.4	1.4
Turbiedad	UNT	SM 2130 B	166.8	37.0	147.8	52.1	82.0	21.4	96.4	21.9	121.7	21.8
Color	UC	APHA 2120	2,039	287	1,839	731	879	272	855	290	755	291
OD	ppm	SM 4500-OG	2.8	1.1	2.7	1.2	3.4	1.6	2.59	1.5	2.3	1.5
pH	U pH	SM 9040 B	7.5	0.2	7.7	0.1	7.5	0.2	7.27	0.4	7.6	0.1
CE	µS/cm	SM 2510 B	990	208	815	325	528	39	560	100	719	115
SDT	ppm	SM 2540	494	103	357	200	265	21	276	52	360	58
Sol. Sed.	ml/L	NMX-AA-004-SCFI-2000	<0.1	0.0	<0.1	0.0	<0.1	0.0	<0.1	0.0	<0.1	0.0
SST	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001	450	100	399	140	167	57	125	59	328	60
DBO5	mg/L	SM 4500-OG	565	114	459	160	290	65	243	67	375	67
DQO	mg/L	USEPA 410.4	1,284	285	1137	401	777	164	658	168	936	168
NT	mg/L	NMX-AA-026-SCFI-2001	109	24	96	34	40	14	30	14	79	14
PT	mg/L	NMX-AA-029-SCFI-2001	19	4	17	6	7	2	5	2	14	2
Col. Fec.	NMP/100mL	NMX-AA-42-1987	144,550	14,027	135,804	17,805	85,001	26,901	102,228	20,528	112,237	32,652
G y A	mg/L	NMX-AA-005-SCFI-2000	204.8	45.4	181.4	64.0	76.1	26.2	56.9	26.9	149.3	26.8
M. Flotante		NMX-AA-006-SCFI-2000	Presente		Presente		Presente		Presente		Presente	
Cianuro	mg/L	Standard Method	0.4	0.2	0.0	0.0	1.1	0.7	1.0	0.6	0.6	0.1
Cobre	mg/L	Bicinchinato	1.1	0.9	3.0	1.5	4.7	2.2	5.8	0.7	5.4	0.3
Plomo	mg/L	PAN	1.1	0.3	0.5	0.0	0.8	0.6	1.3	0.2	1.5	0.1
Cromo	µg/L	ASTM D1687-92	0.7	0.3	0.7	0.3	0.6	0.3	0.7	0.3	0.8	0.1
Níquel	mg/L	PAN	2.6	1.4	2.3	0.3	4.2	1.9	3.5	1.6	3.3	0.2
Zinc	mg/L	Zincon	4.7	3.2	7.4	1.7	9.3	5.0	12.5	3.1	10.7	0.5

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 5

# Trenes típicos de plantas de tratamiento que operan en Tabasco

El sistema de tratamiento de aguas residuales más empleado en el estado de Tabasco es el tanque Imhoff. Durante el inventario del año 2020, esta tecnología tenía una cobertura del 49.3 % en las 34 PTAR instaladas, para un gasto de 253.7 L/s, siendo un 12.6 % del volumen agua residual tratada en el estado (CONAGUA, 2020). Típicamente el tipo de PTAR más empleada cuenta con un cárcamo con pretratamiento básico (rejillas y desarenador), el tanque Imhoff y la desinfección con cloro; los lodos son separados (purga) para su deshidratación en un lecho de secado. El segundo tipo de PTAR utilizada incluye después del tanque Imhoff un biofiltro anaerobio horizontal con medio de soporte de escombros de construcción y el tercer tipo de PTAR incluye como postratamiento al tanque Imhoff un humedal artificial horizontal que puede ser de flujo libre (con hidrófita flotante) o flujo subsuperficial (con hidrófita emergente y grava de 1" de diámetro).

## **PTAR con tanque Imhoff**

Uno de los problemas comunes en estas PTAR es que no existe una ingeniería de procesos en sus rehabilitaciones, pues los tiempos de retención hidráulica (TRH) en la mayoría de las plantas solo consideran un tiempo necesario para separar SST como unidades de sedimentación, cuando el tanque Imhoff puede incluir una degradación anaerobia removiendo de un 40 a 60 % de la materia orgánica con TRH mayores (6 a 72 horas) (CONAGUA, 2019b); para el caso de los biofiltros y humedales que se han implementado como postratamiento en la optimización de estos procesos del tratamiento, no cumplen con los TRH para la eliminación de DBO o DQO, por lo que es necesario conocer concentraciones de influentes, efluentes (LMP), gastos, TRH y cinética de degradación para obtener la eficiencia requerida del proceso. Otro problema típico es que presentan subdimensionamiento en las tuberías de interconexión en líneas de agua y sobre todo en lodos, provocando el taponamiento de las líneas de descarga de lodos quedando fuera de operación estas líneas. En la figura 3 se muestra el diagrama de las PTAR de tanque Imhoff, que básicamente se encuentran en el estado de Tabasco. El tren de agua consta de pretratamiento, tratamiento primario y secundario. El tren de lodos solo aplica en la deshidratación (CONAGUA, 2020).

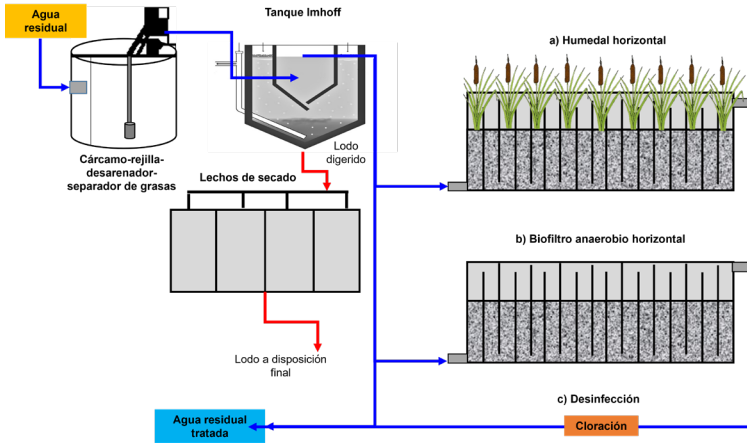


Figura 3. Diagrama de procesos de tanques Imhoff.

Fuente: elaboración propia.

## PTAR con lagunas de estabilización

El segundo sistema de tratamiento de aguas residuales empleado en el estado de Tabasco es el de las lagunas de estabilización. Desde 2020 ocupan el 15.9 % como tecnología aplicada en el estado con 11 PTAR que tratan un gasto de 849 L/s, siendo un 42.3 % del volumen tratado en el estado. Estos sistemas son nobles, pues son capaces de soportar variaciones de carga, temperatura y caudal. Están integradas con pretratamiento (rejillas-desarenador), laguna anaerobia, laguna facultativa y desinfección (cloro), mientras que otras incluyen la desinfección natural mediante lagunas de pulimento (CONAGUA, 2019c). La mayoría de las PTAR no son operadas con responsabilidad social, ambiental y técnica; estas no cumplen con los niveles de descarga en la eliminación de materia orgánica por lo que los efluentes son superiores a 30 mg/L de DBO, lo que provoca que se formen compuestos tóxicos como las monocloroaminas, tricloroaminas y trihalometanos, sustancias tóxicas, carcinogénicas y teratogénicas (Ramírez, 2005; CONAGUA, 2019d). Por lo anterior, se sugiere cambiar la desinfección convencional a lagunas de pulimento

con un biofiltro anaerobio al final para controlar la presencia de algas en el efluente.

Estos sistemas no cuentan regularmente con mantenimiento preventivo y correctivo, y en los proyectos ejecutivos no presentan estudios de calidad del agua indicando los tipos de sedimentos o sólidos, no hay cálculos de azolve y hacen falta programas para la evacuación del material colmatado. Al no haber mantenimiento, las lagunas se llenan de vegetación macrófita, material que tampoco es removido, provocando la disminución del volumen de las lagunas y del TRH de las mismas (7 a 21 días), provocando un cortocircuito (Vázquez y López, 2011), disminuyendo la eficiencia de la PTAR y, en ocasiones, incrementando la concentración en el efluente, llegando a ser mayor que la concentración de entrada, presentándose una eficiencia negativa (-) en el proceso. La figura 4 presenta trenes típicos en el estado de Tabasco de lagunas de estabilización. El material depositado en las lagunas después de dos años está digerido, por lo que se deben eliminar a los patógenos y disponerse de manera segura si cumple con lo establecido en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

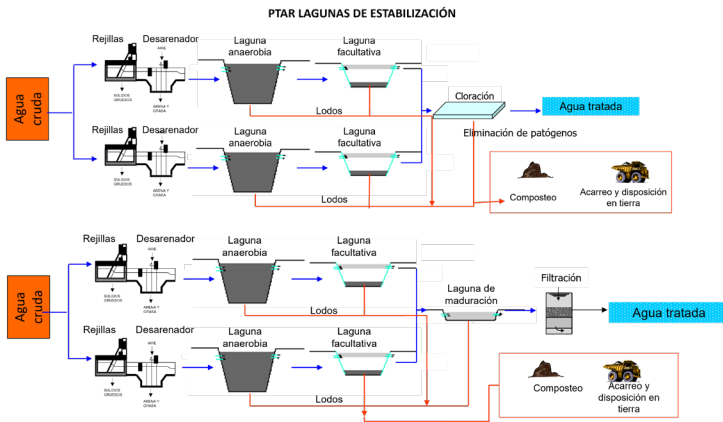


Figura 4. Diagrama de procesos de lagunas de estabilización.  
Fuente: elaboración propia.

## PTAR con humedales artificiales

El tercer sistema de tratamiento de aguas residuales empleado en el estado de Tabasco son los humedales artificiales (Wetlands). Desde 2020 ocupan el 8.7 % como tecnología aplicada en el estado con seis PTAR que tratan un gasto de 687 L/s, siendo un 34.2 % del volumen tratado en el estado (CONAGUA, 2020).

Esta alternativa se está implementando y aplicando como pos-tratamiento de PTAR, que cuentan con tratamiento primario básico o reactores anaerobios de primera y segunda generación. Hay combinaciones humedales de flujo libre, subsuperficial, de estanque y verticales (CONAGUA, 2019e). Esta ha presentado ciertas dificultades, como por ejemplo, se construyen humedales con especies y materiales de soporte que no son de la zona, por lo que se han introducido especies que han presentado implicaciones ecológicas de importancia, esto incrementa costos de construcción y operación en estas PTAR. Los medios de soporte son un factor importante en la vida útil, y ello, aunado a la falta de mantenimiento preventivo y correctivo, provoca la colmatación de las celdas, disminuyen el TRH y, como consecuencia final, disminuyen la vida útil del humedal.

Otro problema es que en las PTAR que cuentan con especie *Thypha sp.*, por tener características de poca humedad y contener un poder calorífico entre 5,000 y 6,000 Kcal/kg, se convierten en combustible, provocando que se incendien celdas de humedales en los meses de estiaje. Este problema puede evitarse si se cuenta con un programa de mantenimiento preventivo de poda, cosecha y retiro de la biomasa vegetal de manera rutinaria. Estos sistemas, al igual que otros, solo cuentan con presupuesto de operación durante los primeros tres años y posteriormente se dejan en abandono por considerar que no requieren mantenimiento por ser tecnologías naturales. Los operadores de estos sistemas deben poseer, además de conocimientos técnicos y de laboratorio, conocimientos en el manejo de la especie, manejo de fauna, control de plagas, hidráulica subsuperficial, entre otros. La figura 5 muestra los trenes típicos de humedales que operan en Tabasco (CONAGUA, 2019e).

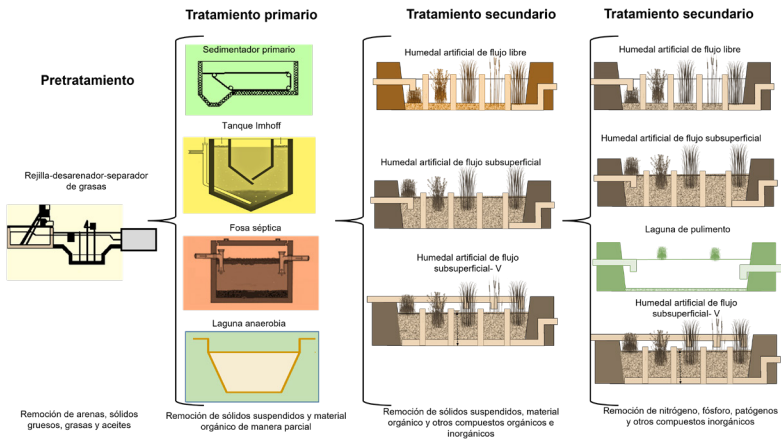


Figura 5. Diagrama de procesos de humedales artificiales.

Fuente: elaboración propia.

## PTAR con sistemas convencionales

El cuarto sistema de tratamiento de aguas residuales más empleado en el estado de Tabasco es el denominado convencional (lodos activados, filtros percoladores biodiscos y primario avanzado). Desde 2020 ocupa el 8.7 % como tecnología aplicada en el estado con seis PTAR que operan un gasto de 118 L/s, siendo un 5.9 % del volumen tratado en el estado (CONAGUA, 2020). La biopelícula fija (microorganismos con 3 mm de espesor) trata las aguas residuales, oxidando la materia orgánica (degradación) al hacerla circular a través de un soporte o medio poroso sólido, donde estos microorganismos están adheridos. Los TRH van desde las 8 horas para el desdoble de materia orgánica y hasta 16 para la eliminación de nutrientes (CONAGUA, 2019f).

La PTAR de filtro percolador que se encuentra operando en Tabasco es la Planta Guanajay en el municipio de Paraíso, y se construyó en 1987 por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). La planta fue diseñada para tratar cargas de DBO de 280 mg/L, SST de 250 mg/L y un gasto de 60 L/s. Actualmente se presentan concentraciones de 320 a 550 mg/L de DBO, de 300 mg/L de SST y se presentan gastos superiores a 120 L/s (figura 4). Hidráulicamente, la

PTAR ya se vio rebasada y el volumen máximo que podría soportar es de 80 L/s por cada módulo, sin embargo, la generación de agua de la ciudad sobrepasa los 86 L/s en promedio, de manera tal que no cumple con los TRH de diseño y baja significativamente la eficiencia de los procesos primarios y secundarios (figura 6). Con las cargas altas que se presentan, para que el filtro percolador opere adecuadamente se tendrá que cambiar el medio de soporte de roca por uno sintético (polietileno) que garantice una mayor área de contacto que soporte a los microorganismos; de esta manera, los dos filtros no son suficientes para soportar caudales superiores a 60 L/s, ya que ocasionaría la pérdida de biopelícula por el incremento de velocidad en las tuberías de interconexión, además de que los efectos de carga y temperatura disminuirían la eficiencia del proceso. Cuando fue diseñada, la planta cumplía con los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996, por lo que ahora es necesario optimizar el proceso para que cumpla la actual NOM-001-SEMARNAT-2021.

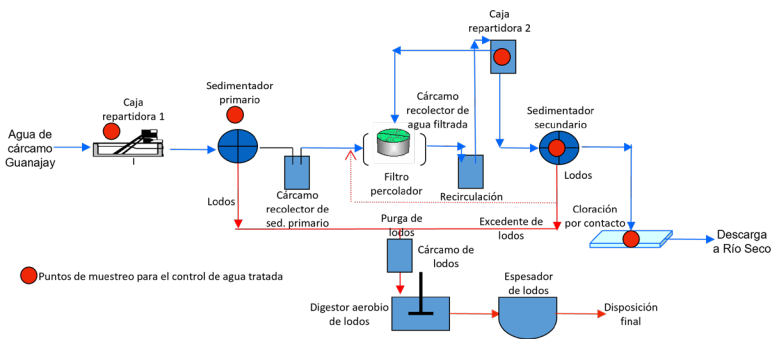


Figura 6. Diagrama de procesos de la PTAR de filtro percolador Guanajay, Paraíso, Tabasco.

Fuente: elaboración propia.

Para el caso de las PTAR de biodiscos y las PTAR de lodos activados (3), operan con TRH básicos de 8 y hasta 16 horas. Típicamente, el tren de tratamiento de agua consta de pretratamiento con eliminación de sólidos mayores a 3 cm, desarenación, sedimentación primaria, reactor biológico, sedimentación secundaria y desinfección. El tren de lodos está conformado por espesadores de digestión aerobia, lechos de secado y acarreo a disposición final (figura 7) (CONAGUA, 2019g). Estas PTAR son las que requieren mayor

atención en el mantenimiento preventivo en su infraestructura, ya que presentan altos grados de deterioro por falta de sustitución de la pailería interna, aireadores y buenos recubrimientos en el acero de la infraestructura.

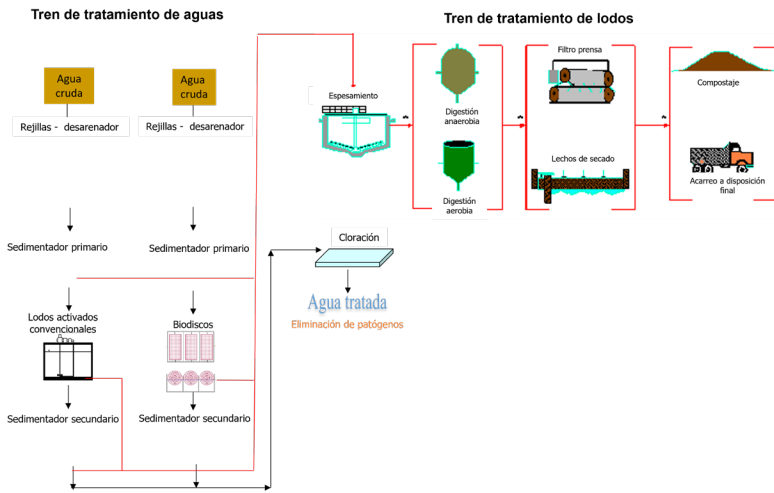


Figura 7. Diagrama de procesos de sistemas convencionales de biodiscos y lodos activados.

Fuente: elaboración propia.

## PTAR con reactores anaerobios

El quinto sistema de tratamiento de aguas residuales más empleado en el estado son los reactores anaerobios. Desde 2020 ocupa el 8.7 % como tecnología aplicada en el estado con seis PTAR que operan un gasto de 54.5 L/s, siendo un 2.7 % del volumen tratado en la entidad (CONAGUA, 2020). En el tratamiento anaerobio de aguas residuales, los componentes orgánicos se convierten a  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  y masa microbiana mediante reacciones bioquímicas. Por ello, es una alternativa viable para el tratamiento de aguas y lodos residuales con bajo consumo de energía, capaz de tratar desechos con alta carga orgánica (CONAGUA, 2019d).

Esta tecnología es de las más implementadas en fraccionamientos industriales y habitacionales, con la finalidad de aprovechar mayor espacio en estos al ser construcciones enterradas. La construcción básica es a través de tubos de alcantarillas con diámetros de 2 a 4 m. El proceso inicia con un cárcamo concentrador donde se retienen sólidos gruesos y arenas; en la primera sección (de alcantarilla) se instala una malla para separación de materiales finos de 1 a 3 cm, posteriormente, pasa a dos cámaras en serie de digestión anaerobia, la tercera cámara opera como filtro anaerobio con grava de 3/4 de pulgada como medio de soporte y la desinfección en la última etapa. El agua tratada se infiltra al subsuelo o es mandada por bombeo a un cuerpo receptor (laguna, pantano u arroyo) (figura 8). Aunque las primeras plantas de este tipo utilizaron la cloración como método de desinfección, hoy debemos considerar otro método de desinfección por los riesgos de formar compuestos tóxicos al mezclarse materia orgánica y cloro.

Este tipo de procesos hoy están en abandono, tales como los del corredor Parrilla en el centro de Tabasco, pues se encuentran colmatadas y con la infraestructura completamente desmantelada, por lo que su rehabilitación resulta muy difícil y costosa (Aguilar et al. 2022).

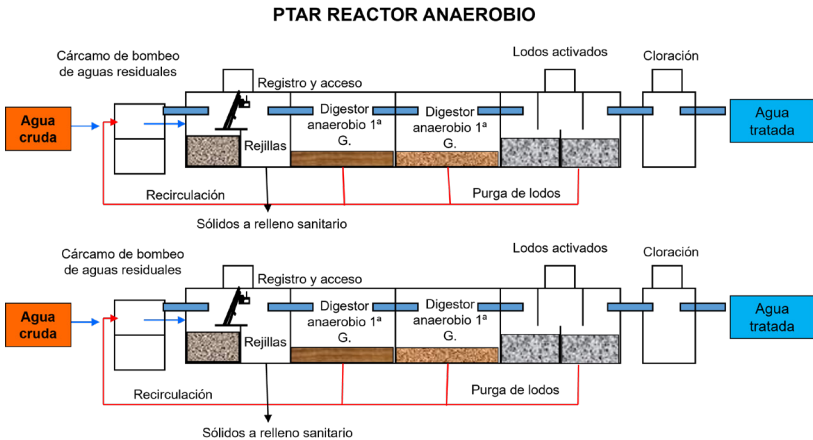


Figura 8. Diagrama de procesos de reactores anaerobios.

Fuente: elaboración propia.

## PTAR con reactores RAFA

Finalmente, el sexto sistema de tratamiento de aguas residuales más empleado en Tabasco son los reactores anaerobios de flujo ascendente (RAFA). Desde 2020 ocupa el 2.9 % como tecnología aplicada en el estado por dos PTAR que operan un gasto de 24 L/s, siendo un 1.2 % del volumen tratado en el estado. El resto de los sistemas se encuentran en otras clasificaciones (CONAGUA, 2020). Los RAFA se utilizan para tratar aguas residuales con alta carga, pero también se han construido para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Este proceso biológico requiere de pretratamiento eficiente para evitar obstrucciones en las tuberías de alimentación y en el interior del reactor (CONAGUA, 2019h).

Estas PTAR se han construido en mayor número a las reportadas en operación, directamente para tratar aguas residuales de fraccionamientos y condominios en los municipios Centro, Comalcalco y Paraíso. Están constituidas por cárcamos concentrados con eliminación de residuos sólidos mayores a 3 cm y desarenación. El reactor RAFA con un filtro interno en su tercera etapa puede ser un humedal horizontal o un biofiltro anaerobio horizontal y desinfección con cloración (figura 9). Estos presentan problemas similares a los reactores anaerobios y tanque Imhoff, sin embargo, Escobedo et al. (2010) mejoró la eficiencia y problemas de operación con un cambio de diseño, eliminando el filtro interno dejando un RAFA + biofiltro anaerobio + humedal horizontal, con TRH de 1 a 2 días, 2 a 4 horas y 4 a 8 horas, respectivamente, con un sistema de desinfección distinto a la cloración.

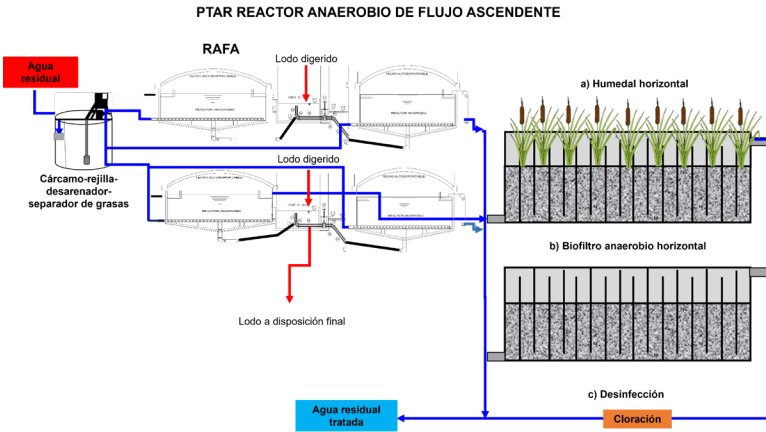


Figura 9. Diagrama de procesos de reactores anaerobios de flujo ascendente.

Fuente: elaboración propia.

Es importante aclarar que los sistemas aplicados por el organismo regulador (antes SAPAET, hoy CEAS) difieren del propuesto por Escobedo et al. (2010) en la salida o efluente del RAFA, pues este presenta problemas hidráulicos (tapón), corrosión y formación de algas en el domo del reactor, debilitando estructuralmente la losa del reactor (figura 10).

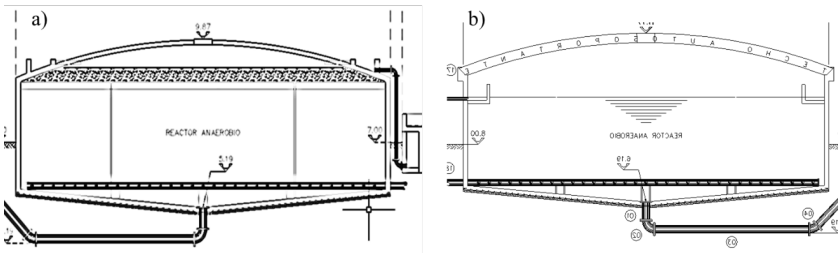


Figura 10. a) RAFA construido por organismo regulador, b) RAFA propuesto por Escobedo et al. (2010).

Fuente: elaboración propia.

Capítulo 6

# La evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales

En el estado de Tabasco se ha planteado la necesidad de implementar un sistema interinstitucional constituido por los tres órdenes de gobierno, universidades, ONG y sociedad en general, con la finalidad de vigilar y asegurar la calidad de los cuerpos de agua, pues es necesario proteger los recursos naturales para las futuras generaciones, y esto es un trabajo de todas y todos. Para dar seguimiento al manejo de aguas residuales es necesario contar con un monitoreo, evaluación y reporte de la eficiencia de los sistemas de aguas residuales existentes en las diferentes divisiones académicas, a fin de dar atención a los problemas y optimizar los procesos en el tratamiento de aguas existentes en la entidad, en cuanto a la capacidad y calidad del agua tratada. Para el caso de las comunidades sin sistemas es necesario proponer la alternativa de tratamiento más viable en términos técnicos, económicos y sustentables.

- Los horizontes básicos que se deben marcar en la entidad tienen principios básicos en estas acciones:
- Calcular caudales actuales y de proyecto para la ampliación del sistema de tratamiento en las localidades principales.
- Evaluar hidráulicamente la capacidad de las PTAR.
- Caracterizar los parámetros de calidad del agua en influentes y efluentes de las unidades del sistema.
- Determinar la eficiencia parcial y total del proceso de tratamiento.
- Evaluar qué optimizaciones necesita el sistema, así como el rescate de la infraestructura existente.
- Desarrollar las síntesis de procesos de la PTAR, seleccionando la mejor alternativa.
- Desarrollar la ingeniería básica y de detalle de la optimización de la PTAR.
- Generar el proyecto ejecutivo en conjunto con programas complementarios (eléctricos, estructurales, catálogo de conceptos, etc.), como lo establece el Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de la CONAGUA.

Con estas líneas marcadas se podrá generar información base sobre el estado actual de las descargas y plantas de tratamiento que se han implementado en la entidad; se puede identificar el grado de cumplimiento en cada municipio para evitar posibles conflictos legales, generar documentos técnicos que se deben presentar ante las autoridades correspondientes como lo indica la normatividad ambiental vigente a partir de la entrada en vigor del nuevo marco

normativo ambiental federal, y finalmente implementar una comisión interinstitucional que coadyuve a la función de protección para la cual las autoridades se han visto rebasadas. De esta manera resulta crucial iniciar cada diagnóstico de sistema con lo referenciado en la tabla 11.

En los siguientes apartados de este capítulo se detallan las principales variables técnicas a evaluar en las PTAR.

**Tabla 11**

*Aspectos por evaluar en el diagnóstico de los sistemas de tratamiento*

Rubro	Concepto
Administrativos	Trámites y permisos: derecho de descarga, registro de proceso ante CONAGUA, estudios de impacto, estudio de riesgo
Operativos	Arranque de planta, balance de materia, diseño del sistema, operación del sistema. Eficiencias de proceso y eficiencia requerida. Análisis de agua en la entrada y la salida del proceso
Ambientales	Aspectos de contaminación por el tipo de descarga, cuerpo receptor, disposición de lodos primarios y secundarios y residuos sólidos.
Seguridad	Higiene y seguridad laboral en la planta y en el personal, revisión de bitácora de mantenimiento, etc.
Riesgo	Inventario de residuos peligrosos, registro de sustancias, programa de prevención de accidentes, programa de contingencias en coordinación con protección civil, entre otros

*Fuente:* elaboración propia.

## Evaluación física de las unidades de tratamiento

Dentro del levantamiento en campo se realiza la determinación de la volumetría de las unidades de tratamiento, ya que es necesario conocer las dimensiones internas y externas para las evaluaciones correspondientes. Esta actividad se realiza debido a que no existe un plano de construcción dentro de los expedientes de los organismos operadores. Para estas actividades es necesario realizar una medición física de unidades con apoyo de varas batimétricas,

discos de secci, cintas métricas, flexómetros, etc. Los parámetros principales para medir son espesadores de muros, bordos libres, tirante de agua, longitud y anchura, diámetro de las tuberías, etc. Para la determinación del área de la planta es necesario contar con una estación total y el equipo completo de topografía.

## Caracterización volumétrica de las aguas residuales

Generalmente, para conocer el gasto de aguas residuales de una PTAR se puede aplicar el método directo, que consiste en preparar el cárcamo concentrador de aguas crudas de volumen conocido (graduándolo) (figura 11). Posteriormente, se determina el tiempo en que se llena dicho recipiente y se obtiene el caudal con la relación.

$$Q = Vol / T \quad (Ec 1)$$

$$Vol = ATi \quad (Ec 2)$$

Donde:

Q = Caudal (m<sup>3</sup>/s, L/s)

Vol = Volumen (m<sup>3</sup>)

A = Área (m<sup>2</sup>)

Ti = Tirante o altura del agua (m)

T = Tiempo (s)

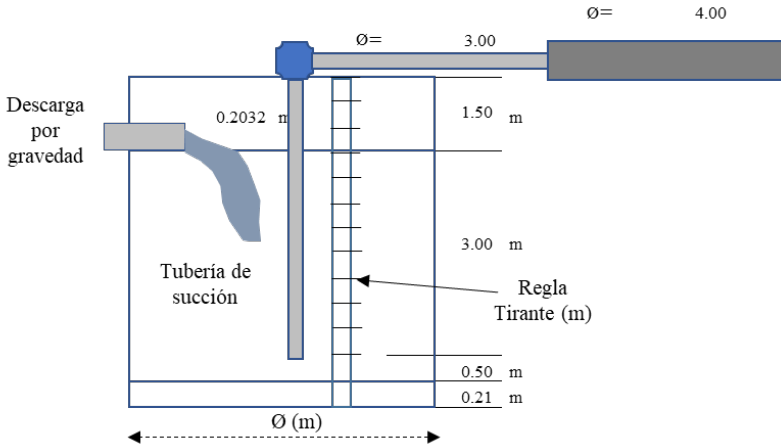


Figura 11. Graduación de la descarga al volumen de control que es el cárcamo.

Fuente: elaboración propia.

## Evaluación hidráulica de las unidades de tratamiento de la PTAR

La evaluación hidráulica consiste en conocer el tiempo de retención hidráulica (TRH) de la unidad y las velocidades del agua en las líneas de conducción de la PTAR. Para evaluar el TRH se consideran los gastos de operación y los volúmenes de las unidades. Además, se verifica el perfil de velocidades del sistema en las tuberías de entradas y salidas de las unidades. El cálculo del TRH parte de considerar las siguientes ecuaciones; la ecuación de la continuidad rige el flujo de entrada a la unidad de tratamiento, es decir, es el cálculo de la velocidad del agua dentro de un sistema de transporte de área conocida, como un tubo o un canal (Sotelo, 1994).

$$Q = AV \quad (Ec 3)$$

Donde:

A = Área de la sección transversal (m<sup>2</sup>)

V = Velocidad en la sección dada (m/s)

Volumen y área de las unidades de tratamiento (sedimentador y filtro) se establece en la siguiente ecuación:

$$\mathbf{Vol = ATi} \quad (\text{Ec 4})$$

$$\mathbf{A = \pi \varnothing^2/4} \quad (\text{Ec 5})$$

Donde:

Vol = Volumen de agua contenido en la unidad (m<sup>3</sup>)

A = Área de la unidad de tratamiento (m<sup>2</sup>)

Ti = Tirante o altura de agua que está contenida en la unidad de tratamiento (m)

∅ = Diámetro de la unidad de tratamiento (m)

El tiempo de retención hidráulico de la unidad puede estimarse mediante la siguiente relación (Metcalf y Eddy, 2003):

$$\mathbf{Vol = QTRH} \quad (\text{Ec 6})$$

$$\mathbf{TRH = Vol / Q} \quad (\text{Ec 7})$$

Donde:

Vol = Volumen de agua contenido en la unidad (m<sup>3</sup>)

Q = Gasto de agua de entrada a la unidad de tratamiento (m<sup>3</sup>/s)

TRH = Tiempo de retención hidráulico (d, h, min)

## Evaluación del equipo de bombeo

La evaluación del cárcamo de bombeo inicia conociendo la tubería de succión (entrada) (Sotelo, 1994; Metcalf y Eddy, 2003):

$$\mathbf{Q = (\pi \varnothing^2/4) V} \quad (\text{Ec 8})$$

Donde:

Q = Gasto de bombeo en función del área hidráulica (m<sup>3</sup>/s)

V = Velocidad de succión de la bomba (1-3) m/s

∅ = Diámetro de la tubería de transporte (m, in)

$$\mathbf{\varnothing = [4 Q / V]^{1/2}} \quad (\text{Ec 9})$$

Para calcular el tirante (m) de un canal circular se aplica la siguiente ecuación (Sotelo, 1994; Metcalf y Eddy, 2003):

$$h = (Q / 1.47 (2) \pi \emptyset)^{1/1.42} \quad (\text{Ec } 10)$$

El gasto y tiempo de bombeo se estiman mediante las siguientes ecuaciones (Sotelo, 1994; Metcalf y Eddy, 2003):

$$Q_B = 2 Q_E \quad (\text{Ec } 11)$$

Donde:

$Q_B$  = Gasto de bombeo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_E$  = Gasto de entrada ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

El tiempo de bombeo se obtiene de la siguiente manera:

$$T_B = V / (Q_B - Q_E) \quad (\text{Ec } 12)$$

Donde:

$T_B$  = Tiempo de bombeo (s, min, h)

$V$  = Volumen de agua ( $\text{m}^3$ )

Para calcular la potencia de la bomba se aplica la siguiente ecuación (Metcalf y Eddy, 2003):

$$P = \gamma Q_B (HT) / 76 \eta \quad (\text{Ec } 13)$$

Donde:

$P$  = Potencia de bombeo (Hp)

$\gamma$  = Densidad ( $1,000 \text{ Kg}/\text{m}^3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  a  $20^\circ\text{C}$ )

$Q_B$  = Gasto de bombeo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$HT$  = Carga hidráulica total (m)

1 HP =  $76 \text{ kg}/\text{s}$  y

$\eta$  = Eficiencia (%/100)

## Eficiencia requerida del sistema y de proceso

La eficiencia requerida de un sistema está dada por la concentración promedio de entrada de una sustancia y la concentración de salida que se establece por la NOM-001-SEMARNAT-2021, y la eficiencia de proceso está dada en función de la concentración promedio de entrada y salida de una sustancia. Para cualquier sustancia se puede aplicar el cálculo de eficiencia requerida y eficiencia de proceso de remoción mediante las siguientes ecuaciones, respectivamente (Metcalf y Eddy, 2003):

$$\eta' = [(C_1 - C_2) / C_1] 100 \quad (\text{Ec } 14)$$

Donde:

$\eta'$  = Eficiencia de remoción requerida de una sustancia dada (%)

$C_1$  = Concentración de entrada de la sustancia (mg/L)

$C_2$  = Concentración máxima permisible de la sustancia (mg/L)

$$\eta_p = [(C_1 - C_3) / C_1] 100 \quad (\text{Ec } 15)$$

Donde:

$\eta_p$  = Eficiencia de proceso (remoción de una sustancia dada) (%)

$C_1$  = Concentración de entrada de la sustancia al sistema (mg/L)

$C_3$  = Concentración de salida de la sustancia del sistema (mg/L)

Con los resultados del laboratorio, se debe verificar si cumple los LMP (NOM-001-SEMARNAT-2021). Del mismo modo, se recomienda analizar la biodegradabilidad de las aguas según lo establece Crites et al. (2000), para ello es necesario determinar la DQO y la DBO<sub>5</sub>. El análisis de las operaciones y procesos unitarios se realiza con la finalidad de establecer si es necesario mejorar o replantear una nueva PTAR y cubrir la descarga de la población actual, la eficiencia del sistema, el costo, la operación, la funcionalidad y la factibilidad, requerida para la adecuación de la planta o la sustitución por un nuevo sistema de tratamiento que garantice la calidad del agua para la población beneficiada (MAPAS, CONAGUA, 2019a).

## Estimación de gastos teóricos para el diseño de PTAR

A continuación, se presentan las ecuaciones para estimar los gastos de diseño de un sistema de tratamiento. Es importante recordar que las unidades de pretratamiento se diseñan con el  $Q_{\text{máx. ext.}}$ ; mientras que las unidades de tratamiento primario, secundario y terciario se diseñan con el gasto medio (Vázquez y López, 2011).

Aportación:  $Ap = 0.8 \text{ Dot}$  (L/hab/día) (Ec 16)

Gasto medio:  $Q_{\text{med}} = \frac{(Ap \text{ Población})}{86400}$  (L/s) (Ec 17)

Gasto mínimo:  $Q_{\text{min}} = 0.5 Q_{\text{med}}$  (L/s) (Ec 18)

Gasto máximo instantáneo  $Q_{\text{máx. inst}} = Q_{\text{med}} M$  (L/s) (Ec 19)

Coefficiente de Harmon (M)  $M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{\frac{\text{Población}}{1000}}}$  (Ec 20)

Gasto máximo extraordinario:  $Q_{\text{máx. ext}} = Q_{\text{máx. inst}} 1.5$  (L/s) (Ec 21)

Volumen diario:  $Vd = Q_{\text{med}} 86.4$  (m<sup>3</sup>/día) (Ec 22)

Capítulo 7

**Optimización de procesos de  
sistemas de tratamiento  
recomendados para  
el estado de Tabasco**

En el siguiente apartado se presentan las memorias de cálculos de las ingenierías básicas de los sistemas de tratamiento propuestos para optimizar las plantas en el estado de Tabasco que cuentan con este tipo de elementos, o bien, que puedan ser implementadas estas operaciones y procesos unitarios como parte de su optimización para lograr el cumplimiento de la nueva disposición de la NOM-001-SEMARNAT-2021.

El primer tren de tratamiento con tanque séptico-humedal artificial, está dirigido a comunidades descentralizadas y es recomendable para el tratamiento de las aguas residuales con población que va desde los 10 a los 100 habitantes. Este tipo de tren considera la instalación de dos módulos para tratar el gasto de 200 habitantes de 0.3 L/s, empleando un pretratamiento con cárcamo, rejillas, desarenador, tanque de grasas y aceites, tratamiento primario con un sedimentador, tratamiento secundario con fosa séptica y un humedal y desinfección en filtro lento de arena.

El segundo tren de tratamiento con RAFA-FBAH-ciénega, fue desarrollado para tratar el gasto de 4,500 habitantes (10 L/s), y consta de cárcamo concentrador, pretratamiento con rejilla, desarenador, tanque de grasas y aceites y tanque de regulación; posteriormente, un tratamiento secundario con un reactor RAFA acoplado a un filtro biológico anaerobio horizontal y finalmente una ciénega. En esta memoria se desarrolla el cálculo del lecho de secado para la disposición de los lodos provenientes de los tratamientos secundarios.

El tercer tren de tratamiento con HAFL-HAFS-ciénega permite dar atención a el gasto de agua residual (55 L/s) producida para una población que ronda los 25,000 habitantes. Los cálculos de la parte que integran este tren son de un sedimentador primario, tratamiento secundario con humedal de flujo libre seguido del humedal de flujo subsuperficial y finalmente el estanque de pulimento. Se recomienda un tren completo en el arreglo final del sistema que le permite cumplir con la normatividad vigente.

El último tren de tratamiento fue desarrollado con laguna aireada-facultativa. En este documento se presentan los cálculos de los estanques para una población de 50,000 habitantes que generan un gasto de 111 L/s. Los cálculos de la ingeniería básica son de los tanques y se recomienda un tren completo en el arreglo final, lo que le permite cumplir con la normatividad vigente.

## Tren de tratamiento con tanque séptico-humedal artificial

### 1. Datos generales y gastos de proyecto

Es importante aclarar que la delegación de la CONAGUA, para el caso de Tabasco, es quien verifica y autoriza la dotación de aguas y la aportación para generar los proyectos de agua potable y por consiguiente los volúmenes de generación de agua residual.

**Tabla 12**

*Datos básicos para el diseño del tren de tratamiento*

Datos de proyecto		
Pob. Proyecto =	200	hab.
Dotación =	180	L/hab./día
Aportación =	144	L/hab./día
Carga orgánica Unitaria (COU) =	56	g/hab./día
M =	4.15	Coef. Harmon
Cs =	1.5	Coef. seguridad
Módulos =	2	

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 13**

*Gastos para el diseño del tren de tratamiento*

	Gastos total		Gastos por módulo	
Q <sub>med.</sub> =	0.3	L/s	0.2	L/s
Q <sub>min.</sub> =	0.2	L/s	0.1	L/s
Q <sub>máx. inst.</sub> =	1.4	L/s	0.7	L/s
Q <sub>máx. ext.</sub> =	2.1	L/s	1.0	L/s

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 14**

*Carga orgánica total y concentración de entrada en el tren de tratamiento*

	Concentración de entrada al sistema		Concentración por módulo	
COT =	11.2	kg/día	5.6	kg/día
FVOL =	28.8	m <sup>3</sup> /día	14.4	m <sup>3</sup> /día
C <sub>DBO</sub> =	389	mg/L	389	mg/L

COT: carga orgánica total; FVOL: flujo volumétrico; CDBO: concentración de DBO.

Fuente: elaboración propia

**Tabla 15**

*Límites máximos permisibles y eficiencia esperada del tren de tratamiento*

	NOM-001-SEMARNAT-2021		Eficiencia requerida del sistema		
C LMP DBO=	30	mg/L	ER DBO=	92.3	%
C LMP SST=	30	mg/L	ER SST=	92.8	%
C LMP DQO	60	mg/L	ER DQO=	92.1	%

C LMP: concentración de límite máximo permisible, ER: eficiencia de remoción.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 16**

*Concentración teórica de entrada de contaminantes básicos*

Parámetros	g/hab/día	g/hab/día	M (kg/día)	C (mg/L)
DBO <sub>5</sub>	50 a 120	56.0	11	389
DQO	110 a 295	110.0	22	764
SST	60 a 150	60.0	12	417
NH <sub>3</sub>	5 a 12	5.0	1	35
N org N	4 a 10	4.0	1	28
NTK	9 a 21.7	9.0	2	63
P <sub>ORG COMO P</sub>	0.9 a 1.8	0.9	0	6
P <sub>INORG COMO P</sub>	1.8 a 2.7	1.8	0	13

Parámetros	g/hab/día	g/hab/día	M (kg/día)	C (mg/L)
P TOTAL COMO P	2.7 a 4.5	2.7	1	19
Grasas y aceites	10 a 40	10.0	2	69

Fuente: elaboración propia.

## 2. Cárcamo concentrador

$$Vol_{cárcamo} = TRH Q_{máx. ext.} \quad (Ec 23)$$

### Criterios de diseño

TRH=	45	min		
Q <sub>máx. ext.</sub> =	2.1	L/s	0.12	m <sup>3</sup> /min
Vol. cárcamo =	5.6	m <sup>3</sup>		
Diámetro (Ø) =	1.43	m		
Ø a Const. =	2.00	m		
Nueva área =	3.14	m <sup>2</sup>		
Nuevo volumen =	11.00	m <sup>3</sup>		
Nuevo TRH =	88.36	min		

### Área y volumen de sedimentos

C. sólidos sed. =	60	ml/L =	0.06 m <sup>3</sup> arena / m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O
Vol. agua =	11.0	m <sup>3</sup>	Parámetro por cono Imhoff
Vol. sedimentos =	0.7	m <sup>3</sup>	
Tirante sedimentos =	0.21	m	

### Diámetro de tubería de succión

$$Q = A V \quad (Ec 3)$$

$$A = \pi \text{Ø}^2 / 4 \quad (Ec 5)$$

$$Q_B = 2 Q_E \quad (Ec 11)$$

Vel. bomba =	2.5	m/s	2-2.7 m/s
Q bombeo =	0.004	m <sup>3</sup> /s	
	0.0460		
Ø tubería =	0	m=	1.8 in

$\emptyset$ constructivo =	<b>3.00</b>	in
N <sub>área</sub> =	0.005	m <sup>2</sup>
N <sub>velocidad</sub> =	0.91	m/s

**Diámetro de tubería de descarga**

Vel. =	0.6	m/s
Q =	0.004	m <sup>3</sup> /s
$\emptyset$ tubería =	0.09	m                      3.7      in
$\emptyset$ constructivo =	<b>4.00</b>	m
N <sub>área</sub> =	0.008	m <sup>2</sup>
N <sub>velocidad</sub> =	0.51	m/s

**Dimensionamiento final del cárcamo**

Bordo libre =	1.5	m
Tirante =	3.5	m
Long Tub entra =	3.0	m
Altura T Carc. =	5.2	m

**Potencia del equipo de bombeo**

$$P = YQ_B (HT) / 76 \eta \quad (Ec 13)$$

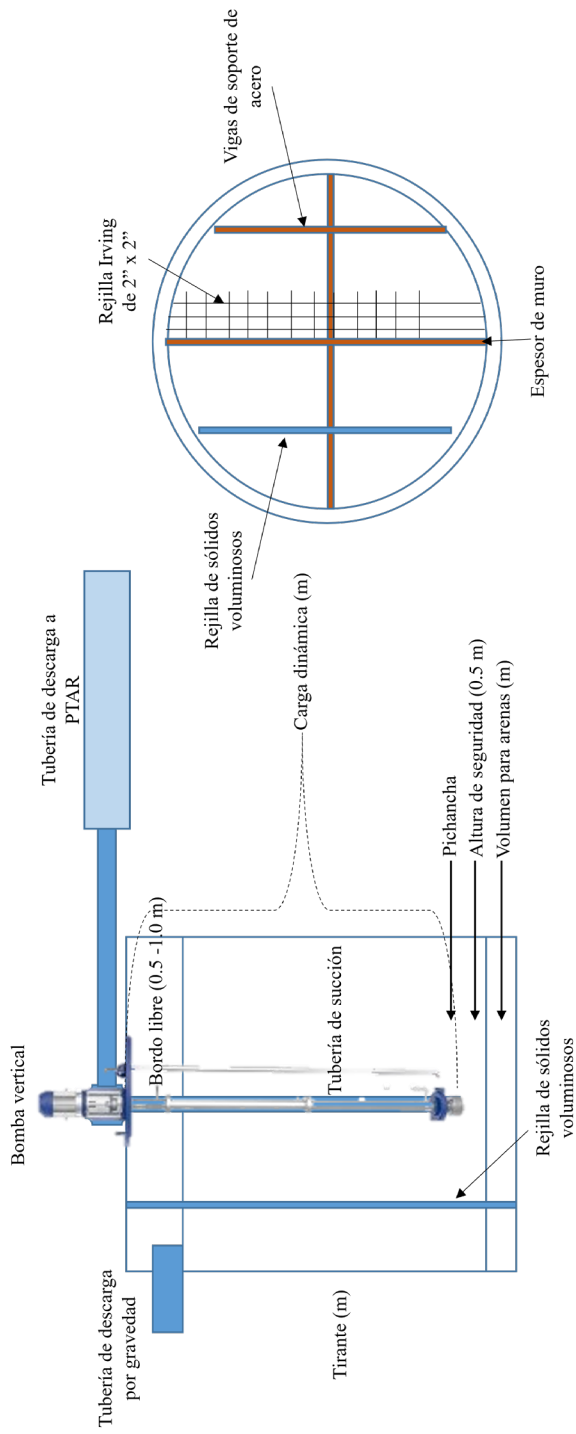
Carga dinámica =	4.5	m	<b>Pérdidas Locales</b>
Pérdidas loc. =	<b>5.0</b>	m	hf+hc+he+hd+has
Carga de posición =	<b>20.0</b>	m	Hf = pérdida por fricción
HT =	29.5	m	hc = pérdida por codos
Y, Densidad agua =	1000	kg/m <sup>3</sup>	he = pérdida por entrada
Eficiencia (η) =	<b>80</b>	%	Hd = pérdida por descarga
1 Hp	76	kg/s	Has = pérdida por agranda- miento súbito
Potencia	1.29	HP	

**Tiempo de bombeo**

$$T_B = V / (Q_B - Q_E) \quad (\text{Ec 12})$$

Q bombeo =	0.25	m <sup>3</sup> /min
Tiempo bombeo (T <sub>B</sub> ) =	88	min
No. arranques	16	
Arranque/bomba	8	
Horas op/bomba	12	horas
No. bombas	2	

Nota: cálculos basados en CONAGUA, 2019i.



### Corte longitudinal

### Vista en planta

Figura 12. Elementos de cárcamo concentrador que alimentará al sistema de tratamiento.  
Fuente: elaboración propia.

### 3. Unidad de pretratamiento

#### Criterios de diseño del canal

$Q_{\text{máx. inst.}}$ =	2.07	L/s
Vel. =	0.6	m/s
Área =	0.003	m <sup>2</sup>
A = a b	1.5	
	b = 0.01	m
	a = 0.50	m
	b' = 0.2	m
	B'' = 0.1	m
	BT = 0.31	m

#### Rejillas

Separación =	0.035	m
Separaciones =	14.29	
Barras =	13.29	
Excedente =	0.06	
Separaciones =	2	
Barras =	1	
Ajuste de separación =	0.04	m

#### Ajuste del canal

Solera espesor (e) =	0.25	in
Espesor total que agregar a canal =	0.006	m
Ancho de canal corregido =	0.51	m

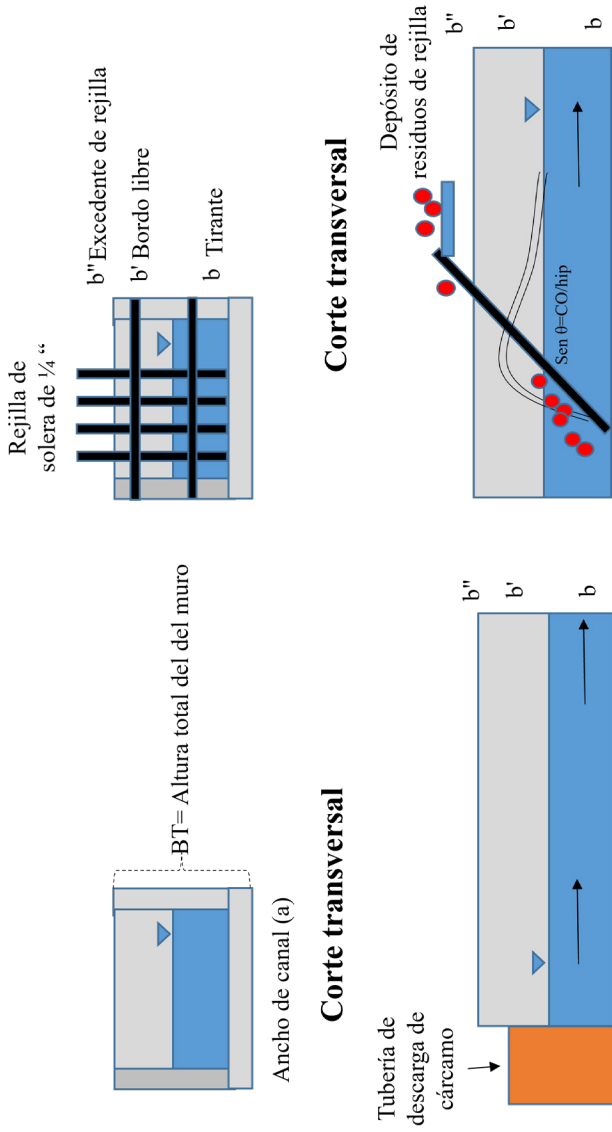
#### Cálculo del material de la rejilla

Ángulo en grados =	45	
Cateto opuesto (CO) =	0.31	m
Hipotenusa (hip) =	0.36	
Log total de barras =	0.36	m
Empotrado =	1.41	m

Long. total de solera =	2.1	m
No. soleras =	0.4	

**Pendiente del canal y velocidad**

Área hidráulica =	0.00	m <sup>2</sup>
Perímetro mojado =	0.51	m
Radio hidráulico =	0.01	m
Velocidad de escurrimiento =	0.6	m/s
(n) coeficiente de rugosidad =	0.013	
Pendiente (S) =	0.0471	



## Corte longitudinal

## Corte transversal

Figura 13. Corte longitudinal y transversal de canal y rejilla de alimentación del sistema.  
Fuente: elaboración propia.

**Desarenador hidráulico**

$Q_{\text{máx. inst.}}$ =	179.2	m <sup>3</sup> /día
Velocidad del agua =	0.3	m/s
Velocidad de sedimentación =	0.024	m/s
Tirante del canal =	0.01	m
Coefficiente de seguridad =	1.5	
Longitud =	0.1	m
Agua residual doméstica =	0.00006	m <sup>3</sup> arena/m <sup>3</sup> agua
Tiempo de limpieza =	3	día
Volumen de arena en (3 días) =	0.03	m <sup>3</sup>
Área del desarenador =	0.07	m <sup>2</sup>
Tirante del desarenador =	0.49	m

**Pérdida de carga por rejilla al 50%**

Eficiencia de rejilla =	0.8	
Carga total HT =	0.088	m
Tirante de desarenador final =	0.58	m

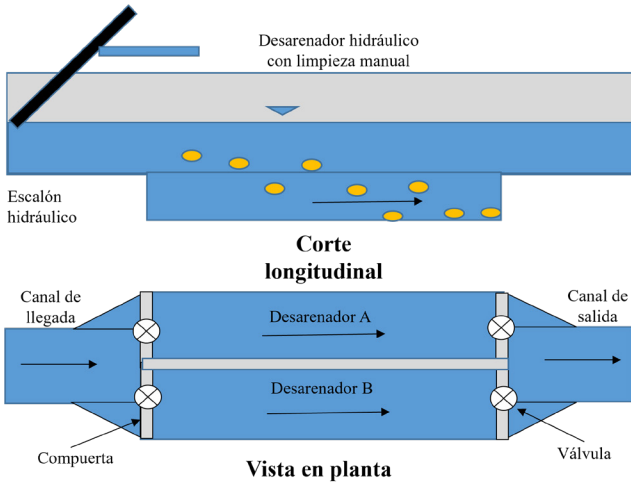


Figura 14. Corte longitudinal y vista en planta del desarenador hidráulico.  
Fuente: elaboración propia.

**Tanque de grasas y aceites (flotación natural)**

$Q_{\text{máx. inst.}} =$	179.2	$\text{m}^3/\text{día}$
$C_{\text{GyA}} =$	69.4	$\text{mg}/\text{L}$
TRH =	25	min
TRH =	0.017	día
Volumen de tanque flotación =	3.1	$\text{m}^3$
Tirante del diseño =	1.5	m
Área del tanque (flotación) =	2.1	$\text{m}^2$
Relación largo ancho =	2.5: 1	
Ancho (a) =	0.9	m
Largo (b) =	2.3	m

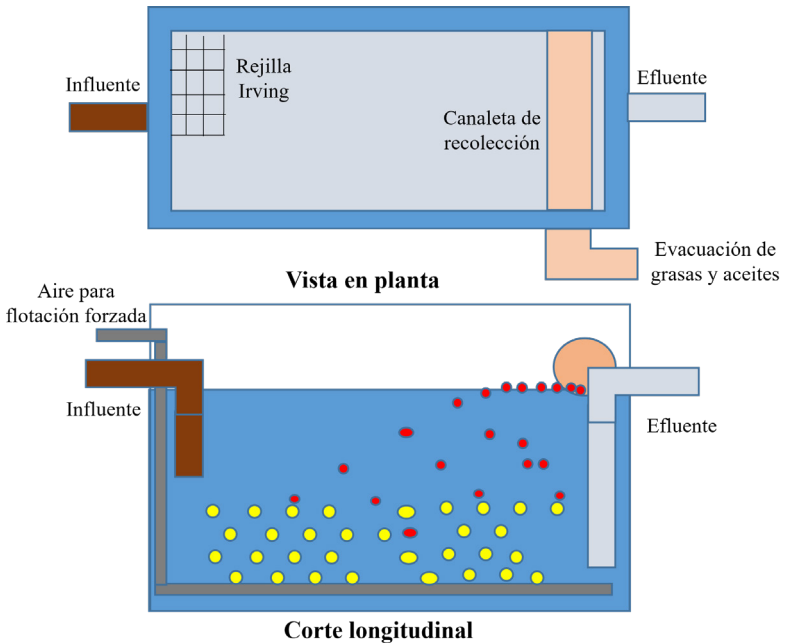


Figura 15. Corte longitudinal y vista en planta del tanque de grasas y aceites.

Fuente: elaboración propia.

## 4. Sedimentador primario

### Criterios de diseño

No. módulos =	2			
Carga superficial =	32 a 49	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día		
Carga superficial =	32	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día		
Q <sub>med.</sub> =	0.17	L/s=	14.4 m <sup>3</sup> /día	
Área de sedimentación =	0.5	m <sup>2</sup>		
Ancho a =	0.67	m	≈1.00	m
Largo b =	0.67	m	≈1.00	m
Nueva área de sedimentador =	1.0	m <sup>2</sup>		
Tirante =	2	m		
Pendiente al centro (S) =	8	%		
Tirante al centro =	2.04	m		
Volumen sedimentador =	2.0	m <sup>3</sup>		
TRH =	3.37	h		

### Volumen y masa de los materiales separados

ER SST 60-70% =	70	Densidad SST =	1,200	kg/m <sup>3</sup>
ERDBO 20-30% =	30	Densidad DBO ¿?	600	kg/m <sup>3</sup>

**Tabla 17**

*Balace de masas en el sedimentador primario*

Flujo másico (kg/día)	Flujos másicos (kg/día)			Concentración (mg/L)		
	ME	MR	MS	CE	CR	CS
M SST	6.0	4.2	1.8	416.7	291.7	125.0
M DBO	5.6	1.7	3.9	388.9	116.7	272.2

ME: masa de entrada; MR: masa removida; MS: masa de salida;  
 CE: concentración de entrada; CR: concentración removida;  
 CS: concentración de salida.

Fuente: elaboración propia.

**Volumen de lodos**

Coef. exp. =	6	
Vol. SST =	0.004	m <sup>3</sup> /día
Vol. DBO =	0.003	m <sup>3</sup> /día
Vol. total =	0.006	m <sup>3</sup> /día
Vol. exp. =	0.038	m <sup>3</sup> /día

**Dimensionamiento de la tolva**

Tirante de tolva =	0.5	m
Área de tolva =	0.08	m <sup>2</sup>
Ancho a =	0.27	m
Largo b =	0.27	m
Ancho nuevo de tolva =	0.4	m
Volumen tolva =	0.03	m <sup>3</sup>

**Diámetro de tubería de entrada**

Q <sub>med.</sub> =	0.17	L/s =	0.0002	m <sup>3</sup> /s
Vel. entrada =	0.10	m/s		
A =	0.0017	m <sup>2</sup>		
Ø tub. entrada =	0.05	m =	1.81	in ≈ 4 in
Área nueva de tubería =	0.008	m <sup>2</sup>		0.10 m
Vel. nueva =	0.02	m/s		

**Tubería de extracción de lodo**

Coefficiente de seguridad =	1.5			
Ø =	6.0	in	0.15	m
Ø comercial =	6.0	in	0.15	m

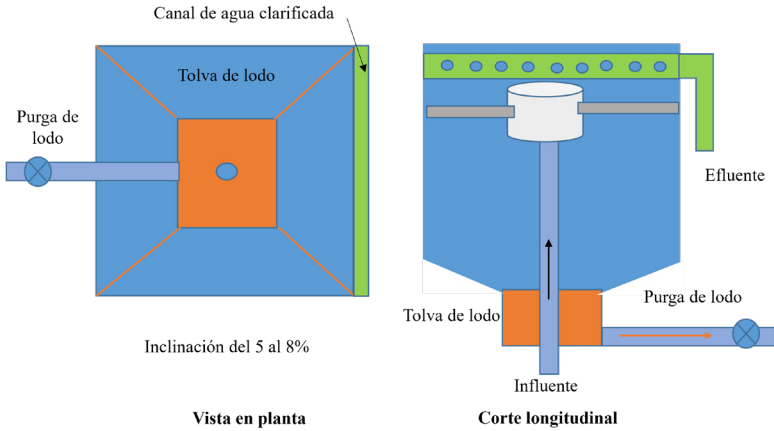


Figura 16. Corte longitudinal y vista en planta del tanque sedimentador.

Fuente: elaboración propia.

Nota: cálculos basados en CONAGUA, 2019i.

## 5. Tanque séptico

### Criterios de diseño (CONAGUA):

No. módulos: 2

Tiempo de retención (TRH) = 1-8 días

TRH diseño = 3 días

Relación largo ancho 2:1 y 3:1

Tirante (Ti) = 1.5 a 2.5 m

Ti diseño = 2.5 m

$Q_{med.} = 0.2$  L/s = 14.4 m<sup>3</sup>/día

### Eficiencias de remoción en el reactor anaerobio de primera generación (RA1G)

ER DBO = 60 %

ER SST = 30 %

**Tabla 18***Balance de materia y volumen de lodos en la fosa séptica*

Parámetro	Flujo másico (kg/día)			Volumen diario de lodos (m <sup>3</sup> /día)		
	ME	MR	MS	VE	VR	VS
M DBO =	1.80	1.08	0.72	0.003	0.002	0.001
M SST =	3.92	1.2	2.74	0.003	0.001	0.002
Total =	5.72	2.26	3.46	0.006	0.003	0.003

ME: masa de entrada; MR: masa removida; MS: masa de salida;  
 VE: volumen de entrada; VR: volumen removido; VS: volumen de salida.

Fuente: elaboración propia.

DL <sub>DBO</sub> =	600	kg/m <sup>3</sup>	Lodo DBO se degrada hasta un 70% (mineralización)
DL <sub>SST</sub> =	1,200	kg/m <sup>3</sup>	Lodo SST se degrada hasta un 30% (materia orgánica)

### Volumen de lodos dentro del reactor ya degradados

Vol. lodos = 0.001 m<sup>3</sup>/día

Vol. lodos = 0.447 m<sup>3</sup>/año

### Volumen de lodos crudos dentro del reactor

Vol. lodos crudos = 1.015 m<sup>3</sup>/año

Vol. total de lodos = 1.462 m<sup>3</sup>/año

Vol. expandido = 2.924 m<sup>3</sup>/año

### Volumen del RA1G

Vol. = 43.2 m<sup>3</sup>

Área = 17.28 m<sup>2</sup>

A = a b =

Rel L-a = 2.5

a = 2.6 m

b = 6.6 m

### Ajuste cinético

Const. de deg. K (Lab) = 0.33 días<sup>-1</sup>

Ajusto K (Arrhenius) = 0.42 días<sup>-1</sup>

TRH (60%<sub>RDBO</sub>) = 1.21 días

Considerando que el agua se degrada en primer orden

Vol. agua =	40.3	m <sup>3</sup>	Conc. DBO a la salida =	76.87 mg/L
TRH agua =	2.8	días	Eficiencia de remoción =	71.76 %
T. amb. =	32	°C	Para cumplir el criterio de descarga	
T. agua =	28	°C	Efic. requerida del sistema (ERS) =	89 %
			TRH (ERS) =	5.2 días

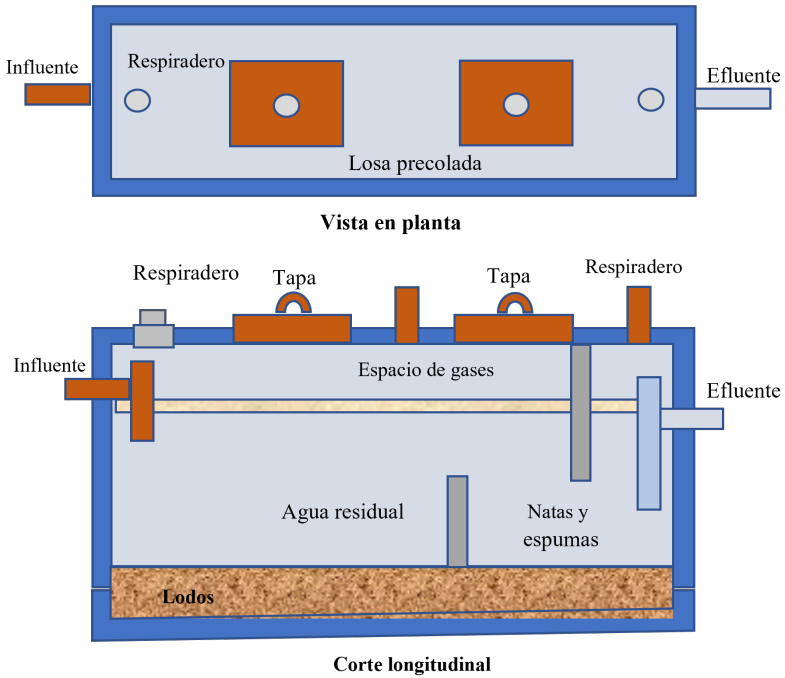


Figura 17. Corte longitudinal y vista en planta del tanque séptico.

Fuente: elaboración propia.

Nota: cálculos basados en CONAGUA, 2019j.

## 6. Humedal artificial de flujo subsuperficial

### Tasa de remoción global de DBO

$$K_2 = K_1 \theta^{(T_2 - T_1)} \quad (\text{Ec 24})$$

Condiciones expe. con un TRH= 0.8 d

$\theta =$	1.06		
$T_1 =$	20	°C	
$T_2 =$	34	°C	
$K_1 =$	0.25	d <sup>-1</sup>	
$K_2 =$	0.57	d <sup>-1</sup>	K aparente

### Determinación del tiempo de retención para la DBO

Se considera el efecto de dispersión axial y el efecto de las temperaturas

$$t = -\ln(C_n / C_o) / k_o \quad (\text{Ec 25})$$

TRH =	2.4	días
$\eta =$	0.5	
tn =	1.2	
FCC =	2.00	

t = Tiempo de retención para la remoción de la DBO, (d)	2.4
V = Volumen total del humedal (m <sup>3</sup> )	69
Q = Gasto medio (m <sup>3</sup> /d)	28.8
Cn = Conc. de DBO en el efluente del reactor n de la serie (mg/L)	20
Co = Conc. en el influente (mg/L)	77
N = Número de reactores de mezcla completa en serie	1
k <sub>o</sub> = Cte GTR de DBO, corregida para la temperatura (d <sup>-1</sup> )	0.57
ER = Eficiencia de remoción del HAFS (%)	73.98

### Tasa de la carga orgánica

$$tco = C \, dw \, \eta \, F_1 / (t/F_2) \quad (\text{Ec 26})$$

Límite máximo permisible (kg/had) =	110
tco = Tasa de carga orgánica (lb/ac d)	72

tco = Tasa de carga orgánica (kg/had)		80.6
C = Conc en el influente (mg/L)		76.87
$\eta$ = Porosidad respecto al no. de plantas (0.3-0.5)		0.50
$F_2 = 3.07ac$ ft / Mgal		3.07
$F_1 = 8.34$ lb / (Mgal (mg/L))		8.34
Dw = Profundidad del flujo (ft)		1.64
C =	0.08	kg/m <sup>3</sup>
mc =	2.21	kg/día
área =	0.004	ha
tco =	529	kg/ha d

### Área neta del humedal para remoción de DBO

$$A = Qt / dw \eta \quad (Ec 27)$$

$$w = A^{1/2} / R_A \quad (Ec 28)$$

Área =	0.027	ha=
	274.4	m <sup>2</sup>
No. módulos =	2	
w = Ancho del humedal de flujo libre		
L = Largo del canal		
Rel a:b = Rel. largo ancho		<b>3</b>
TRH	4.8	días
Tirante operativo	0.5	m
Volumen del humedal	137.2	m <sup>3</sup>
Volumen por módulo	68.6	m <sup>3</sup>

**Tabla 19**

*Dimensiones del HAFS*

Dimensiones constructivas			
Total	Unidad	Módulo	Unidad
10	m	4.8	m
29	m	14	m

Fuente: elaboración propia.

**Tasa de carga para la remoción de SST**

$$Cs = Co [0.1139 + 8.4 \times 10^{-4} (Lw)] \quad (Ec 29)$$

Cs =	11	mg/L
Co =	95	mg/L
Cte 1 =	0.1139	
Cte 2 =	0.00084	
Lw =	2	in/día Carga hidráulica del agua residual (1-3 in)

**Tiempo de retención para la remoción de nitrógeno**

$$\ln(N_{inf} / N_{eff}) / -Kn = t \quad (Ec 30)$$

N <sub>inf</sub> = Conc. de NT en el influente (mg/L)	38
N <sub>eff</sub> = Conc. de NT en el efluente (mg/L)	5
Kn = Cte. de remoción de nitrógeno 20°C d <sup>-1</sup>	-0.22
Tiempo de retención para la remoción de N, días =	9.21

**Cálculo del área neta del humedal para remover nitrógeno**

$$A = QF/Lw \quad (Ec 31)$$

A= Área neta del humedal para remover nitrógeno (ha) 0.057566.9 m<sup>2</sup>

Q= Gasto promedio (m <sup>3</sup> /día)	28.80
F= Factor de conversión (0.1 ha*mm/m <sup>3</sup> )	0.1
Lw= Tasa de carga hidráulica del agua residual (mm/d)	50.8

**Cálculo de la velocidad del fluido en la sección del humedal**

$$V = Q / dw W \quad (Ec 32)$$

$$n = a / dw^{1/2} \quad (Ec 33)$$

$$S = [ Vn / dw^{2/3} ]^2 \quad (Ec 34)$$

Q mód. =	14.40	m <sup>3</sup> /día	N = cte. de Manning =	0.30	s* ft <sup>1/3</sup>
dw =	0.5	m	A = factor de resistencia (s ft <sup>1/6</sup> )		
W mód. =	5	m	a =	0.487	si dw > 1.3 ft

Velocidad = 0.0001 m/s	a = 1.949	si $dw = 1$ ft
Pendiente (S) = 2.38262E-09	a = 7.795	si $dw < 1$ ft

### Dimensionamiento de la unidad

**Tabla 20**

*Criterios de diseño para dimensionar el HAFS*

Parámetro	Valor	Unidad
Gasto de diseño ( $Q_{med.}$ ) =	28.80	m <sup>3</sup> /día
Vel. del agua (0.1 a 0.6) =	0.60	m/s
Sep. mamp. (1.5 a 2.0) =	2.00	m
Espesor de mamparas =	0.30	m
Bordo libre =	0.40	m
TRH (1 a 7) =	<b>4.76</b>	días
Tirante de agua (Ti) =	0.50	m

Fuente: elaboración propia.

$$A = V / Ti \quad (Ec 35)$$

$$A = a b \quad (Ec 36)$$

$$A = a 3a = 3 a^2 \quad (Ec 37)$$

$$b = 3a \quad (Ec 38)$$

$$\text{Vol} = 137.20 \quad m^3$$

$$\text{Á tanque} = 274.4 \quad m^2$$

$$\text{Relación a:b} \quad 3$$

a = Ancho del tanque

b = Longitud del tanque

$$a = 9.6 \quad m$$

$$b = 28.7 \quad m$$

$$A = 274.4 \quad m^2$$

$$\text{No. de mamp.} = \frac{\text{Long. del tanque} - 1}{\text{Sep. entre mamp.}} \quad (Ec 39)$$

$$\text{No. de mamparas} = 13 \quad \text{No. de espacios:} \quad 14$$

$$\text{Long. prelimi. del tanque} = \text{(Sep. entre mamp.) (No. espacios)} \quad (\text{Ec } 40)$$

$$\text{Long. preliminar del tanque:} \quad 28.7 \text{ m}$$

Verificación de la velocidad del agua:

$$\text{Área de flujo} = \text{(Sep. entre mamp.) (Tirante del agua)} \quad (\text{Ec } 41)$$

$$\text{Vel. del agua} = \frac{Q_{med.}}{\text{Área de flujo}} \quad (\text{Ec } 42)$$

$$\text{Área de flujo} = 1 \text{ m}^2$$

$$\text{Vel. del agua} = 0.0003 \text{ m/s}$$

$$\text{Grosor total de mamp.} = \text{(Espesor de las mamp.) (No. de mamp.)} \quad (\text{Ec } 43)$$

$$\text{Grosor total de mamparas} = 4.0 \text{ m}$$

$$\text{Long. total del tanque} = \text{Long. prelim. del tanque} + \text{Grosor total de mamp.} \quad (\text{Ec } 44)$$

$$\text{Longitud total del tanque} = 32.7 \text{ m}$$

$$\text{Abertura del paso del agua} = 1.5 \text{ (separación entre mamp.)} \quad (\text{Ec } 45)$$

$$\text{Abertura del paso del agua} = 3 \text{ m}$$

$$\text{Long. de la mamp.} = \text{Ancho del tanque} - \text{Abertura del paso del agua} \quad (\text{Ec } 46)$$

$$\text{Longitud de la mampara} = 6.6 \text{ m}$$

$$\text{Altura de la mampara} = \text{Tirante del agua} + 0.1 \text{ m} \quad (\text{Ec } 47)$$

$$\text{Altura de la mampara} = 0.60 \text{ m}$$

$$\text{Altura de la estructura} = 1.00 \text{ m}$$

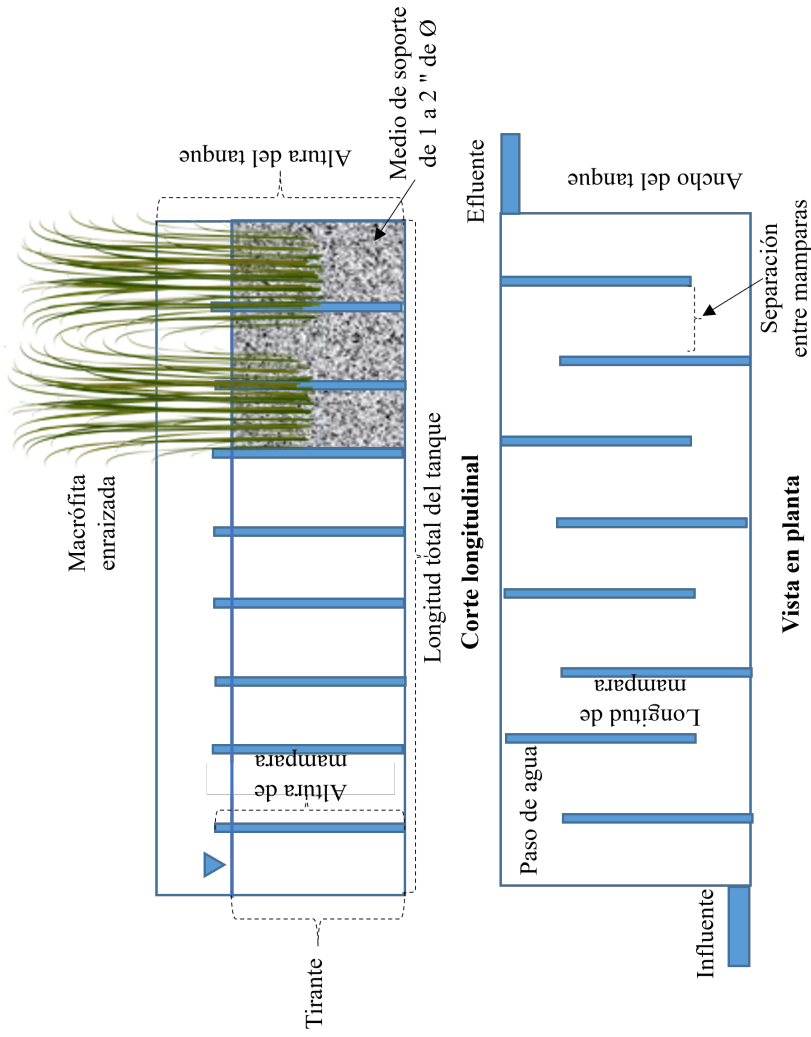


Figura 18. Corte longitudinal y vista en planta del HAFS.

Fuente: elaboración propia.

Nota: cálculos basados en Crites y Tchobanoglous, 2000 y CONAGUA, 2019e.

## 7. Filtro lento en arena descendente

**Tabla 21**

*Características de los medios filtrantes*

Medio filtrante	Ø Part. (mm)	Esp. (m)	Dens. (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidad	Vol. (m <sup>3</sup> )	Masa (kg)
Arena gruesa	1 a 2	0.25	2.3	0.45	0.0001	0.33
Gravilla fina	2 a 5	0.25	1.6	0.58	0.0018	2.92
Gravilla	5 a 10	0.25	1.4	0.52	0.0006	0.83
Grava	10 a 25	0.25	2.4	0.52	0.0001	0.17

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 22**

*Criterios de diseño de CONAGUA*

Vel. lavado =	60-80	m/h =	0.01 a 0.02	m/s
Tasa filtración =	5 a 25	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /h =	1.38 a 6.9	L/s/m <sup>2</sup>
Vel. filtrado =	3	L/s/m <sup>2</sup>		

Fuente: elaboración propia.

### Dimensionamiento del filtro con medio de soporte

$$N = 1.38 (Q)^{1/2} \text{ (Ec 48)}$$

No. Filtros =	0.03		
	≈1.0		
Carga superficial =	270	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /día	
Q <sub>med.</sub> =	0.33	L/s =	28.80 m <sup>3</sup> /día
A Filtrado =	0.11	m <sup>2</sup>	
C Vel Filtrado =	3.1	L/s/m <sup>2</sup>	
A Filtro Ind. =	0.11	m <sup>2</sup>	
a = b =	0.33	m	a = b Tanque F = 1 m
Área nueva AN de filtro =	1.00	m <sup>2</sup>	
Tirante agua =	2.5	m	
Vol. agua =	2.5	m <sup>3</sup>	

Ti soporte =	1 m
Vol. total tanque =	3.50 m <sup>3</sup>
Vol. medio filtrante =	1.00 m <sup>3</sup>
Vol. real medio filtrante =	0.5 m <sup>3</sup>
Vol. total agua =	2.98 m <sup>3</sup>
Bordo libre =	0.5 m
Altura total =	4.00 m

#### Tubería de entrada a filtro

Q =	0.33 L/s =	0.00033	m <sup>3</sup> /s
V =	0.60 m/s		
A =	0.001 m <sup>2</sup>		
Ø tub. Entrada =	0.03 m =	1.05 in ≈	3 in
Área nueva tubería =	0.00 m <sup>2</sup>		
Vel. nueva =	0.07 m/s		

#### Tubería de interconexión filtro

Q =	0.33 l/s =	0.0003	m <sup>3</sup> /s
V =	0.60 m/s		
A =	0.001 m <sup>2</sup>		
Ø de entrada =	0.03 m =	1.0	<b>N. tubo</b> 3 in
AN tubería =	0.00 m <sup>2</sup>		0.0762
Vel. nueva =	0.07 m/s		
No. de orificios =	<b>60</b>		
Q orificio =	0.01 L/s =	5.55556E-06	m <sup>3</sup> /s
V =	0.60 m/s		
A =	0.00001m <sup>2</sup>		
Ø entrada =	0.003 m =	0.14	<b>N. tubo</b> 1.00 in
AN tubería =	0.0005 m <sup>2</sup>		
Vel. nueva =	0.01 m/s		

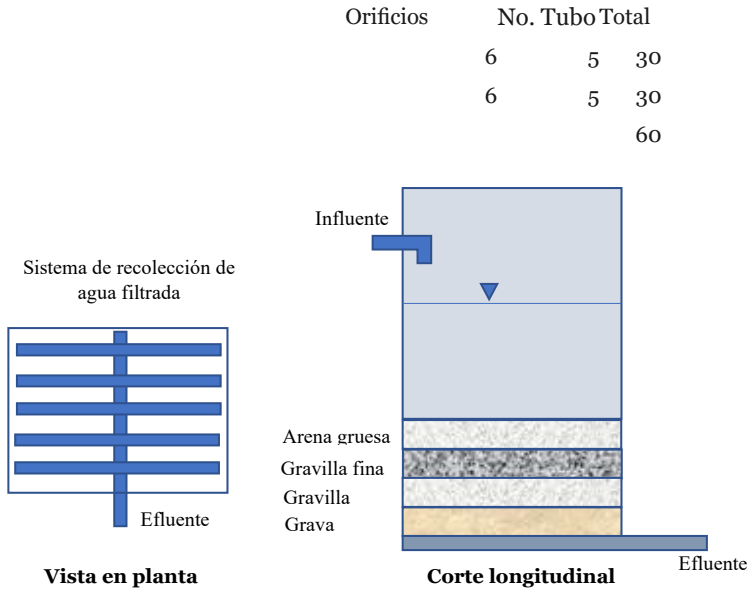


Figura 19. Corte longitudinal y vista en planta del filtro lento de arena.

Fuente: elaboración propia.

Nota: cálculos basados en CONAGUA, 2019d.

## Tren de tratamiento con RAFA-FBAH-ciénega

### 1. Datos generales y gastos de proyecto

**Tabla 23**

*Datos básicos para el diseño del tren de tratamiento*

Datos de proyecto		
Pob. proyecto =	4500	hab.
Dotación =	240	L/hab./día
Aportación =	192	L/hab./día
Carga orgánica unitaria (COU) =	85	g/hab./día
M =	3.29	Coef. Harmon
Cs =	1.5	Coef. seguridad
Módulos =	2	

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 24**

*Gastos para el diseño del tren de tratamiento*

	Gastos totales de proyecto		Gastos por módulo	
	L/s	m <sup>3</sup> /día	L/s	m <sup>3</sup> /día
Q <sub>med.</sub> =	10.0	864	5.0	432
Q <sub>mín.</sub> =	5.0	432	2.5	216
Q <sub>máx. inst.</sub> =	32.9	2,840	16.4	1,420
Q <sub>máx. ext.</sub> =	49.3	4,260	24.7	2,130

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 25**

*Carga orgánica total y concentración de entrada en el tren de tratamiento*

Concentración de entrada al sistema		Concentración por módulo		
COT =	382.5	kg/día	191.25	kg/día
F <sub>VOL</sub> =	864	m <sup>3</sup> /día	432	m <sup>3</sup> /día
C <sub>DBO</sub> =	443	mg/L	443	mg/L

COT: carga orgánica total; FVOL: flujo volumétrico; CDBO: concentración de DBO.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 26**

*Límites máximos permisibles (LMP) y eficiencia esperada del tren de tratamiento*

NOM-001-SEMARNAT-2021		Eficiencia requerida del sistema		Temperatura de entrada			
C LMP DBO =	30	mg/L	ER DBO =	93.2	%	T amb.	32 °C
C LMP DQO =	60	mg/L	ER SST =	94.3	%	T agua	28 °C
C LMP SST =	30	mg/L	ER DQO =	94.5	%		

C LMP: concentración de límite máximo permisible;

ER: eficiencia de remoción.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 27**

*Concentración teórica de entrada de contaminantes básicos*

Parámetros	g/hab./día	g/hab./día	M (kg/día)	C (mg/L)
DBO <sub>5</sub>	50 a 120	85.0	383	443
DQO	110 a 295	202.5	911	1,055
SST	60 a 150	105.0	473	547
NH <sub>3</sub>	5 a 12	8.5	38	44
N org N	4 a 10	7.0	32	36
NTK	9 a 21.7	15.4	69	80
P <sub>ORG COMO P</sub>	0.9 a 1.8	1.4	6	7
P <sub>INORG COMO P</sub>	1.8 a 2.7	2.3	10	12
P <sub>TOTAL COMO P</sub>	2.7 a 4.5	3.6	16	19
Grasas y aceites	10 a 40	25.0	113	130

Fuente: elaboración propia.

## 2. Cárcamo concentrador

### Criterios de diseño

TRH =	45	min	30-45 min
Q máx. ext. =	49.3	L/s	3.0 m <sup>3</sup> /min
Vol. cárcamo =	133.1	m <sup>3</sup>	
Tirante =	4.5	m	
Área =	29.6	m <sup>2</sup>	
Ø =	6.14	m	
Ø a construir =	6.00	m	
NA =	28.27	m <sup>2</sup>	
N <sub>volumen</sub> =	127.23	m <sup>3</sup>	
N TRH =	43.01	min	

### Área y volumen de sedimentos

C sólidos sedimentables =	45	ml/L =	0.045 m <sup>3</sup> arena / m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O
Vol. agua =	127.2	m <sup>3</sup>	
Vol. sedimentos =	5.7		
Tirante <sub>sedimentos</sub> =	0.2	m	

### Diámetro de tubería de succión en equipo de bombeo

Vel. bomba =	2.5	m/s	2-2.7 m/s
Q bombeo =	0.099	m <sup>3</sup> /s	
Ø tubería =	0.22410	m =	8.8 in
Ø constructivo =	10.00	in =	0.254 m
N <sub>área</sub> =	0.051	m <sup>2</sup>	
N <sub>velocidad</sub> =	1.95	m/s	

### Diámetro de tubería de descarga

V <sub>(vel. descarga)</sub> =	0.6	m/s	
Q bombeo =	0.099	m <sup>3</sup> /s	
Ø tubería =	0.46	m	18.0 in

$\emptyset$ constructivo =	18.00	in
N <sub>área</sub> =	0.164	m <sup>2</sup>
N <sub>velocidad</sub> =	0.60	m/s

### Dimensionamiento del cárcamo

Bordo libre =	1.5	m
Tirante =	4.5	m
Long Tub. entrada =	4.0	m
Altura T cárcamo =	6.2	m

### Potencia de bombeo

Carga dinámica =	6.3	m
Pérdidas locales =	5.0	m
Carga de posición =	20.0	m
H <sub>TOTAL</sub> =	31.3	m
Densidad agua =	1,000	kg/m <sup>3</sup>
Eficiencia n =	80	%
1 Hp =	76	kg/s
Potencia =	32	Hp

### Operación de los sistemas de bombeo

Q <sub>bombeo</sub> =	5.92	m <sup>3</sup> /min
T <sub>bombeo</sub> =	43	min
No. arranques =	33	
Arranque/bomba =	8	
Horas op/bomb. =	6	horas
No. bombas =	4	

## 3. Unidades de pretratamiento

### Criterios de diseño del canal

Q <sub>máx. ext.</sub> =	49.31	L/s
No. módulo	2.00	

Q diseño =	24.65	L/s
Velocidad =	0.6	m/s
Área = A = a x b =	0.041	m <sup>2</sup>
a =	0.50	m
b =	0.08	m
b' =	0.3	m
b'' =	0.1	m
BT =	0.4	m

### Cálculo de la rejilla

Separación =	0.035	m
Separaciones =	14.29	
Barras =	13.29	
Excedente =	0.29	
Separaciones =	7	
Barras =	6	
Ajuste de separación =	0.04	m

### Ajuste del canal

Solera e =	0.25	pulg.
Espesor total que agregar a canal =	0.038	m
Ancho de canal corregido =	0.54	m

### Cálculo del material de la rejilla

Ángulo	45	°
Cateto opuesto CO =	0.48	m
Hipotenusa hip. =	0.57	m
Long. total de barras =	3.40	m
Empotrado =	1.48	m
Long. total de solera =	5.9	m
No. solera =	0.98	

**Pendiente y velocidad en el canal**

Área hidráulica =	0.04	m <sup>2</sup>
Perímetro mojado =	0.70	m
Radio hidráulico =	0.06	m
Velocidad de escurrimiento =	0.6	m/s
(n)coeficiente de rugosidad =	0.013	
Pendiente (S) =	0.0024	

**Desarenador hidráulico**

Q diseño =	2,130.0	m <sup>3</sup> /día
Velocidad del agua =	0.3	m/s
Velocidad de sedimentación =	0.024	m/s
Tirante del canal =	0.08	m
Coficiente de seguridad =	<b>1.5</b>	
Longitud =	1.5	m
Sol sed 60 ml/L =	0.00006	m <sup>3</sup> arena/m <sup>3</sup> agua
Limpieza =	<b>3</b>	día
Volumen de arena en (3 días) =	0.38	m <sup>3</sup>
Área del desarenador =	0.83	m <sup>2</sup>
Tirante del desarenador =	0.46	m

Pérdida de carga por rejilla al 50 %

Eficiencia de rejilla =	0.8	
HT =	0.088	m
Tirante desarenador final =	0.55	m

**Sistema de flotación natural (grasas y aceites)**

Q diseño =	2,130.0	m <sup>3</sup> /día
C <sub>GyA</sub> =	130.2	mg/L
TRH =	0.017	día
Vol. de tanque flotación =	36.2	m <sup>3</sup>
Tirante del diseño =	2.0	m

Área del tanque de flotación =	18.1	m <sup>2</sup>
Relación largo ancho =	2.5:1	
Ancho (a) =	2.7	m
Largo (b) =	6.7	m

#### Cálculo de tubería de interconexión

Vel. =	0.6	m/s
Q =AV =	0.025	m <sup>3</sup> /s
A =	0.0411	m <sup>2</sup>
Ø =	0.23	m
Ø =	9.00	in
Ø =	10	in
NA =	0.0507	m <sup>2</sup>
NV =	0.49	m/s

#### Tanque de regulación y ecualización

Q <sub>diseño</sub> =	2,130.0	m <sup>3</sup> /día
C <sub>GyA</sub> =	0.0	mg/L
TRH =	<b>0.5</b>	día
Volumen de tanque =	1065.0	m <sup>3</sup>
Tirante del diseño =	<b>3.0</b>	m
Área del tanque =	355.0	m <sup>2</sup>
Relación largo ancho =	2.5:1	
Ancho (a) =	12	m
Largo (b) =	30	m

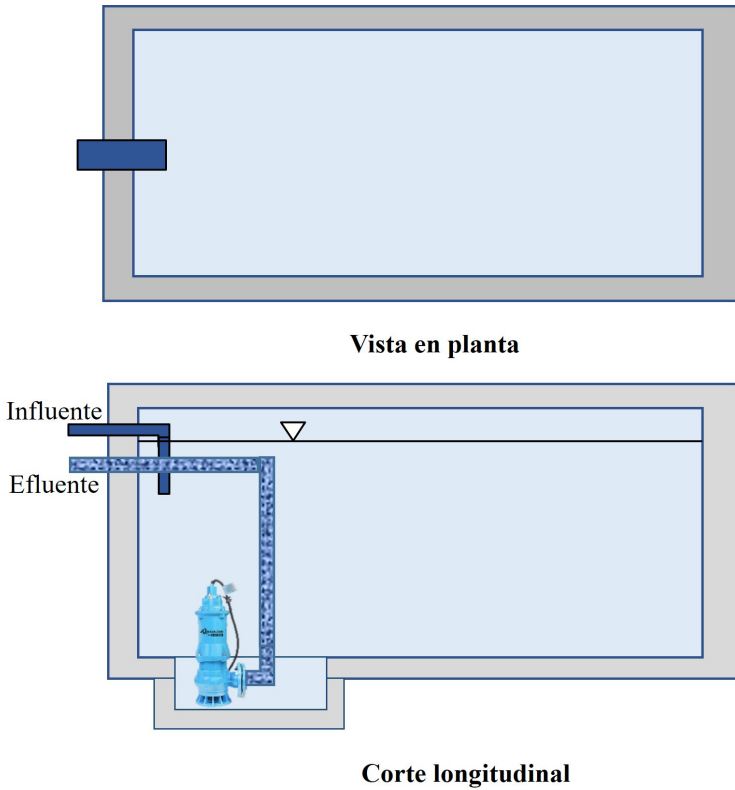


Figura 20. Corte longitudinal y vista en planta del tanque regulador.

Fuente: elaboración propia.

#### 4. Reactor anaerobio de flujo ascendente (circular)

##### Crterios de diseo

TRH =	10	h
	10.00	L/s
$Q_{med} =$	36	$m^3/h$
	0.010	$m^3/s$
Vol =	360	$m^3$

Ti =	3	m
Área A =	120.00	m <sup>2</sup>
Vel. =	0.6	m/s
Carga hidráulica =	20	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d

### Tubería de entrada y de salida

Ø =	0.087	m	3	in
-----	-------	---	---	----

### Dimensionamiento del reactor RAFA circular

Diámetro =	12	m
Tirante en el muro perimetral =	4	m
Pendiente en el fondo del tanque =	8	%
Tirante máximo =	4.5	m

### Carga para el vertedor

Diámetro =	12	m
Canaletas =	1.3	m
Corregido =	11.1	m
L = D <sub>corr</sub> p =	34.75	m

$$CSV = Q_{med} / L \quad (Ec 48)$$

$$\frac{360}{34.75} = m^3/d = 10.36 \quad m^3 / m d$$

### Dimensiones de la canaleta perimetral

Ancho	0.4	m
-------	-----	---

### Tirante crítico para descarga libre

$$yc = [(1/2 Q \text{ máx})^2 / (9.81 \times \text{ancho}^2)]^{1/3} \quad (Ec 49)$$

$$yc = 0.07 \quad m$$

$$yo = 1.73 yc \quad (Ec 50)$$

$$yo = 0.13 \quad m$$

Con 5 cm de bordo libre al gasto máximo las dimensiones serán:

Ancho =	0.65	m
Alto =	0.18	m

**Determinación de tolvas de los lodos**

$$M = SST R Q_{med} \quad (Ec 51)$$

$$V = M / (Clodo) (glodo) \quad (Ec 52)$$

<b>Masa del lodo:</b>	SST = 546.9	mg/L			
	R = 0.8				
	Q <sub>med</sub> = 10.0	l/s	⇒	M <sub>Total</sub> = 378000000	mg/d
				M <sub>Total</sub> = 0.38	ton/d
	Considerando 1	unidad(es)	⇒	M <sub>sed.</sub> = 0.38	ton/d
<b>Volumen de lodo:</b>	(Clodo) (glodo) = 40,000-70,000	mg/L			
	(Clodo) (glodo) = 40,000	mg/L		Vlodo = 9450	L/d
				Vlodo = 9.45	m <sup>3</sup> /d

Volumen de tolva con extracciones cada 12 horas

$$V \text{ tolva} = Vlodo / \text{No. extracciones} \quad (Ec 53)$$

$$V \text{ tolvas} = 9.45 \text{ m}^3 \cdot 189 \text{ m}^3/\text{mes}$$

**Volumen de un digestor anaerobio**

Volumen	56.9	días		
C <sub>DQO</sub> =	1,054.7	mg/L	1,054.7	g/m <sup>3</sup>
Q <sub>med.</sub> =	864.0	m <sup>3</sup> /día		
F	0.0003	kg/g		
Lorg	4.8	kgDQO/m <sup>3</sup> d		

**Eficiencias de remoción y las constantes cinéticas de degradación**

Q <sub>med.</sub> =	864	m <sup>3</sup> /día
Ce SST =	547	mg/L
Ce DBO =	443	mg/L
Temp. amb. =	32	°C
Temp. agua =	28	°C

**Tabla 28***Balance de materia y eficiencias de pretratamiento y RAFA*

Unidades	SST (mg/L)				SST (kg/día)			
	CE	CS	CR	ERP (%)	ME	MS	MR	ERP (%)
Pretratamiento	547	410	137	25	473	354	118	25
RAFA	410	123	287	70	354	71	284	80

Unidades	DBO (mg/L)				DBO (kg/día)			
	CE	CS	CR	ERP (%)	ME	MS	MR	ERP (%)
Pretratamiento	443	421	22	5	383	363	19	5
RAFA	421	126	294	70	363	73	291	80

CE: concentración de entrada; CS: concentración de salida; CR: concentración removida; ERP: eficiencia de remoción del proceso; ME: flujo másico de entrada; MS: flujo másico de salida y MR: flujo másico removido.

Fuente: elaboración propia.

#### Volumen de sedimentos o lodos generados

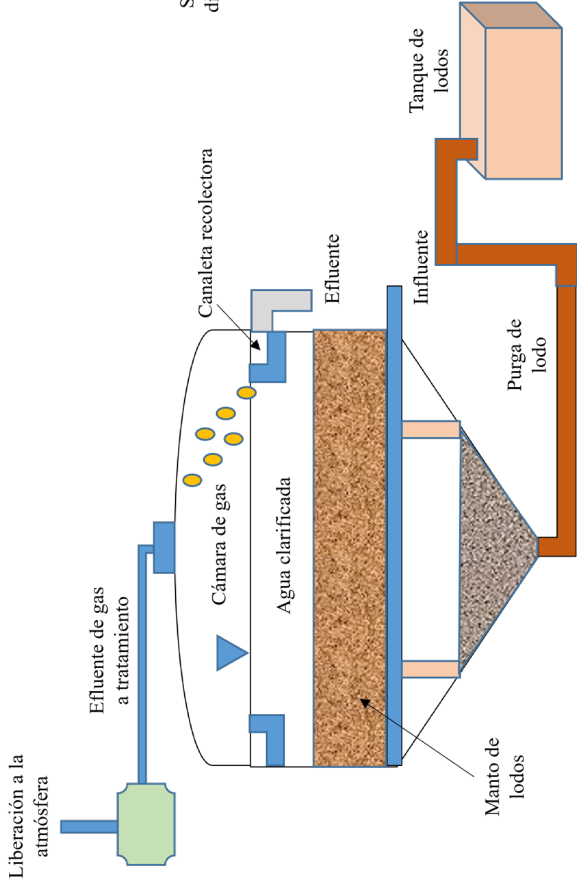
Parámetro	kg/día	m <sup>3</sup> /día
SST	402	0.223
DBO	310	0.516
		0.740

Volumen de cámara de lodos 10.35 m<sup>3</sup>

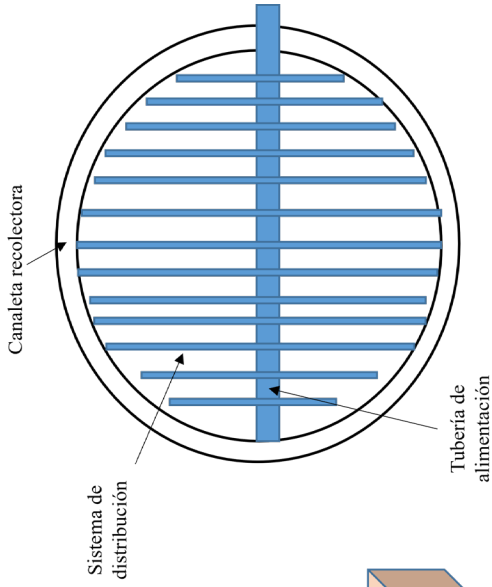
#### Volumen del RAFA

#### Ajuste cinético para n=1

Vol. Total =	520.0	m <sup>3</sup>	Const. de deg. K (lab) =	0.33	días <sup>-1</sup>
Vol. agua =	360.0	m <sup>3</sup>	Ajusto K (Arrhenius) =	0.46	días <sup>-1</sup>
Vol. sedim. =	10.4	m <sup>3</sup>	Considerando que la DBO se degrada en primer orden		
Espacio gases =	160	m <sup>3</sup>	TRH (70% R <sub>DBO</sub> ) =	0.78	días 18.7 h
TRH agua =	0.4	días	Conc. DBO a la salida =	4.34	mg/L
TRH agua =	10.0	horas			



**Corte longitudinal**



**Vista en planta**

Figura 21. Corte longitudinal y vista en planta del RAFA (circular).  
Fuente: elaboración propia.

## 5. Reactor anaerobio de flujo ascendente (rectangular)

**Tabla 29**

*Datos de proyecto para el dimensionamiento del RAFA*

Parámetros de entrada	Valor	Unidad
Gasto afluente promedio =	864	m <sup>3</sup> /d
Qip gasto afluente máximo horario: Qmax-h =	2,840.0	m <sup>3</sup> /d
DQO afluente promedio (So) =	1,055	mg/L
DBO afluente promedio (So) =	443	mg/L
Temperatura del agua residual	28	°C
Coefficiente del rendimiento de sólidos: Y =	0.18	kgSST/kgDQO
Coefficiente del rendimiento de sólidos, en términos de DQO: Yobs =	0.21	kgDQO/lodo/kgDQO
Concentración esperada de la descarga del lodo: C =	4	%
Densidad del lodo: g =	1,021	kg/m <sup>3</sup>
Tiempo de residencia hidráulica TRH =	8	h

Fuente: elaboración propia.

### Carga de DQO afluente promedio (Lo)

$$Lo = So Qip \quad (Ec 54)$$

So =	1.05	kg/m <sup>3</sup>
Qip =	864	m <sup>3</sup> /d
Lo =	911	kg DQO/d

### Tiempo de residencia hidráulica (t)

TRH =	8	horas =	0.333	días
-------	---	---------	-------	------

### Volumen total del reactor (V)

$$Vol = Qip TRH \quad (Ec 55)$$

Vol =	288	m <sup>3</sup>
-------	-----	----------------

### Número de módulos del reactor (N)

N =	2
-----	---

**Volumen de cada módulo (Vu)**

$$Vu = Vol / N \quad (Ec 56)$$

$$Vu = 144 \quad m^3$$

**Altura del reactor (H):**

$$H = 4$$

**Área de cada módulo (A)**

$$A = 36.0 \quad m^2$$

$$A = Vu / H \quad (Ec 57)$$

$$a = 4 \quad m$$

$$A = b a \quad (Ec 58)$$

$$b = 9.0 \quad m$$

**Verificación del área, volumen y tiempo de residencia hidráulica**

$$A \text{ neta} = 72 \quad m^2$$

$$Vol. = 288 \quad m^3$$

$$TRH = 0.333 \quad \text{días}$$

**Carga hidráulica volumétrica (CHV)**

$$CHV = Qip / Vol \quad (Ec 59)$$

$$CHV = 3.0 \quad m^3/m^3 \text{ d}$$

**Carga orgánica volumétrica (COV)**

$$COV = (Qip So) / Vol \quad (Ec 60)$$

$$COV = 3.17 \quad \text{kgDQO}/m^3 \cdot \text{d}$$

**Velocidades del flujo ascendente**

$$V = Qip / At \quad (Ec 61)$$

$$Qip = 864 \quad m^3/d$$

$$v = 12.01 \quad m/d =$$

$$v = 0.5 \quad m/h$$

$$Q_{\text{máx}} = 2,840.0 \quad m^3/d$$

$$v = 39.48 \quad m/d =$$

$$v = 1.6 \quad m/h$$

**Sistemas de distribución del agua residual (afluente)**

Área de influencia  $A_d = 2 \text{ m}^2$

Lodo medio flocul. COV = 2 kg de DQO  $\text{m}^3/\text{d}$

Número de tubos de distribución del afluente

$$Nd = At / Ad \quad (\text{Ec } 62)$$

$Nd = 36$  tubos de distribución

No de tubos por reactor	18	izquierdo	derecho
		6	6
		Largo b	3
		Ancho a	9

**Eficiencias de remoción de la DQO del sistema**

$$ER_{DQO} = 100 (1 - 0.68 t)^{-0.35} \quad (\text{Ec } 63)$$

$$ER_{DQO} = 100 (1 - 0.7 t)^{-0.5} \quad (\text{Ec } 64)$$

$ER_{DQO} = 67.2 \%$

$ER_{DBO} = 75.3 \%$

**Concentraciones de DQO y DBO en el efluente final**

$$C_{efl} = S_o - [ (E S_o) / 100 ] \quad (\text{Ec } 65)$$

Cefl DQO = 0.346 kgDQO/ $\text{m}^3$

346 mgDQO/L

Cefl DBO = 0.110 kgDQO/ $\text{m}^3$

110 mgDQO/L

**Producción teórica del metano**

$$DQO_{CH_4} = Qip [ (S_o - C_{efl}) - Y_{obs} S_o ] \quad (\text{Ec } 66)$$

$$K(t) = (PKDQO) / [ R (273 + T) ] \quad (\text{Ec } 67)$$

$$Q_{CH_4} = DQO_{CH_4} / K(t) \quad (\text{Ec } 68)$$

$DQO_{CH_4} = 421$  kgDQO/d

$P = 1$  atm

$K_{DQO} =$	64	gDQO/mol
$R =$	0.08206	atm L/mol K
$T =$	28	°C
$K(t) =$	2.6	kgDQO/m <sup>3</sup>
$Q_{CH_4} =$	162	m <sup>3</sup> /d

### Producción del biogás

$$Qg = DQO_{CH_4} / 0.7 \quad (Ec 69)$$

$Qg =$	232	m <sup>3</sup> /d
$Qg =$	9.7	m <sup>3</sup> /h

### Dimensionamiento del colector del gas

Número de colectores de gas =	2	uno por módulo
Longitud de cada colector: Lg =	9	m

Longitud total del colector de gas (considerando los dos módulos):

$$Lt = 18 \quad m$$

Ancho de la parte superior del colector del gas (Ag):

$$Ag \text{ (establecido)} = 0.25 \quad m$$

Área total del colector del gas (Atg), en la parte superior:

$$Atg = 4.5 \quad m^2 \quad (Ec 70)$$

Tasa de liberación del biogás en el colector del gas (kg):

$$kg = 2.15 \quad m/h \quad (Ec 71)$$

Por lo tanto, cada colector de biogás se hace con las siguientes dimensiones:

Longitud	9	m
Ancho	0.25	m

### Dimensionamiento de las aberturas del compartimento del sedimentador

$$Ata = Lt Aa \quad (Ec 72)$$

Con un separador de tres fases en cada módulo, entonces:

El número de aberturas simples =	4	(2 en cada módulo)
Longitud de cada abertura (La) =	9	m a lo largo del reactor
Longitud equivalente de oper. simples Lt =	36	m
Ancho de cada abertura (Aa) =	0.45	m (adoptado)
Área total de las aberturas (Ata) =	16.2	m <sup>2</sup>

Verificación de las velocidades a través de las aberturas (v):

$$v = Q_{ip} / Ata \quad (Ec 73)$$

Para  $Q_{ip}$ :

v =	53.3	m/d
v =	2.2	m/h

Para  $Q_{máx-h}$ :

v =	175.3	m/d
v =	7.3	m/h

Las velocidades encontradas se encuentran dentro de las recomendaciones de diseño, por lo tanto, cada abertura del compartimento del sedimentador tendrá las siguientes dimensiones:

Abertura simple:

Longitud:	9	m
Ancho:	0.45	m

$$Lts = LsN \quad (Ec 74)$$

$$Ats = Lts Aes \quad (Ec 75)$$

### Dimensionamiento del compartimento del sedimentador

Número de compartimentos del sedimentador  $N = 2$  (1 en cada reactor)

Longitud de cada sedimentador (Ls) =	9	m (a lo largo del reactor)
Longitud total del sedimentador (Lts) =	18	m
Ancho de cada colector de gas (Ag) =	0.3	m (0.25 + 0.05 espesor de la pared)
Ancho de cada compartimento del sedimentador (As) =	4	m
Ancho efectivo de cada sedimentador Aes: Aes =	3.7	m
Área total del sedimentador (Ats) =	66.6	m <sup>2</sup>

#### Verificación de las tasas de carga de superficie del sedimentador (vs)

Para Qip:  $vs = Q_{ip} / A_{ts}$  (Ec 76)

$$vs = 13.0 \quad \text{m/d}$$

$$vs = 0.54 \quad \text{m/h}$$

Para Q<sub>máx-h</sub>:

$$vs = 42.6 \quad \text{m/d}$$

$$vs = 1.78 \quad \text{m/h}$$

Se puede observar que las tasas de carga superficial en el sedimentador se encuentran dentro de los criterios de diseño. Por lo tanto, cada compartimento del sedimentador tendrá las siguientes dimensiones:

$$\text{Longitud: } 9 \quad \text{m}$$

$$\text{Ancho: } 3.7 \quad \text{m}$$

Volumen del compartimento del sedimentador

Altura de la parte superior del compartimento del sedimentador (paredes verticales)

Altura de la parte del fondo del compartimento del sedimentador (paredes inclinadas)

Tiempo de residencia en el compartimento del sedimentador 2 m/h

#### Producción de lodo

$$Pl = Y D Q O \quad (\text{Ec } 77)$$

$$Vs = Ps / (y C) \quad (\text{Ec } 78)$$

$P_s = 164.0 \text{ kg SST/d}$

$vs = 4.0 \text{ m}^3/\text{d}$

Nota: cálculos basados en CONAGUA, 2019h.

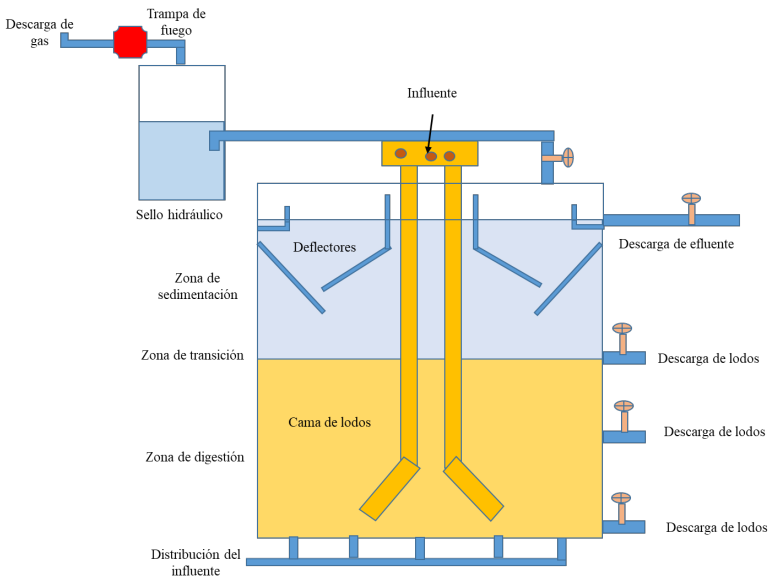


Figura 22. Diagrama de RAFA adaptado de CONAGUA, 2019h.

Fuente: elaboración propia.

## 6. Filtro biológico anaerobio horizontal

### Criterios de diseño

TRH	6.0	h
	10.0	L/s
$Q_{med.} =$	36	$\text{m}^3/\text{h}$
	0.010	$\text{m}^3/\text{s}$
Vol. =	216.0	$\text{m}^3$
$T_i =$	1.5	m
Área A =	144.0	$\text{m}^2$

Vel =	0.6	m/s
Carga hidráulica =	7.0	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /d
A superficial =	123.4	m <sup>2</sup>

### Tubería de entrada y de salida

Ø =	0.087	m =	3	in
-----	-------	-----	---	----

### Dimensionamiento del tanque

Relación largo ancho 2:1

Ancho	a =	7.86	m
Largo	b =	15.71	m
Número de pasos =		4.00	pasos
Espesor de mamparas =		0.15	m
Longitud adicional =		0.60	m
Long. int. efec. de la unidad =		16.31	m
Altura del lecho de grava =		1.00	m
Paso del agua =		0.35	m
Escalón hidráulico =		0.25	m

### Eficiencias de remoción y las constantes cinéticas de degradación

Q <sub>med.</sub> =	864	m <sup>3</sup> /día
Ce SST =	123	mg/L
Ce DBO =	126	mg/L
Temp. amb. =	32	°C
Temp. agua =	28	°C

**Tabla 30**

*Balance de materia y eficiencias de filtro biológico anaerobio horizontal (FBAH)*

Unidades	SST (mg/L)			
	CE	CS	CR	ERP (%)
Filtro biológico anaerobio horizontal	123	25	98	80
	DBO (mg/L)			
	CE	CS	CR	ERP (%)
	126	25	101	80
	SST (kg/día)			
	ME	MS	MR	ERP (%)
	15	3	12	80
	DBO (kg/día)			
	ME	MS	MR	ERP (%)
	16	3	13	80

Fuente: elaboración propia.

#### Volumen de sedimentos

Parámetro	kg/día	m <sup>3</sup> /día
SST	12	0.007
DBO	13	0.021
		0.028
Volumen de cámara de lodos		0.39 m <sup>3</sup>

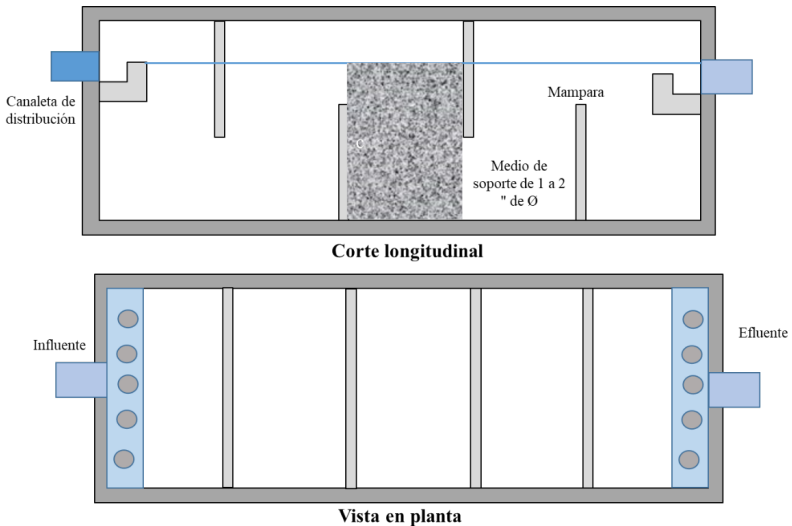


Figura 23. Corte longitudinal y vista en planta del FBAH.  
Fuente: elaboración propia.

## 7. Ciénega

### Criterios de diseño

Tiempo de retención: 1 a 5 horas

Velocidad del agua: 0.6 a 1.5 m/s

Separación entre mamparas: 0.50 a 0.80 metros

Abertura del paso del agua: 1.5 x separación entre mamparas

Forma del tanque: por la forma y dimensiones relación 3:1

Bordo libre: no menor de 30 cm.

### Tabla 31

Consideraciones para el dimensionamiento de la ciénega

Parámetro	Valor	Unidad
Gasto nominal de diseño	10.00	m <sup>3</sup> /h
Velocidad del agua	0.60	m/s
Separación/mamparas	0.60	m

Parámetro	Valor	Unidad
Espesor de mamparas	0.15	m
Bordo libre	0.30	m
Tiempo de retención	5.00	h
Bordo libre	0.30	m
Tirante de agua =	1.20	m

Fuente: elaboración propia.

### Dimensiones de la unidad

$$\text{Vol. del tanque} = Q_{med} TRH \quad (Ec 79)$$

$$\text{Á del tanque} = \frac{\text{Vol. del tanque}}{Ti \text{ del agua}} \quad (Ec 80)$$

Volumen del tanque = 50.0 m<sup>3</sup>

a = Ancho del tanque 4.6 m Relación 2:1

b = Longitud del tanque 9.1 m

Área del tanque = 41.7 m<sup>2</sup>

$$\text{No de mamp.} = \frac{\text{Long. del tanque} - 1}{\text{Separación entre mamp.}} \quad (Ec 81)$$

No. de mamparas = 14 No. de espacios: 15

$$\text{Long. preliminar del tanque} = (\text{Sep. entre mamp.}) (\text{No. de espacios}) \quad (Ec 82)$$

Long. preliminar del tanque = 9.1 m

Verificación de la velocidad del agua:

$$\text{Área de flujo} = (\text{Sep. entre mamp.}) (\text{Tirante del agua}) \quad (Ec 83)$$

Área de flujo 0.72 m<sup>2</sup>

$$\text{Vel. del agua} = \frac{Q_{med}}{\text{Área de flujo}} \quad (Ec 84)$$

Vel. 0.01 m/s

$$\text{Grosor total de mamp.} = (\text{Espesor de las mamp.}) \quad (\text{Ec 85})$$

$$(\text{No. de mamp.})$$

Grosor total de mamparas= 2.1 m

$$\text{Longitud total del tanque} = \text{Long. preliminar del tanque} + \quad (\text{Ec 86})$$

$$\text{Grosor total de mamp.}$$

Longitud total del tanque: 11.3 m

$$\text{Abertura del paso del agua} = (1.5) (\text{Separación} \quad (\text{Ec 87})$$

$$\text{entre mamp.})$$

Abertura del paso del agua: 0.9 m

$$\text{Longitud de la mamp.} = \text{Ancho del tanque} - \text{Abertura del} \quad (\text{Ec 88})$$

$$\text{paso del agua}$$

Longitud de la mampara: 3.7 m

$$\text{Altura de la mamp.} = \text{Tirante del agua} + 0.1 \text{ m} + \quad (\text{Ec 89})$$

$$\text{bordo libre}$$

Altura de la mampara: 1.30 m

Altura de la estructura: 1.60 m

### Eficiencias de remoción y las constantes cinéticas de degradación

$Q_{\text{med.}} = 240 \text{ m}^3/\text{día}$

$C_e \text{ SST} = 25 \text{ mg/L}$

$C_e \text{ DBO} = 25 \text{ mg/L}$

Temp. amb. = 32 °C

Temp. agua = 28 °C

**Tabla 32**  
**Balace de materia y eficiencia de la ciénega**

Unidades	SST (mg/L)			
	CE	CS	CR	ERP (%)
Ciénega HAFL	25	18	6	25
	DBO (mg/L)			
	CE	CS	CR	ERP (%)
	25	24	1	5
	SST (kg/día)			
	CE	CS	CR	ERP (%)
	6	4	1	25
	DBO (kg/día)			
	CE	CS	CR	ERP (%)
	6	6	0	5

CE: concentración de entrada; CS: concentración de salida; CR: concentración removida; ERP: eficiencia de remoción del proceso; ME: flujo másico de entrada; MS: flujo másico de salida y MR: flujo másico removido.  
Fuente: elaboración propia.

### Volumen de sedimentos

Parámetro	kg/día	m <sup>3</sup> /día
SST	1	0.001
DBO	0	0.001
		0.001
Volumen de cámara de lodos		0.02 m <sup>3</sup>

## 8. Lechos de secado

Numero de módulos =	1	
Vol. lodos =	54	m <sup>3</sup> /día
Vol. lodos digeridos =	5.4	m <sup>3</sup> /día
Tiempo de secado =	10	días
Tirante =	0.4	m

Volumen =	53.8	m <sup>3</sup>
Área efectiva =	135	m <sup>2</sup>
a =	12	m
b =	12	m
Ti en el centro, con pendiente del 8%		
Ti =	0.6	m

### Lechos de secado

Numero de celda =	2	
Vol. lodos =	27	m <sup>3</sup> /día
Vol. lodos digeridos =	2.7	m <sup>3</sup> /día
Tiempo de secado =	10	días
Tirante =	0.4	m
Volumen =	13.5	m <sup>3</sup>
Área efectiva =	34	m <sup>2</sup>
	a = 6	m
	b = 6	m
Ti en el centro, con pendiente del 8%		
Ti =	0.5	m
Por norma	6 x 20	120 m <sup>2</sup> dimensiones máximas
Para 4,500 hab. =	418.5	m <sup>2</sup> se necesitan de área para la disposición de lodos

Nota: cálculos basados en CONAGUA (2019h).

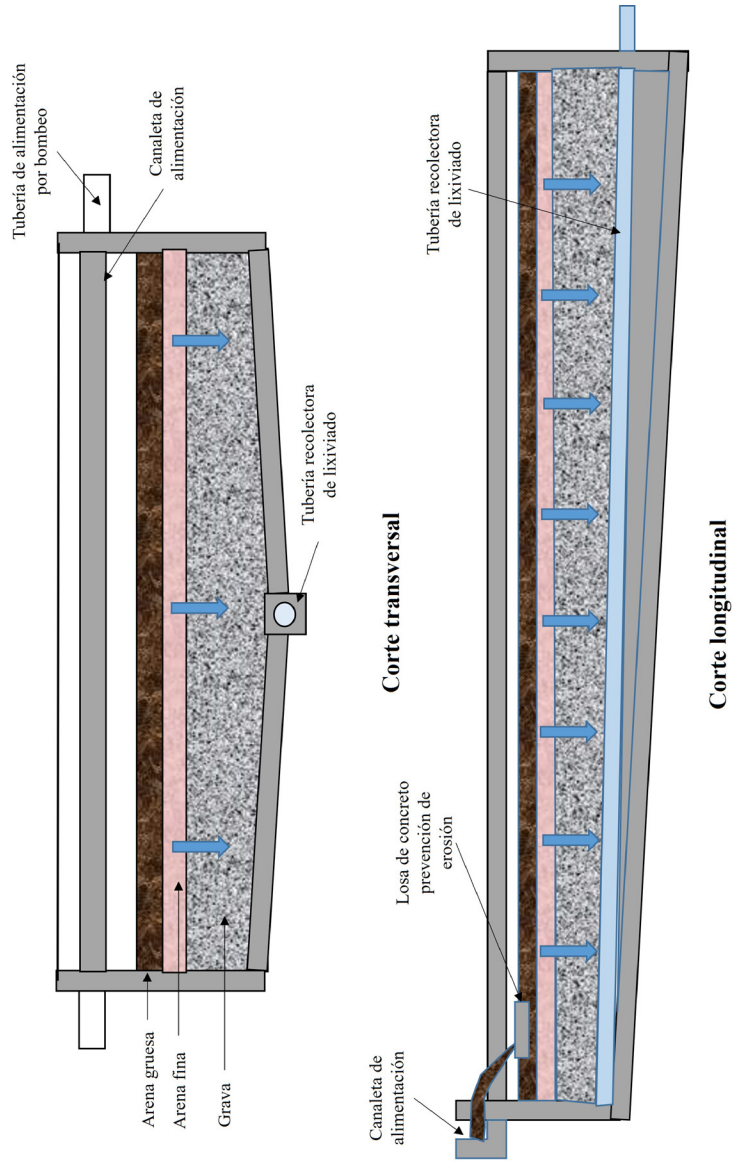


Figura 24. Corte longitudinal y corte transversal del lecho de secado.  
Fuente: elaboración propia.

## Tren de tratamiento con HAFL-HAFS-ciénega

### 1. Datos generales y gastos de proyecto

**Tabla 33**

*Datos básicos para el diseño del tren de tratamiento*

Parámetros	Valor	Unidad
Población proyecto ( $P_p$ ) =	25,000.0	hab.
Dotación ( $D_{ot}$ ) =	240	L/hab./día
Aportación =	192.00	L/hab./día
Carga orgánica unitaria (COU) =	85.0	g/hab./día
No. módulos =	2.0	
Coefficiente de seguridad ( $C_s$ ) =	1.5	
Coefficiente de Harmon ( $M$ ) =	2.56	

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 34**

*Datos meteorológicos*

Parámetros	Mes cálido (junio)		Mes más frío (diciembre)	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad
Temperatura media mensual	29.6	°C	24.3	°C
Precipitación media mensual	227.4	mm/mes	162.0	mm/mes
Evaporación media mensual	5.0	mm/mes	2.0	mm/mes
Infiltración	5	mm/día	5	mm/día

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 35**

*Gastos de diseño*

Caudal	Gasto total de proceso		Gasto por módulo	
	L/s	m <sup>3</sup> /día	L/s	m <sup>3</sup> /día
$Q_{med.}$ =	55.56	4,800	27.8	2,400
$Q_{min.}$ =	27.78	2,400	13.9	1,200

Caudal	Gasto total de proceso		Gasto por módulo	
	L/s	m <sup>3</sup> /día	L/s	m <sup>3</sup> /día
Q máx. inst. =	141.98	12,266	70.9	6,133
Q máx. ext. =	212.96	18,400	106.5	9,200

Fuente: elaboración propia.

### Dimensionamiento preliminar de unidades de tratamiento (Q módulo)

#### TQ1: flujo libre 1

$$t_{r1} = 7.0 \quad d$$

$$h_1 = 0.50 \quad m$$

$$\text{Vol TQ1} = 16,800.00 \quad m^3$$

$$A \text{ TQ1} = 33,600.00 \quad m^2$$

#### TQ2: flujo subsuperficial 2

$$t_{r2} = 5.5 \quad d$$

$$h_2 = 0.50 \quad m$$

$$\text{Vol TQ2} = 13,200.00 \quad m^3$$

$$A \text{ TQ2} = 26,400.00 \quad m^2$$

#### TQ3: pulimento

$$t_{r1} = 4.0 \quad d$$

$$h_1 = 0.5 \quad m$$

$$\text{Vol TQ3} = 9,600.00 \quad m^3$$

$$A \text{ TQ3} = 19,200.00 \quad m^2$$

Se considera un excedente de 20% del área total **95,040.0 m<sup>2</sup> o 9.5040 Ha**

### Tabla 36

#### Criterios de diseño de humedales artificiales

Humedal	Tirante (m)	TRH (días)	S (%)	n	K
HAFL	0.1-0.45	6 a 14	0-0.5		0.40-0.65
HAFS	0.45-1.0	14	0-0.5	0.3-0.75	0.25-0.40
HAE	0.6-1.2	7 a 14			0.20-0.25

Fuente: CONAGUA, Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento, libro 10, capítulo 5, "Lechos de hidrófitas".

**Tabla 37**  
*Parámetros de entrada al sistema de tratamiento*

	Concentración de entrada al sistema		Conc. por módulo	
COT =	2,125.00	kg/día	1,062.50	kg/día
F <sub>VOL</sub> =	4,800.00	m <sup>3</sup> /día	2,400.00	m <sup>3</sup> /día
C <sub>DBO</sub> =	443	mg/L	443	mg/L

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 38**  
*Eficiencia requerida del sistema*

Parámetro	Valor	Unidad
C LMP DBO =	30	mg/L
C LMP SST =	30	mg/L
ER DBO =	93.2	%

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 39**  
*Concentración teórica de entrada de contaminantes básicos*

Parámetros	g/hab./día	g/hab./día	M (kg/día)	C (mg/L)
DBO5	40 a 120	85.0	2,125	443
DQO	110 a 295	110.0	2,750	573
SST	60 a 150	60.0	1,500	313
NH3	5 a 12	5.0	125	26
N org N	4 a 10	4.0	100	21
NTK	9 a 21.7	9.0	225	47
P <sub>ORG COMO P</sub>	0.9 a 1.8	0.9	23	5
P <sub>INORG COMO P</sub>	1.8 a 2.7	1.8	45	9
P <sub>TOTAL COMO P</sub>	2.7 a 4.5	2.7	68	14
Grasas y aceites	10 a 40	10.0	250	52

Fuente: elaboración propia.

## 2. Sedimentador

### Criterios de diseño

No. módulos =	2		
Carga superficial	32 a 49	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$	
Carga sup. =	49	$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$	
$Q_{\text{med.}}$ =	27.78	$\text{L/s}$ =	2,400 $\text{m}^3/\text{día}$
A sedimentación =	48.980	$\text{m}^2$	
Diámetro =	7.90	m	8.00 m
N A sedimentador =	50.3	$\text{m}^2$	
Tirante =	3.5	m	
Pendiente =	8	%	
Tirante al centro =	3.82	m	
Volumen sedimentador =	184.0	$\text{m}^3$	
TRH =	1.84	H =	0.077 días

### Volumen y masa de los materiales separados

ER SST 60-70% =	40	Dens SST =	1,400 $\text{kg}/\text{m}^3$
ERDBO 20-30% =	5	Dens DBO =	600 $\text{kg}/\text{m}^3$

**Tabla 40**

*Balance de materia del sedimentador primario*

Cargas	Flujo másico ( $\text{kg}/\text{día}$ )			Concentración ( $\text{mg}/\text{L}$ )		
	Ce	Cr	Cs	Ce	Cr	Cs
M SST	750.00	300	450.0	312.5	125.0	187.5
M DBO	1,062.50	53.1	1,009.4	442.7	22.1	420.6

Fuente: elaboración propia.

### Volumen de lodos en la tolva

Vol SST =	0.21429	$\text{m}^3/\text{día}$
Vol DBO =	0.08854	$\text{m}^3/\text{día}$
Vol total =	0.30283	$\text{m}^3/\text{día}$
Vol exp =	0.60565	$\text{m}^3/\text{día}$

**Dimensionamiento de la tolva**

Tirante de tolva =	0.5	m
Área de tolva =	1.21	m <sup>2</sup>
Diámetro =	1.24	m
Dia N tolva =	1.55	m
Volumen tolva =	0.61	m <sup>3</sup>

**Diámetro de la tubería de entrada al sedimentado**

Q med. =	27.78	L/s=	0.0278	m <sup>3</sup> /s
Vel. entrada =	0.60	m/s		
A =	0.05	m <sup>2</sup>		
Dia tub entrada =	0.24	m=	9.56	in ≈ 10 in
AN tubería =	0.05	m <sup>2</sup>		0.25 m
Vel. nueva =	0.55	m/s		

### 3. Tasas de reacción para la remoción de constituyentes en humedales artificiales

**Coefficiente de remoción en base a volumen**

Reed et al. (1995), citado en Crites y Tchobanoglous (2000). El principio supone a un único constituyente que es la DBO.

$$r_{DBO} = -k DBO \quad (Ec 90)$$

$r_{DBO}$  = Tasa de remoción de DBO por unidad de tiempo por volumen (ML<sup>-3</sup>T<sup>-1</sup>)

$k$  = Coeficiente de la velocidad para la remoción de DBO (T<sup>-1</sup>)

DBO = Concentración de DBO carbonácea, ML<sup>-3</sup>

**Tabla 41**

*Comportamiento esperado según Reed et al. (1995)*

Parámetro	HAFI	HAFS	HAE	Unidad
$k$ =	0.45	0.25	0.2	
$C_e$ DBO =	443	443	443	mg/L
$C^s_{DBO(TC)}$ =	16.9	72.1	103.7	mg/L

Parámetro	HAFL	HAFS	HAE	Unidad
$C_{S_{DBO(TSC)}} =$	38.2	113.5	149.1	mg/L
$\eta_{(TC)} =$	96.2	83.7	76.6	%
$\eta_{(TSC)} =$	91.4	74.4	66.3	%

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 42**

*Eficiencias de remoción según Reed et al. (1995)*

Tren	CE	CR	CS	ER DBO
HAFL	443	404	38	91.4
HAFS	38	28	10	74.4
HAPF	10	7	3	66.3
			ETR	99.3

Fuente: elaboración propia.

### Coefficiente de remoción en base al área

Kadlec y Knigh (1996), citando en Crites y Tchobanoglous (2000).

$$r_{DBO} = -k(A/V) DBO = -(kA/H)(DBO) \quad (Ec 91)$$

$r_{DBO}$  = Tasa de remoción de DBO por unidad de tiempo por volumen ( $ML^{-3}T^{-1}$ )

$k_A$  = Coeficiente de la velocidad para la remoción de DBO ( $LT^{-1}$ )

DBO = Concentración de DBO carbonácea, mg/L

A = Área de la superficie,  $m^2$

V = Volumen,  $m^3$

H = Profundidad, m

Flujo libre                      Flujo subsuperficial

$k_A$  =                      0.65                      0.4

DBO =                      443                      mg/L

A =                      33594                       $m^2$

V =                      13,055.3                       $m^3$

H =                      0.52                      m

$C_{DBO(TC)} =$	0.0024	mg/L	0.25	mg/L
$C_{DBO(TSC)} =$	0.4796	mg/L	6.63	mg/L
$\eta_{(TC)} =$	100.00	%	99.94	%
$\eta_{(TSC)} =$	99.89	%	98.50	%

### Tiempo de retención teórico en un humedal artificial

$$TRH = V / Q = n \, dA / Q \quad (Ec \, 92)$$

Área propuesta	361,603.20	pie <sup>2</sup>
$n =$ Porosidad del medio (0.35-0.75)	0.75	
$a =$ Ancho	425.2	pie = 129.6 m
$b =$ Largo	850.4	pie = 259.2 m
$T_i =$ Tirante o profundidad	1.7	pie = 0.52 m
$Q =$ Gasto (m <sup>3</sup> /día)	84,756.00	pie <sup>3</sup> /día = 2,398.59 m <sup>3</sup> /día

**Tabla 43**

### Ajuste de dimensionamiento de un humedal

Parámetro	n real		Con hid.		Con F.C.	
TRH =	5.4	días	7.3	días	9.7	días
Volumen =	13055.3	m <sup>3</sup>	17407.1	m <sup>3</sup>	23209	m <sup>3</sup>
Área	25195.53	m <sup>2</sup>	33594.04	m <sup>2</sup>	44792.05	m <sup>2</sup>
					$b =$	345.6 m
					$a =$	129.6 m

Con F.C.: dimensionamiento con factor de corrección 1.33; n real: dimensionamiento con porosidad; Con hid: dimensión hidráulica.

Fuente: elaboración propia.

### Determinación del efluente teórico de DBO en un flujo pistón (ideal)

$$DBO_{eff} = DBO_{inf} e^{-kt} \quad (Ec \, 93)$$

$DBO_{inf} =$	443	mg/L
$k =$	0.45	d <sup>-1</sup>

t =	5.4	días		
DBO <sub>eff</sub> =	38.23	mg/L	η proceso =	91.4 % R DBO

### Ajuste a n reactores de mezcla completa con volúmenes iguales en serie

$$C_n = C_0 / (1 + kV/nQ)^n \quad (Ec 94)$$

C <sub>n</sub> = Conc. de DBO en reactor n de la serie (mg/L)	13.80
C <sub>0</sub> = Conc. del influente (mg/L)	442.71
K = Cte. global de tasa de remoción de DBO = 1.2 d <sup>-1</sup>	1.20
V = Volumen total del humedal	13,055.31
n = Número de reactores	3.00
Q = Gasto medio (m <sup>3</sup> /día)	2,398.59

### Cálculo de la tasa aparente de remoción

$$\ln (DBO_{eff} / DBO_{efl}) / -t = K \quad (Ec 95)$$

$$K_{aparente} = 0.64 \text{ d}^{-1}$$

### Modelado de la remoción de DBO

$$k = K_{global} / (1 + rt)^n \quad (Ec 96)$$

	Diseño	Valor
k = Cte. de la TR en el tiempo (d <sup>-1</sup> )		<b>0.31</b>
k <sub>global</sub> = Cte. inicial TRG en el tiempo (d <sup>-1</sup> )		0.64
r = Coeficiente de retardo, (d <sup>-1</sup> )	0.1-0.4	0.2
t = Tiempo (dist./vel.)		5.4
n = Expo. relacionado constituyente removido	0.0 - 1.0	1
L = Longitud		
V = Velocidad		

### Modelado de la remoción de SST

$$SST_n = \frac{C_0}{(1 + (k_0/1 + rt \times V/nQ))^n} = \frac{C_0}{(1 + (0.25 k_0 t / 1 + rt))^n} \quad (Ec 97)$$

SSTn = Conc. de SST en reactor n de la serie (mg/L)	45.2	Con retardo
SSTo = Conc. del influente (mg/L)	313	
$K_0$ = Cte. global de tasa de remoción de SST sin retardo = $1.2 \text{ d}^{-1}$	1.25	
V = Volumen total del humedal	13,055.31	
n = Número de reactores	2.00	
Q = Gasto medio ( $\text{m}^3/\text{día}$ )	2,398.59	
r = Coeficiente de retardo, ( $\text{d}^{-1}$ )	0.20	
t = Tiempo de retención	5.44	
SSTn sin retardo (mg/L)	42.8	
$\eta_{\text{SST}}$ (%) =	85.5	

### Impacto de los tiempos de retención sobre las tasas de remoción

$$\ln(C_s/C_o) / -t = K \quad (\text{Ec } 98)$$

	Condiciones exp. con un TRH = 0.8 d		Condiciones exp. con un TRH = 6.4 d		
Cs =	29	mg/L	Cs =	12	
Co =	312.50	mg/L	Co =	312.50	mg/L
t =	0.8	d	t =	6.4	d
K =	2.97	$\text{d}^{-1}$	K =	0.51	$\text{d}^{-1}$

### Efecto de la temperatura en los humedales artificiales

$$K_2 = K_1 \theta^{(T_2 - T_1)} \quad (\text{Ec } 99)$$

	Condiciones expe. con un TRH = 0.8 d		Condiciones exp. con un TRH = 6.4 d		
$\theta$ =	1.06		$\theta$ =	1.06	
T <sub>1</sub> =	10	°C	T <sub>1</sub> =	10	°C
T <sub>2</sub> =	26	°C	T <sub>2</sub> =	26	°C
K <sub>1</sub> =	2.97	$\text{d}^{-1}$	K <sub>1</sub> =	0.51	$\text{d}^{-1}$
K <sub>2</sub> =	7.55	$\text{d}^{-1}$	K <sub>2</sub> =	1.29	$\text{d}^{-1}$
Nuevo t =	0.3	d	Nuevo t =	2.5	d

## 4. Humedal artificial de flujo libre (TQ1)

### DBO máxima residual en el efluente de HAFL

$$DBO_{RARA} = DBO_{EHA} - DBO_{DV} \quad (Ec 100)$$

$$DBO_{inf} = 442.71 \text{ mg/L}$$

$$DBO_{DV} = 5 \text{ mg/L}$$

$$DBO_{EHA} = 25 \text{ mg/L}$$

$$DBO_{RARA} = 20 \text{ mg/L}$$

### Tasa de remoción global de DBO

Condiciones exp. con un TRH = 0.8 d

Considerando n = 1

$$\theta = 1.03$$

$$T = 4.0$$

$$T_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 34 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$K_1 = 0.45 \text{ d}^{-1}$$

$$K_2 = 0.68 \text{ d}^{-1}$$

### Determinación del tiempo de retención para la DBO

Se considera el efecto de dispersión axial y el efecto de las temperaturas

$$TRH = 3.5 \text{ días}$$

$$\eta = 0.75$$

$$tn = 2.625$$

$$FCC = 1.33$$

$$t = \text{Tiempo de retención para la remoción de la DBO, d} \quad 6.4$$

$$V = \text{Volumen total del humedal (m}^3\text{)} \quad 16,800.0$$

$$Q = \text{Gasto medio (m}^3\text{/d)} \quad 4,800.0$$

$$C_n = \text{Conc. de DBO en el efluente del reactor n de la serie (mg/L)} \quad 30$$

$$C_o = \text{Conc. en el influente (mg/L)} \quad 443$$

$$n = \text{Número de reactores de mezcla completa en serie} \quad 3$$

$$k_o = \text{Cte. GTR de DBO, corregida para la temperatura (d}^{-1}\text{)} \quad 0.681$$

**Tasa de la carga orgánica**

$$tco = C d_w \eta F_1 / (t/F_2) \quad (Ec 101)$$

Límite máximo permisible =	110	kg/had	
tco = Tasa de carga orgánica (lb/ac d)	16		
C = Conc. en el influente (mg/L)	30.00		
$\eta$ = Porosidad con respecto al no. de plantas (0.65-0.75)	0.75		
F2 = 3,07ac ft /Mgal	3.07		
F1 = 8.34 lb/(Mgal*(mg/L))	8.34		
d <sub>w</sub> = profundidad del flujo (ft)	1.64		
C =	0.03	kg/m <sup>3</sup>	
mc =	144	kg/día	17.6 kg/had
Área =	1.024	ha	10,241.28 m <sup>2</sup>
tco =	141	kg/had	

**Área neta del humedal para remoción de DBO**

$$A = Qt / d_w \eta \quad (Ec 103)$$

Área =	8.2	ha	81,961.3	m <sup>2</sup>
No. módulos =	2			
w = ancho del humedal de flujo libre				
L = largo del canal				
RA = relación largo ancho				

**Tabla 44**

*Dimensionamiento del HAFL*

Total	Unidad	Módulo	Unidad
202	m	101.2	m
405	m	202	m
2			

Fuente: elaboración propia.

**Tasa de carga para la remoción de SST**

$$Cs = Co [ 0.1139 + 8.4 \times 10^{-4} (Lw) ] \quad (Ec 103)$$

Cs =	<b>36</b>	mg/L	
Co =	313	mg/L	
Cte 1 =	0.1139		
Cte 2 =	0.00084		
Lw =	3	in/día	Tasa de carga hidráulica del agua residual (1-3 in)

### Tiempo de retención para la remoción de nitrógeno

$$Ln ( N_{inf} / N_{eff} ) / -kN = t \quad (Ec 104)$$

Ninf = Conc. de NT en el influente (mg/L)	47
Neff = Conc. de NT en el efluente (mg/L)	5
Kn = Cte. de remoción de nitrógeno 20°C d <sup>-1</sup>	-0.2187
Tiempo de retención para la remoción de N, días =	10.23

### Cálculo del área neta del humedal para remover nitrógeno

$$A = QF / Lw \quad (Ec 105)$$

$$n = a / dw^{1/2} \quad (Ec 106)$$

m<sup>2</sup>

A = Área neta del humedal para remover nitrógeno (ha)	6.3	62992.13
Q = Gasto promedio (m <sup>3</sup> /día)	4,800	
F = Factor de conversión (0.1 ha*mm/m <sup>3</sup> )	0.1	
Lw = Tasa de carga hidráulica del agua residual (mm/d)	76.2	

### Cálculo de la velocidad del fluido en la sección del humedal

$$V = Q / dw W \quad (Ec 107)$$

$$s = [ V n / dw^{2/3} ]^2 \quad (Ec 108)$$

Q Mod =	2,400.00	m <sup>3</sup> /día	n = cte de maning =	0.297	s* ft <sup>1/3</sup>
dw =	0.5	m	a = factor de resistencia (s ft <sup>1/6</sup> )		
W Mod =	101	m	a =	0.487	si dw > 1.3 ft
Velocidad =	0.00055	m/s	a =	1.949	si dw = 1 ft
S =	1.4772E-07		a =	7.795	si dw < 1 ft

## 5. Humedal artificial de flujo subsuperficial (TQ2)

### Tasa de remoción global de DBO

Condiciones exp. con un TRH = 0.8 d

$\theta =$	1.06		
$T_1 =$	20	$^{\circ}\text{C}$	
$T_2 =$	34	$^{\circ}\text{C}$	
$K_1 =$	0.25	$\text{d}^{-1}$	
$K_2 =$	0.57	$\text{d}^{-1}$	K aparente

### Determinación del tiempo de retención para la DBO

Se considera el efecto de dispersión axial y el efecto de las temperaturas

TRH	3.5	días
$\eta =$	0.75	
$t_n =$	2.625	
FCC =	1.33	

$t =$ Tiempo de retención para la remoción de la DBO, d	4.8
$V =$ Volumen total del humedal ( $\text{m}^3$ )	16,800
$Q =$ Gasto medio ( $\text{m}^3/\text{d}$ )	4,800.0
$C_n =$ Conc. de DBO en el efluente del reactor n de la serie (mg/L)	30
$C_o =$ Conc. en el influente (mg/L)	443
$n =$ Número de reactores de mezcla completa en serie	2
$k_o =$ Cte. GTR de DBO, corregida para la temperatura ( $\text{d}^{-1}$ )	0.565

### Tasa de la carga orgánica

$$tco = C d_w \eta F_1 / t/F_2 \quad (\text{Ec } 109)$$

Límite máximo permisible =	110	kg/had
$tco =$ Tasa de carga orgánica (lb/ac d)		166

C = Conc. en el influente (mg/L)		442.71
$\eta$ = Porosidad con respecto al no. de plantas (0.3-0.5)		0.40
$F_2 = 3,07ac$ ft/Mgal		3.07
$F_1 = 8.34$ lb/(Mgal (mg/L))		8.34
dw = Profundidad del flujo (ft)		1.64
C =	0.44270833	kg/m <sup>3</sup>
mc =	2125	kg/día
Área =	1.0	ha
tco =	2075	kg/ha d

### Área neta del humedal para remoción de DBO

$$A = Qt / dw \eta \quad (Ec 110)$$

$$\text{Área} = 11.43 \quad \text{ha} = 114293 \quad \text{m}^2$$

$$\text{No. módulos} = 2$$

w = Ancho del humedal de flujo libre

L = Largo del canal

RA = Relación largo ancho

### Tabla 45

#### Dimensionamiento del HAFS

Total	Unidad	Módulo	Unidad
239	m	119.5	m
478	m	239	m
2			

Fuente: elaboración propia.

### Tasa de carga para la remoción de SST

$$Cs = Co [0.1139 + 8.4 \times 10^{-4} (Lw)] \quad (Ec 111)$$

$$Cs = 36 \quad \text{mg/L}$$

$$Co = 313 \quad \text{mg/L}$$

$$\text{Cte. 1} = 0.1139$$

$$\text{Cte. 2} = 0.00084$$

$$L_w = 2 \quad \text{in/día} \quad \text{Tasa de carga hidráulica del agua residual (1-3 in)}$$

### Tiempo de retención para la remoción de nitrógeno

$$\ln(N_{inf}/N_{efl}) / -k_N = t \quad (\text{Ec 112})$$

$$N_{inf} = \text{Conc. de NT en el influente (mg/L)} \quad 47$$

$$N_{efl} = \text{Conc. de NT en el efluente (mg/L)} \quad 5$$

$$k_N = \text{Cte. de remoción de nitrógeno } 20^\circ\text{C d}^{-1} \quad -0.2187$$

$$\text{Tiempo de retención para la remoción de N, días} = 10.23$$

### Cálculo del área neta del humedal para remover nitrógeno

$$A = Q F / L_w \quad (\text{Ec 113})$$

$$A = \text{Área neta del humedal para remover nitrógeno (ha)} \quad 9.449 \quad 94,488.2 \quad \text{m}^2$$

$$Q = \text{Gasto promedio (m}^3/\text{día)} \quad 4,800.00$$

$$F = \text{Factor de conversión (0.1 ha mm/m}^3) \quad 0.1$$

$$L_w = \text{Tasa de carga hidráulica del agua residual (mm/d)} \quad 50.8$$

### Cálculo de la velocidad del fluido en la sección del humedal

$$V = Q / dw W \quad (\text{Ec 114})$$

$$n = a / dw^v \quad (\text{Ec 115})$$

$$S = [Vn / dw^{2/3}]^2 \quad (\text{Ec 116})$$

$$Q_{\text{Mod}} = 2,400.00 \quad \text{m}^3/\text{día} \quad n = \text{cte. de Manning} = 0.297 \quad \text{s ft}^{1/3}$$

$$dw = 0.5 \quad \text{m} \quad a = \text{factor de resistencia (s ft}^{1/6})$$

$$W_{\text{Mod}} = 120 \quad \text{m} \quad a = 0.487 \quad \text{si } dw > 1.3 \text{ ft}$$

$$\text{Velocidad} = 0.000 \quad \text{m/s} \quad a = 1.949 \quad \text{si } dw = 1 \text{ ft}$$

$$a = 7.795 \quad \text{si } dw < 1 \text{ ft}$$

$$\text{La pendiente } S = 1.0593\text{E-}07$$

## 6. Humedal artificial de estanque (TQ3)

**Tabla 46**

*Criterios de diseño de un humedal de estanque*

Parámetro	Valor	Unidad
Gasto de diseño ( $Q_{med.}$ ) =	2,400.00	m <sup>3</sup> /día
Vel. del agua (0.6 a 1.5) =	0.60	m/s
Sep. mamp. =	5.00	m
Espesor de mamparas	0.03	m
Bordo libre	0.40	m
TRH (1 a 7) =	<b>4.00</b>	días
Tirante de agua ( $T_i$ ) =	0.50	m

Fuente: elaboración propia.

### Dimensionamiento de la unidad

$$Vol = (Q_{med}) (TRH) \quad (Ec 79)$$

$$A = Vol / T_i \quad (Ec 80)$$

$$Vol = 9,600.00 \quad m^3$$

$$\text{Á tanque} = 19,200.0 \quad m^2$$

$$a = \text{ancho del tanque} \quad A = a b \quad A = a 2a = 2a^2 \quad a = 98.0 \quad m$$

$$b = \text{longitud del tanque} \quad b = 2a \quad b = 196.0 \quad m$$

$$A = 19200.0 \quad m^2$$

$$No \text{ de mamp.} = \frac{Long. \text{ del tanque} - 1}{Separación \text{ entre mamp.}} \quad (Ec 81)$$

$$No. \text{ de mamparas} = 38 \quad No. \text{ de espacios} = 39$$

$$Long. \text{ preliminar del tanque} = (Sep. \text{ entre mamp.}) (No. \text{ de espacios}) \quad (Ec 82)$$

$$Long. \text{ preliminar del tanque: } 196.0 \quad m$$

$$Vel. \text{ del agua} = \frac{Q_{med}}{(Sep. \text{ entre mamp.}) (Tirante \text{ del agua})} \quad (Ec 83)$$

$$\text{Verificación de la velocidad del agua} = 0.01111 \quad m/s$$

$$\text{Grosor total de mamp.} = (\text{Espesor de las mamp.}) \quad (\text{Ec 84}) \\ (\text{No. de mamp.})$$

$$\text{Grosor total de mamparas} = 1.0 \quad \text{m}$$

$$\text{Longitud total del tanque} = \text{Long. preliminar del tanque} + \quad (\text{Ec 85}) \\ \text{Grosor total de mamp.}$$

$$\text{Longitud total del tanque} = 196.9 \quad \text{m}$$

$$\text{Abertura del paso del agua} = (1.5) (\text{Separación} \quad (\text{Ec 86}) \\ \text{entre mamp.})$$

$$\text{Abertura del paso del agua} = 7.5 \quad \text{m}$$

$$\text{Longitud de la mamp.} = \text{Ancho del tanque} - \text{Abertura del} \quad (\text{Ec 87}) \\ \text{paso del agua}$$

$$\text{Longitud de la mampara} = 90.5 \quad \text{m}$$

$$\text{Altura de la mamp.} = \text{Tirante del agua} + 0.1 \text{ m} \quad (\text{Ec 88})$$

$$\text{Altura de la mampara} = 0.60 \quad \text{m}$$

$$\text{Altura de la estructura} = 1.00 \quad \text{m}$$

## 7. Eliminación de coliformes totales

### Eliminación de coliformes totales en el HAFL

#### Datos

Temperatura del mes más frío =	28.00	°C
Concentración del influente =	1.82E+06	NMP/100 ml
Tiempo de retención hidráulico =	7	días
Tirante =	0.50	m

Constante de remoción bacteriana

$$K_{CF} = 0.84 (1.07)^{TL-20} \quad (\text{Ec 117})$$

$$K_{CF} = 1.443 \quad \text{día}^{-1}$$

**Relación largo ancho del tanque**

Largo = 404.87 m

Ancho = 202.44 m

L/B = 2.0

**Coefficiente de dispersión (Y)**

$$Y = C / (A + BC + CC^2) \quad (Ec 118)$$

$$\alpha = (1 + 4(KCF)(R)(Y))^{1/2} \quad (Ec 119)$$

c = 2

a = -0.26118

b = 0.25392

c = 1.0136

Y = 0.465

 $\alpha$  = 4.449**Concentración del efluente**

$$C_{FE} = (C_f) (4 \alpha E^{1/2 Y}) / (1 + \alpha)^2 E^{\alpha/2 Y} \quad (Ec 120)$$

 $C_{FE}$  = 11,515 NMP/100 ml**Periodo de desazolve****Evaluación de desazolve en años**

$$\theta L = 0.5 V / Tac P \quad (Ec 121)$$

 $\theta L$  = Periodo de desazolve en añosTac = Tasa de acumulación de lodos, 0.04 m<sup>3</sup>/hab./año

P = Población

V = Volumen de agua

**Periodo de desazolve del TQ1**8.4 años**Eliminación de coliformes totales en el HAFS****Datos**

Temperatura del mes más frío 28.00 °C

Concentración del influente	1.15E+04	NMP/100 ml
Tiempo de retención hidráulico	5.50	días
Tirante de la laguna	0.50	m

### Constante de remoción bacteriana

$$K_{CF} = 1.443 \text{ día}^{-1}$$

### Relación largo ancho del tanque

$$L/B = 2.0$$

### Coefficiente de dispersión (Y)

$$c = 2$$

$$a = -0.26118$$

$$b = 0.25392$$

$$c = 1.0136$$

$$Y = 0.465$$

$$\alpha = 3.970$$

### Concentración del efluente

$$C_{FE} = 131 \text{ NMP/100 ml}$$

**Periodo de desazolve del TQ2** 6.6 años

### Eliminación de coliformes totales en el HAE

#### Datos

Temperatura del mes más frío =	28.00	°C
Concentración del influente =	1.31E+02	NMP/100 ml
Tiempo de retención hidráulico =	4	días
Tirante de la laguna =	0.5	m

### Constante de remoción bacteriana

$$K_{CF} = 1.443 \text{ día}^{-1}$$

**Relación largo ancho del tanque**

$$L/B = 2.0$$

**Coefficiente de dispersión (Y)**

$$c = 2$$

$$a = -0.26118$$

$$b = 0.25392$$

$$c = 1.0136$$

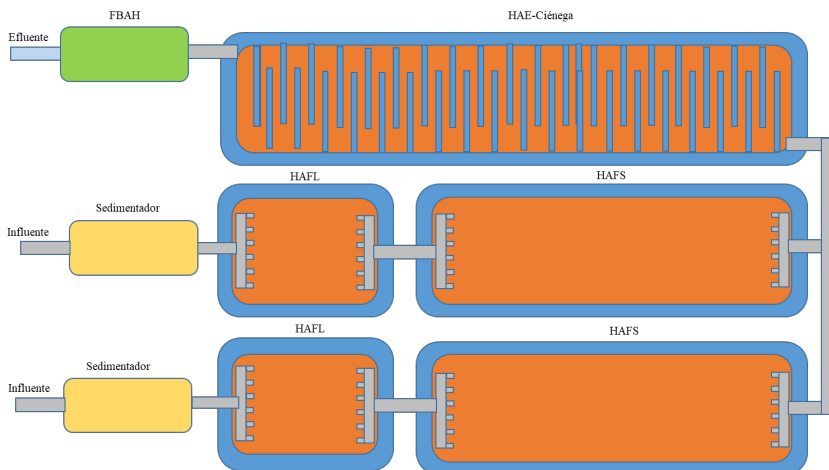
$$Y = 0.465$$

$$\alpha = 3.426$$

**Concentración del efluente**

$$C_{FE} = 2.899 \quad \text{NMP/100 ml}$$

**Periodo de desazolve del TQ3**      **4.8 años**



*Figura 25.* Propuesta de distribución de tren de tratamiento a base de humedales artificiales (vista en planta). HAFL: humedal artificial de flujo libre; HAFS: humedal artificial de flujo subsuperficial; HAE: humedal artificial de estanque (hidrófita flotante).

*Fuente:* elaboración propia.

*Nota:* cálculos basados en CONAGUA, 2019d.

# Tren de tratamiento con laguna aireada-facultativa

## 1. Datos generales y gastos de proyecto

**Tabla 47**

*Datos básicos para el diseño del tren de tratamiento*

Parámetro	Valor	Unidad
Población proyecto (Pp) =	50,000	hab.
Dotación (Dot) =	240	L/hab./día
Carga orgánica unitaria (COU) =	56	gr/hab./día
M	2.56	Coef. de Harmon

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 48**

*Datos meteorológicos*

Parámetros	Mes más cálido (junio)		Mes más frío (diciembre)	
Temperatura media mensual	29.6	°C	24.3	°C
Precipitación media mensual	227.4	mm/mes	162.0	mm/mes
Evaporación media mensual	5.0	mm/mes	2.0	mm/mes
Infiltración	5	mm/día		

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 49**

*Gastos de diseño*

Gastos de diseño			Gastos por módulo	
$A_p =$	192.00	L/(hab./día)	No. módulo =	2
$Q_{med} =$	111.11	L/s	55.56	L / s
$Q_{min} =$	55.56	L/s	27.78	L / s
$Q_{máx. inst.} =$	251.62	L/s	125.81	L / s
$Q_{máx. ext.} =$	377.43	L/s	188.71	L / s
$V_d =$	9,600.00	m <sup>3</sup> /día	4,800.00	m <sup>3</sup> / día

Gastos de diseño		Gastos por módulo	
COT =	2,800.00	kg/día	1,400.00 Kg / día
C <sub>0</sub> =	291.67	mg/L	291.67 mg / L

Fuente: elaboración propia.

### Cálculos de las áreas requeridas por tanque

TQ1: laguna anaerobia 1		TQ2: laguna facultativa 2	
<b>t<sub>r1</sub> = 4.0</b>	d	<b>t<sub>r2</sub> = 7.0</b>	d
<b>h<sub>1</sub> = 3.0</b>	m	<b>h<sub>2</sub> = 2.0</b>	m
V <sub>TQ1</sub> =	<b>19,200.00</b> m <sup>3</sup>	V <sub>TQ2</sub> =	<b>33,600.00</b> m <sup>3</sup>
A <sub>TQ1</sub> =	<b>6,400.00</b> m <sup>2</sup>	A <sub>TQ2</sub> =	<b>16,800.00</b> m <sup>2</sup>
Para el A <sub>T</sub> se considera un excedente de 20%	<b>27,840.00 m<sup>2</sup></b>	<b>ó</b>	<b>2.7 Ha</b>

**Tabla 50**

### Parámetros de entrada al sistema de tratamiento

Concentración de entrada		Conc. por módulo	
COT =	2,800.00	kg/día	1,400.00 kg/día
F <sub>VOL</sub> =	9,600.00	m <sup>3</sup> /día	4,800.00 m <sup>3</sup> /día
C <sub>DBO</sub> =	292	mg/l	292 mg/l

COT: carga orgánica total; F<sub>VOL</sub>: flujo volumétrico; C<sub>DBO</sub>: concentración de DBO.

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 51**

### Eficiencia requerida del sistema

Parámetro	Valor	Unidad
C LMP DBO =	30	mg/L
C LMP SST =	50	mg/L
ER DBO =	89.7	%

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 52***Concentración teórica de entrada de contaminantes básicos*

Parámetros	g/hab./día	g/hab./día	M (kg/día)	C (mg/L)
DBO5	40 a 120	56.0	2,800	292
DQO	110 a 295	110.0	5,500	573
SST	60 a 150	60.0	3,000	313
NH3	5 a 12	5.0	250	26
N org N	4 a 10	4.0	200	21
NTK	9 a 21.7	9.0	450	47
P <sub>ORG COMO P</sub>	0.9 a 1.8	0.9	45	5
P <sub>INORG COMO P</sub>	1.8 a 2.7	1.8	90	9
P <sub>TOTAL COMO P</sub>	2.7 a 4.5	2.7	135	14
GyA	10 a 40	10.0	500	52
T. amb. °C				32
T agua °C				28
C SSED ml/L				60

Fuente: elaboración propia.

## 2. Dimensionamiento de la laguna aireada (TQ1)

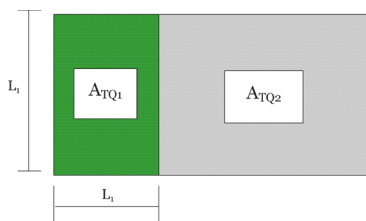


Figura 26. Dimensiones de laguna anaerobia TQ1

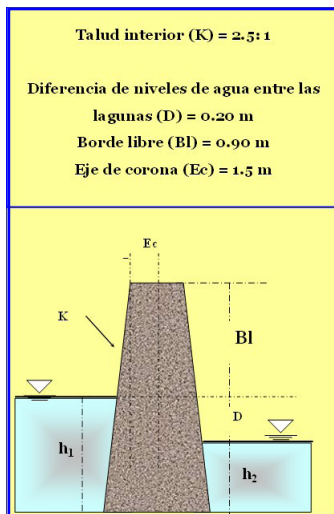
Fuente: elaboración propia..

### Datos de normas CNA

$$\text{Tirante} = h_1 = 3.0 \text{ m}$$

$$\text{Eje de corona} = E_c = 1.5 \text{ m}$$

$$\text{Bordo libre} = B_l = 0.9 \text{ m}$$



### Cálculo de la longitud al nivel medio ( $L_{n.med}$ )

$$A_{TQ1} = 6,400.00 \text{ m}^2$$

$$mmA_{TQ2} = 16,800.00 \text{ m}^2$$

$$L1^2 = 6,400.00$$

$$L1 = (6,400.00)^{1/2}$$

$$L1 = \underline{80.00} \text{ m}$$

$$L_1 = \text{Longitud del TQ1 al nivel medio} = L_{n.med} = 80.00 \text{ m}$$

Figura 27. Características del talud de laguna anaerobia y facultativa.

Fuente: elaboración propia.

### Cálculos de longitudes a diferentes niveles

#### Lado corto = lado largo

$$L_{fond} = 72.50 \text{ m}$$

$$L_{n.med} = 80.00 \text{ m}$$

$$L_{n.máx} = 87.50 \text{ m}$$

$$L_{b.int} = 92.00 \text{ m}$$

$$L_{c.cor} = 95.00 \text{ m}$$

$$L_{fond} = L_{n.med} - 2(h_1 K) \quad (Ec 122)$$

$$L_{n.máx} = L_{n.med} + 2(h_1 K) \quad (Ec 123)$$

$$L_{b.int} = L_{n.máx} + 2(B_l K) \quad (Ec 124)$$

$$L_{c.cor} = L_{b.int} + 2 E_c \quad (Ec 125)$$

**Cálculos de áreas y volúmenes**

$$A_{\text{fond.}} = 5,256.25 \text{ m}^2 \qquad A_{\text{fond}} = (L_{\text{fond}})^2 \qquad (\text{Ec } 126)$$

$$A_{\text{n. med.}} = 6,400.00 \text{ m}^2 \qquad A_{\text{n. med}} = (L_{\text{n. med}})^2 \qquad (\text{Ec } 127)$$

$$A_{\text{n. máx.}} = 7,656.25 \text{ m}^2 \qquad A_{\text{n. máx}} = (L_{\text{n. máx}})^2 \qquad (\text{Ec } 128)$$

$$V_{\text{n. med.}} = 8,742.19 \text{ m}^3 \qquad V_{\text{n. med}} = \frac{(A_{\text{n. med}} + A_{\text{fond}})}{2} (h_1/2) \qquad (\text{Ec } 129)$$

$$V_{\text{n. máx.}} = 19,368.75 \text{ m}^3 \qquad V_{\text{n. máx}} = \frac{(A_{\text{n. máx}} + A_{\text{fond}})}{2} h_1 \qquad (\text{Ec } 130)$$

No. de cajas	3
Relación L/B	3
Distancia entre cajas	26.7
	80.0

**Cálculos de la potencia mínima requerida**

$$HP_{\text{mín. rep}} = V_{TQ1} \cdot 0.035 \qquad (\text{Ec } 131)$$

$$HP = 67.79$$

En base a normas se colocarán 4 aireadores de 25 HP c/u a una profundidad de 1.22 m y un radio de influencia de 42.98 m cada uno.

$$\text{Distancia entre aireadores} = (0.5 L_{\text{n. máx.}}) \qquad (\text{Ec } 132)$$

43.75 m con respecto al nivel máximo de agua para  $L_{\text{n. máx.}}$ .

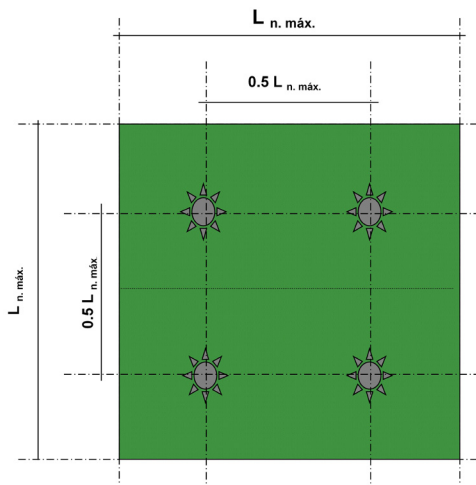


Figura 28. Distancia entre los aireadores de laguna aireada.  
Fuente: elaboración propia.

### 3. Dimensionamiento de la laguna facultativa (TQ2)

**Datos de normas CNA**

- Tirante =  $h_2 = 2.0$  m
- Eje de corona =  $Ec = 1.5$  m
- Bordo libre =  $Bl = 0.9$  m
- Dif. de niv. de agua entre lag. =  $D = 0.2$  m

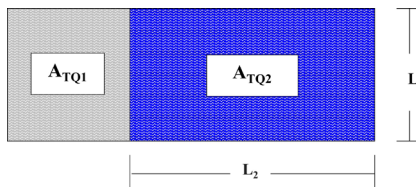


Figura 29. Dimensiones de laguna facultativa TQ2.  
Fuente: elaboración propia.

**Datos**

Donde  $L$  es igual a la longitud en el sentido corto del TQ1 para un tirante:  
 $Y = (D + 0.5 h_2)$

$A_{TQ1} = 6,400.00 \text{ m}^2$   
 $A_{TQ2} = 16,800.00 \text{ m}^2$

$L_2 = A_2 / L \quad (Ec 133)$

**Cálculo de L lado corto al tirante medio**

$$L_{TQ1} = L_{TQ2} = 80.00 \quad \text{m}$$

Longitud del TQ2 al nivel medio =  $L_{n.med} = 80.00 \text{ m}$

**Cálculo de L<sub>2</sub> lado largo al tirante medio**

$$L_2 = 210.00 \quad \text{m}$$

**Cálculos de longitudes a diferentes niveles, en ambos sentidos**

	Lado corto	Lado largo		
$L_{fond.} =$	75.00 m	205.00 m	$L_{fond} = L_{n.med} - 2(hK)$	(Ec 134)
$L_{n.med.} =$	80.00 m	210.00 m		
$L_{n.máx.} =$	85.00 m	215.00 m	$L_{n.máx} = L_{n.med} + 2(hK)$	(Ec 135)
$L_{b.int.} =$	89.50 m	219.50 m	$L_{b.int} = L_{n.máx} + 2(BLK)$	(Ec 136)
$L_{c.cor.} =$	92.50 m	222.50 m	$L_{c.cor} = L_{b.int} + 2Ec$	(Ec 137)

**Cálculos de áreas y volúmenes**

$A_{fond.} =$	15,375.00 m <sup>2</sup>	$A_{fond} = L_{fond} \text{ lado corto } L_{fond} \text{ lado largo}$	(Ec 138)
$A_{n.med.} =$	16,800.00 m <sup>2</sup>	$A_{n.med} = L_{n.med} \text{ lado corto } L_{n.med} \text{ lado largo}$	(Ec 139)
$A_{n.máx.} =$	18,275.00 m <sup>2</sup>	$A_{n.máx} = L_{n.máx} \text{ lado corto } L_{n.máx} \text{ lado largo}$	(Ec 140)
$V_{n.med.} =$	16,087.50 m <sup>3</sup>	$V_{n.med} = \frac{(A_{n.med} + A_{fondo})}{2}(h_2/2)$	(Ec 141)
$V_{n.máx.} =$	33,650.00 m <sup>3</sup>	$V_{n.máx} = \frac{(A_{n.máx} + A_{fondo})}{2}(h_2)$	(Ec 142)
No. de cajas	3		
Relación L/B	7.9		
D entre cajas	70.0 m		

## 4. Temperatura del agua del TQ1 y TQ2

### Conversiones para el cálculo de la temperatura del agua del TQ1

$T_{A\text{DIC}} = 24.3$	$^{\circ}\text{C} =$	75.7	$^{\circ}\text{F}$
$T_{A\text{MAY}} = 29.6$	$^{\circ}\text{C} =$	85.3	$^{\circ}\text{F}$
$A_{TQ1} = 6,400.00$	$\text{m}^2 =$	68,887.04	pies <sup>2</sup>
$Q_{\text{med.}} = 111.11$	$\text{l / seg} =$	881,840.00	lb/hora
$V_{TQ1} = 19,200.00$	$\text{m}^3 =$	5.07	millones de galones
$T_i = 24.0$	$^{\circ}\text{C} =$	75.2	$^{\circ}\text{F}$
$W = 67.79$	$\text{H.P.}$		

$$fT = 1 + (HP7.8 / (\text{Millones} - \text{galones})) \quad (\text{Ec } 143)$$

$$fT = 2.71$$

### Fórmula

$$TL = Ti + TA (X + Y) / (X + Y - 1) \quad (\text{Ec } 144)$$

Cálculos de X y Y

$$Y = (A) (fT) / Q \quad (\text{Ec } 145)$$

$$X = (0.8 + 0.16 W) Y \quad (\text{Ec } 146)$$

$$Y = 0.21$$

$$X = 2.47$$

### Cálculo para el mes de diciembre

$$T_{LW} = 75.59 \quad ^{\circ}\text{F} = \underline{\underline{24.2 \quad ^{\circ}\text{C}}}$$

Cálculo para el mes de mayo

$$T_{LS} = 82.54 \quad ^{\circ}\text{F} = \underline{\underline{28.1 \quad ^{\circ}\text{C}}}$$

### Conversiones para el cálculo de la temperatura del agua del TQ2

$T_{A\text{DIC}} = 24.3$	$^{\circ}\text{C} =$	75.7	$^{\circ}\text{F}$
$T_{A\text{MAY}} = 29.6$	$^{\circ}\text{C} =$	85.3	$^{\circ}\text{F}$

$A_{TQ_2} =$	16,800.00	$m^2 =$	180,828.48	pies <sup>2</sup>
$Q_{med.} =$	111.11	$l / \text{seg} =$	881,840.00	lb / hora
$V_{TQ_1} =$	33,600.00	$m^3 =$	8.88	millones de galones
$T_i =$	24.0	$^{\circ}C =$	75.2	$^{\circ}F$
$W =$	10	$H.P.$		

$$fT = 1 + (HP \cdot 7.8 / (\text{Millones} - \text{galones})) \quad (Ec \ 147)$$

$$fT=1$$

**Fórmula**  $TL = T_i + TA (X + Y) / (X + Y - 1) \quad (Ec \ 148)$

#### Cálculos de X y Y

$$Y = (A) (fT) / Q \quad (Ec \ 149)$$

$$X = (0.8 + 0.16 W) Y \quad (Ec \ 150)$$

$$Y = 0.21 \quad X = 0.49$$

#### Cálculo para el mes de diciembre

$$TLW = 75.42 \quad ^{\circ}F = \underline{24.1} \quad ^{\circ}C$$

#### Cálculo para el mes de mayo

$$TLS = 79.34 \quad ^{\circ}F = \underline{26.3} \quad ^{\circ}C$$

#### Cálculo de la temperatura del agua del TQ1 y TQ2 por el método de Mancini y Barnhart (1976)

##### Temperatura del agua de las lagunas

$$TL = (fATa + Q T_i) / (fA + Q) \quad (Ec \ 151)$$

Esta temperatura se utiliza para obtener el factor de carga orgánica

TL = Es la temperatura de las lagunas en  $^{\circ}C$

Ta = Es la temperatura del ambiente (en invierno y en verano)

$T_i$  = Temperatura del influente que por lo general equivale a aproximadamente  $4^{\circ}\text{C}$  abajo de la  $T_a$

$f$  = Es un factor 0.483

$A$  = Área superficial en  $\text{m}^2$

$Q$  = Gasto en  $\text{m}^3/\text{día}$

$T_a$  invierno = 24.3  $^{\circ}\text{C}$

$T_a$  verano = 29.6  $^{\circ}\text{C}$

$T_i$  influente inv. = 20.3  $^{\circ}\text{C}$

$T_i$  influente ver. = 25.6  $^{\circ}\text{C}$

$f$  = 0.483

$A_1$  = 7,656.25  $\text{m}^2$

$Q_{\text{med.}}$  = 9,600.00  $\text{m}^3/\text{día}$

$A_2$  = 18,275.00  $\text{m}^2$

### Laguna 1

$T_L$  invierno = 21.41  $^{\circ}\text{C}$

$T_L$  verano = 26.71  $^{\circ}\text{C}$

### Laguna 2

$T_L$  invierno = 22.22  $^{\circ}\text{C}$

$T_L$  verano = 27.52  $^{\circ}\text{C}$

## 5. Cálculo de las cargas biológicas y concentración del efluente del TQ1 y TQ2

### Cargas biológicas y concentración del efluente del TQ1

$K_{35}$  = Tasa de degradación a  $35^{\circ}\text{C}$  = 1.2

$q$  = Coeficiente de Temperatura de reacción = 1.085

*Diciembre*

$T_{LW}$  = Temperatura del agua en la laguna en  $^{\circ}\text{C}$  = 21.41

*Cálculos*

$$K_{TW} = 0.40 \text{ d}^{-1} \qquad K_{TW} = K_{35} / q^{(35 - TLW)} \quad (\text{Ec } 152)$$

$$P_1 = 1,083.47 \text{ kg/día} \qquad P_1 = P_o / K_{TW} R_1 + 1 \quad (\text{Ec } 153)$$

$$C_1 = 112.86 \text{ mg/L} \qquad C_1 = (P_1 / V_d) * 1000 \quad (\text{Ec } 154)$$

Mayo

$$T_{LS} = \text{Temperatura del agua en la laguna en } ^\circ\text{C} = 26.71$$

Cálculos

$$K_{Ts} = 0.61 \text{ d}^{-1} \qquad K_{Ts} = K_{35} / q^{(35 - T_{LS})} \quad (\text{Ec } 155)$$

$$P_1 = 816.66 \text{ kg/día} \qquad P_1 = P_o / K_{Ts} R_1 + 1 \quad (\text{Ec } 156)$$

$$C_1 = 84.76 \text{ mg/L} \qquad C_1 = (P_1 / V_d) * 1000 \quad (\text{Ec } 157)$$

### Cargas biológicas y concentración del efluente del TQ2

$$K_{35} = \text{Tasa de degradación a } 35^\circ\text{C} = 1.2$$

$$q = \text{Coeficiente de Temperatura de reacción} = 1.085$$

Diciembre

$$T_{LW} = \text{Temperatura del agua en la laguna en } ^\circ\text{C} = 22.22$$

Cálculos

$$K_{TW} = 0.42 \text{ d}^{-1} \qquad K_{TW} = K_{35} / q^{(35 - TLW)} \quad (\text{Ec } 158)$$

$$P_2 = 273.58 \text{ kg/día} \qquad P_2 = P_1 / K_{TW} R_2 + 1 \quad (\text{Ec } 159)$$

$$C_2 = 28.5 \text{ mg/L} \qquad C_2 = (P_2 / V_d) * 1000 \quad (\text{Ec } 160)$$

Mayo

$$T_{LS} = \text{Temperatura del agua en la laguna en } ^\circ\text{C} = 27.52$$

Cálculos

$$K_{Ts} = 0.65 \text{ d}^{-1} \qquad K_{Ts} = K_{35} / q^{(35 - T_{LS})} \quad (\text{Ec } 161)$$

$$P_2 = 146.3 \text{ kg/día} \qquad P_2 = P_1 / K_{T_{LS}} R^2 + 1 \quad (\text{Ec } 162)$$

$$C_2 = 15.24 \text{ mg/L} \qquad C_2 = (P_2 / V_d) * 1000 \quad (\text{Ec } 163)$$

## 6. Condiciones de operación del TQ1 y TQ2

### Ajuste del proyecto para el TQ1

#### Datos meteorológicos

Mes más frío: diciembre

$$\text{Precipitación} = Pr_w = 162.0 \text{ mm/mes} = 0.162 \text{ m/mes}$$

$$\text{Evaporación} = Ev_w = 2.0 \text{ mm/mes} = 0.002 \text{ m/mes}$$

Mes más cálido: mayo

$$\text{Precipitación} = Pr_s = 227.4 \text{ mm/mes} = 0.2274 \text{ m/mes}$$

$$\text{Evaporación} = Ev_s = 5.0 \text{ mm/mes} = 0.005 \text{ m/mes}$$

$$\text{Infiltración} = Inf = 5 \text{ mm/día} = 0.005 \text{ m/día}$$

#### Condiciones de trabajo a nivel máximo

Mes más frío: diciembre

Mes más cálido: mayo

#### Precipitación por día

$$Pr = (A_{n.máx} * PR_i) / 30 \quad (Ec 163)$$

41.34	m <sup>3</sup> /día	58.03	m <sup>3</sup> /día
-------	---------------------	-------	---------------------

#### Evaporación por día

$$Ev = (A_{n.máx} Ev_i) / 30 \quad (Ec 165)$$

0.51	m <sup>3</sup> /día	1.28	m <sup>3</sup> /día
------	---------------------	------	---------------------

#### Infiltración por día

$$Inf = A_{n.máx} * Inf_i \quad (Ec 166)$$

38.28	m <sup>3</sup> /día	38.28	m <sup>3</sup> /día
-------	---------------------	-------	---------------------

#### Volumen neto

$$V_{neto} = Vd - Ev + Pr - Inf \quad (Ec 167)$$

9,602.55	m <sup>3</sup> /día	9,618.48	m <sup>3</sup> /día
----------	---------------------	----------	---------------------

#### Tiempo de retención

$$R1 = V_{n.máx} / V_{neto} \quad (Ec 168)$$

2.02	día <sup>-1</sup>	2.01	día <sup>-1</sup>
------	-------------------	------	-------------------

**Concentración total**

$$P_1 = P_0 / (K_t R_1 + 1) \quad (Ec 169)$$

1,556.51      kg/día      1,256.18      kg/día

**Retención de DBO**

$$Retención = P_0 - P_1 \quad (Ec 170)$$

1,243.49      kg/día      1,543.82      kg/día

**Eficiencia**

$$Eficiencia = (Retención / P_0) 100 \quad (Ec 171)$$

44.41      %      55.14      %

**Concentración del influente**

$$C_{\text{efluente}} = (P_1 / V_{\text{neto}}) 1000 \quad (Ec 172)$$

162.09      mg/L      130.60      mg/L

**Carga orgánica superficial**

$$COS = Reten. / A_{n.máx} \quad (Ec 173)$$

1,624.15      kg/Ha día      2,016.42      kg/Ha día

**Carga orgánica volumétrica**

$$COV = Reten. / V_{n.máx} \quad (Ec 174)$$

64.20      g/m<sup>3</sup> día      79.71      g/m<sup>3</sup> día

**Condiciones de trabajo a nivel máximo**

Mes más frío: diciembre

Mes más cálido: mayo

**Precipitación por día**

$$Pr = (A_{n.máx} Ev i) / 30 \quad (Ec 175)$$

98.69      m<sup>3</sup>/día      138.52      m<sup>3</sup>/día

**Evaporación por día**

$$Ev = (A_{n.máx} Ev i) / 30 \quad (Ec 176)$$

1.22      m<sup>3</sup>/día      3.05      m<sup>3</sup>/día

**Infiltración por día**

$$Inf = A_{n.máx} Inf i \quad (Ec 177)$$

91.38      m<sup>3</sup>/día      91.38      m<sup>3</sup>/día

**Volumen neto**

$$V_{\text{neto}} = Vd - Ev + Pr - Inf \quad (\text{Ec } 178)$$

9,606.09	m <sup>3</sup> /día	9,644.10	m <sup>3</sup> /día
----------	---------------------	----------	---------------------

**Tiempo de retención**

$$R_1 = V_{n.\text{m}\acute{a}x} / V_{\text{neto}} \quad (\text{Ec } 179)$$

3.50	día <sup>-1</sup>	3.49	día <sup>-1</sup>
------	-------------------	------	-------------------

**Concentración total**

$$P_2 = P_1 / (K_t R_1 + 1) \quad (\text{Ec } 180)$$

627.26	kg/día	383.71	kg/día
--------	--------	--------	--------

**Retención de DBO**

$$\text{Retención} = P_1 - P_2 \quad (\text{Ec } 181)$$

929.25	kg/día	872.47	kg/día
--------	--------	--------	--------

**Eficiencia**

$$\text{Eficiencia} = ( \text{Retención} / P_1 ) 100 \quad (\text{Ec } 182)$$

59.70	%	69.45	%
-------	---	-------	---

**Concentración del influente**

$$C_{\text{efluente}} = ( P_2 / V_{\text{neto}} ) 1000 \quad (\text{Ec } 183)$$

65.30	mg/L	39.79	mg/L
-------	------	-------	------

**Carga orgánica superficial**

$$COS = \text{Retención} / A_{n.\text{m}\acute{a}x} \quad (\text{Ec } 184)$$

508.48	kg/Ha día	477.41	kg/Ha día
--------	-----------	--------	-----------

**Carga orgánica volumétrica**

$$COV = \text{Retención} / V_{n.\text{m}\acute{a}x} \quad (\text{Ec } 185)$$

27.62	g/m <sup>3</sup> día	25.93	g/m <sup>3</sup> día
-------	----------------------	-------	----------------------

**Condiciones globales de trabajo del sistema****Retención de DBO**

$$\text{Retención} = P_0 - P_2 \quad (\text{Ec } 186)$$

2,172.74	kg/día	2,416.29	kg/día
----------	--------	----------	--------

**Eficiencia**

$$Eficiencia = ( Retención / P_o ) 100 \quad (Ec 187)$$

77.60            %            86.30            %

**Concentración del influente**

$$C_{efluente} = ( P_2 / v_{neto} ) 1000 \quad (Ec 188)$$

65.30            Mg/l            39.79            Mg/l

**Periodo de desazolve de las lagunas**

$$\Theta L = 0.5V / Tac P \quad (Ec 121)$$

$\Theta L$  = Periodo de desazolve en años

Tac = Tasa de acumulación de lodos, 0.04 m<sup>3</sup>/hab./año

P = Población

V = Volumen de agua en la laguna

**Periodo de desazolve del TQ1**    4.8            años

**Periodo de desazolve del TQ2**    8.4            años

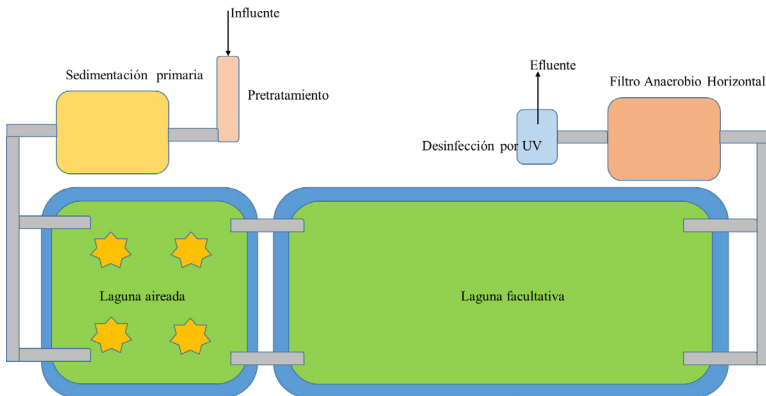


Figura 30. Propuesta de distribución de tren de tratamiento a base lagunas aireada-facultativa.

Fuente: elaboración propia.

Nota: cálculos basados en SEDUE, 1985; Rolin Mendoza, 1999 y CONAGUA, 2019c.

## Consideraciones

---

Los cálculos que se presentan líneas arriba son la base de ingeniería hidráulica mínima necesaria para la optimización de los sistemas de tratamiento de agua residual en nuestro estado. Nuestro compromiso siempre será el cuidado y respeto por el ambiente, con énfasis en el manejo y tratamiento del agua. Estamos convencidos de que la vinculación entre academia, gobierno y sociedad es clave para transitar hacia mejores servicios ambientales. De esta manera ponemos a su disposición esta obra, formulada desde la óptica de la ingeniería ambiental para el beneficio de la sociedad y como estrategia para mitigar la contaminación del agua y promover un desarrollo sustentable.

El Laboratorio de Tecnología del Agua de la DACBiol-UJAT contribuye a la formación de recursos humanos de alta especialidad en la conservación de este recurso natural desarrollando el tratamiento, control y la mitigación de la contaminación del agua.

## Referencias

---

- Aguilar Pérez, G., Pampillón González, L., López Ocaña, G. (2022). Tratamiento de aguas residuales en el corredor Parrilla II en Centro, Tabasco. Memoria del Congreso Internacional de Investigación, *Academia Journals Chetumal*, Vol. 14, No. 3, 1-7.
- Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEAS). (2012). *Inventario de plantas de tratamiento de agua residual en Tabasco*. Reporte Técnico. Dirección Técnica.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2006). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Diciembre 2006.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/133326/Inventario\\_2006.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/133326/Inventario_2006.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2012). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Diciembre 2012.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/108925/Inventario\\_2012.compressed.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/108925/Inventario_2012.compressed.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2016). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*. Diciembre 2015.  
[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/563373/INVENTARIO\\_2016.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/563373/INVENTARIO_2016.pdf)
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019a). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 25. Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019b). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 31. Diseño de PTARM: zonas rurales, periurbanas y desarrollos ecoturísticos.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro31.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019c). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 27. Diseño de PTARM: lagunas de estabilización  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro27.pdf>

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019d). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 23. Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro23.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019e). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 30. Diseño de PTARM: humedales artificiales.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro30.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019f). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 34. Diseño de PTARM: procesos de oxidación bioquímica con biomasa fija.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro34.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019g). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 33. Diseño de PTARM: procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro33.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019h). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 28. Diseño de PTARM: reactores anaerobios de flujo ascendente.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro28.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019i). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 26. Diseño de PTARM: pretratamiento y tratamiento primario.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro26.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019j). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Libro 37. Saneamiento básico  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro37.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación*.  
<https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-2-22-a.pdf>
- Gobierno del Estado de Tabasco. (2022). Regiones de Tabasco.  
<https://tabasco.gob.mx/regiones-de-tabasco>
- Crites, R. W. y Tchobanoglous, G. (2000). *Small and decentralized wastewater management systems*, McGraw Hill.
- Escobedo-Cazan, L. A., Méndez de los Santos, N., López-Ocaña, G. (2010). Reactores anaerobios aplicados a comunidades rurales. *Kuxulcab'*.

- Revista de Divulgación de la División Académica de Ciencias Biológicas-UJAT*. Vol. 16, No. 30, 9-18.
- Naciones Unidas Worldometers. (2022). *Población Mundial Actual*. Consultada el 27 de agosto.  
<https://www.worldometers.info/es/poblacion-mundial/#ref-1>
- Naciones Unidas. (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Nota del Secretario General. Asamblea General. Consultada el 27 de agosto.  
[https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE\\_LECTURE\\_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf](https://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_LECTURE_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf)
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, Que establece los límites permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la nación. DOF: 11/03/2022.  
[https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11/03/2022)
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-SEMARNAT-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. DOF: 03/06/1998.  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#:~:text=NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2002,que%20dice%3A%20Estados%20Unidos%20Mexicanos.](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998#:~:text=NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2002,que%20dice%3A%20Estados%20Unidos%20Mexicanos.)
- Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. DOF: 21/09/1998.  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4893449&fecha=21/09/1998#gsc.tab=0)
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. DOF: 15/08/2003.  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003#gsc.tab=0)
- Moeller C. G. y Escalante E.V. (2021). Las lagunas de estabilización: ¿tecnología apropiada o tecnología de punta para el tratamiento de aguas residuales? La experiencia mexicana. XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.  
<https://docplayer.es/14869700-I-157-las-lagunas-de-estabilizacion-tecnologia-apropiada-o-tecnologia-de-punta-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-la-experiencia-mexicana.html>

- Ramírez Quiroz, F. (2005). Desinfección del agua con cloro y cloroaminas. *Técnica Industrial* 260.  
<https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numero/20/42/a42.pdf>
- Rolin Mendoça S. (1999). Lagunas aireadas mecánicamente. Organización Panamericana de la Salud / Organización Mundial de la Salud.
- SEDUE. (1985). Operación y mantenimiento de lagunas aireadas. México.
- Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Tabasco (SAPAET). (2006). *Inventario de plantas de tratamiento de agua residual en Tabasco*. Reporte Técnico. Dirección Técnica.
- Sotelo Ávila, G. (1994). *Hidráulica general*. XV reimpresión. LIMUSA.
- Tchobanoglous, G. "Metcalf & Eddy". (2003). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y purificación*, Vols. 1 y 2, (3ª. ed.). McGraw Hill.
- Vázquez González M. B., López Ocaña, G. (2011). Evaluación técnica de un tanque Imhoff para el tratamiento de aguas residuales en Centro, Tabasco. *UNACAR Tecnociencia* 5(1), 32-47.



—— **Semblanzas** ——



## Gaspar López Ocaña

---

Ingeniero ambiental, maestro en Ingeniería y Protección Ambiental, con Especialidad en Sistemas de Tratamiento de Aguas y Aguas Residuales y doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Ha incursionado en líneas de investigación y proyectos sobre contaminación de suelo, modelación ambiental, restauración de suelos impactados por hidrocarburos, evaluación de impactos, riesgos y daños ambientales, restauración ecológica, monitoreo de calidad del aire, calidad del agua, diseño de sistemas de potabilización y tratamientos de aguas residuales, disposición y tratamiento térmico de residuos sólidos, legislación y gestión ambiental. Es responsable y colaborador en proyectos de carácter ambiental; brinda servicios profesionales en industrias, empresas y sector gubernamental, orientadas hacia el tratamiento de aguas residuales, potabilización, impacto ambiental y gestión de RSU. Actualmente es profesor investigador tiempo completo titular B de la División de Ciencias Biológicas de la UJAT. Es responsable del Laboratorio de Tecnología del Agua, líder del grupo de investigación Procesos Termodinámicos y Gestión Hídrica Sostenible. Ha sido integrante del SNI (candidato y nivel 1), miembro del SEI, cuenta con perfil PRODEP y como director de tesis ha concluido 64 de licenciatura, 14 de maestría y 5 de doctorado. Cuenta con dos libros, 15 capítulos de libro, 24 artículos científicos en revistas indexadas y científicas y participa en encuentros académicos y en redes de investigación (nacionales e internacionales).

## Nancy Estrada Pérez

---

Ingeniera ambiental, maestra en Ingeniería, Tecnología y Gestión Ambiental. Actualmente es estudiante del Doctorado en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Cuenta con la participación en tres artículos publicados en revistas indexadas JCR y

CONAHCYT referentes al tratamiento del agua. Ha participado como ponente en congresos internacionales y nacionales. En la iniciativa privada tiene experiencia como técnico laboratorista y de campo en muestreo y caracterización de descargas de aguas residuales. Ha participado en la evaluación y diseño de sistemas de tratamiento de agua potable, del mismo modo en el área administrativa y técnica en el seguimiento de proyectos en el Laboratorio de Tecnología del Agua desde hace seis años a la actualidad. Ha incursionado en líneas de investigación y desarrollado de proyectos en el área de calidad del agua y aguas residuales para el diseño de sistemas de tratamiento y potabilización de agua. Ha dirigido tesis de licenciatura relacionadas con la gestión e ingeniería ambiental.

## Carlos Alberto Torres Balcázar

---

Ingeniero industrial químico por el Instituto Tecnológico de Celaya y maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental por el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Profesor en los programas de Ingeniería Ambiental en los niveles licenciatura y maestría en la UJAT, impartiendo cursos sobre Operaciones y Procesos Unitarios, Sistemas de Tratamiento de Aguas para Potabilización y para Aguas Residuales Domésticas, Energías Alternas, Manejo y Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos, entre otros. Ha desarrollado y colaborado en más de 15 proyectos de investigación para el tratamiento de aguas residuales domésticas, mediante lodos activados en reactores de mezcla completa continuos y discontinuos, filtros biológicos y humedales artificiales, realizando pruebas con diferentes especies de plantas nativas en la zona del sureste mexicano, así como incineración de residuos sólidos. Ha sido colaborador en más de 25 artículos científicos arbitrados a nivel nacional e internacional, en capítulos de libros nacionales y en ponencias en congresos nacionales e internacionales. Director de tesis en más de 19 trabajos, tanto a nivel licenciatura como maestría. Integrante del grupo de investigación Procesos Termodinámicos y Gestión Hídrica Sostenible de la UJAT y miembro del Sistema Estatal de Investigadores del Estado de Tabasco. Actualmente se desarrolla en la línea de generación y aplicación del conocimiento de tecnologías del agua.

## Rudy Solís Silván

---

Ingeniero ambiental, maestro en Ciencias Ambientales y doctor en Ciencias en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales. Cuenta con seis artículos publicados en revistas indexadas JCR y CONAHCYT referentes al tratamiento del agua. Ha participado como ponente en 15 congresos internacionales en los últimos tres años. Ha sido integrante del SEI en el periodo 2015-2022. Fue director técnico en Agua y Saneamiento Urbano de la Asociación Mexicana de Ingeniería, Ciencia y Gestión Ambiental. Es capacitador externo en materia ambiental y seguridad en el trabajo No. de registro SOSR-810822-7LO-0005. Es gestor ambiental para la elaboración de MIA en sus modalidades particular y general, informes preventivos, estudios de riesgo ambiental y evaluación de daños ambientales con número de autorización No. SBSCC-AUT-PF-003-2021/EXPEDIENTE No. PF-003-2021. Obtuvo el primer lugar como asesor en el área de Biotecnología y Ciencias Agropecuarias en el 6º. Encuentro de Jóvenes hacia la Investigación, organizado por el CONAHCYT y el Consorcio de Universidades Mexicanas con el tema “Bioelectricidad a partir del cultivo de Anana comosus (piña)” en 2018. Primer lugar en Industria y Manufactura en la 17ª. Expo Industrial CANACINTRA Tabasco 2019, organizada por la Cámara Nacional de la Industria de Transformación delegación Tabasco con los prototipos: Robot buscador, Planta procesadora de pozol y Máquina secadora de cacao. Actualmente cuenta con su propia empresa ambiental ECOBIOT-SA, en la que estudiantes del ITSC y UPCH realizan residencias profesionales.



—— **Glosario** ——



## Glosario

---

### A

**A. Área.** Superficie de una unidad hidráulica o de tratamiento, expresada generalmente en metros cuadrados ( $m^2$ ). Se utiliza para el diseño, dimensionamiento y evaluación de reactores, lagunas, humedales y demás infraestructuras de tratamiento de aguas.

**Avanzado.** Nivel de tratamiento de aguas residuales que va más allá del tratamiento secundario. Su objetivo es remover contaminantes específicos como nutrientes (nitrógeno y fósforo), microcontaminantes, patógenos o compuestos orgánicos persistentes, para cumplir normas ambientales más estrictas o permitir la reutilización del agua. Incluye procesos como filtración avanzada, desinfección, membranas y tratamientos terciarios especializados.

### B

**Batea.** Estructura hidráulica abierta, generalmente rectangular y de poca profundidad, utilizada en procesos de sedimentación, decantación o mezcla en el tratamiento de aguas. Permite la separación de sólidos por gravedad o sirve como recipiente para la realización de pruebas, dosificación de reactivos o tratamientos fisicoquímicos a pequeña escala.

**Biodiscos.** Sistema de tratamiento biológico aerobio conocido como contactores biológicos rotatorios (CBR). Consiste en discos plásticos parcialmente sumergidos que giran lentamente, permitiendo el crecimiento de una biopelícula de microorganismos. Estos degradan la materia orgánica presente en el agua residual al alternar su contacto con el agua y el aire, siendo eficientes para la remoción de DBO y DQO.

## C

**C LMP DBO.** Concentración límite máxima permisible de demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Indica el valor máximo de DBO que puede tener un efluente antes de ser descargado a un cuerpo receptor o sistema de alcantarillado, según la normativa ambiental vigente. La DBO mide la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos degraden la materia orgánica biodegradable presente en el agua.

**C LMP DQO.** Concentración límite máxima permisible de demanda química de oxígeno (DQO). Representa el valor máximo permitido de materia orgánica total (biodegradable y no biodegradable) en un efluente. La DQO expresa la cantidad de oxígeno requerida para oxidar químicamente los compuestos orgánicos presentes en el agua residual.

**C LMP SST.** Concentración límite máxima permisible de sólidos suspendidos totales (SST). Define el límite máximo de partículas sólidas no disueltas que pueden estar presentes en un efluente tratado. Los SST influyen en la turbidez, sedimentación y transporte de contaminantes, y su control es clave para proteger los cuerpos de agua receptores.

**C1.** Concentración de entrada de la sustancia (mg/L). Representa la cantidad inicial del contaminante presente en el agua residual antes de recibir cualquier proceso de remoción.

**C2.** Concentración máxima permisible de la sustancia (mg/L) establecida por la normativa ambiental vigente. Indica el límite que no debe exceder el efluente para su descarga o reutilización, con el fin de proteger la salud pública y el medio ambiente.

**C3.** Concentración de salida de la sustancia del sistema (mg/L). Corresponde a la concentración del contaminante en el efluente una vez concluido el proceso de tratamiento, utilizada para evaluar la eficiencia del sistema.

**CE.** Conductividad eléctrica del agua, generalmente expresada en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Es un indicador indirecto de la cantidad de sales disueltas presentes y se utiliza para evaluar la salinidad y la calidad del agua en procesos hidráulicos y de tratamiento.

**CEAS.** Comisión Estatal de Agua y Saneamiento. Organismo público encargado de la planeación, regulación, operación y supervisión de los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento a nivel estatal en México.

**CH<sub>4</sub>.** Metano, gas producido principalmente durante procesos de digestión anaerobia en el tratamiento de aguas residuales. Es un componente clave del biogás y puede ser aprovechado como fuente de energía, aunque también es un gas de efecto invernadero.

**CO<sub>2</sub>.** Dióxido de carbono, gas generado en procesos biológicos aerobios y anaerobios durante la degradación de la materia orgánica. Participa en el equilibrio ácido-base del agua y es un subproducto del metabolismo microbiano.

**Color verdadero.** Parámetro de calidad del agua que mide el color causado únicamente por sustancias disueltas, una vez eliminados los sólidos suspendidos. Se asocia principalmente a la presencia de materia orgánica, metales disueltos o compuestos húmicos.

**CONAGUA.** Comisión Nacional del Agua. Autoridad federal en México responsable de la administración, regulación, preservación y aprovechamiento de las aguas nacionales, así como de la supervisión del cumplimiento de la normatividad en materia hídrica.

**COT.** Carbono Orgánico Total. Parámetro que cuantifica la cantidad total de carbono presente en compuestos orgánicos del agua, tanto biodegradables como no biodegradables. Se utiliza como indicador global de contaminación orgánica y para evaluar la eficiencia de procesos de tratamiento.

**CR.** Concentración real de una sustancia en el agua, medida experimentalmente en un punto específico del sistema de tratamiento. Refleja el valor obtenido a partir de análisis de laboratorio.

**CS.** Concentración estándar o de referencia de una sustancia, utilizada para comparación con valores normativos, límites permisibles o concentraciones objetivo dentro del diseño y evaluación de sistemas de tratamiento.

## D

**DBO5.** Demanda bioquímica de oxígeno a cinco días. Cantidad de oxígeno disuelto requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable presente en el agua durante un periodo de cinco días a 20 °C. Es un indicador clave de contaminación orgánica.

**DQO.** Demanda química de oxígeno. Medida de la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica total (biodegradable y no biodegradable) presente en el agua. Se usa para evaluar la carga contaminante total.

## E

**E. coli (NMP/100 ml).** Indicador microbiológico que estima la presencia de contaminación fecal reciente en el agua. Se expresa como número más probable (NMP) por 100 mL y es ampliamente utilizado para evaluar riesgos sanitarios.

**E. fecales (NMP/100 ml).** Grupo de bacterias coliformes asociadas al intestino de humanos y animales de sangre caliente. Se emplean como indicadores de contaminación fecal, especialmente en evaluaciones de calidad sanitaria del agua.

**ER DBO.** Eficiencia de remoción de demanda bioquímica de oxígeno, expresada generalmente en porcentaje. Indica la capacidad del sistema para reducir la carga de materia orgánica biodegradable.

**ER DQO.** Eficiencia de remoción de demanda química de oxígeno. Mide el porcentaje de eliminación de la materia orgánica total a lo largo del proceso de tratamiento.

**ER SST.** Eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales. Representa la efectividad del sistema para eliminar partículas sólidas no disueltas presentes en el agua residual.

**ERP (%).** Eficiencia de remoción porcentual. parámetro general que expresa, en porcentaje, la reducción de una sustancia o contaminante específico entre la concentración de entrada y la de salida del sistema de tratamiento.

## F

**Filtros percoladores.** Sistema de tratamiento biológico aerobio en el que el agua residual se distribuye sobre un medio filtrante (piedra, plástico u otro material). Sobre este medio se desarrolla una biopelícula microbiana que degrada la materia orgánica mientras el agua percola por gravedad. Son eficaces para la remoción de DBO y SST.

**FVOL. Flujo volumétrico.** Volumen de agua que circula por un sistema hidráulico por unidad de tiempo, generalmente expresado en  $m^3/s$ ,  $m^3/d$  o L/s. Es un parámetro fundamental para el diseño y operación de sistemas de tratamiento.

## G

**Grasas y aceites.** Conjunto de compuestos orgánicos de origen animal, vegetal o mineral presentes en el agua residual. En concentraciones elevadas pueden afectar los procesos biológicos y provocar obstrucciones en sistemas hidráulicos.

## H

**H. de Helm. / Huevos de Helminto.** Formas reproductivas de parásitos intestinales (principalmente nemátodos) presentes en aguas residuales. Se utilizan como indicadores sanitarios en la evaluación de riesgos para la reutilización del agua, especialmente en riego agrícola, y se expresan como número de huevos por litro.

**HAFL.** Humedales artificiales de flujo libre. Tipo de humedal construido donde el agua circula sobre la superficie del sustrato y entre la vegetación emergente. Se utilizan para el tratamiento de aguas residuales mediante procesos físicos, químicos y biológicos.

**HAFS.** Humedales artificiales de flujo subsuperficial. Sistemas en los que el agua circula a través de un medio granular (grava o arena) por debajo de la superficie, evitando olores y contacto directo con el ambiente. Son eficientes en la remoción de DBO, SST y patógenos.

**HP.** Unidad de medida *horse power* (“caballos de fuerza”), de un sistema de bombeo.

**HT.** Carga hidráulica total (m). Suma de todas las cargas presentes en un sistema hidráulico, incluyendo carga de presión, carga de velocidad y carga de elevación. Representa la energía total del fluido por unidad de peso.

**Humedales artificiales.** Sistemas de tratamiento natural diseñados para imitar los procesos de los humedales naturales. Utilizan vegetación acuática, sustratos y microorganismos para remover contaminantes mediante sedimentación, filtración, absorción y biodegradación.

## L

**Lagunas aireadas.** Tipo de tratamiento biológico donde se incorpora oxígeno al agua residual mediante aireadores mecánicos o difusores, favoreciendo la degradación aerobia de la materia orgánica. Son más eficientes que las lagunas facultativas en tiempos de retención más cortos.

**Lagunas de estabilización.** Sistemas extensivos de tratamiento de aguas residuales que emplean procesos naturales y biológicos. Incluyen lagunas anaerobias, facultativas y de maduración, y se caracterizan por su bajo costo operativo y alta eficiencia en la remoción de patógenos.

**LMP.** Límite máximo permisible. Valor máximo de concentración de un contaminante que puede estar presente en un efluente, de acuerdo con la normativa ambiental vigente, para su descarga o reutilización.

**Lodos activados.** Proceso de tratamiento biológico aerobio en el que una biomasa microbiana en suspensión degrada la materia orgánica del agua residual. El sistema incluye un reactor de aireación y un sedimentador secundario para la separación y recirculación de lodos.

## M

**ME.** Masa de entrada (según el contexto del análisis). Representa la cantidad de sustancia que ingresa al sistema y es utilizada para evaluar cargas contaminantes y balances de materia.

**MR.** Materia removida. Cantidad de contaminante eliminada por el sistema de tratamiento, calculada a partir de la diferencia entre la concentración de entrada y la de salida.

**MS.** Materia de salida. Cantidad de sustancia que permanece en el efluente tratado al final del proceso, utilizada para evaluar la eficiencia del sistema.

## N

**N/A.** No aplica, indica que un parámetro, cálculo o criterio no es pertinente en un análisis o condición específica.

**$\eta$ .** Eficiencia (%/100), relación adimensional que expresa el desempeño de un sistema de tratamiento, obtenida al dividir la eficiencia porcentual entre 100 (%/100), utilizada en cálculos hidráulicos y de remoción de contaminantes.

**$\eta_r$ .** Eficiencia de remoción requerida de una sustancia dada (%), valor mínimo de eficiencia que debe alcanzar un sistema de tratamiento para cumplir con el límite máximo permisible establecido para un contaminante específico.

**NMP.** Número más probable, método estadístico utilizado para estimar la concentración de microorganismos en el agua, especialmente bacterias indicadoras de contaminación fecal, expresado generalmente como NMP por 100 mL.

**NT.** Nitrógeno total. Suma de todas las formas de nitrógeno presentes en el agua, incluyendo nitrógeno orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos. Es un parámetro clave en la evaluación de eutrofización y eficiencia de tratamiento.

**$\emptyset$ .** Diámetro de la unidad de tratamiento (m), medida transversal característica de estructuras circulares como tanques, reactores o sedimentadores, utilizada en el diseño hidráulico y estructural. También se aplica para el diámetro de tuberías.

**ONG.** Organizaciones no gubernamentales. Entidades sin fines de lucro que participan en actividades de gestión, conservación y protección del recurso hídrico, así como en proyectos de saneamiento y educación ambiental.

## P

**P.D.** Promedio diario, valor medio de un parámetro medido o calculado a lo largo de un día, utilizado para el análisis de variaciones operativas y de carga hidráulica.

**P.M.** Promedio mensual, valor medio de un parámetro obtenido a partir de mediciones realizadas durante un mes, empleado para evaluar el desempeño sostenido de un sistema.

**P.** Potencia de bombeo (HP), energía requerida por una bomba para elevar o transportar un caudal determinado, considerando pérdidas hidráulicas y altura manométrica.

**pH (UpH).** Medida de la acidez o alcalinidad del agua, expresada en unidades de pH. Influye directamente en los procesos químicos, biológicos y de corrosión en sistemas de tratamiento.

**PT.** Fósforo total. Suma de todas las formas de fósforo presentes en el agua, tanto orgánicas como inorgánicas. Es un nutriente clave asociado a procesos de eutrofización.

**PTAR.** Planta de tratamiento de aguas residuales. Instalación diseñada para remover contaminantes físicos, químicos y biológicos del agua residual antes de su descarga o reutilización.

## Q

**Q.** Caudal ( $m^3/s$ , L/s), volumen de agua que fluye a través de una sección por unidad de tiempo, expresado comúnmente en  $m^3/s$  o L/s. Es un parámetro fundamental en el diseño y operación de sistemas hidráulicos.

**QB.** Gasto de bombeo ( $m^3/s$ ); caudal de agua impulsado por un sistema de bombeo, determinado por la capacidad de la bomba y las condiciones hidráulicas del sistema.

**Qd.** Caudal de diseño. Valor de caudal utilizado para el dimensionamiento de unidades hidráulicas y de tratamiento, considerando condiciones críticas o máximas de operación.

**QE.** Gasto de entrada ( $m^3/s$ ), caudal de agua residual que ingresa al sistema o a una unidad de tratamiento para su procesamiento.

**Qo.** Caudal de operación. Flujo real de agua que circula por el sistema durante condiciones normales de funcionamiento, el cual puede diferir del caudal de diseño. Se expresa comúnmente en  $m^3/s$  o  $L/s$ .

## R

**RAFA.** Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente. Unidad de tratamiento biológico anaerobio en la que el agua residual fluye de abajo hacia arriba a través de un lecho de lodos, permitiendo la degradación de la materia orgánica y la producción de biogás.

**RAFA-FBAH-Ciénega.** Sistema integrado de tratamiento que combina un RAFA con un Filtro Biológico Aerobio de Alta Hidrólisis (FBAH), implementado en la región de Ciénega, para mejorar la remoción de materia orgánica y sólidos.

## S

**SAPAET.** Sistema de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Tabasco. Organismo público encargado de la gestión, operación y mantenimiento de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en el estado de Tabasco, México.

**SEDUE.** Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Dependencia gubernamental encargada de la planeación urbana, protección ambiental y regulación del uso del suelo.

**SST.** Sólidos suspendidos totales, partículas sólidas no disueltas presentes en el agua, que pueden ser removidas mediante procesos físicos y biológicos de tratamiento.

## T

**T.** Tiempo, variable que representa la duración de un proceso hidráulico o de tratamiento, expresada en unidades como segundos, minutos u horas.

**TB.** Tiempo de bombeo (s, min, h), periodo durante el cual opera un sistema de bombeo para transportar un volumen específico de agua.

**Temp. (°C).** Temperatura del agua. Parámetro físico que influye en la solubilidad de gases, la cinética de reacciones químicas y la actividad biológica en los procesos de tratamiento.

**Ti.** Tirante o altura del agua (m), profundidad del flujo medida verticalmente desde el fondo del conducto o canal hasta la superficie libre del agua.

**Tox. aguda (UT).** Indica el efecto adverso inmediato de una sustancia o efluente sobre organismos vivos en un periodo corto de exposición. Se utiliza para evaluar riesgos ambientales asociados a descargas de aguas residuales.

**TRH.** Tiempo de retención hidráulica. Tiempo promedio que el agua permanece dentro de una unidad de tratamiento o sistema hidráulico. Se calcula como la relación entre el volumen del reactor y el caudal de entrada.

## V

**V.I.** Valor instantáneo; medición puntual de un parámetro realizada en un momento específico, utilizada para analizar variaciones temporales y condiciones operativas momentáneas.

**Vol.** Volumen ( $m^3$ ), cantidad de espacio ocupado por el agua en una unidad de tratamiento, tanque, canal o sistema hidráulico.

## Y

**Y.** Densidad ( $1,000 \text{ kg}/m^3$ ,  $H_2O$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ), propiedad física que relaciona la masa con el volumen del agua, con un valor aproximado de  $1,000 \text{ kg}/m^3$  para e.

---

*Wilfrido Miguel Contreras Sánchez*

Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

*Pablo Marín Olán*

Director de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica

*Analuís Kú Ortíz*

Jefa del Departamento Editorial de Publicaciones  
No Periódicas

---