

## **Sistema combinado anaerobio-humedal de tratamiento de aguas residuales para comunidades de Michoacán, México**

### ***Combined anaerobic-wetland wastewater treatment system for communities in Michoacán, Mexico***

**Salvador Alejandro Sánchez-Tovar\***

Consultoría SAST, Río Nazas 500, Int. 10, Col. Ventura Puente, 58020 Morelia, Michoacán, México  
Teléfono (+52) 55 3708 3736. Correo-e (*e-mail*): salvadorinvestigador@gmail.com

\* Autor a quien debe dirigirse la correspondencia / *Corresponding author*

Recibido / *Received*: Enero / *January* 15, 2023

Aceptado / *Accepted*: Febrero / *February* 14, 2023 (Número 1, enero-junio / *Number 1, January-June*)

#### **Resumen**

En México la Comisión Nacional del Agua en adelante CONAGUA, registra en su último inventario cerca de tres mil plantas de tratamiento de aguas residuales, PTAR, de las cuales funcionan aproximadamente mil y de acuerdo con datos de la industria privada apenas 100 están en condiciones óptimas de funcionamiento. El sistema de lodos activados de amplio uso con más del 50% del volumen de tratamiento es un sistema excesivamente caro para los municipios mexicanos, ya que, al ser extremadamente ineficiente en la conversión energética con apenas el 30% de ella, los operadores prefieren apagarlo y pagar la multa por el no tratamiento. Este tipo de sistemas inventado hace más de cien años y que además se utiliza para tratar una mezcla de efluentes industriales con domésticos "tratamiento a final del tubo" no es capaz de eliminar todos los contaminantes. Se ha demostrado que drogas como la cocaína, el nonil fenol y los disruptores endócrinos fluyen por estas PTAR sin sufrir degradación alguna, hidrocarburos, medicamentos como el diclofenaco tampoco son eliminados. Los colorantes de la industria textil no pueden ser degradados por este tipo de tratamientos. Los sistemas de aireación mecánica son complejos de operar y requieren de personal especializado. Una alternativa la constituye el tratamiento celular o en origen y ahí mismo buscar su reutilización o bien aliviar la carga de la PTAR municipales. En el estado de Michoacán la CONAGUA local registra 116 PTAR de lodos activados que presentan el mismo problema de inoperatividad por ineficiencia energética y por sobrecostos que están más allá de los presupuestos municipales. En el presente artículo se presenta un sistema combinado para cinco mil habitantes constituido por un desarenador, una trampa de grasas y aceites, un digestor o reactor anaerobio y un humedal artificial de pulimento. Este tipo de sistema se basa en el aprovechamiento de la energía de la gravedad que permite abatir los costos de operación y es mucho menos complejo de operar que el sistema de lodos activados.

**Palabras clave:** Tratamiento, agua residual, digestor o reactor anaerobio, humedal artificial

#### **Abstract**

In Mexico, the National Water Commission, hereinafter CONAGUA, records in its latest inventory about three thousand wastewater treatment plants, WWTP, of which approximately one thousand are in operation and according to data from the private industry only 100 are in optimal operating conditions. The widely used activated sludge system with more than 50% of the volume treatment is an excessively expensive system for Mexican municipalities, since, being extremely inefficient in the energy conversion with only 30% of it, the operators prefer to turn it off and pay the fine for not treating it. This type of systems invented more than a hundred years ago and which are also used to treat a mixture of industrial and domestic effluents "end-of-pipe treatment" is not capable of removing all contaminants. It has been shown that drugs such as cocaine, nonilphenol and endocrine disruptors flow through these WWTPs without suffering any degradation, hydrocarbons, medicines such as diclofenac are also not eliminated. Dyes from the textile industry cannot be degraded by this type of treatment. The mechanical aeration systems are complex to operate and require specialized personnel. An alternative is the cell treatment or at source and right there seek its reuse or alleviate the burden of the municipal WWTP. In the state of Michoacán, the local CONAGUA registers 116 activated sludge WWTPs that present the same problem of inoperability due to inefficiency energy and cost overruns that are beyond municipal budgets. This article presents a system combined for five thousand inhabitants consisting of a sand remover, a grease and oil trap, a digester or anaerobic reactor and an artificial wetland polish. This type of system is based on the use of the energy of gravity that allows lowering operating costs and is much less complex to operate than the activated sludge system.

**Keywords:** Treatment, wastewater, anaerobic reactor or digester, constructed or artificial wetlands

## INTRODUCCIÓN

En México, la Comisión Nacional del Agua o CONAGUA tiene registradas casi 3,000 plantas de tratamiento de aguas residuales o "PTAR" (Conagua, 2014, 2016, 2018; Numeragua México, 2016), de las cuales solamente cerca de 1,000 están en funcionamiento y óptimamente apenas el 20% (Empresas privadas de tratamiento de aguas residuales, 2020).

Entre las principales causas de esta disfuncionalidad se encuentran:

- Mal diseño y mal dimensionamiento
- Consideración de un solo tipo de tratamiento como equivalente de todo tipo de agua residual
- Inestabilidad en la composición del agua residual
- Excesiva complejidad en el diseño
- Sobrecarga de equipos, material y construcciones
- Balances incorrectos de materia y de energía
- Falta de capacitación de operadores
- Falta de drenajes de alimentación
- Falta de mantenimiento preventivo y correctivo
- Abandono total y/o parcial y deterioro
- Subtratamiento por falta de presupuesto municipal

Los sistemas más usados en un 55% en México son los lodos activados, sistemas biológicos, los cuales fueron descubiertos en 1913 en el Reino Unido por dos ingenieros, Edward Ardern y W.T. Lockett, que estaban realizando una investigación para el Departamento de Ríos de Manchester Corporation en Davyhulme Sewage Works y consisten principalmente en un tanque de aireación donde se forman los flóculos microbianos que transforman los contaminantes en nueva biomasa y un tanque de sedimentación donde se separa la fase acuosa que rebosa y la fase de lodos que sedimenta (De-la-Peña et al., 2013). Cuando estos se mezclan con otro tratamiento se tiene el sistema dual que constituye el 11.6% que sumados al anterior dan un 66.6%. Este tipo de sistema se caracteriza por el elevado consumo de energía eléctrica debido a la gran cantidad de aire y mezclado que demandan, la alta producción de lodos la cual hay que tratar y disponer de ellos; además de la complejidad en la operación. La Figura 1 muestra los principales tratamientos de aguas residuales usados en México (Conagua 2018; Ortiz-Pérez, 2015).



**Figura 1.** Principales sistemas de tratamiento de aguas residuales usados en México (Conagua, 2016, tomado de Vidal-Álvarez, 2018)

Vidal-Álvarez (2018) menciona que Hernández (2016) acotó: "Por ejemplo, en Xaltianguis, Guerrero, México, la construcción de una planta de tratamientos mediante lodos activados que trata 1080 m<sup>3</sup>/día requirió un monto de \$5,965,000.00 M.N. (pesos mexicanos), además del gasto de \$38,880.00 M.N. mensuales solamente de operación por metro cúbico". Esto significa que, en poco más de 10 meses se gastan el 6.5% del costo de la planta solamente en operación.

---

Los filtros biológicos como los percoladores de altas eficiencias apenas se usan en un 4.4%. Los reactores anaerobios apenas se usan con un 1.3%. Un gran problema de los lodos activados es que el tiempo de residencia de los contaminantes es muy corto, por lo que muchos se absorben en los flóculos, se sedimentan y se separan junto con estos sin terminar de degradarse (Núñez-García, 2015; Riojas-Rodríguez et al., 2013). Tanto en el agua tratada por lodos activados como en los lodos residuales se encuentran sustancias que no se degradan como son: No se eliminan metales pesados y otros contaminantes inorgánicos como el arsénico, el flúor y el cromo hexavalente ni el nonil fenol, hormonas provenientes de los anticonceptivos, disruptores endócrinos, medicamentos y drogas (Hanjra et al., 2011; OMS-UNICEF, 2014; Redondo-Gómez et al., 2009). Durante más de 100 años y por exigencia de las autoridades hídricas y sanitarias, el sistema de lodos activados ha sido incluso obligatorio por parte de las autoridades correspondientes (Jiménez-Cisneros, 2008).

Ha llegado la hora de cambiar el paradigma. Las ecotecnologías como los filtros percoladores modernos, los reactores empacados, las trampas de grasas y aceites con enzimas lipasas, los reactores anaerobios y los humedales artificiales, todo lo anterior a gravedad o con un mínimo de bombeo son opciones viables a los métodos arcaicos que aún se usan en México.

Por ello, el nuevo paradigma para tratar las aguas residuales mezcladas de poblaciones humanas e industrias al "final del tubo" por el tratamiento celular o local o en el origen por medio de las ecotecnologías anteriores pudiendo permitir la reutilización del agua "in situ" (WWAP, 2017). Además, pueden aliviar la carga de las grandes plantas municipales que ya se han convertido en verdaderos "elefantes blancos" (Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018; PNH 2014-2018; WWAP, 2017).

Las ecotecnologías permiten la participación directa de las comunidades, la educación ambiental y la concientización de las mismas.

En México se tienen más de una decena de leyes y normas oficiales con respecto al agua, ya sea para consumo humano o como agua residual. Por debajo de la Constitución se encuentra la Ley de Aguas Nacionales, actualmente en discusión sus modificaciones en la Cámara de Diputados. Como último escalón están las normas oficiales mexicanas (DOF, 1996, 1997, 2021, Ley General de Salud, 2010):

- Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores nacionales. Publicada el 3 de abril de 2022
- Norma Oficial Mexicana NOM-002-Semarnat-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998
- 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 públicos. Publicada el 21 de septiembre de 1998

La NOM-001-Semarnat 1996 se modificó en 2021 a la NOM-001-Semarnat-2021 y es una NOM más exigente en cuanto a que sustituyó la demanda bioquímica de oxígeno por la demanda química de oxígeno o DQO ya que la segunda engloba a la primera y a veces hasta por decenas de veces su valor.

Además, en caso de que los cloruros excedan los 1,000 mg/L deberá evaluarse el carbono orgánico total en lugar de la DQO. Urge la actualización de la NOM-003-Semarnat-1997 para hacer más eficiente la reutilización (reúso) del agua residual tratada ya sea para riego diferencial, inyección al subsuelo, lavado industrial y hasta posible potabilización dada la emergencia nacional por sequía en México.

Urge una política pública de tratamiento y reutilización de aguas residuales en origen semejante a "Sembrando vida" donde se dé la educación ambiental hídrica a nivel popular y con la apropiación

social del conocimiento de tal manera que la población mexicana aprenda a tratar, reciclar y valorar el precioso recurso hídrico.

En Michoacán la división regional de la CONAGUA tiene registradas un promedio de 115 plantas de lodos activados municipales detenidas por el excesivo consumo y costo eléctrico de operación de estas y que rebasa los presupuestos de los municipios sobre todo de los más pobres, por lo que las apagan y desvían el agua residual sin tratar (CONAGUA Michoacán, comunicación personal). Las PTAR municipales tal y como se conocen en la actualidad tratan el agua combinada y de difícil composición químico-biológica "a final del tubo". En la actualidad se manejan nuevos conceptos como es el tratamiento "celular o en origen" y la reutilización del agua tratada en el mismo lugar donde se generó. Estos métodos ya se aplican en las industrias petrolera y petroquímica y son conocidos como metodología "pinch"<sup>13</sup>.

Es del conocimiento común el gravísimo deterioro del sistema lacustre de Michoacán especialmente en los lagos de Cuitzeo, que es el segundo cuerpo de agua nacional después del Lago de Chapala, del Lago de Pátzcuaro y del Lago de Zirahuén. Estos últimos están rodeados de pendientes montañosas y sus poblaciones vecinas están más elevadas con respecto de dichos cuerpos de agua propiedad de la nación. La gravedad hidráulica es una forma de energía gratuita que se puede aprovechar si se calcula y se conduce de forma científica e ingenieril. En el presente documento se propone un sistema a gravedad que aproveche dichas pendientes y para poblaciones de no más de 5,000 habitantes y se compone principalmente por un desarenador, una trampa de grasas, un reactor anaerobio, una desnatadora y un humedal artificial.

Este tipo de sistemas ya ha sido probado tanto experimentalmente a nivel de laboratorio, lo mismo que a nivel municipal y a escalas mayores con excelentes resultados (Bautista-Bayona e Ibañez-Ramírez, 2018; Halcón Internacional, 2015; Herrera-López et al., 2021; Romero-Ortiz et al., 2010; Solano-de-la-Cruz et al., 2020; Valladares-Rodríguez et al., 2019).

Esta investigación aplicada tiene como objetivo ofrecer una solución realista para comunidades de 5,000 habitantes con una propuesta combinada de un reactor anaerobio con un humedal artificial o tecnificado.

A continuación, se detalla la propuesta de este estudio.

### **Digestor o reactor anaerobio más humedal artificial**

#### **Fundamentos**

En esta investigación se presenta la ingeniería básica primaria de una planta de tratamiento de aguas residuales. Se constituye como sigue (datos tomados de Duncan Mara, 2003):

- Planta de tratamiento de aguas residuales, en adelante PTAR, para 5,000 habitantes con un consumo-generación promedio de 200 L/habitante-día
- Lo anterior equivale a un flujo  $Q = 1,000.00 \text{ m}^3/\text{d}$ ;  $41.66 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $11.57 \text{ L/s}$
- Composición aproximada según la Tabla 1
- Con esperanza de remoción del 90% de contaminantes

Se propone un modelo a gravedad, prácticamente sin bombeo y sin consumo eléctrico compuesto principalmente por:

- Desarenador con rejillas de desbaste

<sup>13</sup> La metodología "pinch" (en español, pellizco) optimiza la recuperación energética minimizando la inversión de capital. Se conceptualizó desde la década de 1970 por Linnhoff y Vredeveid (Kemp, I.C. 2006. Pinch analysis and process integration: A user guide on process integration for the efficient use of energy. 2nd ed. Butterworth-Heinemann. ISBN 0-7506-8260-4) [Nota de los(as) editores(as)]

- Cárcamo de recepción
- Reactor anaerobio con control de natas
- Humedal artificial
- Canal de contacto de cloro

**Tabla 1.** Composición del agua residual rural promedio (Metcalf y Eddy,1991)

Componente	Unidad	Concentración		
		Fuerte	Media	Diluida
DBO <sub>5</sub> total	mg/L	400	220	110
DQO total	mg/L	1000	500	250
P total (fosfatos)	mg/L	4	8	15
N total	mg/L	20	40	85
Grasas y aceites	mg/L	50	100	150
Sólidos suspendidos	mg/L	350	220	100
Sólidos disueltos totales	mg/L	850	500	250
Sólidos totales	mg/L	1200	720	350
Coliformes totales	NMP/100 mL	107-109	107-108	106-107

Para reforzar la bondad del sistema propuesto, en la Tabla 2 se presenta una comparación entre el sistema tradicional de lodos activados y el sistema propuesto de biodigestor-humedal.

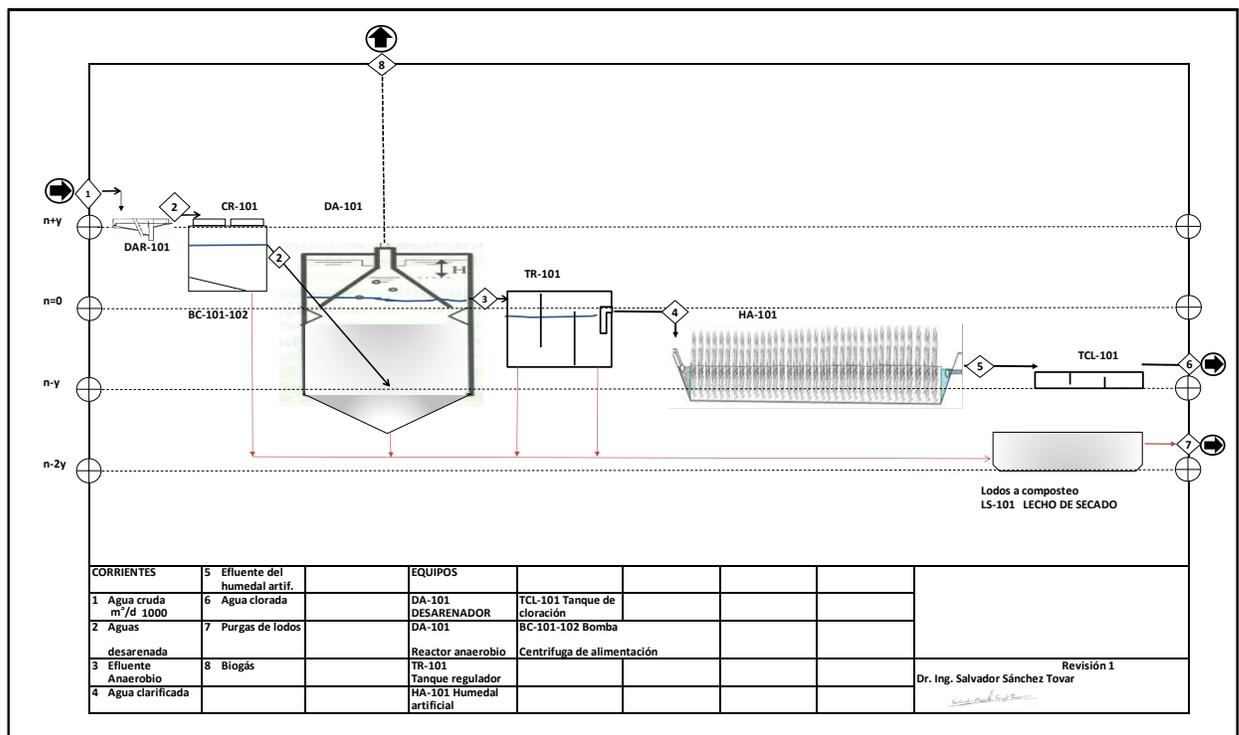
**Tabla 2.** Comparación entre el sistema tradicional de lodos activados y el sistema biodigestor-humedal a gravedad

PARÁMETRO	LODOS ACTIVADOS	BIODIGESTOR-HUMEDAL
COSTO	Estándar	Estándar
FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN	Factible en la localidad	Factible, pero requiere mucha área y mucha mano de obra
EQUIPAMIENTO	Alto Requiere instalación eléctrica de 440 VAC, 50 Hz y el transformador adecuado Requiere de un centro de control de motores	Bajo, puede operar con 220 VAC, 60Hz  Puede operar con un tablero botonera, arranque paro
MANTENIMIENTO	Alto y más complejo	Menor, requiere poda periódica del humedal y purga de lodos del digestor
COMPLEJIDAD DE OPERACIÓN	Mayor en cuanto a lo mecánico eléctrico	Sistema más natural
VIDA MEDIA	30 años	40 años
EFICIENCIA	Alta	Muy alta
PRODUCTOS	Agua tratada	Agua tratada
LODOS	Lodo seco, muy fértil, se puede aplicar directamente a lombricultura	Lodo seco muy fértil, no necesita composteo, se puede aplicar directamente a lombricultura
IMPACTO SOCIAL	Normal	Alto
IMPACTO AMBIENTAL	Alto	Bajo

Es claro que el impacto ambiental de un sistema de lodos activados es mayúsculo ya que los aerosoles que se forman durante la aireación forzada llevan microorganismos potencialmente patógenos más otras sustancias contaminantes que las personas pueden respirar. El sistema de digestión y el humedal están diseñados para justamente mantener bajo control aerosoles y posibilidades de vectores como mosquitos porque el humedal es de flujo subsuperficial y el biorreactor anaerobio puede diseñarse con

un lavador de gases para el caso de que el agua a tratar llevara sulfatos y pudiera formarse ácido sulfhídrico y ya el gas lavado con la misma agua residual tratada que se envía al humedal artificial tiene la posibilidad de aprovecharse por su contenido de metano (Castro-González et al., 2001).

Los sistemas son muy amigables con el ambiente como puede verse en el Anexo 1. De acuerdo con las memorias de cálculo ejemplificadas en el Anexo 2 se desarrolló y dimensionó el Diagrama de Flujo y Proceso o DFP que se muestra en la Figura 2, donde se incluyen los dos sistemas. Se presenta un ejemplo ya construido por una empresa fraterna (Figura 3).



**Figura 2.** DFP para la PTAR compuesta por digestor o reactor anaerobio y humedal artificial (desarrollo del autor)

La PTAR propuesta consiste básicamente de:

- **DAR-101.** Desarenador con rejillas, concreto y varilla 1.5m x 4.5m (Ingeniería civil libre en Internet, 2015)
- **CR-101.** Cárcamo de recepción de 30 m<sup>3</sup> (Concreto y /o mampostería)
- **DA-101.** Digestor o reactor anaerobio: Tanque de orillas curvas (Evitar zonas hidráulicamente muertas) de 600 m<sup>3</sup> de capacidad incluyendo "reboses" (ver glosario de términos al final), de bordes trapezoidales, apisonados y compactados manualmente o con maquinaria y recubierta con geomembrana de polietileno de alta densidad (*HDPE liner*, en inglés) de 1.5 mm de espesor. La geomembrana cubre fondo, bordos y cara superior del bordo. El digestor está cubierto con una geomembrana flexible o inflable que permita contener el biogás
- **TR-101.** Tanque de 20 m<sup>3</sup> (opcional), en concreto o geomembrana el cual por medio de mamparas retiene los lodos y natas que expulsa el biodigestor y evita que entren al humedal artificial y lo tapen o taponen
- **HA-101.** Humedal artificial de 1,000 m<sup>2</sup> (Bordo de mampostería y recubierto con geomembrana de 1.5 mm) , con canales y tubería de distribución hidráulica y plantas como carrizos (*Phragmites australis*) o tules (*Typha latifolia*), los cuales envuelven con sus raíces y rizomas el soporte de

grava, formando un horizonte radicular y un bioma artificial que termina de depurar los efluentes del digestor o reactor anaerobio

- **LS-101.** Lecho de secado. Área de 200 m<sup>2</sup> filtrante bordeado con fondo de grava y arena, que filtra retiene los sólidos de la purga, los seca y permite su recuperación
- **CCL-101.** Canal de contacto de cloro. Construido en concreto en forma de "caracol cuadrado" para disminuir el área ocupada y maximizar el tiempo de contacto



**Figura 3.** Reactor anaerobio de flujo ascendente con postratamiento de humedal artificial. construido con tecnología de la Comisión de Aguas del Estado de México o CAEM por la empresa Halcón Internacional S.A. de C.V.<sup>14</sup> (<https://halconinternacional.com/>)

### Costos y precio

El valor "llave en mano" del sistema es de aproximadamente \$5,676,600 pesos mexicanos. Considerando los 5000 habitantes a quienes serviría, el costo unitario por persona es de \$1,135.00, un costo extraordinariamente razonable para tener un sistema de saneamiento adecuado y poder incluso reutilizar el agua para riego sin peligro para los usuarios.

En el Anexo 2 se dan las bases ingenieriles que soportan esta evaluación económica.

En la Tabla 3 se presentan los costos y precio aproximados del sistema "llave en mano".

### Conclusiones

Esta propuesta de un sistema "llave en mano" es una opción viable para comunidades aledañas al Lago de Pátzcuaro o al Lago de Cuitzeo para evitar que se sigan contaminando sus aguas.

El estado de Michoacán, en México, es una región que está al borde del colapso ambiental si sus autoridades, su población y sus industriales no se ponen de acuerdo para resolver los problemas creados por la contaminación que ellos mismos como sociedad producen.

La propuesta tiene un costo que es extraordinariamente razonable.

<sup>14</sup> Construyó en 2015 la PTAR de Axapusco Edo. de México con reactor anaerobio de flujo ascendente y humedal subsuperficial con tecnología de la CAEM o Comisión de Aguas del Estado de México

Su vista es agradable para las personas que vivan en sus alrededores. Como ya se mencionó, en el Anexo 1 se presentan algunas fotografías tomadas de referencias bibliográficas abiertas (que permiten su reproducción). Y, en el Anexo 2, se presentan los cálculos en los que se basó esta investigación.

**Tabla 3a.** Costos y precio aproximados del sistema "llave en mano"(Parte 1)

Planta: Digestor más humedal					OBRA CIVIL	EQUIPO	INSTALACIÓN	INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
Descripción	Unidad	Cantidad	Costo Unitario USD\$	Costo Total USD\$				
<b>AD Administración</b>								
Fianza		1	3,000	3,000				3,000
Contingencias		1	3,000	3,000				3,000
Seguro		1	3,000	3,000				3,000
<b>EE Equipo Eléctrico</b>								
CCM		1	500	500		500		
Tablero de Control		1	500	500		500		
<b>EQ Equipo</b>								
Bombas Alimentacion		0	600	-		-		
Bombas de lodos		0	600	-		-		
Rejilla de desbaste		1	1,000	1,000		1,000		
Quemador y arrestador de flama		1	3,000	3,000		3,000		
Bombas de recirculacion		1	500	500		500		
Dosificador de cloruro férrico		0	1,500	-		-		
Dosificador de hipoclorito de sodio		0	500	-		-		
Laboratorio, mesas	Lote	1	3,000	3,000		3,000		
Bomba de lodos	Lote	1	800	800		800		
LECHO DE SECADO		1	12,000	12,000		12,000		
<b>IE Instalación Eléctrica</b>								
Iluminación		1	2,000	2,000			2,000	
Instalación Eléctrica		1	3,000	3,000			3,000	
<b>IM Instalación Mecánica</b>								
Instalación Mecánica		1	4,000	4,000			4,000	
<b>IN Ingeniería</b>								
Ingeniería		1	50,000	50,000				50,000
Supervisión		1	30,000	30,000				30,000
<b>IO Instrumentación</b>								
Flujo Parshall		1	2,000	2,000		2,000		
Nivel		1	1,500	1,500		1,500		
Oxígeno		0	1,200	-		-		
pH		1	1,220	1,220		1,220		
Temperatura		1	300	300		300		

**Tabla 2b.** Costos y precio aproximados del sistema "llave en mano" (Parte 2)

<b>OC Obra civil</b>								
Tanque de recepción	m3	30	700	21,000	21,000			
Recubrimiento base del Biodigestor	m2	1000	6	6,000	6,000			
Membrana inflable del Biodigestor	m2	1800	9	16,364	16,364			
Biodigestor (excavación)	m3	600	16	9,600	9,600			
Tuberías de biogás	lote	1	2,500	2,500	2,500			
Bordeo del humedal	m3	1200	15	18,000	18,000			
Base del humedal geomembrana	m2	1000	6	5,909	5,909			
Grava, arena o tezontle para base	m3	600	5	2,727	2,727			
Cloración tanque de contacto	m3	20	400	8,000	8,000			
Area techada Cribas	m2	0	400	-	-			
Cuarto de Control y Laboratorio	m2	1	500	500	500			
Caseta de productos quimicos	m2	1	400	400	400			
Acabados y Urbanización	lote	1	1,500	1,500	1,500			
<b>TR Tráfico</b>								
Agente aduanal		1	3,000	3,000			3,000	
Flete adicionales	lote	1	2,000	2,000			2,000	
<b>TV Tuberías y válvulas</b>								
TUBERÍA PVC DE 40	lote	1	1,000	1,000	1,000			
Válvulas	lote	1	1,000	1,000	1,000			
<b>VI Viáticos</b>								
Viáticos		1	6,000	6,000				6,000
<b>Costo Total</b>				<b>229,820</b>	<b>92,500</b>	<b>28,320</b>	<b>14,000</b>	<b>95,000</b>
<b>Utilidad 30%</b>				<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Precio de Venta</b>				<b>298,766</b>	<b>92,500</b>	<b>28,320</b>	<b>14,000</b>	<b>95,000</b>
					229,820			
					Total USD\$ 298,766			
					Tipo de cambio 19			
					Total Pesos M.N. 5,676,554			

**GLOSARIO DE TÉRMINOS Y SIGLAS**

<b>Términos y siglas</b>	<b>Definición</b>
A	Fracción de la DBO no removida como sólidos sedimentables a la entrada del sistema de humedales artificiales. Es una variable que depende de la calidad del agua (se recomienda un valor de 0.80)
A	Área superficial del bioreactor, m <sup>2</sup>
A1	Área parcial del BIODIGESTOR (del fondo), m <sup>2</sup>
A2	Área trapezoidal del BIODIGESTOR, m <sup>2</sup>
A3	Área cónica del BIODIGESTOR, m <sup>2</sup>
As	Área superficial del humedal artificial, m <sup>2</sup>
AGV	Ácidos grasos volátiles, medidos como ácido acético
Alcalinidad	Una medición de la calidad del agua medida con CaCO <sub>3</sub>
apisonado	Aplanado por medio de "llana" con rodillos empleando fuerza humana o maquinaria motorizada. Del verbo apisonar, apretar o allanar tierra, grava, etc., por medio de un pisón o una apisonadora

Términos y siglas	Definición
	(https://dle.rae.es/apisonar?m=form)
BIOLAK	Sistema alemán de construcción de estanque con bordos trapezoidales de tierra compactada, recubiertos en su interior con geomembrana de polietileno y en su exterior con pasto "Pangola" para reforzar el bordo
$C_e$	Concentración de DBO en el efluente del humedal artificial, mg/L
$C_o$	Concentración de DBO en el influente del humedal artificial, mg/L
Coliformes	Coliformes fecales medidos como número más probable, NMP
DFP	Diagrama de Flujo y Proceso
DQO total	Demanda química de oxígeno total
DQO soluble	Demanda química de oxígeno soluble
DBO <sub>5</sub> total	Demanda bioquímica de oxígeno medida durante cinco días total
DBO <sub>5</sub> soluble	Demanda bioquímica de oxígeno medida durante cinco días soluble
Fósforo	Medición de fósforo como fosfatos
H	Altura del biorreactor, m
<i>HDPE liner</i>	En inglés geomembrana de polietileno de alta densidad para el BIORREACTOR
$K_s$	Conductividad hidráulica, $m^3/m^2 \cdot d$
$K_T$	Constante de primer orden dependiente de la temperatura, $d^{-1}$
$L$	Longitud del rectángulo A1 del BIORREACTOR
L	Longitud del humedal artificial (paralelo al flujo del agua en tratamiento), m
$L_m$	Longitud mayor en la superficie exterior del BIORREACTOR
Lodos activados	<p>El proceso de lodos activados fue descubierto en 1913 en el Reino Unido por dos ingenieros, Edward Ardern y W.T. Lockett, que estaban realizando una investigación para el Departamento de Ríos de Manchester Corporation en Davyhulme Sewage Works. En 1912, Gilbert Fowler, un científico de la Universidad de Manchester, observó los experimentos que se estaban realizando en la Estación Experimental de Lawrence en Massachusetts, EE. UU., relacionados con la aireación de aguas residuales en una botella que había sido cubierta con algas. Los colegas ingenieros de Fowler, Ardern y Lockett, experimentaron con el tratamiento de aguas residuales en un reactor de extracción y llenado, que produjo un efluente altamente tratado. Airearon el agua residual continuamente durante aproximadamente un mes y pudieron lograr una nitrificación completa del material de muestra. Creyendo que el lodo había sido activado (de manera similar al carbón activado) el proceso se denominó lodo activado. No fue hasta mucho más tarde que se dieron cuenta de que lo que realmente había ocurrido era un medio para concentrar organismos biológicos, desacoplando el tiempo de residencia de los líquidos (idealmente, bajo, para un sistema de tratamiento compacto) del tiempo de retención de los sólidos (idealmente, bastante alto para un efluente bajo en DBO5 y amoníaco). Sus resultados se publicaron en su artículo de 1914, y el primer sistema de flujo continuo a gran escala se instaló en Worcester dos años después. Después de la Primera Guerra Mundial, el nuevo método de tratamiento se extendió rápidamente, especialmente a los EE. UU., Dinamarca, Alemania y Canadá. A fines de la década de 1930, el tratamiento de lodos activados se convirtió en un proceso biológico de tratamiento de aguas residuales bien conocido en aquellos países donde los sistemas de alcantarillado y las plantas de tratamiento de aguas residuales eran comunes   <i>The activated sludge process was discovered in 1913 in the United Kingdom by two engineers, Edward Ardern and W.T. Lockett, who were conducting research for the Manchester Corporation Rivers Department at Davyhulme Sewage Works. In 1912, Gilbert Fowler, a scientist at the University of Manchester,</i></p>

Términos y siglas	Definición
	<p><i>observed experiments being conducted at the Lawrence Experiment Station at Massachusetts involving the aeration of sewage in a bottle that had been coated with algae. Fowler's engineering colleagues, Ardern and Lockett, experimented on treating sewage in a draw-and-fill reactor, which produced a highly treated effluent. They aerated the waste-water continuously for about a month and were able to achieve a complete nitrification of the sample material. Believing that the sludge had been activated (in a similar manner to activated carbon) the process was named activated sludge. Not until much later was it realized that what had actually occurred was a means to concentrate biological organisms, decoupling the liquid residence time (ideally, low for a compact treatment system) from the solids retention time (ideally, fairly high for an effluent low in BOD<sub>5</sub> and ammonia). Their results were published in their 1914 paper, and the first full-scale continuous-flow system was installed at Worcester two years later. In the aftermath of the First World War the new treatment method spread rapidly, especially to the U.S., Denmark, Germany, and Canada. By the late 1930s, the activated sludge treatment became a well-known biological wastewater treatment process in those countries where sewer systems and sewage treatment plants were common</i></p> <p><i>(<a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Activated_sludge">https://en.wikipedia.org/wiki/Activated_sludge</a>)</i></p>
n	Porosidad del sistema (espacio disponible para el paso del agua en tratamiento) como fracción decimal
Nitrógeno Kjeldahl, NK	Nitrógeno medido de acuerdo con el método propuesto por Kjeldahl
NOM	Norma Oficial Mexicana
P	Fósforo total medido como fosfatos
Pi	$\Pi = 3.1416$ Notación en programación
PTAR	Planta(s) de tratamiento de aguas residuales
Q	Flujo hidráulico en m <sup>3</sup> /unidad de tiempo
r	Radio del cono del procedimiento BIOLAK
"reboses"	Limite hidráulico de desbordamiento de un recipiente hidráulico
s	Longitud del trapecoide al fondo del BIORREACTOR
SDT	Sólidos disueltos totales
SST	Sólidos suspendidos totales
SSV	Sólidos suspendidos volátiles
Tc	Cambio de temperatura en el humedal artificial, °C o K
Te	Temperatura del efluente del humedal artificial, °C o K
Tw	Temperatura promedio del agua en el humedal artificial, °C o K
TRH	Tiempo de residencia hidráulica, h, d
U	Coeficiente total de transferencia de calor
V	Volumen del biorreactor (considerado como un paralelepípedo, con longitud, ancho y altura), m <sup>3</sup>
Vr	Volumen del bioreactor
v1	Velocidad de ascenso en el biorreactor anaerobio, m/h
W	Ancho del sistema de humedales artificiales (perpendicular al flujo del agua en tratamiento), m
W	Ancho del rectángulo A1 del BIORREACTOR
Wm	Ancho mayor en la superficie del BIORREACTOR
Y	Rendimiento microbiológico (kg SSV/ kgDQO-día)
y	Profundidad promedio del sistema¿Cuál sistema?, m
z	Lado inclinado del trapecoide del BIORREACTOR

---

## RECONOCIMIENTOS

A mis maestros la Dra. Carmen Durán y el Dr. Enrique Bazúa-Rueda, al Ing. José Primelles-Williamson y a la memoria del Dr. Peter Kuschk y del Ing. Gilberto Carpinteyro.

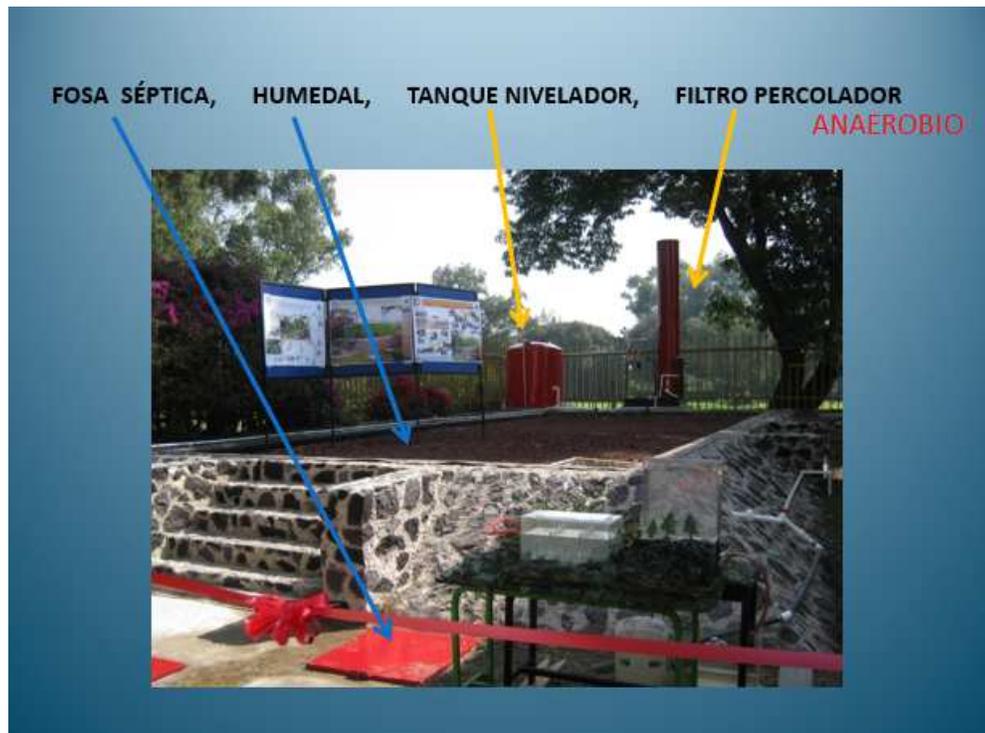
### ANEXO 1. Acervo fotográfico



**Figura 4.** Sistema digestor más humedal  
(Parador El Márquez, Querétaro, México. Desarrollo del autor)



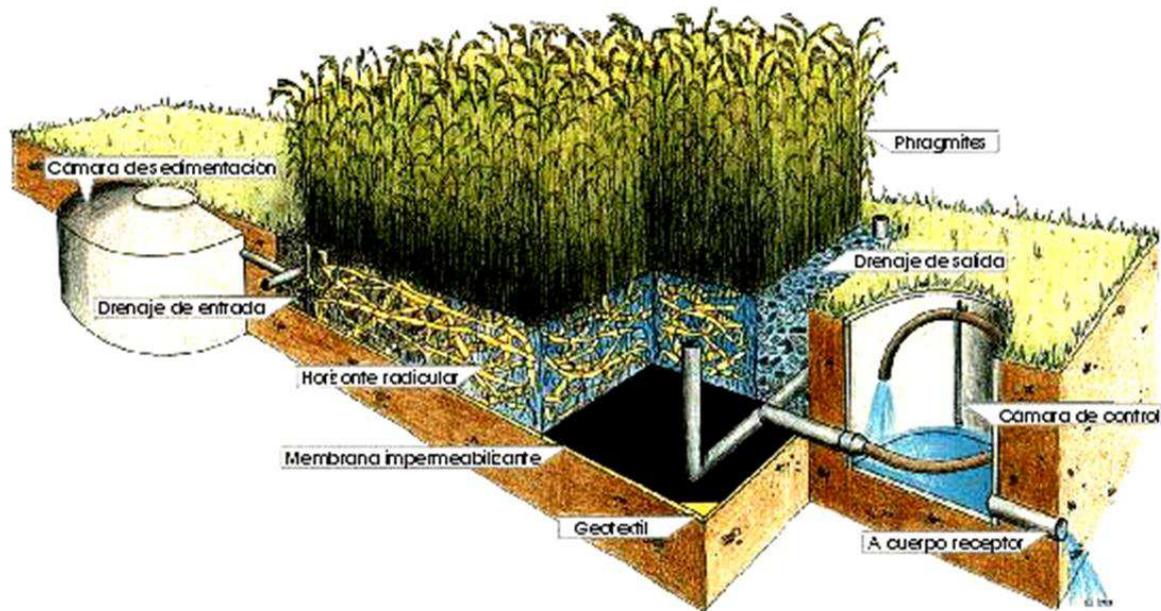
**Figura 5.** Humedal posterior al sistema anaerobio  
(Parador El Márquez, Querétaro, México. Desarrollo del autor)



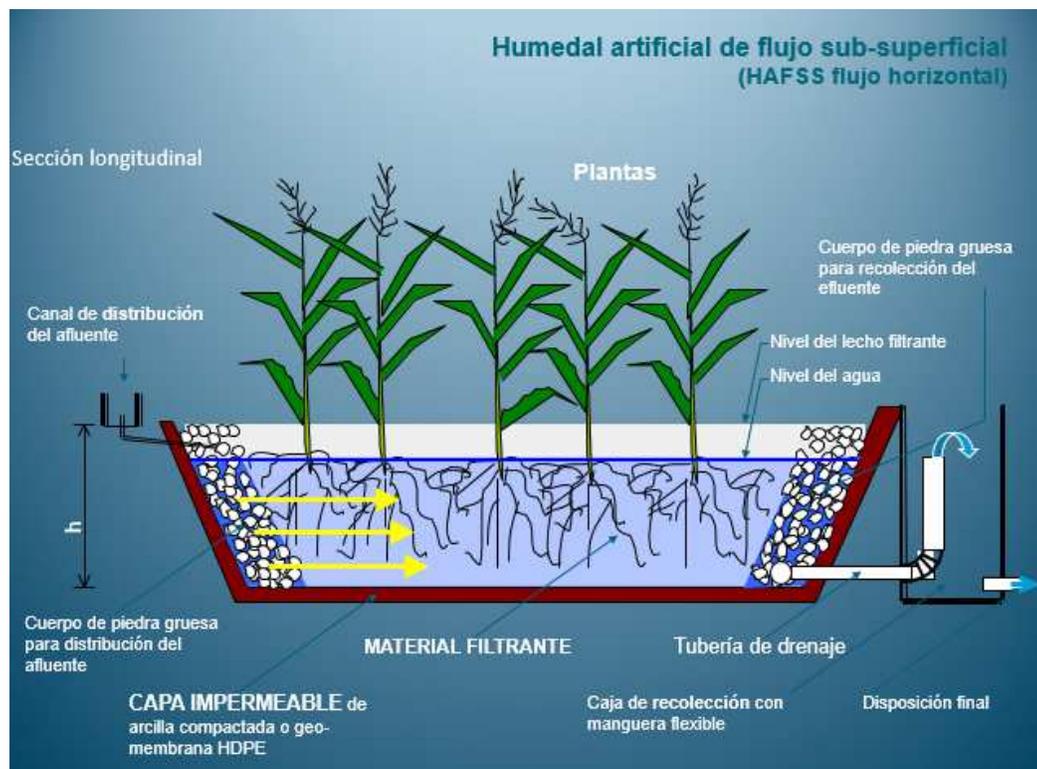
**Figura 6.** Filtro percolador anaerobio más humedal CCH SUR, UNAM, Ciudad de México (cortesía del autor, responsable de su construcción)



**Figura 7.** Filtro anaerobio más humedal con carrizos y papiros justo antes de la poda semestral en el CCH SUR, UNAM, Ciudad de México (cortesía del autor, responsable de su construcción)



**Figura 8.** Estructura interna de un humedal artificial (Cortesía de Durán-de-Bazúa, 1991, tomada por Salas-Rodríguez, 2017)



**Figura 9.** Diagrama esquemático de un humedal artificial (Cortesía de Borrero-Lara<sup>15</sup>, 2018)

<sup>15</sup> Fluir viene del latín *fluere*. Influyente, corriente que ingresa a un sistema; efluente: corriente que sale de un sistema; afluente, corriente secundaria que se une a una principal. En esta imagen debiera decir influyente no afluente [Nota de las(os) editoras(es)]



**Figura 10.** Humedal artificial de elementos flotantes (Cortesía de Ecofiltros, 2021)



**Figura 11.** Humedal artificial superficial (Cortesía de Aquamarket, 2015)



**Figura 12.**  
Biodigestor con  
membrana antes del  
arranque (Cortesía de  
Moncayo-Romero,  
2020)



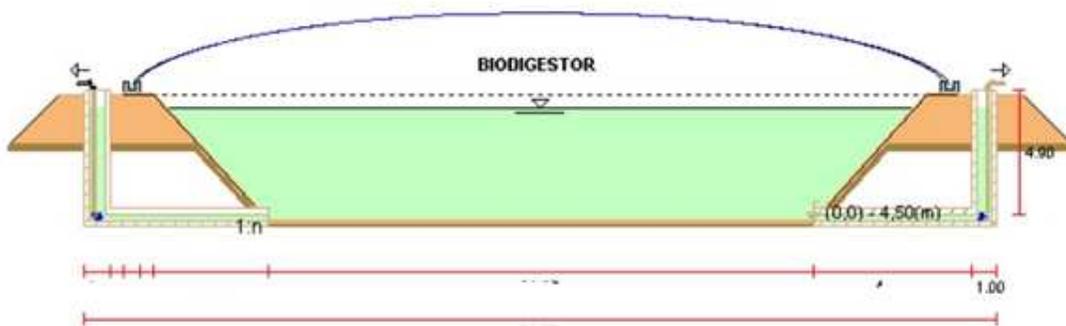
**Figura 13.**  
Biodigestor con  
biogás y quemador  
(Cortesía de Moncayo-  
Romero, 2020)



**Figura 14.** Biodigestor de geomembrana y cárcamo de recepción (Cortesía de Moncayo-Romero, 2020)



**Figura 15.** Biodigestor de geomembrana y cárcamo de recepción (Cortesía de Moncayo-Romero, 2020)



**Figura 16.** Estructura interna de un biodigestor (Cortesía de Moncayo-Romero, 2020)

## ANEXO 2. Memorias de cálculo

**Tabla 4a.** Memoria de cálculo del desarenador (Parte 1)

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDAD						
CAUDAL MÁXIMO	QMD	0.012 m <sup>3</sup> /s		41.667 m <sup>3</sup> /h					1000 m <sup>3</sup> /d
DIÁMETRO DE LA PARTÍCULA	dp	0.1 mm							
MASA ESPECÍFICA DE LA ARENA	Mar	2.65 g/cm <sup>3</sup>							
MASA ESPECÍFICA DEL AGUA	Mag	1 g/cm <sup>3</sup>							
PROFUNDIDAD EN EL DESARENADOR	h	1 m		100 cm					
RELACIÓN ANCHO LARGO	B-L	1.5							
BORDE LIBRE	bl	0.3 m							
PORCENTAJE DE REMOCIÓN	%	85							
GRADO DEL DESARENADOR	n	1							
TEMPERATURA DEL AGUA	T	25 oC							
VISCOSIDAD DINÁMICA	μ	0.0102 cm <sup>2</sup> /s							
GRAVEDAD	g	9.81 m/s <sup>2</sup>							
DENSIDAD	p	1 g/cm <sup>3</sup>							
<b>1.- Velocidad de sedimentación de la partícula</b>									
Fórmula de Hazen Stockes									
$V_s = (g(p_s - p) * d_p^2 / 18\mu)$		$V_s =$	<b>0.8816</b> cm/s						
<b>2.- Obtención del número de Hazen con grado de sedimentador y % de remoción</b>									
<b>CONDICIONES</b>	<b>% DE REMOCIÓN</b>								
DEFLECTORES	Número de Hazen				$\theta/t$				
RENDIMIENTO	87.5	80	75	70	65	60	55	50	
n=1	7	4	3	2.3	1.8	1.5	1.3	1	
n=2	2.75								0.76
n=4	2.37								0.73
Máximo teórico	0.68			0					0-50
<b>3.- Cálculo de tiempo de sedimentación</b>									
$\theta/t =$	<b>3</b>			$t = \frac{H}{V}$					
H =	<b>100</b> cm								
t =	<b>113.43</b> s								
t =	<b>1.89</b> min								
<b>4.- Cálculo del tiempo de residencia hidráulica, TRH</b>									
$\theta = t * \text{Número de Hazen}$									
$\theta =$	300 segundos								
$\theta =$	0.08 horas								
$\theta =$	5 minutos								

**Tabla 4b.** Memoria de cálculo del desarenador (Parte 2)

<b>5.-Cálculo del volumen del tanque</b>			
$\theta = V/Q$			
$V = \theta \cdot Q$			
$V = 3.47 \text{ m}^3$			
<b>6.- Cálculo del área superficial</b>			
$A1 = V/H$			
$As = 3.47 \text{ m}^2$			
<b>7.- Dimensiones del tanque</b>			
$B = \sqrt{(As/Z)}$		Redondeo	
B=	1.08	Ancho=	1.6 m
BL=	01 a 5		
Z=	3	Largo=	4.8 m
<b>8.- Cálculo de la carga hidráulica superficial</b>			
$q = Q/As$			
$q = 0.0033 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-s} \quad 288.00 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-d}$			
<b>9.- Chequeo del diámetro de partícula crítica menor a la partícula de diseño</b>			
$q = V_o = Q/A \Rightarrow V_o = q$		$d_o = \sqrt{V_o * 18 * \mu s / g * (ps)}$	
V <sub>o</sub> =	0.003 m/s	0.333 cm/s	0.0612
d <sub>o</sub> =	0.00615 cm	6.14893 mm	1618.65 3.8E-05
<b>Ingeniería civil libre en Internet. Hojas de cálculo gratuitas</b>			
<a href="https://www.civilexcel.com/2015/02/calculo-de-un-desarenador-incluye.html">https://www.civilexcel.com/2015/02/calculo-de-un-desarenador-incluye.html</a>			



**Figura 17.** Humedal artificial subsuperficial con soporte de grava (Cortesía de Aquamarket, 2015)

**Tabla 4c.** Memoriade cálculo del desarenador (Parte 3)

**10.- Relaciones de proporcionalidad**  
 $V_s/V_o = \theta/t$

$\theta/t = 3$   
 $V_s/V_o = 2.6$

**11.- Chequeo de la velocidad horizontal respecto a la máxima recomendada**  
 $V_h = Q/W = (V_o * L)/H < V_{m\acute{a}x} = 20V_s ; V_h < 0.25 \text{ m/s}$

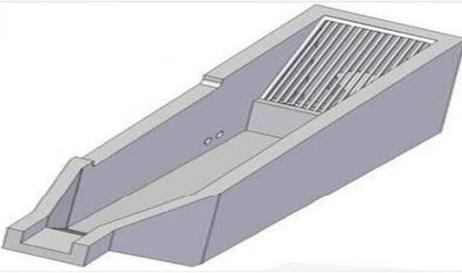
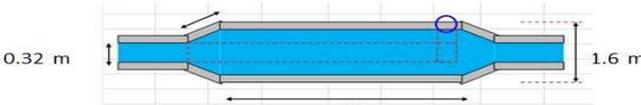
$W = \text{m}^2$   
 $V_h = 1.614 \text{ cm/s} \quad 0.016 \text{ m/s} \quad \text{Ok}$   
 $V_{h\text{max}} = 17.63 \text{ cm/s} \quad 0.176 \text{ m/s} \quad \text{Ok}$

**12.- Velocidad de resuspensi3n máxima**  
 $V_h < V_r = \sqrt{((8k/f)) * g(p_s - p) \cdot d}$

$V_r = 16.97 \text{ cm/s} \quad 0.1697 \text{ m/s}$   
 $V_h = 1.614 \text{ cm/s} \quad 0.0161 \text{ m/s} \quad \text{Ok}$

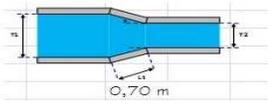
**13.- Verificar que  $9 < V_h/V_o < 15$**

$V_h/V_o = 4.8412 \quad \text{No cumple}$   
 $V_o = 0.18 \text{ cm/s} \quad \text{Para cumplir al mínimo}$

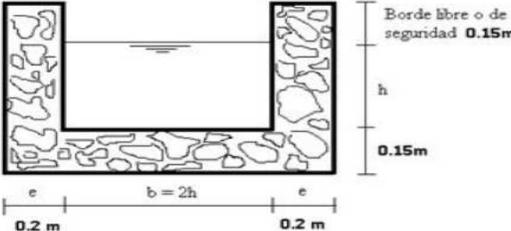



0.32 m      1.6 m

4.8 m



0,70 m



Borde libre o de seguridad **0.15m**

$h$

$0.15\text{m}$

$e$        $b = 2h$        $e$

$0.2 \text{ m}$        $0.2 \text{ m}$

<https://www.civilexcel.com/2015/02/calculo-de-un-desarenador-incluye.html>

**Tabla 5a.** Memoria de cálculo del digestor o reactor anaerobio (Parte 1)

BIODIGESTOR INFLUENTE				Litros por segundo	
FLUJO	Q=			m <sup>3</sup> /día	LPS
	5,000	habitantes		1000	11.574
	200.00	L/hab-día			
	1,000,000.00	L/día			
<b>1.- DATOS DEL INFLUENTE</b>					
	TEMPERATURA=	°C	K		
		20	293.15		
pH		7.2			
Parámetros de concentración		mg/ L	g/L		
DQO TOTAL		800	0.8		
DQO SOLUBLE		600	0.6		
DBO <sub>5</sub> TOTAL		520	0.52		
DBO <sub>5</sub> SOLUBLE		416	0.416		
SDT		300	0.3		
SST		210	0.21		
SSV		130	0.13		
NITRÓGENO Kjeldahl Total, NKT		75	0.075		
NITRÓGENO Kjeldahl Total, NKT		12	mg/L		
Nitratos		12	mg/L		
FÓSFORO (como fosfatos)		12	0.012		
GRASAS Y ACEITES		0.6	0.0006		
AGV (ácido acético mg/L)		0	mg/L		
Alcalinidad CaCO <sub>3</sub>		0	mg/L		
Y=		0.5			
<b>2.- FLUJOS Y CARGAS</b>					
	FLUJO, Q (m <sup>3</sup> / día)=	1,000.00	m <sup>3</sup>		
			día		
	FLUJO, Q (m <sup>3</sup> / h)=	41.67	m <sup>3</sup>		
			h		
	FLUJO, Q (L/s)=	11.57	lps		
	FLUJO, Q (Mgal/ día)=	L/hab	Mgal		
			día		
<b>CARGA (kg DQO / día)=</b>					
Carga (kg DQO / día)=		(Flujo (m <sup>3</sup> /d) *DQO Entrada (mg/L)/1000)			
Carga (kg DQO / día)=		800.00	kg DQO /día		
CARGA VOLUMÉTRICA DE DQO=		2.0	(8-12) kg DQO		
(kg DQO /m <sup>3</sup> -día)			m <sup>3</sup> reactor- día		

**Tabla 5b.** Memoria de cálculo del digestor o reactor anaerobio (Parte 2)

<b>2.- FLUJOS Y CARGAS</b>			
FLUJO, Q (m <sup>3</sup> / día)=	1,000.00	$\frac{m^3}{día}$	
FLUJO, Q (m <sup>3</sup> / h)=	41.67	$\frac{m^3}{h}$	
FLUJO, Q (L/s)=	11.57	lps	
FLUJO, Q (Mgal/ día)=	L/hab	$\frac{Mgal}{día}$	
<b>CARGA (kg DQO / día)=</b>			
Carga (kg DQO / día)=	(Flujo (m <sup>3</sup> /d) *DQO Entrada (mg/L)/1000)		
Carga (kg DQO / día)=	800.00	kg DQO /día	
<b>CARGA VOLUMÉTRICA DE DQO=</b> (kg DQO /m <sup>3</sup> -día)	<input type="text" value="2.0"/>	(8-12) kg DQO m <sup>3</sup> reactor- día	
<b>3.- DIMENSIONAMIENTO</b>			
VOLUMEN DEL REACTOR, V(m <sup>3</sup> )=	400.00	$\frac{(Carga\ máscica\ kg\ DQO\ /\ día)}{(Carga\ volumétrica\ (kg\ DQO/m^3\ -día))}$	
VELOCIDAD ASCENCIONAL, v <sub>1</sub> =	<input type="text" value="0.20"/>	m/h	(Recomendada)
ÁREA SUPERFICIAL, A =	208.33	m <sup>2</sup>	
ALTURA DEL REACTOR, H=	5.00	$v_1 = \frac{Q_a}{A} = \frac{V_r}{TRH \times A} = \frac{H}{TRH}$	
Volumen del reactor en forma de paralelepípedo recto, V=ÁREA SUPERFICIAL, A X ALTURA,			1500.00
Largo =	<input type="text" value="30.00"/>	m	m <sup>3</sup>
Ancho=	<input type="text" value="10.00"/>	m	
Nota: Este volumen corresponde al volumen del líquido, no se considera la cámara de recuperación de biogás			
<b>4.-TIEMPOS</b>			
VOLUMEN DEL REACTOR, V=	Q*TRH		Reactores
TIEMPO DE RESIDENCIA HIDRÁULICA, TRH (horas) =	$V\ m^3 / Q\ (m^3/h)$		
TRH=	9.6	Horas	
TRH=	0.400	días	
<b>PARÁMETROS DE SALIDA (EFLUENTE)</b>			
DATOS AGUA DE	EFLUENTE		% de REMOCIÓN 90%
pH	<input type="text" value="7.7"/>	mg/L	
S (DQO Salida)=	52	mg/L	
S (DBO <sub>5</sub> Salida)=	42	mg/L	
SST=	30	mg/L	
SSV=	21	mg/L	
AGV (ácidos grasos volátiles, como ácido acético, mg/L)	13	mg/L	
Alcalinidad CaCO <sub>3</sub>	8	mg/L	
Grasa y aceite	1	mg/L	
Nitrógeno Kjeldahl Total	1	mg/L	
Nitratos	1	mg/L	

**Tabla 6a.** Memoria de cálculo del humedal artificial (Parte 1)

<b>DIMENSIONAMIENTO DE HUMEDALES CON PLANTA HIDROFITAS</b>	
<b>SALIENDO DEL REACTOR ANAEROBIO</b>	
<b>PARÁMETROS DE ENTRADA (INFLUENTE)</b>	
DATOS AGUA DE EFLUENTE DEL REACTOR ANAEROBIO	
	% de REMOCIÓN 70%
pH	7.7
So (DQO Entrada)=	52 mg/L
So (DBO <sub>5</sub> Entrada)=	150 mg/L
SST=	50 mg/L
SSV=	9 mg/L
AGV (ácido acético mg/L)	32 mg/L
Alcalinidad CaCO <sub>3</sub>	5 mg/L
Grasa y aceite	12 mg/L
Nitrógeno (Kjeldahl)	3 mg/L
Nitratos	0 mg/L
<b>DATOS .</b>	
<b>GASTOS DE DISEÑO:</b>	
Población=	5,000 Habitantes
Q= Gasto total(población)=	1,000,000 m <sup>3</sup> /d-población
Gasto (por habitante)=	200 L / d-habitante
Gasto total (L/d-población)	1,000,000 L /d-población
Gasto total (L/min-población)	694.44 L / min-población
<b>Conversiones de flujo</b>	
Qmed =	11.57 L/s = 1,000.00 m <sup>3</sup> /d = 41.67 m <sup>3</sup> /h = 0.6944 m <sup>3</sup> /min
Q max inst =	17.36 L/s = 1,500.00 m <sup>3</sup> /d = 62.50 m <sup>3</sup> /h = 1.0417 m <sup>3</sup> /min
	<b>Q max inst = 0.0174 m<sup>3</sup>/s</b>
C <sub>e</sub> = Concentración de DBO en el efluente, mg/L	
C <sub>o</sub> = Concentración de DBO en el influente, mg/L	
A= Fracción de la DBO no removida como sólidos sedimentables a la entrada del sistema, es una variable que depende de la calidad del agua (se recomienda 0.80)	
L= longitud del sistema (paralelo al flujo), m	
W= ancho del sistema, m	
y= profundidad promedio del sistema, m	
n= porosidad del sistema (espacio disponible para el paso del agua) como fracción decimal	
Q= Caudal promedio en el sistema	
T <sub>c</sub> , Cambio de temperatura en el humedal	
T <sub>e</sub> , Temperatura del efluente	
T <sub>w</sub> , Temperatura promedio del agua en el humedal.	
Temperatura del agua a la entrada =	
A <sub>s</sub> = área superficial	
K <sub>T</sub> = Constante de primer orden dependiente de la temperatura, d <sup>-1</sup>	
TRH, Tiempo de residencia hidráulica	
U, Coeficiente de transferencia de calor	

**Tabla 6b.** Memoria de cálculo del humedal artificial (Parte 2)

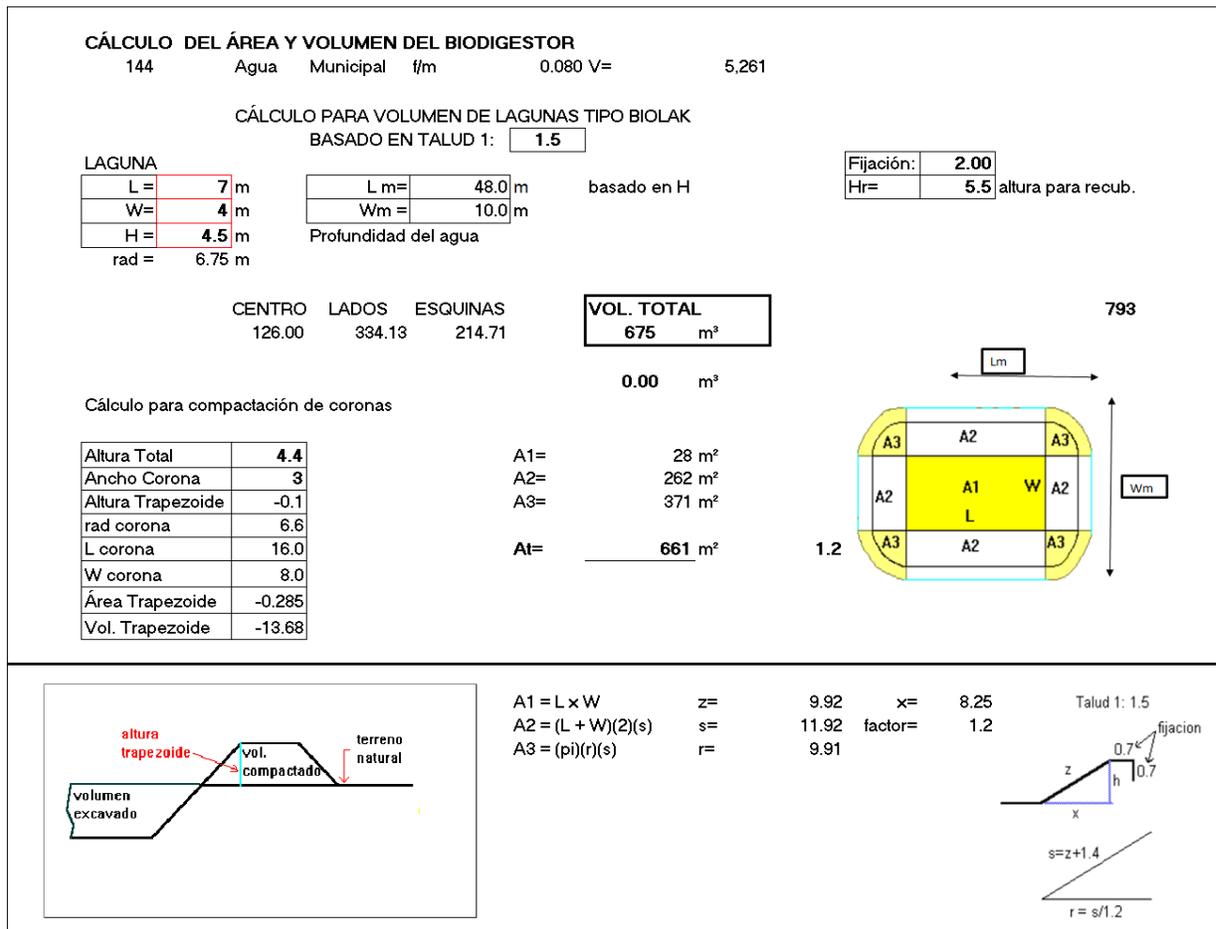
<b>Dimensionamiento:</b>			
<b>SALIENDO DEL REACTOR RAFA</b>			
Datos de partida:			
DBO entrada =	52	mg/l	
DBO salida =	42	mg/l	
SST entrada =	30	mg/l	
Caudal Q =	1,000.00	m <sup>3</sup> /d =	41.67 m <sup>3</sup> /hr = 1.16 lps
Población =	5,000	habts.	
<hr/>			
Medio =	grava media de 25mm		
n =	0.4		
ks =	25000	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> *d	
k =	2	sat	
<hr/>			
Vegetación =	Carrizos (Phragmites Australis)		
Profundidad del humedal (y=)	0.6	m	
Pendiente del humedal =	1%		
Temperatura critica en invierno =	10	°C	
Temperatura agua entrada =	20	°C	
<b>ECUACIONES A UTILIZAR</b>			
$K_T = K_{20} * (106)^{(T-20)}$ $K_{20} = 1.104 * d^{-1}$ $K_T = 1.104 * (1.06)^{(T - 20)}$			
$A_s = \frac{Q (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * y * n} \quad A_s = \frac{Q (\ln(C_o) - \ln(C_e) + \ln(A))}{K_T (y) (z)}$			
$TRH = \frac{A_s * y * n}{Q}$			
$U = \frac{1}{\frac{y_1}{K_1} + \frac{y_2}{K_2} + \frac{y_n}{K_n}}$			
$T_c = \frac{qL}{qG} = \frac{(T_o - T_a) * U * \alpha * A_s * t}{C_p * \delta * A_s * y * n}$			
$T_e = T_o - T_c$			
$T_w = \frac{T_o + T_e}{2}$			
$CH = \frac{Q}{A_s} * 100$			
$C_{e(SST)} = C_{o(SST)} [0.1058 + 0.0014(CH)]$			

**Tabla 6c.** Memoria de cálculo del humedal artificial (Parte 3)

<b>Cálculos</b>	
1. Suponiendo la temperatura de diseño	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">19</span> °C
$K_T = 1.104 * (1.06)^{T-20}$	$= 1.0755 \text{ d}^{-1}$
2.- Determinar $A_s$	
$A_s = \frac{Q * (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * (y) * (n)}$	$= 865 \text{ m}^2$ <b>Se proponen 1,000 m<sup>2</sup></b>
3.- Determinación de TRH	
$TRH = \frac{A_s * y * n}{Q}$	$= 0.207 \text{ días}$
4.- Determinando U	
Se supone	
Una capa de residuos de vegetación de	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">15</span> cm
Una capa de grava seca de	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">80</span> mm
Una capa de grava media saturada de	<span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">60</span> cm
$U = \frac{1}{\frac{0.15}{0.05} + \frac{0.08}{1.5} + \frac{0.6}{2}}$	$= 0.30$
5.- Determinando $T_c$	
$T_c = \frac{(T_o - T_a) * U * \alpha * A_s * t}{C_p * \delta * A_s * y * n}$	$= 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$
$T_e = T_o - T_c$	$= 19.9 \text{ } ^\circ\text{C}$
$T_w = \frac{T_o - T_e}{2}$	$= 20.0 \text{ } ^\circ\text{C}$
$T_{supuesta} \approx T_{DISEÑO}$	
6.- Determinando largo y ancho	
L:W	3:1
Se diseña para dos unidades	185.07 m <sup>2</sup> cada una Se proponen 2 de 200 m <sup>2</sup> en paralelo
$A_s = 865 \text{ m}^2$	$W = \sqrt[2]{A_s/R}$
W= 16.98 m	
F= 3.00	
L= 50.93 m	
864.52 m <sup>2</sup>	
$A_{s1} = A_{s2} = 432.26 \text{ m}^2$	
W= 12.00 m	Se proponen 2 Reactores
F= 3.00	Ancho = m
L= 36.01 m	Largo = m
432.26 m <sup>2</sup>	Profundidad máxima de grava 0.9 m
	Profundidad máxima del agua 0.8 m
	Pendiente 1-2% según topógrafo

**Tabla 6d.** Memoria de cálculo del humedal artificial (Parte 4)

7. Determinación de la concentración de SST a la salida.								
$CH = \frac{1000.00}{865} * 100 = 115.7 \text{ cm/d}$								
$C_{e(SST)} = C_o [0.1058 + 0.0014 (CH)] = 8 \text{ mg/L}$								
8. Determinación de la carga hidráulica para eliminación de fósforo								
P entrada = <input type="text" value="23"/> mg/L								
$CH = \frac{1000.00}{865} * 100 = 115.7 \text{ cm/d}$								
$C_{e(p)} = C_o * \exp \frac{-2.74 \text{ cm/d}}{CH} = C_o * \exp \frac{-2.74 \text{ cm/d}}{115.7}$								
$C_{e(p)} = 22 \text{ mg/L}$								
<b>PARÁMETROS DE SALIDA</b>			<b>(EFLUENTE)</b>					
DATOS AGUA DE		EFLUENTE		% de REMOCIÓN				
				85%				
pH		7.7						
S (DQO Salida)=		7.8 mg/L						
S (DBO <sub>5</sub> Salida)=		22.5 mg/L						
SST=		7.5 mg/L						
SSV=		1.4 mg/L						
AGV (ácido acético mg/L)		4.8 mg/L						
Alcalinidad CaCO <sub>3</sub>		0.8 mg/L						
Grasa y aceite		1.8 mg/L						
Nitrógeno Kjeldahl, NK		0.5 mg/L						
Nitratos		0.0 mg/L						
<b>RESUMEN DE DIMENSIONAMIENTO</b>								
DIMENSIÓN		CALCULADA		DISEÑO SUGERIDO		VARIABLE DE PROCESO		VALOR DE DISEÑO
Área superficial (m <sup>2</sup> )		865	400			Profundidad del agua (m)		0.8
Número de unidades		1.0000	2 de 200 m <sup>2</sup>			Pendiente del humedal (%)		1
Ancho (m)		16.98	0.00			Profundidad de grava (m)		0.9
Longitud (m)		50.9	0.00			Temperatura (°C)		19
Longitud (m)		Cárcamo descarga	1.0	1.0				
TRH		días	0.2	1.0				

**Tabla 7.** Cálculo del volumen del biodigestor**REFERENCIAS CONSULTADAS**

- Bautista-Bayona, A.M., Ibañez-Ramírez, P. 2018. Análisis técnico-económico del primer tren de tratamiento biológico, reactor UASB y humedal superficial, PTAR Sotaquirá-Boyacá. Trabajo de grado - Pregrado, Facultad de Ingeniería, Ciencia Unisalle. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Bogotá D.C. Colombia. [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/778](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/778)
- Borrero-Lara, J. 2018. Esquema de un humedal artificial. [https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-de-un-humedal-de-flujo-subsuperficial\\_fig1\\_230888087](https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-de-un-humedal-de-flujo-subsuperficial_fig1_230888087)
- Castro-González, A., Enríquez-Poy, M., Durán-de-Bazúa, C. 2001. Design, construction, and starting-up of an anaerobic reactor for the stabilisation, handling, and disposal of excess biological sludge generated in a wastewater treatment plant. *Anaerobe (Biotechnology)*. 7(3):143-149.
- Conagua. 2014. Estadísticas del Agua en México. Gobierno federal.
- Conagua. 2016. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento.
- Conagua. 2018. Estadísticas del agua en México. Gobierno Federal Norma Oficial Mexicana
- De-la-Peña, M.E., Ducci, J., Zamora, V. 2013. Tratamiento de aguas residuales en México. Con aportaciones de Roberto Contreras, Gerente de Potabilización y Tratamiento, CONAGUA. Banco Interamericano de Desarrollo.
- DOF. 2021. Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-2021, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores nacionales. Publicada el 3 de abril de 2022. Diario Oficial de la Federación. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1997. 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 públicos. Publicada el 21 de septiembre de 1998. Diario Oficial de la Federación. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-002-Semarnat-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en la descarga de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada el 3 de junio de 1998. Diario Oficial de la Federación. Estados Unidos Mexicanos.

- Durán-de-Bazúa, M.d.C. 1991. Material didáctico del curso Tratamiento biológico de aguas residuales. UNAM, Facultad de Química. Ciudad de México, México.
- Ecofiltros. 2021. Humedales artificiales flotantes. <https://ecofiltros.cl/humedales-de-tratamiento-flotantes/>
- Empresas privadas de tratamiento de aguas residuales. 2020. Reunión ejecutiva de TICSA, HIPRO-ECOLÓGICO, ICA-FLUOR DANIEL, HALCON INGENIERÍA, S.A. DE C.V. Información personal. Ciudad de México, México.
- Halcón Internacional S.A. de C.V. 2015. Empresa Mexicana de Tratamiento de aguas residuales. <https://halconinternacional.com/page2.html>
- Hanjra, M.A., Blackwell, J., Carr, G., Zhang, F., Jackson, T. 2011. Wastewater irrigation and environmental health: Implications for water governance and public policy.
- Herrera-López, G., Mejía-González, G., Cuevas-González, R., Arévalo-Velázquez, M.A., Guillén-Navarro, G.K. 2021. Sistema acoplado reactor anaerobio con deflectores-humedal artificial como alternativa de reúso en riego de áreas verdes. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 37:247-259. [file:///C:/Users/Asis%2004/Downloads/53643-Texto%20del%20art%20C3%ADculo-164345-1-10-20210510%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Asis%2004/Downloads/53643-Texto%20del%20art%20C3%ADculo-164345-1-10-20210510%20(2).pdf)
- Ingeniería civil libre en Internet. 2015. Hojas de cálculo gratuitas <https://www.civilexcel.com/2015/02/calculo-de-un-desarenador-incluye.html>
- Jiménez-Cisneros, B. 2008. Unplanned reuse of wastewater for human consumption: The Tula Valley, Mexico. In Water Reuse: An International Survey of Current Practice, Issues, and Needs. Jiménez-Cisneros, B., Asano, T. (eds.). Scientific and Technical Report No. 20. IWA Publishing, London, Reino Unido.
- Ley de Aguas Nacionales. 2016. Diario Oficial de la Federación del 1º de diciembre de 1992. Última reforma publicada DOF 24-03-2016. Estados Unidos Mexicanos.
- Ley General de Salud. Diario Oficial de la Federación del 7 de febrero de 1984. Últimas reformas publicadas Diario Oficial de la Federación del 27 de abril de 2010. Estados Unidos Mexicanos.
- Mara, D. 2003. Domestic Wastewater Treatment in Developing Countries. Ed. Earthscan. Londres, Reino Unido. <http://proyectos2.iingen.unam.mx/LACClimateChange/docs/boletin/Nota15.pdf>
- Metcalf & Eddy, Inc. 1991. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 3rd edition, Ed. McGraw-Hill, Inc., Singapore. [https://ptabdata.blob.core.windows.net/files/2017/IPR2017-01468/v22\\_FWS1016%20-%20Metcalf.pdf](https://ptabdata.blob.core.windows.net/files/2017/IPR2017-01468/v22_FWS1016%20-%20Metcalf.pdf)
- Moncayo-Romero, G. 2020. Dimensionamiento, Diseño y Construcción de Biodigestores y Plantas de Biogás <https://www.aqualimpia.com/biodigestores/e-books-manuales/>
- Numeragua México. 2016. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Subdirección General de Planeación. Ciudad de México, México.
- Núñez-García, A.L. 2015. Caracterización de la problemática de las aguas residuales en Ixmiquilpan, Hidalgo. Tesis de licenciatura en Geografía Humana. Universidad Autónoma Metropolitana. División de Ciencias Sociales y Humanidades. Ciudad de México, México. Pp. 11, 43-50.
- OMS-UNICEF. 2014. Progresos en materia de agua potable y saneamiento. Informe de actualización. ISBN: 978 92 4 350724 8. París, Francia.
- Ortiz-Pérez, M.D. 2015. El agua para consumo humano en México. [http://www.scjn.gob.mx/normativa/analisis\\_reformas/Analisis%20Reformas/00130218.pdf](http://www.scjn.gob.mx/normativa/analisis_reformas/Analisis%20Reformas/00130218.pdf)
- Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Gobierno de la República. Pp. 43, 134. Ciudad de México, México.
- PNH 2014-2018. Gobierno de la República. Programa Nacional Hídrico 2014-2018. Pp. 69-71. Ciudad de México, México.
- Redondo-Gómez, S., Cantos, M., Mateos-Naranjo, E., Figueroa, M. E., Troncoso, A. 2009. Heavy metals and trace element concentrations in intertidal soils off our estuaries of SW Iberian Peninsula. Soil & Sediment Chemistry. 18:320-327.
- Riojas-Rodríguez, H., Schilman, A., López-Carrillo, L., Finkelman, J. 2013. La salud ambiental en México: Situación actual y perspectivas futuras. Salud Pública de México, 55(6): 638-649.
- Romero-Ortiz, L., Ramírez-Vives, F., Álvarez-Silva, C., Miranda-Arce, M.G. 2011. Uso de hidrófitas y un sistema anaerobio para el tratamiento de agua residual de rastro / Use of hydrophytes and anaerobic system for wastewater treatment from slaughterhouse. Polibotánica. 31(Marzo):157-167. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-27682011000100010](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-27682011000100010)
- Salas-Rodríguez, J.J. 2017. Humedales Artificiales. Diseño y Construcción. <https://docplayer.es/63185567-Humedales-artificiales-diseno-y-construccion.html>
- Solano-de-la-Cruz, V., Vallejo-Cantú, N.A., Alvarado-Lassman, A. 2020. Tratamiento de un agua residual azucarera utilizando un sistema híbrido (digestión-humedal construido). Tesis para obtener el grado de: Maestría en Ingeniería Química. Tecnológico Nacional de México, Orizaba Veracruz, México. <file:///C:/Users/Asis%2004/Documents/sast2022-2023/JUNIO%20SELECCION%20%202023/HUMEDALES%202023/Viridiana Solano De La CruzTESIS%20ANAEROBIO%20HUMEDAL.pdf>
- Valladares-Rodríguez, M.R., Juárez-Sedano, N., Flores-Valverde, E. 2019. Tratamiento biológico combinado anaerobio-Humedal. Revista Tendencias en Docencia e Investigación Química (Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco). 5(5):199-203. [http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/7820/Tratamiento\\_biologico\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://zaloamati.azc.uam.mx/bitstream/handle/11191/7820/Tratamiento_biologico_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Vidal-Álvarez, M. 2018. Tratamiento de aguas residuales en México: Problemáticas de salud pública y oportunidad de uso de ecotecnologías sustentables / Wastewater treatment in Mexico: public health problems and opportunity to use sustainable ecotechnologies. RINDERESU. 3 (1-2): 41-58. [https://www.researchgate.net/publication/343485996\\_Tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_en\\_Mexico\\_problematicas\\_de\\_salud\\_publica\\_y\\_oportunidad\\_de\\_uso\\_de\\_ecotecnologias\\_sustentables](https://www.researchgate.net/publication/343485996_Tratamiento_de_aguas_residuales_en_Mexico_problematicas_de_salud_publica_y_oportunidad_de_uso_de_ecotecnologias_sustentables)
- WWAP. 2017. The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource. United Nations World Water Assessment Programme. UNESCO. París, Francia.