



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SÁN NICOLÁS DE HIDALGO**

UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
*Cuna de héroes, crisol de pensadores*



**Facultad de Ingeniería Civil**

**TESIS**

**“Revisión conceptual del sistema de  
tratamiento de aguas residuales del  
Centro de Información, Arte y Cultura, de  
la UMSNH.”**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA:

**Kristian Hernández Sánchez**

ASESOR:

**Ricardo Ruiz Chávez**

Maestro en Ciencias con especialidad en ing. ambiental

MORELIA, MICH..

MARZO, 2022

# Índice

|  |    |
|--|----|
| Resumen .....                                  | V  |
| Abstract .....                                 | VI |
| 1.- Antecedentes. ....                         | 1  |
| 2.- Objetivos. ....                            | 18 |
| 2.1.- Objetivo General.....                    | 18 |
| 2.2.- Objetivos Particulares.....              | 18 |
| 3.- Información del sistema. ....              | 19 |
| 3.1.- Pretratamiento. ....                     | 19 |
| 3.1.1.- Coagulación – Flocculación.....        | 19 |
| 3.1.2.- Filtración.....                        | 20 |
| 3.1.3.- Sedimentación. ....                    | 21 |
| 3.1.4.- Flotación.....                         | 22 |
| 3.2.- Tratamiento primario.....                | 26 |
| 3.2.1.- SISTEMAS AEROBIOS. ....                | 33 |
| 3.2.2.- SISTEMAS ANAEROBIOS. ....              | 45 |
| 3.3.- Desinfección. ....                       | 56 |
| 3.3.1.- Desinfección con métodos físicos.....  | 58 |
| 3.3.2.- Desinfección con métodos químicos..... | 60 |
| 4.- Eficiencia del tren de tratamiento. ....   | 63 |
| 4.1.- Pretratamiento. ....                     | 66 |
| 4.1.1.- Canal de aproximación. ....            | 67 |
| 4.1.2.- Canal desarenador doble.....           | 67 |
| 4.1.3.- Rejillas. ....                         | 69 |
| 4.1.4.- Cárcamo de bombeo.....                 | 72 |
| 4.1.5.- Sedimentador primario.....             | 73 |
| 4.2.- Tratamiento primario.....                | 76 |
| 4.2.1.- Sedimentador secundario. ....          | 79 |
| 4.3.- Cloración. ....                          | 82 |

Revisión conceptual del Sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro de  
Información, Arte y Cultura de la UMSNH.

---

|  |    |
|--|----|
| 4.4.- Recomendación de construcción y adaptación de humedal..... | 84 |
| 5.- Conclusiones.....  | 88 |
| 6.- Recomendaciones.....   | 89 |
| 7.- Bibliografía. ....   | 90 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1.- Fachada del Colegio de San Nicolás, Pátzcuaro, Mich. ....                                       | 1  |
| Ilustración 2.-Vista satelital de C.U. y ubicación del C.I.A.C.....   | 3  |
| Ilustración 3.- Mapa de C.U.....  | 4  |
| Ilustración 4.- Acceso principal al Centro de información, arte y cultura de la<br>Universidad Michoacana. .... | 5  |
| Ilustración 5.- Entrada del auditorio del C.I.A.C.....  | 6  |
| Ilustración 6.- Explanada del C.I.A.C.....  | 7  |
| Ilustración 7.- Método de coagulación-floculación.....  | 19 |
| Ilustración 8.- Rejillas. ....  | 21 |
| Ilustración 9.- Proceso de filtración. ....   | 21 |
| Ilustración 10.- Proceso de sedimentación.....  | 22 |
| Ilustración 11.- Comparación de la floculación y la sedimentación. ....   | 24 |
| Ilustración 12.- Cárcamo de bombeo. ....  | 25 |
| Ilustración 13.- Esquema de una PTAR con lodos activados. ....  | 34 |
| Ilustración 14.- Imágenes de PTAR Ocotlán, Jal.....   | 35 |
| Ilustración 15.- Esquema de una PTAR con zanjas de oxidación. ....  | 37 |
| Ilustración 16.- Imágenes de PTAR Aguascalientes. ....  | 39 |
| Ilustración 17.- Esquema de una PTAR con filtros percoladores (biológicos). ....                                | 41 |
| Ilustración 18.- Imágenes de PTAR Cuautla, Morelos.....   | 42 |
| Ilustración 19.- Esquema de una PTAR con lagunas aerobias. ....   | 43 |
| Ilustración 20.- Imágenes de PTAR Norte Tangamanga II, SLP. ....  | 44 |
| Ilustración 21.- Vista transversal de un reactor anaerobio de flujo ascendente.....                             | 49 |
| Ilustración 22.- Esquema de una PTAR con UASB. ....   | 51 |
| Ilustración 23.- Imágenes de PTAR FIRIOB, Ver. ....   | 52 |
| Ilustración 24.- Esquema de un tanque Imhoff. ....  | 53 |
| Ilustración 25.- Esquema de una PTAR con tanque Imhoff.....   | 55 |
| Ilustración 26.- Desinfección con luz UV. ....  | 59 |
| Ilustración 27.- Desinfección con electrodos. ....  | 60 |
| Ilustración 28.- Desinfección con cloro (gas).....  | 61 |
| Ilustración 29.- Desinfección con ozono. ....   | 62 |
| Ilustración 30.- Pretratamiento existente en la planta.....   | 66 |

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| <i>Tabla 1.- Inventario de plantas por estado 2018.</i> .....                         | 9  |
| <i>Tabla 2.- Inventario de plantas por estado y por proceso 2018 (parte 1).</i> ..... | 10 |
| <i>Tabla 3.- Inventario de plantas por estado y por proceso 2018 (parte 2).</i> ..... | 11 |
| <i>Tabla 4.- Inventario de plantas por estado y por proceso 2018 (parte 3).</i> ..... | 12 |
| <i>Tabla 5.- Inventario de plantas por estado y por proceso 2018 (parte 4).</i> ..... | 13 |
| <i>Tabla 6.- Resumen de plantas por estado.</i> .....                                 | 14 |
| <i>Tabla 7.- Evolución del saneamiento del agua en México.</i> .....                  | 16 |
| <i>Tabla 8.- Resumen de plantas por proceso.</i> .....                                | 17 |
| <i>Tabla 9.- Procesos biológicos unitarios.</i> .....                                 | 27 |
| <i>Tabla 10.- Comparación de métodos de desinfección.</i> .....                       | 57 |
| <i>Tabla 11.- Criterios de diseño de sedimentadores primarios.</i> .....              | 73 |
| <i>Tabla 12.- Criterios de autores para sedimentadores primarios.</i> .....           | 73 |

## Resumen

El trabajo presentado tiene la intención de analizar el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura de la UMSNH. Una parte del trabajo fue destinada a analizar las distintas partes que conforman la planta de tratamiento, incluyendo las dimensiones de las estructuras construidas, el tipo de tratamiento que se le da al agua y hasta que nivel es este tratamiento.

Una vez dado un análisis de la situación actual de la planta, de su eficiencia actual y las posibles mejoras constructivas y operacionales, se procedió a dar opiniones acerca de cómo reacondicionar la planta para así sacarle mayor provecho. También se dieron opiniones en cuanto al mejoramiento del tren de tratamiento, para hacer que el proceso tenga una eficiencia mayor.

El reacondicionamiento de la planta no solo tiene importancia a nivel ecológico, sino también a nivel jurídico, ya que la Ley de Aguas Nacionales en su Artículo 96 BIS 1 dice que “Las personas físicas o morales que descarguen aguas residuales, en violación a las disposiciones legales aplicables, y que causen contaminación en un cuerpo receptor, asumirán la responsabilidad de reparar o compensar el daño ambiental causado...”

## Palabras claves:

✚ Agua residual, DBO5, DQO, Lodos.

## **Abstract**

This presented job has the intention of improving the functioning of the residual water treatment plant of the Center of information, art and culture of the UMSNH.

A part of the job was destined to analyze the different parts that make up the treatment plant, including the dimensions of the structures built, the type of treatment given to the water and at what stage is that treatment.

Once given the analysis of the current situation of the plant, of her current efficiency and the possible constructive and operational upgrades, we proceeded to give opinions about how to recondition the plant to get more out of it. Also opinions were given about the upgrade of the treatment train, for the process to have a higher efficiency.

The recondition of the plant not only is important at an ecological level, but also a juridical level, since the Law of National Waters in her Article 96 BIS 1 says that “Physical and moral persons that discharge residual water, in violation to the applicable legal provisions, and that cause contamination to a receiving body, will assume the responsibility to repair or compare the environmental damage caused...”

## **Keywords:**

# **CAPÍTULO 1.- ANTECEDENTES**



## 1.- Antecedentes.

La Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), es una institución educativa que imparte educación media superior y superior de una manera laica y pública. Establecida el 15 de octubre de 1917, por el ingeniero Pascual Ortiz Rubio. Sus primeros indicios de institución se remontan al año de 1540, en el cual don Vasco de Quiroga funda en la ciudad de Pátzcuaro el Colegio de San Nicolás Obispo, el cual tenía como objetivo formar sacerdotes preparados para campañas de evangelización los cuales debían acostumbrarse y asimilar la cultura indígena, para así formar una nueva sociedad.

A continuación, en la ilustración 1 se muestra una imagen del antiguo Colegio de San Nicolás, ubicado en Pátzcuaro, Michoacán:



Fuente: [patzcuaropueblomagico.blogspot.mx](http://patzcuaropueblomagico.blogspot.mx), 2020

### Ilustración 1.- Fachada del Colegio de San Nicolás, Pátzcuaro, Mich.

En 1810 se lleva a cabo el movimiento independentista en el que se buscaba la fundación de la nación mexicana encabezado por Miguel Hidalgo, José Ma. Morelos, Ignacio López Rayón, entre otros, hombres que estudiaron en el colegio.

Ante esto, la respuesta de la colonia no se alargó y el colegio fue clausurado en el mismo año. Después de 36 años, con la victoria liberal en Michoacán, encabezada por Melchor Ocampo se realizó la reapertura del Colegio de San Nicolás, con un nuevo plan de estudios elaborado por la Junta Rectora de Estudios. Aquí también se modificó su nombre a: Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo, esto por varias razones:

- Para el gobernador Melchor Ocampo, el colegio debería mantener su nombre original “Colegio de San Nicolás”.
- La palabra “Primitivo” en señal de distinción por haber sido el primero en su género en el continente americano,
- La palabra “Nacional” por la gran importancia en la nación y por sus ideales nacionalistas.
- “de Hidalgo” para honrar a uno de los miembros más destacados del colegio y del movimiento independentista.

Después de la victoria obtenida en la Revolución Mexicana, el ingeniero Pascual Ortiz Rubio ( a pocos días de tomar posesión de la gubernatura michoacana) logro establecer la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo el 15 de octubre de 1917, en la cual se incluyeron el Colegio Primitivo y Nacional de Hidalgo, las Escuelas de Medicina, Jurisprudencia, Normal para profesoras, Normal para profesores, Superior de Comercio y Administración, Industrial y Comercial para señoritas, además de una Biblioteca Pública, Observatorio Meteorológico del Estado y 2 Museos: el Museo Michoacano y el Museo de la Independencia.

Actualmente, la Universidad tiene sede en Morelia, Michoacán, pero también tiene campus en las ciudades de Apatzingán, Uruapan y Ciudad de Hidalgo. Se imparten 33 carreras universitarias, 24 de ellas son licenciaturas y 9 son ingenierías, 17 posgrados, 1 carrera en línea la cual es licenciatura. 7 escuelas que imparten educación nivel superior, 2 carreras técnicas, 9 especialidades, 33 maestrías, y 16 doctorados.

Ante la gran necesidad de tener un espacio exclusivo para albergar eventos, la Universidad decide construir el Centro de Información, Arte y Cultura (CIAC).

Es un edificio de 2 pisos construido a un costado del edificio de rectoría y frente al auditorio de usos múltiples, ubicados en la llamada Ciudad Universitaria (C.U.) de la UMSNH.

En la ilustración 2 se muestra de manera satelital la ubicación del C.I.A.C. dentro de C.U.



Fuente: Google Earth, 2020

### **Ilustración 2.-Vista satelital de C.U. y ubicación del C.I.A.C.**

El CIAC (Centro de Información, Arte y Cultura) es un espacio perteneciente a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) que sirve como auditorio para distintos eventos ya sean culturales (exposiciones, conferencias, conciertos, proyecciones cinematográficas) o científicos (congresos, seminarios, talleres). El edificio fue construido bajo la rectoría de la Dra. Silvia Figueroa Zamudio (2007-2011) y terminado en el mes de noviembre del año 2010, su realización fue llevada a cabo de la siguiente manera:

- ❖ Construcción:
  - Constructora FIEN S.A. de C.V.
  - Constructora Nacional de Michoacán S.A. de C.V.
  - Logística Arquitectónica S.A. de C.V.
- ❖ Supervisión interna:
  - Coordinación de Proyectos y Obras de la UMSNH.
- ❖ Supervisión externa:
  - Constructora y Edificadora L. y H., S.A. de C.V.
- ❖ Proyecto arquitectónico:
  - Arq. Teodoro González de León.

## Revisión conceptual del Sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura de la UMSNH.

---

Tiene como domicilio Av. Francisco J. Múgica s/n, Col. Morelos, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, en la llamada Ciudad Universitaria UMSNH (C.U.).

A continuación, en la ilustración 3 se muestra un mapa de C.U. donde se puede observar el C.I.A.C. y algunos edificios que sirven como referencia.



Fuente: [www.umich.com](http://www.umich.com), 2020

Ilustración 3.- Mapa de C.U.

Revisión conceptual del Sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura de la UMSNH.

---

A continuación, se muestra la ilustración 4 del acceso principal al Centro de información, arte y cultura de la Universidad Michoacana:



Fuente: Propia, 2020

**Ilustración 4.- Acceso principal al Centro de información, arte y cultura de la Universidad Michoacana.**

El centro cuenta con las siguientes instalaciones:

- ❖ Auditorio divisible en dos, con capacidad para 400 personas.

La ilustración 5 mostrada da una vista de la entrada al auditorio.



Fuente: Propia, 2020

#### **Ilustración 5.- Entrada del auditorio del C.I.A.C.**

- ❖ Un salón acústico con capacidad para 80 personas.
- ❖ Sala para cine con capacidad para 60 personas.
- ❖ 10 salones con espacio para 30 personas.
- ❖ Espacios para exposiciones temporales.
- ❖ Sala de prensa.
- ❖ 5 salas de ponencia con aforo para 30 personas.
- ❖ Sala de reuniones.
- ❖ Área de cafetería.
- ❖ Explanada.
- ❖ Estacionamiento.

En la ilustración 6, se da una vista de la explanada del Centro de información, arte y cultura.



Fuente: Propia, 2020

#### **Ilustración 6.- Explanada del C.I.A.C.**

La cantidad de personas que pueden ocupar las instalaciones es de 1,075, esto es considerando una ocupación al 100% de los espacios que brinda este edificio. Las instalaciones de este edificio son requeridas diariamente en un 30% como mínimo, esto sucede de 10 a 15 días mensualmente y albergan en cada uno de sus eventos un mínimo de 50% de su capacidad total. El CIAC cuenta con 30 empleados directos. Esto indica que, como mínimo, las instalaciones son utilizadas por 162 personas diariamente durante los días de eventos.

Hablando de instalaciones hidrosanitarias, el edificio cuenta con 2 baños para hombres y 2 para mujeres. En el primer baño de hombres se cuenta con 4 W.C. 7 mingitorios, 4 lavamanos y 1 regadera. El segundo baño de hombres cuenta con 3 W.C. y 2 lavamanos. El primer baño de mujeres cuenta con 12 W.C. 7 lavamanos y 1 regadera. El segundo cuenta con 3 W.C. y 2 lavamanos.

Debido a lo anteriormente mencionado, se optó por construir una planta de tratamiento de agua residual que tratara el gasto de agua residual proveniente únicamente de las instalaciones del CIAC, para aprovecharla y posteriormente utilizarla como agua de riego para las canchas de fútbol que se encuentran detrás del edificio del CIAC.

Es difícil nombrar una actividad humana en la que el agua no tenga relación. Debido a esto y a que, desde hace décadas, la obtención de agua potable para satisfacer nuestras necesidades cada día es más complicada a causa del incremento de la contaminación de los cuerpos de agua, el tratamiento del agua se ha venido haciendo un constante interés.

La norma oficial mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997 define a las aguas residuales como “Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.” En otras palabras, son aguas que contienen sustancias contaminantes que son incorporadas al agua después de su uso. Dicho lo anterior, el tratamiento de agua es el conjunto de procesos que se realizan para extraer las sustancias que son incorporadas al agua a causa de las actividades humanas.

En México, el 74% de los cuerpos de agua presentan algún grado de contaminación y sus principales contaminantes son: materia orgánica, nutrientes (nitrógeno y fósforo), y coliformes (microorganismos). Esto es causado por la falta de tratamiento al agua residual, ya que en México sólo se trata alrededor de 5% del agua, debido en gran parte a que el sector agrícola tiene el mayor consumo de agua, y ellos no cuentan con una planta de tratamiento, por lo que descargan el agua de manera cruda a los distintos cuerpos de agua. Según CNA en su Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2018, al cierre del año 2017, se contaba con 2,526 plantas de tratamiento de aguas residuales, con una capacidad instalada de 181,150.24 l/s y las cuales alcanzaron una cobertura nacional de tratamiento de aguas residuales municipales del 63.0% con un caudal tratado de 135,580.28 l/s. Pero al cierre del año 2018, las plantas registradas aumentaron a 2,540 plantas de tratamiento de aguas residuales, con una capacidad instalada de 181,152.22 l/s y un caudal tratado de 137,698.61 l/s lo que significa una cobertura nacional de tratamiento del 64%.

A continuación, se muestra una serie de ocho tablas donde se indica el tipo de proceso al que corresponden las plantas existentes en México:

***Tabla 1.- Inventario de plantas por estado 2018.***

| Estado                | No. Plantas | Capacidad Instalada (l/s) | Caudal Tratado (l/s) |
|-----------------------|-------------|---------------------------|----------------------|
| Aguascalientes        | 135         | 4840                      | 2982.7               |
| Baja California       | 45          | 7882.6                    | 5977.8               |
| Baja California Sur   | 31          | 2051.3                    | 1626.5               |
| Campeche              | 17          | 155                       | 142.8                |
| Coahuila de Zaragoza  | 26          | 5680                      | 4516                 |
| Colima                | 82          | 2434.9                    | 1739.8               |
| Chiapas               | 34          | 2001.2                    | 1343.6               |
| Chihuahua             | 185         | 10263.1                   | 7031.7               |
| Ciudad de México      | 29          | 5604.5                    | 2451.5               |
| Durango               | 220         | 4638.7                    | 3496.1               |
| Guanajuato            | 64          | 7560.8                    | 5221.2               |
| Guerrero              | 67          | 4428.3                    | 3755.5               |
| Hidalgo               | 56          | 23826.8                   | 22133.9              |
| Jalisco               | 122         | 15245.2                   | 12346.2              |
| México                | 131         | 9744.7                    | 6400.1               |
| Michoacán de Ocampo   | 46          | 4145.5                    | 3175.4               |
| Morelos               | 52          | 2769.7                    | 1276.4               |
| Nayarit               | 70          | 3493.8                    | 2510.3               |
| Nuevo León            | 55          | 16157                     | 12590.4              |
| Oaxaca                | 76          | 1817.6                    | 1291.2               |
| Puebla                | 85          | 3516.9                    | 3592.5               |
| Querétaro de Arteaga  | 51          | 2449.4                    | 1892.4               |
| Quintana Roo          | 31          | 2685                      | 1780.2               |
| San Luis Potosí       | 40          | 2572.7                    | 2101                 |
| Sinaloa               | 279         | 6496.7                    | 5837.2               |
| Sonora                | 109         | 7394.1                    | 6115.9               |
| Tabasco               | 99          | 2969.9                    | 2665                 |
| Tamaulipas            | 47          | 7369.2                    | 4096.4               |
| Tlaxcala              | 55          | 1481.8                    | 1049.6               |
| Veracruz              | 108         | 7014.8                    | 4711.9               |
| Yucatán               | 28          | 448.7                     | 231.5                |
| Zacatecas             | 65          | 2012.4                    | 1616                 |
| <b>Total nacional</b> | <b>2540</b> | <b>181152.3</b>           | <b>137698.7</b>      |

**Fuente: CNA, 2020**

**Tabla 2.- Inventario de plantas por estado y por proceso 2018 (parte 1).**

| Estado                | Aerobio   |                       | Anaerobio  |                       | Biológico |                       | Biodiscos |                       | Dual      |                       | Filtros biológicos |                       |
|-----------------------|-----------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                       | No.       | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.        | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.       | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.       | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.       | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.                | Q <sub>op</sub> (l/s) |
| Aguascalientes        |           |                       | 5          | 12                    |           |                       | 1         | 10                    | 1         | 1890.2                |                    |                       |
| Baja California       |           |                       |            |                       |           |                       |           |                       |           |                       | 2                  | 159.4                 |
| Baja California Sur   | 1         | 2                     |            |                       |           |                       |           |                       |           |                       |                    |                       |
| Campeche              |           |                       |            |                       |           |                       |           |                       | 1         | 6                     | 1                  | 10                    |
| Coahuila de Zaragoza  |           |                       |            |                       |           |                       |           |                       |           |                       |                    |                       |
| Colima                |           |                       |            |                       |           |                       | 1         | 1                     |           |                       |                    |                       |
| Chiapas               | 2         | 3.5                   | 4          | 64.1                  | 2         | 254.7                 |           |                       | 1         | 100                   | 3                  | 691.5                 |
| Chihuahua             | 1         | 28                    | 1          | 0.1                   |           |                       |           |                       |           |                       |                    |                       |
| Ciudad de México      |           |                       |            |                       |           |                       |           |                       |           |                       |                    |                       |
| Durango               |           |                       | 1          | 0.2                   | 5         | 189                   |           |                       |           |                       |                    |                       |
| Guanajuato            | 6         | 1763.8                | 6          | 47.7                  | 1         | 18                    |           |                       |           |                       | 2                  | 226                   |
| Guerrero              |           |                       | 1          | 15                    |           |                       |           |                       |           |                       | 2                  | 94                    |
| Hidalgo               |           |                       | 16         | 42.1                  |           |                       | 6         | 20.8                  | 1         | 21650                 | 1                  | 1                     |
| Jalisco               |           |                       |            |                       |           |                       | 1         | 5                     |           |                       | 2                  | 225                   |
| México                | 2         | 7.5                   | 16         | 75.9                  | 9         | 54.7                  | 1         | 8                     | 2         | 1172.4                | 2                  | 5.5                   |
| Michoacán de Ocampo   |           |                       |            |                       |           |                       | 2         | 60                    |           |                       | 2                  | 35                    |
| Morelos               | 7         | 41.2                  | 4          | 9.4                   |           |                       | 3         | 33.5                  | 3         | 24.1                  | 6                  | 606.5                 |
| Nayarit               |           |                       |            |                       |           |                       | 8         | 483                   |           |                       | 2                  | 900                   |
| Nuevo León            |           |                       |            |                       |           |                       |           |                       |           |                       |                    |                       |
| Oaxaca                |           |                       | 8          | 21.1                  |           |                       |           |                       |           |                       | 1                  | 75                    |
| Puebla                |           |                       |            |                       | 1         | 3.5                   | 1         | 80                    |           |                       | 4                  | 120.5                 |
| Querétaro de Arteaga  | 1         | 2.4                   | 1          | 7.2                   | 1         | 16                    |           |                       | 5         | 679.5                 | 3                  | 379.1                 |
| Quintana Roo          |           |                       | 1          | 1                     |           |                       |           |                       | 7         | 324.9                 | 1                  | 227.8                 |
| San Luis Potosí       |           |                       | 6          | 14.7                  |           |                       |           |                       | 1         | 1000                  |                    |                       |
| Sinaloa               |           |                       |            |                       |           |                       | 2         | 26.9                  | 1         | 547.8                 |                    |                       |
| Sonora                |           |                       |            |                       |           |                       |           |                       |           |                       |                    |                       |
| Tabasco               |           |                       | 3          | 40                    | 6         | 17.4                  | 1         | 10                    |           |                       | 1                  | 75                    |
| Tamaulipas            |           |                       |            |                       | 1         | 18                    |           |                       |           |                       |                    |                       |
| Tlaxcala              |           |                       | 1          | 1.1                   |           |                       |           |                       |           |                       | 1                  | 200                   |
| Veracruz              |           |                       | 18         | 198.6                 | 4         | 166                   |           |                       |           |                       | 2                  | 1054.7                |
| Yucatán               |           |                       | 8          | 74.6                  |           |                       | 1         | 12                    | 1         | 7.3                   |                    |                       |
| Zacatecas             |           |                       |            |                       |           |                       | 2         | 122                   |           |                       | 1                  | 43.6                  |
| <b>Total nacional</b> | <b>20</b> | <b>1848.4</b>         | <b>100</b> | <b>624.8</b>          | <b>30</b> | <b>737.3</b>          | <b>30</b> | <b>872.2</b>          | <b>24</b> | <b>27402.2</b>        | <b>39</b>          | <b>5129.6</b>         |

Fuente: CNA, 2020

**Tabla 3.- Inventario de plantas por estado y por proceso 2018 (parte 2).**

| Estado                | Fosa séptica |                        | Fosa séptica+Filtro biológico |                        | Fosa séptica+Wetland |                        | Humedales |                        | Lagunas aireadas |                        | Lagunas de estabilización |                        | Otro      |                        |
|-----------------------|--------------|------------------------|-------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|-----------|------------------------|------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|-----------|------------------------|
|                       | No.          | Q <sub>opt</sub> (l/s) | No.                           | Q <sub>opt</sub> (l/s) | No.                  | Q <sub>opt</sub> (l/s) | No.       | Q <sub>opt</sub> (l/s) | No.              | Q <sub>opt</sub> (l/s) | No.                       | Q <sub>opt</sub> (l/s) | No.       | Q <sub>opt</sub> (l/s) |
| Agascalientes         | 13           | 11.1                   |                               |                        |                      |                        | 3         | 3.4                    |                  |                        | 66                        | 150.7                  |           |                        |
| Baja California       |              |                        |                               |                        |                      |                        |           |                        | 9                | 2993                   |                           |                        |           |                        |
| Baja California Sur   |              |                        |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        | 13                        | 223                    |           |                        |
| Campeche              |              |                        |                               |                        |                      |                        | 1         | 12                     |                  |                        |                           |                        |           |                        |
| Coahuila de Zaragoza  | 1            | 1                      |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        | 6                         | 1461                   |           |                        |
| Colima                | 1            | 1                      | 15                            | 16.1                   | 1                    | 8.7                    |           |                        |                  |                        | 10                        | 44.4                   |           |                        |
| Chiapas               | 4            | 3.3                    |                               |                        |                      |                        | 1         | 27                     |                  |                        | 12                        | 177.7                  |           |                        |
| Chihuahua             |              |                        |                               |                        |                      |                        | 1         | 0.7                    |                  |                        | 144                       | 1219.8                 |           |                        |
| Ciudad de México      |              |                        |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        |                           |                        | 1         | 51.1                   |
| Durango               | 4            | 5.5                    |                               |                        |                      |                        | 2         | 9                      | 1                | 1680                   | 186                       | 1037.3                 | 2         | 2.8                    |
| Guanajuato            |              |                        |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        | 3                         | 714                    |           |                        |
| Guerrero              |              |                        |                               |                        |                      |                        | 1         | 6                      | 1                | 6                      | 10                        | 79.2                   |           |                        |
| Hidalgo               |              |                        | 1                             | 4                      | 1                    | 4                      | 1         | 0.9                    | 1                | 30                     | 4                         | 25.3                   | 2         | 6.3                    |
| Jalisco               |              |                        |                               |                        |                      |                        | 4         | 5.2                    | 1                | 16                     | 9                         | 87                     |           |                        |
| México                | 1            | 2                      |                               |                        |                      |                        | 4         | 17.9                   | 1                | 190                    | 14                        | 517.2                  | 2         | 53.8                   |
| Michoacán de Ocampo   |              |                        |                               |                        |                      |                        | 2         | 2                      |                  |                        | 15                        | 714                    |           |                        |
| Morelos               | 1            | 4                      |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        |                           |                        |           |                        |
| Nayarit               | 1            | 1                      |                               |                        |                      |                        | 1         | 2                      | 1                | 40                     | 36                        | 416.1                  |           |                        |
| Nuevo León            |              |                        |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        | 17                        | 122                    |           |                        |
| Oaxaca                |              |                        |                               |                        |                      |                        | 39        | 145.2                  |                  |                        | 6                         | 40                     |           |                        |
| Puebla                | 7            | 12.2                   |                               |                        | 1                    | 1.1                    |           |                        |                  |                        | 16                        | 158.7                  |           |                        |
| Querétaro de Arteaga  |              |                        |                               |                        |                      |                        | 1         | 1.5                    |                  |                        | 1                         | 1.9                    |           |                        |
| Quintana Roo          |              |                        |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        |                           |                        |           |                        |
| San Luis Potosí       | 1            | 0.2                    |                               |                        |                      |                        | 2         | 10.7                   | 1                | 240                    | 8                         | 310.5                  | 2         | 22                     |
| Sinaloa               | 48           | 86.1                   | 23                            | 19.4                   | 108                  | 183.7                  | 1         | 10.2                   | 3                | 32.5                   | 33                        | 1970.9                 |           |                        |
| Sonora                | 11           | 4.8                    |                               |                        |                      |                        | 1         | 4.1                    | 2                | 1104.1                 | 80                        | 1435.5                 |           |                        |
| Tabasco               |              |                        |                               |                        |                      |                        | 7         | 975.2                  | 2                | 416                    | 11                        | 676.3                  | 2         | 14                     |
| Tamaulipas            |              |                        |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        | 31                        | 1162.4                 | 2         | 40                     |
| Tlaxcala              |              |                        |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        | 9                         | 227.2                  |           |                        |
| Veracruz              | 7            | 9.7                    |                               |                        |                      |                        | 2         | 16.5                   | 3                | 220                    | 14                        | 548.2                  | 2         | 6.4                    |
| Yucatán               |              |                        |                               |                        |                      |                        |           |                        |                  |                        |                           |                        |           |                        |
| Zacatecas             |              |                        | 1                             | 4.1                    |                      |                        |           |                        |                  |                        |                           |                        |           |                        |
| <b>Total nacional</b> | <b>100</b>   | <b>141.9</b>           | <b>40</b>                     | <b>43.6</b>            | <b>115</b>           | <b>207</b>             | <b>74</b> | <b>1249.5</b>          | <b>29</b>        | <b>7023.8</b>          | <b>774</b>                | <b>13738.6</b>         | <b>17</b> | <b>203.6</b>           |

Fuente: CNA, 2020

**Tabla 4.- Inventario de plantas por estado y por proceso 2018 (parte 3).**

| Estado                | Lodos activados |                       | Primario avanzado |                       | Primario o sedimentación |                       | Rafa-filtro biológico |                       | Rafa       |                       | Rafa+humedal |                       | Reactor enzimático |                       |
|-----------------------|-----------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                       | No.             | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.               | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.                      | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.                   | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.        | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.          | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.                | Q <sub>op</sub> (l/s) |
| Aguascalientes        | 45              | 903.6                 |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       | 1            | 1.83                  |                    |                       |
| Baja California       | 25              | 1953.2                |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Baja California Sur   | 17              | 1401.5                |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Campeche              | 13              | 104.8                 | 1                 | 10                    |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Coahuila de Zaragoza  | 18              | 3004                  |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Colima                | 10              | 1482.3                |                   |                       |                          |                       | 28                    | 142                   |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Chiapas               | 2               | 16                    |                   |                       |                          |                       |                       |                       | 2          | 4.5                   |              |                       |                    |                       |
| Chihuahua             | 14              | 5742                  |                   |                       | 5                        | 9.5                   |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Ciudad de México      | 28              | 2400.4                |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Durango               | 17              | 571.2                 |                   |                       | 1                        | 0.3                   |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Guanajuato            | 21              | 2042.2                |                   |                       | 2                        | 2.69                  | 7                     | 209.5                 | 10         | 29.2                  | 6            | 168                   |                    |                       |
| Guerrero              | 50              | 3539.3                |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       | 1            | 10                    |                    |                       |
| Hidalgo               | 11              | 302.4                 |                   |                       |                          |                       | 5                     | 36                    |            |                       | 1            | 0.2                   |                    |                       |
| Jalisco               | 79              | 11861                 |                   |                       | 1                        | 2                     |                       |                       | 23         | 55                    |              |                       |                    |                       |
| México                | 56              | 4361.4                |                   |                       |                          |                       | 15                    | 98.1                  | 7          | 21.7                  | 2            | 9                     | 1                  | 3                     |
| Michoacán de Ocampo   | 12              | 2026                  | 2                 | 19                    |                          |                       |                       |                       | 5          | 84                    | 1            | 8                     |                    |                       |
| Morelos               | 26              | 555.7                 |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Nayarit               | 13              | 584.5                 |                   |                       |                          |                       |                       |                       | 3          | 6                     | 4            | 9.7                   |                    |                       |
| Nuevo León            | 38              | 12468.4               |                   |                       |                          |                       | 1                     | 68                    |            |                       |              |                       | 1                  | 3                     |
| Oaxaca                | 20              | 991.9                 |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Puebla                | 14              | 435.9                 | 4                 | 2695                  | 1                        | 6                     | 1                     | 2.8                   | 34         | 73.2                  |              |                       |                    |                       |
| Querétaro de Arteaga  | 36              | 727.3                 |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Quintana Roo          | 22              | 1226.5                |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| San Luis Potosí       | 15              | 477.9                 |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Sinaloa               | 27              | 1169.1                | 1                 | 1687                  |                          |                       |                       |                       | 1          | 13                    | 1            | 28.5                  | 31                 | 75.1                  |
| Sonora                | 15              | 3567.4                |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Tabasco               | 3               | 85                    | 2                 | 20                    |                          |                       |                       |                       | 4          | 7.8                   | 1            | 20                    | 2                  | 4.7                   |
| Tamaulipas            | 13              | 2876                  |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Tlaxcala              | 4               | 276.9                 |                   |                       |                          |                       |                       |                       | 26         | 64.3                  | 5            | 32.9                  |                    |                       |
| Veracruz              | 33              | 1874.5                |                   |                       | 3                        | 14                    |                       |                       | 8          | 785.5                 | 6            | 14.5                  | 4                  | 1.2                   |
| Yucatán               | 18              | 137.6                 |                   |                       |                          |                       |                       |                       |            |                       |              |                       |                    |                       |
| Zacatecas             | 10              | 1073.5                |                   |                       |                          |                       | 5                     | 20.8                  | 10         | 30.6                  | 5            | 28                    | 5                  | 9.6                   |
| <b>Total nacional</b> | <b>725</b>      | <b>70239.4</b>        | <b>10</b>         | <b>4431</b>           | <b>13</b>                | <b>34.49</b>          | <b>62</b>             | <b>577.2</b>          | <b>133</b> | <b>1174.8</b>         | <b>34</b>    | <b>350.63</b>         | <b>44</b>          | <b>96.6</b>           |

Fuente: CNA, 2020

**Tabla 5.- Inventario de plantas por estado y por proceso 2018 (parte 4).**

| Estado                | Sedimentación+ wetland |                       | Tanque Imhoff |                       | Tanque Imhoff-filtro biológico |                       | Tanque Imhoff+wetland |                       | Terciario |                       | Zanjas de oxidación |                       | Total       |                       |         |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|---------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|---------------------|-----------------------|-------------|-----------------------|---------|
|                       | No.                    | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.           | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.                            | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.                   | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.       | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.                 | Q <sub>op</sub> (l/s) | No.         | Q <sub>op</sub> (l/s) |         |
| Aguascalientes        |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       | 135         | 2982.83               |         |
| Baja California       |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       | 2         | 33.7                  |                     | 7                     | 838.5       | 45                    | 5977.8  |
| Baja California Sur   |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 31                    | 1626.5  |
| Campeche              |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 17                    | 142.8   |
| Coahuila de Zaragoza  |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       | 1                   | 50                    |             | 26                    | 4516    |
| Colima                |                        |                       | 2             | 4.7                   | 14                             | 39.6                  |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 82                    | 1739.8  |
| Chiapas               |                        |                       | 1             | 1.2                   |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 34                    | 1343.5  |
| Chihuahua             | 19                     | 31.6                  |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 185                   | 7031.7  |
| Ciudad de México      |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 29                    | 2451.5  |
| Durango               |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       | 1                   | 0.8                   |             | 220                   | 3496.1  |
| Guanajuato            |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 64                    | 5221.09 |
| Guerrero              |                        |                       | 1             | 6                     |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 67                    | 3755.5  |
| Hidalgo               |                        |                       | 1             | 4                     | 1                              | 1.5                   | 3                     | 5.5                   |           |                       |                     |                       |             | 56                    | 22134   |
| Jalisco               |                        |                       |               |                       | 2                              | 90                    |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 122                   | 12346.2 |
| México                |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       | 1         | 10                    |                     |                       |             | 131                   | 6400.2  |
| Michoacán de Ocampo   |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       | 1                   | 18                    |             | 46                    | 3175.4  |
| Morelos               |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 52                    | 1276.4  |
| Nayarit               |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 70                    | 2510.3  |
| Nuevo León            |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 55                    | 12590.4 |
| Oaxaca                |                        |                       | 1             | 15                    |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 76                    | 1291.2  |
| Puebla                |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 85                    | 3592.5  |
| Querétaro de Arteaga  |                        |                       |               |                       | 1                              | 4.5                   |                       |                       |           |                       | 1                   | 3.6                   |             | 51                    | 1892.4  |
| Quintana Roo          |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 31                    | 1780.2  |
| San Luis Potosí       | 1                      | 6                     |               |                       | 1                              | 1                     | 1                     | 5                     |           |                       |                     |                       |             | 40                    | 2101    |
| Sinaloa               |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 279                   | 5837.2  |
| Sonora                |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 109                   | 6115.9  |
| Tabasco               |                        |                       | 45            | 253.2                 | 7                              | 44                    | 2                     | 6.5                   |           |                       |                     |                       |             | 99                    | 2665.1  |
| Tamaulipas            |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 47                    | 4096.4  |
| Tlaxcala              |                        |                       | 1             | 4.5                   |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 55                    | 1049.4  |
| Veracruz              |                        |                       | 6             | 37.4                  |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 108                   | 4711.9  |
| Yucatán               |                        |                       |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 28                    | 231.5   |
| Zacatecas             | 1                      | 2.29                  |               |                       |                                |                       |                       |                       |           |                       |                     |                       |             | 65                    | 1616.19 |
| <b>Total nacional</b> | <b>21</b>              | <b>39.89</b>          | <b>58</b>     | <b>326</b>            | <b>26</b>                      | <b>180.6</b>          | <b>6</b>              | <b>17</b>             | <b>3</b>  | <b>43.7</b>           | <b>13</b>           | <b>985.1</b>          | <b>2540</b> | <b>137699</b>         |         |

Fuente: CNA, 2020

**Tabla 6.- Resumen de plantas por estado.**

| Estado                          | Plantas     |            | Capacidad Instalada |            | Caudal Tratado  |            |
|---------------------------------|-------------|------------|---------------------|------------|-----------------|------------|
|                                 | No.         | %          | No.                 | %          | No.             | %          |
| Aerobio                         | 20          | 0.79       | 3098.8              | 1.71       | 1848.4          | 1.34       |
| Anaerobio                       | 100         | 3.94       | 943.6               | 0.52       | 624.8           | 0.45       |
| Biológico                       | 30          | 1.18       | 1131.4              | 0.62       | 737.3           | 0.54       |
| Biodiscos                       | 30          | 1.18       | 1193.8              | 0.66       | 872.2           | 0.63       |
| Dual                            | 24          | 0.94       | 29602.5             | 16.34      | 27402.2         | 19.90      |
| Filtros biológicos              | 39          | 1.54       | 6418.1              | 3.54       | 5129.6          | 3.73       |
| Fosa séptica                    | 100         | 3.94       | 203.5               | 0.11       | 141.9           | 0.10       |
| Fosa séptica+filtro biológico   | 40          | 1.57       | 69.8                | 0.04       | 43.6            | 0.03       |
| Fosa séptica+wetland            | 115         | 4.53       | 252.2               | 0.14       | 207             | 0.15       |
| Humedales                       | 74          | 2.91       | 1416.6              | 0.78       | 1249.5          | 0.91       |
| Lagunas aireadas                | 29          | 1.14       | 8773.8              | 4.84       | 7023.8          | 5.10       |
| Lagunas de estabilización       | 774         | 30.47      | 18381               | 10.15      | 13738.6         | 9.98       |
| Lodos activados                 | 725         | 28.54      | 99298.1             | 54.82      | 70239.4         | 51.01      |
| Primario avanzado               | 10          | 0.39       | 4297                | 2.37       | 4431            | 3.22       |
| Primario o sedimentación        | 13          | 0.51       | 52                  | 0.03       | 34.49           | 0.03       |
| Rafa+ filtro biológico          | 62          | 2.44       | 853.1               | 0.47       | 577.2           | 0.42       |
| Rafa                            | 133         | 5.24       | 1807.2              | 1.00       | 1174.8          | 0.85       |
| Rafa+ humedal                   | 34          | 1.34       | 425                 | 0.23       | 330.63          | 0.24       |
| Reactor enzimático              | 44          | 1.73       | 105.4               | 0.06       | 96.6            | 0.07       |
| Sedimentación+ wetland          | 21          | 0.83       | 61.6                | 0.03       | 39.89           | 0.03       |
| Tanque Imhoff                   | 58          | 2.28       | 474.6               | 0.26       | 326             | 0.24       |
| Tanque Imhoff+ filtro biológico | 26          | 1.02       | 219.2               | 0.12       | 180.6           | 0.13       |
| Tanque Imhoff+ wetland          | 6           | 0.24       | 25.1                | 0.01       | 17              | 0.01       |
| Terciario                       | 3           | 0.12       | 80                  | 0.04       | 43.7            | 0.03       |
| Zanjas de oxidación             | 13          | 0.51       | 1428.8              | 0.79       | 985.1           | 0.72       |
| Otro                            | 17          | 0.67       | 529.9               | 0.29       | 203.6           | 0.15       |
| <b>Total nacional</b>           | <b>2540</b> | <b>100</b> | <b>181142.1</b>     | <b>100</b> | <b>137698.9</b> | <b>100</b> |

Fuente: CNA, 2020

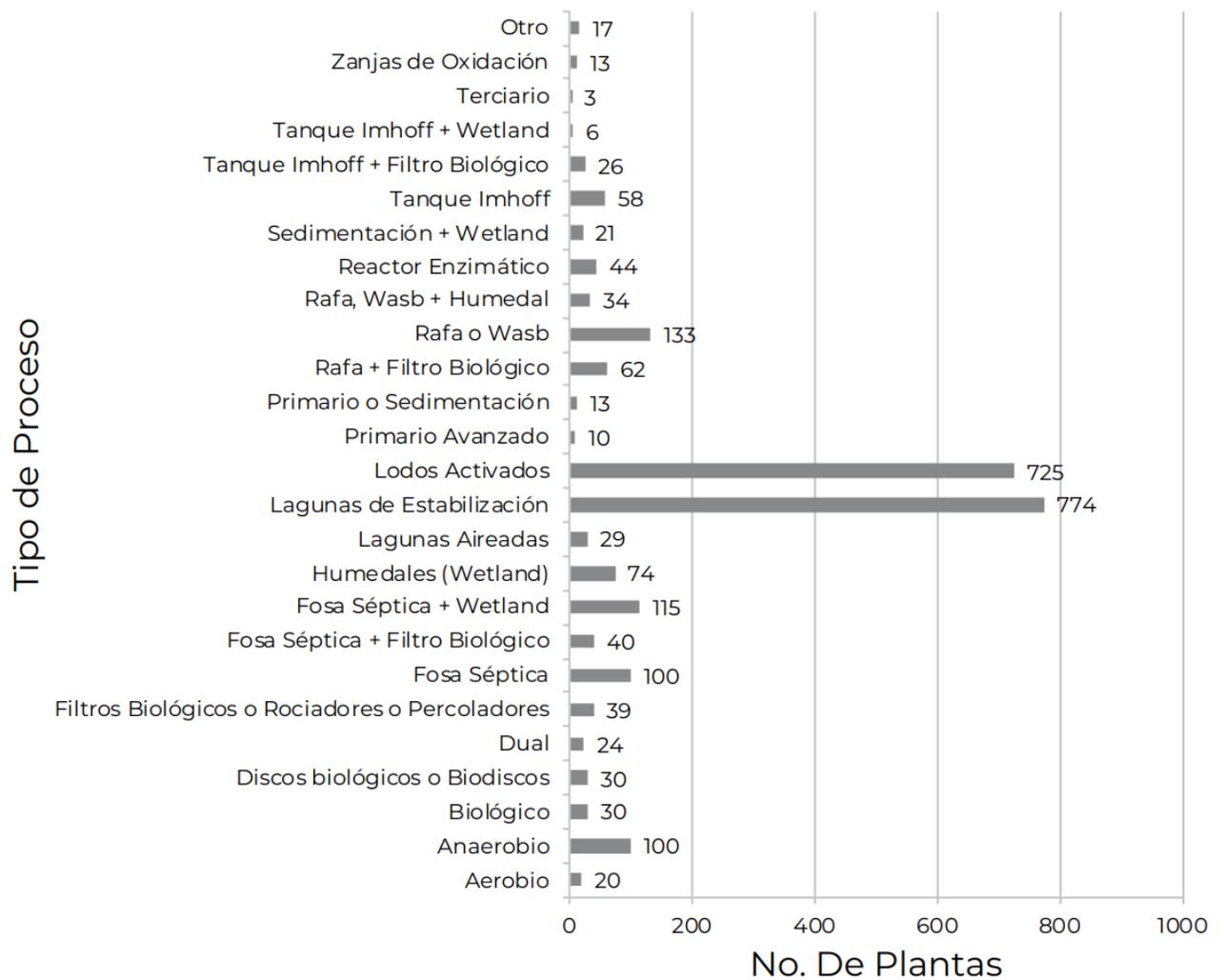
Aquí se puede apreciar que existen 30 plantas con proceso de biodiscos en todo el territorio mexicano (1.18% del total de plantas de tratamiento de aguas residuales), y 13 plantas con el proceso de zanjas de oxidación (0.51% del total de plantas de tratamiento). En el estado de Michoacán de Ocampo, sólo 2 plantas ofrecen el sistema de biodiscos y 1 planta el sistema de zanjas de oxidación.

***Tabla 7.- Evolución del saneamiento del agua en México.***

| Año  | Total          |                       | En operación   |                       |                     |
|------|----------------|-----------------------|----------------|-----------------------|---------------------|
|      | No. De plantas | Gasto instalado (l/s) | No. De plantas | Gasto instalado (l/s) | Gasto tratado (l/s) |
| 1996 | 793            | 54765                 | 595            | 51696.3               | 33745.4             |
| 1997 | 821            | 61653.1               | 639            | 57401.7               | 39388.8             |
| 1998 | 914            | 63150.9               | 727            | 58560.2               | 40854.7             |
| 1999 | 999            | 67532.9               | 777            | 61559                 | 42396.8             |
| 2000 | 1017           | 75937.5               | 793            | 68970                 | 45396.8             |
| 2001 | 1131           | 80607.2               | 938            | 73852.6               | 50810               |
| 2002 | 1241           | 85027.6               | 1077           | 79735                 | 56148.5             |
| 2003 | 1359           | 89570.3               | 1182           | 84331.5               | 60242.6             |
| 2004 | 1480           | 92659.8               | 1300           | 88718.3               | 64242.9             |
| 2005 | 1664           | 101332                | 1433           | 95774.3               | 71784.8             |
| 2006 | 1837           | 104895.9              | 1593           | 99764.2               | 74388.3             |
| 2007 | 2020           | 112294.8              | 1710           | 106266.7              | 79294.3             |
| 2008 | 2101           | 118920                | 1833           | 113024                | 83640.6             |
| 2009 | 2303           | 125626.8              | 2029           | 120860.9              | 88127.1             |
| 2010 | 2500           | 132144.1              | 2186           | 126847.5              | 93600.2             |
| 2011 | 2719           | 144074.7              | 2289           | 137082.1              | 97640.2             |
| 2012 | 2794           | 148307.7              | 2342           | 140142.1              | 99750.2             |
| 2013 | 2835           | 161727.1              | 2287           | 152171.9              | 105934.9            |
| 2014 | 2892           | 161137.3              | 2337           | 151883.4              | 111253.5            |
| 2015 | 3076           | 187953.8              | 2477           | 177973.6              | 120902.2            |
| 2016 | 3266           | 192510.7              | 2536           | 180569.7              | 123596.8            |
| 2017 | 3285           | 194453.3              | 2536           | 181152.2              | 135580.3            |
| 2018 | 3359           | 195239.1              | 2540           | 181152.2              | 137698.6            |

Fuente: CNA, 2020

**Tabla 8.- Resumen de plantas por proceso.**



Fuente: CNA, 2020

# **CAPÍTULO 2.- OBJETIVOS**



## **2.- Objetivos.**

### **2.1.- Objetivo General.**

Revisar el sistema de tratamiento para identificar las deficiencias constructivas y operacionales que tiene la planta de tratamiento de aguas residuales del CIAC para posteriormente, proponer adecuaciones y mejoras.

### **2.2.- Objetivos Particulares.**

- Revisar el estado actual de la planta de tratamiento.
- Identificar deficiencias en el proceso de tratamiento.
- Proponer mejoras constructivas a la planta de tratamiento de aguas residuales.
- Sugerir una operación adecuada para su correcto mantenimiento.

# **CAPÍTULO 3.- INFORMACIÓN DEL SISTEMA**



### 3.- Información del sistema.

El sistema de tratamiento tiene distintas etapas, iniciando el tratamiento con una fase de pretratamiento, seguido por un tratamiento aerobio en suspensión a base de zanjas de oxidación, posteriormente se le aplica al agua un tratamiento aerobio fijo a base de biodiscos. Al término de esto, se hace uso de un sedimentador secundario para finalmente desinfectar el agua utilizando como agente bactericida gas cloro.

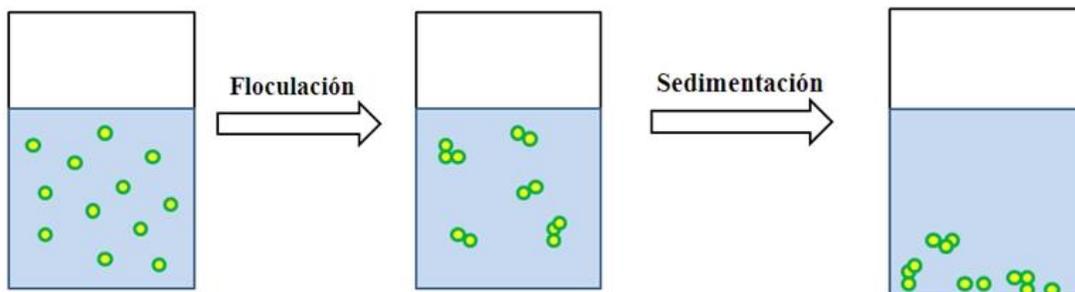
#### 3.1.- Pretratamiento.

Los pretratamientos de aguas residuales son aquellos procesos encargados de eliminar los sólidos en suspensión presentes en el agua. La eficiencia de este sistema es del 30 al 40% con respecto a la DBO. Los principales procesos físico-químicos que pueden ser incluidos son los siguientes: sedimentación, flotación, coagulación – floculación y filtración, los cuales se definen a continuación.

##### 3.1.1.- Coagulación – Floculación.

En muchos casos parte de la materia en suspensión está formada por partículas de muy pequeño tamaño, lo que conforma una suspensión coloidal. Éstas suspensiones coloidales suelen ser muy estables, en muchas ocasiones debido a interacciones eléctricas entre las partículas. Por tanto, tienen una velocidad de sedimentación extremadamente lenta, por lo que haría inviable un tratamiento mecánico clásico.

Una forma de mejorar la eficacia de todos los sistemas de eliminación de materia en suspensión es la adición de ciertos reactivos químicos que, en primer lugar, desestabilicen la suspensión coloidal (coagulación) y a continuación favorezcan la floculación de las mismas para obtener partículas fácilmente sedimentables.



Fuente: (Bolívar, 2021)

Ilustración 7.- Método de coagulación-floculación.

### 3.1.2.- Filtración.

La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable.

Se pueden tener procesos anteriores a estos, los cuales tendrían la principal tarea de remover las partículas con tamaños mayores a 1 cm para aumentar la eficiencia de los tratamientos posteriores. Tales procesos pueden ser rejillas, canales desarenadores, trampas de grasas, tamices.

- ✓ Canal de aproximación.

Tiene como función normalizar la velocidad del gasto a un rango de 0.3 m/s a 1.5 m/s con la finalidad de eliminar la posibilidad de tener un flujo turbulento el cual puede erosionar las paredes de las estructuras.

- ✓ Canal desarenador doble.

Funciona bajo los mismos principios que un sedimentador. Tiene como finalidad, la remoción de, como su nombre lo indica, arena que por su densidad mayor que la del agua, se sedimenta para posteriormente ser removida.

- ✓ Rejillas.

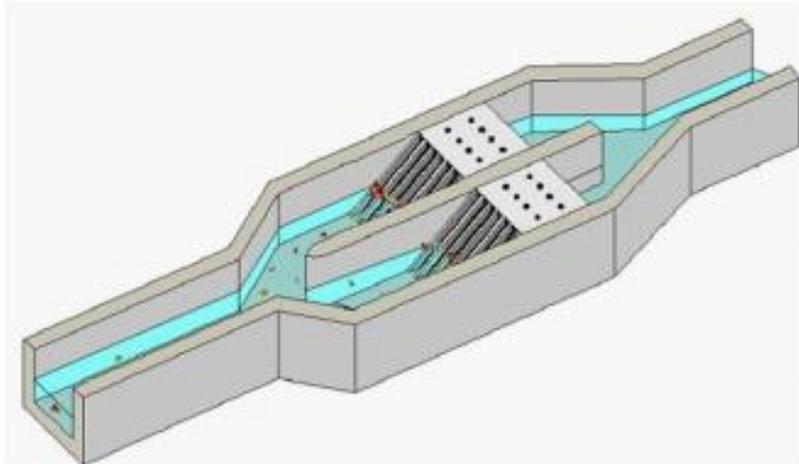
Son estructuras de cribado en las cuales se desechan sólidos con diámetros mayores a 1 cm que pueden dañar u obstruir las tuberías y bombas. Se dividen en 3 según su tamaño de abertura:

- **Rejas Gruesas:** Son las cuales tienen una separación entre las barras (o abertura) de 5cm a 15 cm.
- **Rejas Medianas:** Si la separación entre barras es de 2 a 5 cm.
- **Rejillas finas:** Si la separación entre barras es de 1 a 2 cm.



Fuente: propia

**Ilustración 8.- Rejillas.**

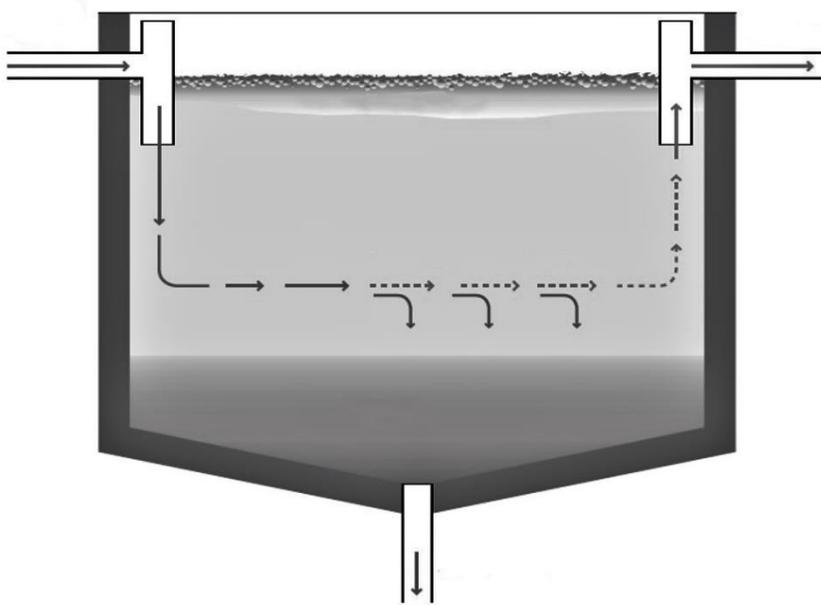


Fuente: (belzona, 2020)

**Ilustración 9.- Proceso de filtración.**

### **3.1.3.- Sedimentación.**

Es un proceso de separación por gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Está en función de la densidad del líquido, del tamaño, del peso específico y de la morfología de las partículas.



Fuente: (SSWM, 2020)

#### Ilustración 10.- Proceso de sedimentación.

### 3.1.4.- Flotación.

Proceso físico fundamentado en la diferencia de densidades. La flotación permite separar la materia sólida o líquida de menor densidad que la del fluido, por ascenso de ésta hasta la superficie del fluido, ya que, en este caso, las fuerzas que tiran hacia arriba (rozamiento y empuje del líquido) superan a la fuerza de la gravedad. Se generan pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, donde son arrastradas y sacadas del sistema. Dicho en otras palabras, el proceso de flotación es el mismo proceso que el de sedimentación, lo que las diferencia es que los movimientos de las partículas a remover tienen sentidos opuestos.

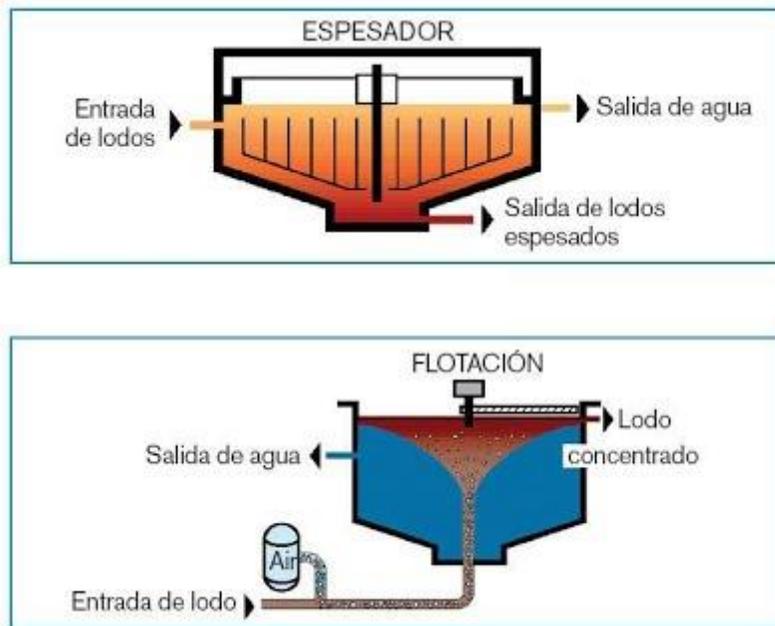
Estos dos últimos procedimientos de pretratamiento son los más utilizados debido a su fácil proceso, pero debido a que son muy similares, a continuación, se mencionan las ventajas y desventajas del método de flotación frente al método de sedimentación.

#### 1) Ventajas.

- a. Permite eliminar mejor y en menos tiempo las partículas pequeñas o ligeras cuya deposición es lenta. Una vez las partículas se hallan en superficie, pueden recogerse mediante un rascado superficial.

- b. Se retiran en un solo paso, las grasas y los sólidos livianos que se elevan a la superficie y arena y sólidos pesados que se precipitan en el fondo.
  - c. Se pueden emplear altas cargas superficiales y períodos cortos de retención, lo que significa que el tamaño de los tanques es menor y hay unas necesidades menores de espacio, así como ahorros en costos de construcción.
  - d. Las emanaciones de olores a causa de los cortos períodos de retención se reducen y en unidades de presión y aireación por la presencia de oxígeno disuelto en el seno del efluente.
  - e. Muchas veces, son más densos las espumas y lodos obtenidos de la unidad de flotación que una unidad de sedimentación.
- 2) Desventajas.
- a. El equipo adicional que se requiere exige unos costos de funcionamiento más altos.
  - b. Generalmente, las unidades de flotación no dan un tratamiento tan efectivo como las unidades de precipitación, aunque el rendimiento varía con el vertido.
  - c. El tipo de presión tiene unas necesidades grandes de energía, lo que aumenta los costos de funcionamiento.
  - d. Los tipos de vacío requieren una estructura estanca relativamente cara, capaz de mantener una presión de 0.2 atmósferas, cualquier fuga a la atmósfera disminuirá el funcionamiento.
  - e. Se requiere un mantenimiento más experto en una unidad de flotación que en una de sedimentación.

(Fuente: Rojas J. A., 2001)



Fuente: (minera, 2020)

Ilustración 11.- Comparación de la floculación y la sedimentación.

✓ Cárcamo de bombeo.

Es un depósito donde se bombea el agua pretratada hacia las siguientes etapas.



Fuente: propia, 2020

**Ilustración 12.- Cárcamo de bombeo.**

Esta etapa es la encargada de iniciar el tratamiento de aguas residuales y tiene como función dar tratamiento al agua residual acondicionándola para que los tratamientos posteriores tengan mayor eficiencia.

## 3.2.- Tratamiento primario

Esta etapa tiene como objetivo la remoción de materia orgánica por medio de procesos biológicos. Ejemplos de estos procesos son lodos activados, filtros percoladores, lagunas de estabilización, zanjas de oxidación, discos biológicos rotativos, aireación extendida. Esta parte del tratamiento del agua residual emplea microorganismos para 3 resultados específicos los cuales son: simplificar la materia orgánica en compuestos más sencillos como nitratos, bióxido de carbono, metano, y compuestos con base nitrógeno, reducir el contenido de nutrientes en el agua residual, y eliminar organismos patógenos.

En el compendio de estadísticas ambientales 2009 (SEMARNAT) se define a este proceso como: Tratamiento de aguas residuales, precedido de pretratamiento, tratamiento primario y seguido de una desinfección, complementándose con un proceso para el manejo y tratamiento de los lodos.

Puede ser anaerobio o aerobio, en cuyo caso, se distinguen los sistemas de *medio fijo* (filtros biológicos y biodiscos) de aquellos denominados de *medio suspendido* (lodos activados en sus diversas variantes y lagunas de estabilización).

- Sistemas de cultivo fijo: Procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la materia orgánica están fijados a un medio inerte, tal como piedras, escorias, o materiales cerámicos y plásticos especialmente diseñados para cumplir con esa función.
- Sistemas de cultivo en suspensión: Procesos de tratamiento biológico en los que los microorganismos responsables de la conversión de la materia orgánica se mantienen en suspensión dentro del líquido.

Los tratamientos primarios o biológicos, a su vez, también se pueden dividir en tratamientos aerobios, anaerobios y anóxicos.

A continuación, se muestra una tabla de clasificación de los tipos de tratamientos primarios que existen tomando en cuenta ambas clasificaciones (Metcalf & Eddy, 1996).

**Tabla 9.- Procesos biológicos unitarios.**

| TIPO                   | NOMBRE COMUN   | APLICACIÓN  |
|------------------------|--|---|
| Procesos aerobios      |  |   |
| Cultivos en suspensión | <p>Proceso de fangos activados:</p> <p>Convencional (flujo en pistón)</p> <p>Mezcla completa</p> <p>Aireación graduada</p> <p>Oxígeno puro</p> <p>Reactor intermitente secuencial</p> <p>Contacto y estabilización</p> <p>Aireación prolongada</p> <p>Canales de oxidación</p> <p>Tanques profundos</p> <p>Deep shaft</p> <p>Nitrificación de cultivos en suspensión</p> <p>Lagunas aereadas</p> <p>Digestión aerobia</p> <p>Aire convencional</p> <p>Oxígeno puro</p> | <p>Eliminación de la DBO carbonosa(nitrificación)</p> <p>Nitrificación</p> <p>Eliminación de la DBO carbonosa(nitrificación)estabilización, eliminación de la DBO carbonosa</p>                     |
| Cultivos fijos         | <p>Filtros percoladores:</p> <p>Baja carga</p> <p>Alta carga</p> <p>Filtro de desbaste</p> <p>Sistemas biológicos rotativos:</p> <p>De contacto(RBC)</p> <p>Reactores de lecho compacto</p>  | <p>Eliminación de la DBO carbonosa (nitrificación)</p> <p>Eliminación de la DBO carbona</p> <p>Eliminación de la DBO carbona(nitrificación)</p> <p>Eliminación de la DBO carbona(nitrificación)</p> |
| Procesos combinados    | <p>Biofiltros activados:</p> <p>Filtro percoladores con contacto de sólidos.</p>   | <p>Eliminación de la DBO carbona(nitrificación)</p>   |

Revisión conceptual del Sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura de la UMSNH.

|   |   |  |
|---|---|--|
|   | Procesos de fangos activados con biofiltros.<br>Procesos de filtros percoladores y fangos activados en serie.   |  |
| <b>Procesos Anóxicos:</b>   |   |  |
| Cultivo de suspensión   | Desnitrificación con cultivos:<br>En suspensión   | Desnitrificación   |
| Cultivo fijo  | Desnitrificación de película fija   | Desnitrificación   |
| <b>Procesos Anaeróbios:</b>   |   |  |
| Cultivos de suspensión  | Digestión anaerobia:<br>Baja carga, una etapa<br>Alta carga, una etapa<br>Doble etapa<br><br>Proceso anaerobio de contacto<br><br>Manto de fango anaerobio de flujo: ascendente | Estabilización, eliminación de la DBO carbonosa<br><br>Eliminación de la DBO carbonosa<br><br>Eliminación de la DBO carbonosa                |
| Cultivo fijo  | Filtro anaerobio<br><br>Lecho expandido   | Eliminación de DBO carbonosa, estabilización de residuos (Desnitrificación)<br>Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de residuos   |
| Procesos anaerobios anóxicos o aerobios combinados<br>Cultivo de suspensión | Procesos de una o varias etapas, múltiples procesos patentados  | Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de residuos(Desnitrificación)<br>Eliminación de la DBO carbonosa, estabilización de residuos |
| <b>Procesos combinados</b>  |   |  |
| Cultivos fijo y en suspensión   | Procesos de una o varias etapas   | Eliminación de la DBO carbonosa, nitrificación, Desnitrificación, eliminación de fosforo   |
| <b>Procesos en estanques</b>  |   |  |

|  |                                     |   |
|--|-------------------------------------|---|
|  | Lagunas aerobias                    | Eliminación de la DBO carbonosa                             |
|  | Estanques de maduración(terciarias) | Eliminación de la DBO carbonosa(nitrificación)              |
|  | Estanques facultativos              | Eliminación de la DBO carbonosa                             |
|  | Estanques anaerobios                | Eliminación de la DBO carbonosa(estabilización de residuos) |

Fuente: Metcalf & Eddy, 1996

- **Sistemas aerobios.**

El aceptor final de electrones es el oxígeno. el principal tratamiento biológico con sistema aerobio son los lodos activados. En el libro de Jairo Alberto Romero Rojas "Tratamiento de aguas residuales" se define a los sistemas aerobios como: la vía energética que implica la utilización de oxígeno, el cual se nutre de las reservas de hidratos de carbono, grasas y proteínas para la degradación de la materia.

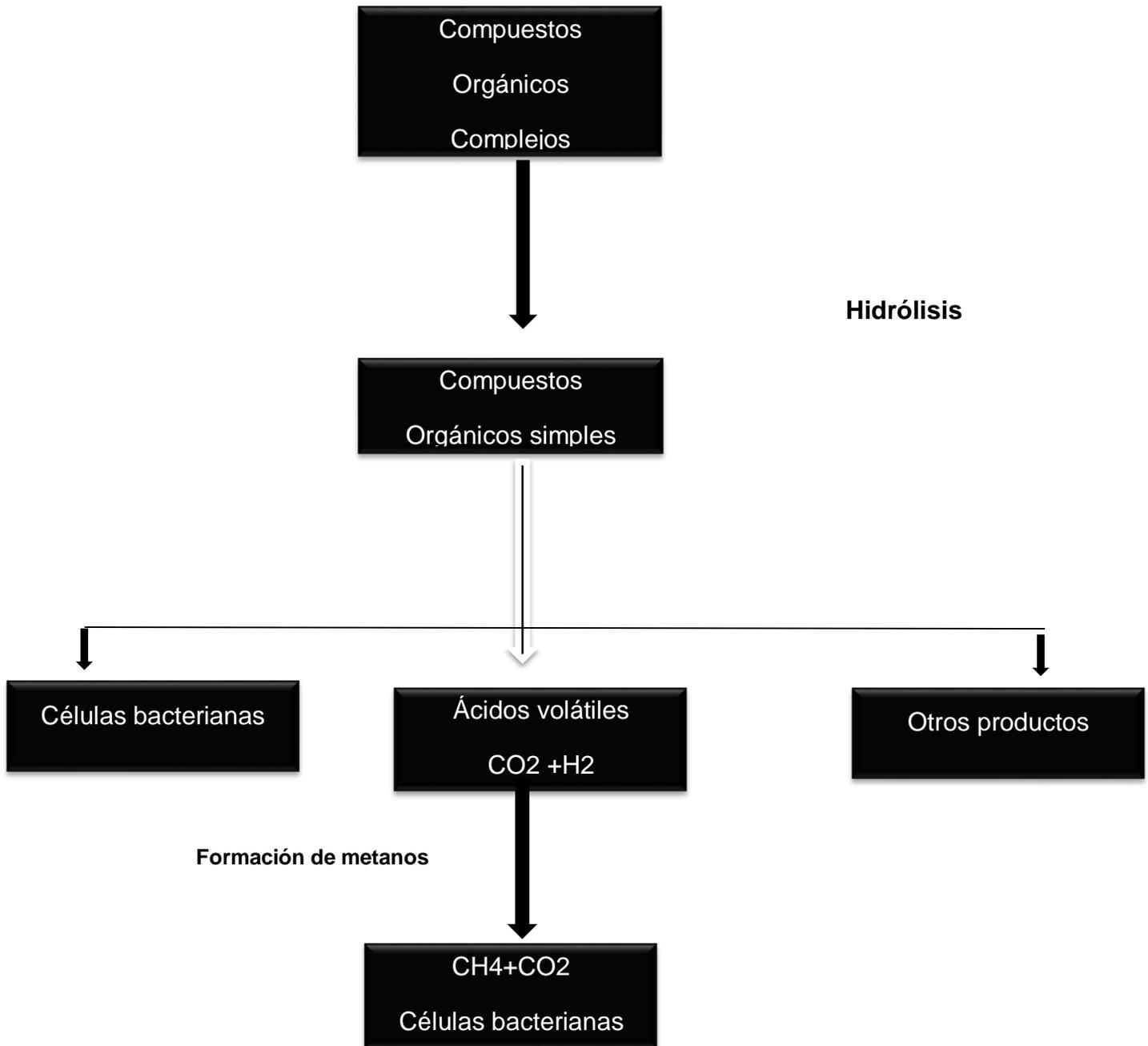
Como el catabolismo oxidativo requiere la presencia de un oxidante de la materia orgánica y normalmente este no está presente en las aguas residuales, él requiere ser introducido artificialmente. La forma más conveniente de introducir un oxidante es por la disolución del oxígeno de la atmósfera, utilizando la aireación mecánica, lo que implica altos costos operacionales del sistema de tratamiento. Adicionalmente, la mayor parte de la DQO de la materia orgánica es convertida en lodo, que cuenta con un alto contenido de material vivo que debe ser estabilizado.

- **Sistemas anaerobios.**

El aceptor final de electrones es la propia materia orgánica.

En su libro "Tratamiento de aguas residuales" Jairo Alberto Romero Rojas describe a este proceso como: un proceso de transformación y no de destrucción de la materia orgánica, como no hay presencia de un oxidante en el proceso, la capacidad de transferencia de electrones de la materia orgánica permanece intacta en el metano producido. En vista de que no hay oxidación, se tiene que la DQO teórica del metano equivale a la mayor parte de la DQO de la materia orgánica digerida (90 a 97%), una mínima parte de la DQO es convertida en lodo (3 a 10%). En las reacciones bioquímicas que ocurren en la digestión anaerobia, solo una pequeña parte de la energía libre es liberada, mientras que la mayor parte de esa energía permanece como energía química en el metano producido.

Aquí se muestra un esquema simplificado del proceso de degradación de la materia orgánica en un sistema anaerobio:



Fuente: CNA, 2020

Según Ramalho, 1996, las ventajas y desventajas de un sistema anaerobio contra un sistema aerobio son

- Ventajas.
  - 1) Ya que no se emplea equipo de aireación, se produce ahorro de coste de inmovilizado, así como de consumo energético en el tratamiento anaerobio.
  - 2) El coeficiente de producción de biomasa  $Y$  para los procesos anaerobios es mucho menor que para los sistemas aerobios. Esto significa que se produce menos biomasa por unidad de reducción de sustrato y en consecuencia se presentan ahorros considerables en los procesos de manejo y evacuación del exceso de lodo (purga). Esto significa también un menor requisito de nutrientes (nitrógeno y fósforo).
  - 3) En los procesos anaerobios es posible operar a cargas orgánicas del afluente superior que para el caso de los procesos aerobios. Este hecho resulta de la limitación de velocidad de la transferencia de oxígeno de los procesos aerobios.
  - 4) La producción de metano en los procesos anaerobios es una ventaja debido a su valor como combustible. Una parte sustancial de la necesidad energética de los procesos anaerobios puede obtenerse de los gases emitidos.
  
- Desventajas.
  - 1) Se necesitan mayores tiempos de residencia. En consecuencia, los costes de inversión en volumen de vasija son superiores en el tratamiento anaerobio.
  - 2) Los malos olores asociados a los procesos anaerobios, debido principalmente a la producción de  $H_2S$  y mercaptanos, fundamentalmente en zonas urbanas.
  - 3) Se necesitan mayores temperaturas para asegurar que los procesos anaerobios se producen a velocidades razonables. Normalmente, la temperatura de los procesos anaerobios está alrededor de los  $35^{\circ}C$ , lo que significa que puede necesitarse el precalentamiento de la alimentación o el calentamiento del reactor anaerobio. Sin embargo, este requisito energético puede no ser una desventaja seria, si una parte sustancial puede suministrarse a partir del gas metano producido.
  - 4) La sedimentación de la biomasa anaerobia en el clarificador secundario es más difícil que la decantación de la biomasa en el proceso de lodos activos. Esto significa que los costes de inversión para la clarificación son superiores. Sin embargo, si el agua residual a tratar en el proceso anaerobio contiene

una concentración elevada de sólidos en suspensión a los que pueda adherirse la biomasa, pueden conseguirse buenas condiciones de sedimentación en el clarificador secundario. Este es el caso de algunas aguas residuales industriales como las de las industrias de conservas de carne, mataderos, cerveza y conservas de pescado, a las que normalmente se aplica el tratamiento anaerobio.

- 5) La operación de las unidades anaerobias es más difícil que las aerobias, siendo el proceso más sensible a las cargas de choque.

Dentro de este tipo de sistemas, el tipo más utilizado es el reactor anaerobio de flujo ascendente con manto de lodos (RAFA).

- Sistemas anóxicos.

El aceptor final de electrones son los nitratos, sulfatos o hidrógeno principalmente (por ejemplo, en los procesos de eliminación biológica de nitratos).

### **3.2.1.- SISTEMAS AEROBIOS.**

#### ***3.2.1.1.- Lodos activados.***

El tratamiento biológico de lodos activados fue desarrollado en Inglaterra en el año de 1914 por Ardra y Lockett y su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia.

A pesar de ser un proceso biológico con altos costos sigue siendo muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales ya que es un proceso estable y con altas eficiencias de remoción de materia orgánica. En México, alrededor del 30% de las plantas utilizan este tipo de tratamiento biológico.

El procedimiento de este proceso inicia con el suministro de agua residual al reactor en el que se encuentra un cultivo de microorganismos, constituido principalmente por bacterias en suspensión, las cuales en su conjunto se les conoce como "licor mezclado". Las condiciones aerobias y la materia en suspensión se mantienen por el suministro de aire, que se realiza mediante de sistemas de difusión o de aeración mecánica. Después de un determinado tiempo de retención, el licor mezclado pasa a un tanque de sedimentación secundaria, donde se separa del agua tratada. Esta sale por la parte superior del tanque y los microorganismos y otros productos de la degradación se separan en forma de flóculos.

Debido a que este sistema produce grandes cantidades de biomasa, parte de ese lodo se tiene que desechar del sistema (llamado lodo residual) y tratarse para convertirlo en un residuo inocuo antes de su disposición final.

Existen muchas variantes de este proceso, pero en esencia todas contienen estos cinco elementos:

- 1) Tanque de aeración diseñado para un mezclado completo o para trabajar como flujo pistón.
- 2) Fuente de aeración que permite transferir el oxígeno y proporciona la mezcla que requiere el sistema. La fuente puede ser un soplador con difusores, aeración mecánica o a través de la inyección de oxígeno puro.
- 3) Sedimentador para separar los sólidos biológicos del agua tratada.
- 4) Sistema de tuberías y bomba para recircular los sólidos biológicos del sedimentador al reactor biológico, lo que se conoce como recirculación de lodos activados.
- 5) Tubería para desechar el exceso de lodos biológicos del sistema, lo que se conoce como purga de lodos.

El reactor es la parte fundamental de un sistema de lodos activados, su diseño y operación está en función de numerosas variables tales como la carga orgánica, la temperatura, la presencia de sustancias tóxicas e/o inhibitorias entre otros parámetros que deben tomarse en cuenta cuando se dimensiona el tanque de aeración.

1) Ventajas

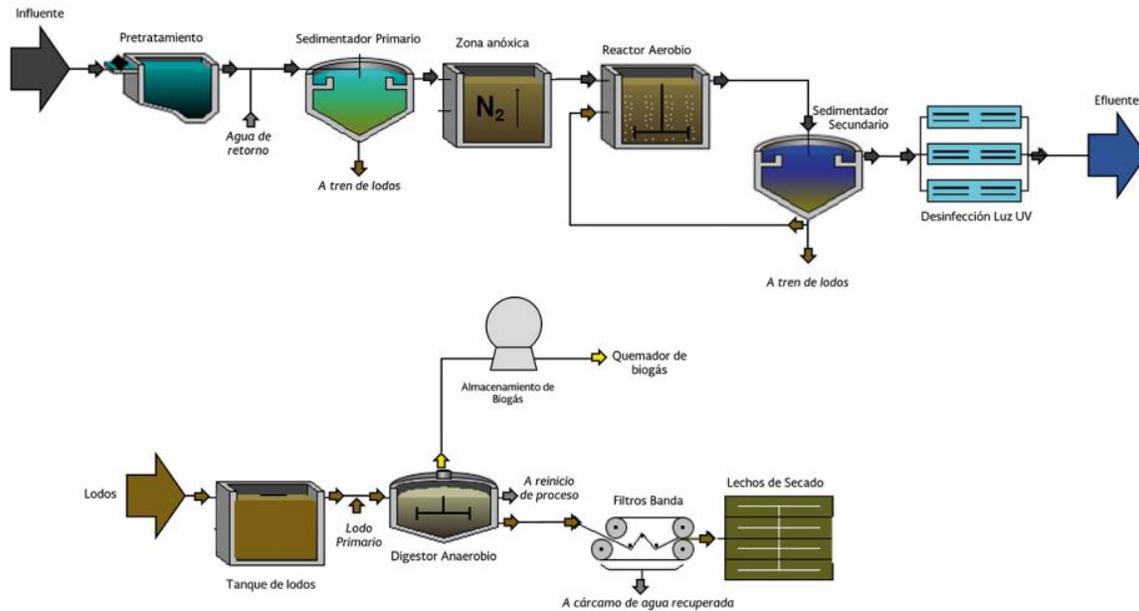
- a) Bajo costo de construcción.
- b) Área pequeña necesaria.
- c) Alta estabilización del lodo.
- d) No produce mal olor.
- e) Elimina un alto porcentaje de DBO5.

2) Desventajas

- a) Alto costo de operación y mantenimiento debido a que dependen de equipos mecánicos.
- b) La maquinaria empleada genera un alto consumo de energía.
- c) Depende de instrumentos especializados para llevar un correcto control del proceso.

Lodos activados

Estado: Jalisco  
Nombre PTAR: Ocotlán  
Capacidad instalada: 300 L/s



Fuente: CNA, 2020

Ilustración 13.- Esquema de una PTAR con lodos activados.

Revisión conceptual del Sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura de la UMSNH.

---



Fuente: CNA, 2020

Ilustración 14.- Imágenes de PTAR Ocotlán, Jal.

### ***3.2.1.2.- Zanjas de oxidación.***

Las zanjas de oxidación fueron inventadas en Holanda en el año de 1953 por Pasveer, como un proyecto para el Institute for Public Health Engineering (TNO) que tenía como intención brindar una variante de aereación extendida del sistema de lodos activados capaz de tratar el agua procedente de poblaciones pequeñas que deben cumplir con estándares de calidad estrictos. Sin embargo, en el continente americano se construyó la primera zanja hasta el año de 1961, en Brasil. En un inicio, la aplicación de esta alternativa quedaba limitada a volúmenes de agua residual de 1500 m<sup>3</sup> como máximo, cargas orgánicas de hasta 500 kg. DBO/Día y tirantes de 1.5 m. lo cual eran datos para una población aproximada de 10,000 habitantes. Pero con la aparición de aereadores de mayor diámetro, se permitió incrementar el tirante hasta 3 m para servir una población de 50,000 habitantes.

En el compendio de estadísticas ambientales 2009 (SEMARNAT) se define a las zanjas de oxidación como: Tipo particular de reactor, con forma de canales, en el que el proceso de depuración del agua ocurre mediante lodos activados. Los canales forman anillos u óvalos y la aireación se proporciona en algunos puntos a lo largo del reactor, en el que el agua circula a una velocidad de 0.25 a 0.35 m/s. Las aguas residuales pretratadas se alimentan a las zanjas, se airean y se circulan en los canales. Estas unidades tienen tiempos de retención prolongados, generalmente de 20 a 24 horas. Su eficiencia varía del 90 al 95%.

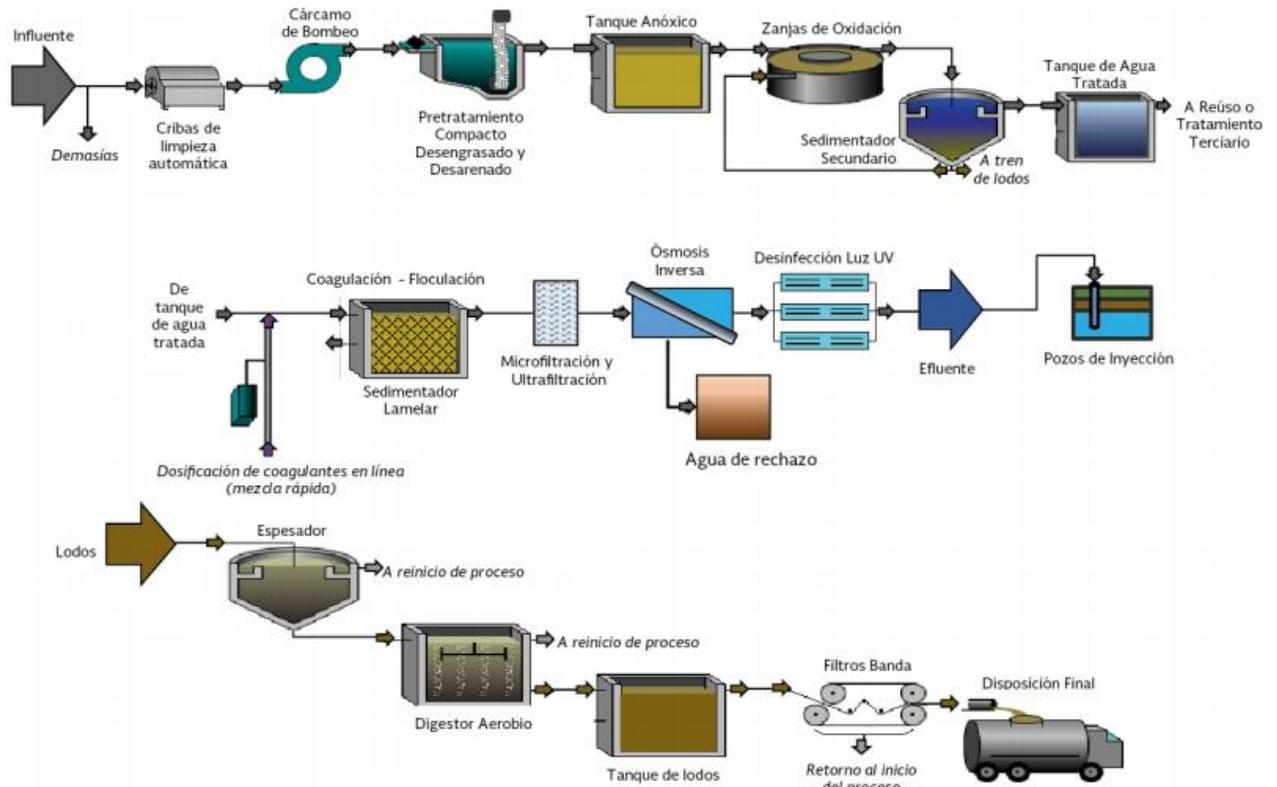
Las zanjas de oxidación ofrecen un alto desempeño a bajo costo en condiciones de climas templados, pero el proceso de nitrificación y desnitrificación es más eficiente a temperaturas mayores a 20°C.

En México, una de las principales aplicaciones de zanjas de oxidación, se da en el Lago de Chapala. Esta aplicación, en conjunto con el tratamiento de lodos activados, logra la remoción de entre el 90-98% del DBO<sub>5</sub> y entre el 70-90% de fosforo y nitrógeno.

A pesar de todo, las zanjas de oxidación tienen inconvenientes importantes tales como la dependencia de equipos mecánicos, el alto consumo de energía...

## Zanjas de oxidación

Estado: Aguascalientes  
Nombre PTAR: Villas de Nuestra Señora de la Asunción  
Capacidad instalada: 50 L/s



Fuente: CNA, 2020

Ilustración 15.- Esquema de una PTAR con zanjas de oxidación.

### ***3.2.1.3.- Discos biológicos rotativos (Biodiscos).***

Este proceso consta de una serie de discos montados sobre una flecha horizontal que gira. En cada giro la superficie de los discos, sobre la que se desarrolla la biopelícula, entra en contacto con el agua residual y con el aire. La película cuando se expone al aire, se oxigena, y al entrar en contacto con el agua residual pueden adsorber la materia orgánica; de esta forma se logra el tratamiento del agua. Los esfuerzos cortantes generados por la rotación del disco mantienen la película con un espesor casi constante, así, los excesos de biomasa se desprenden del disco, salen del reactor y se separan del agua residual en el sedimentador secundario.

Los discos se sumergen de tal forma que sólo 40% del área esté bajo el agua. Tienen bajo costo de consumo de energía y la simplicidad de operación y mantenimiento, ya que, al prescindir de la recirculación, se minimizan apreciablemente los costos de construcción, operación y mantenimiento. Las desventajas que tiene este sistema es que sus costos se comportan de manera casi lineal con respecto a los caudales de agua por tratar, lo cual no sucede en otros sistemas convencionales. Se debe hacer un diseño mecánico riguroso, pues se han registrado varios rompimientos y des-anclaje de la flecha que soporta a los discos.

La velocidad de rotación es generalmente de alrededor de 1 a 4 rpm y en la actualidad se emplea como una solución apropiada para la depuración de aguas residuales en pequeños núcleos de población; entre 2.000 y 5.000 habitantes equivalentes, ya que en depuradoras de tamaño grande (superiores a 30.000 habitantes equivalentes) los costes de construcción y de mantenimiento de estos equipos son altos y poco competitivos frente a otras opciones.

#### 1. Ventajas

- a. área pequeña necesaria para su funcionamiento.
- b. Bajo costo energético.
- c. Procedimiento silencioso.
- d. Ofrece un buen funcionamiento en climas frío.

#### 2. Desventajas

- a. Costo de construcción alto.
- b. Instalación especializada, lo que dificulta su construcción y su mantenimiento.
- c. Se debe monitorear constantemente.
- d. Exceso de grasas y sólidos en suspensión pueden ocasionar atascamiento del sistema.

Revisión conceptual del Sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura de la UMSNH.

---



Fuente: CNA, 2020

Ilustración 16.- Imágenes de PTAR Aguascalientes.

### ***3.2.1.4.- Filtros percoladores.***

El paso de las aguas residuales a través de medios porosos tiene sus antecedentes en las pruebas realizadas entre 1887 y 1890 en la Estación Experimental Lawrence en Massachusetts en las vegas del Río Merrimac. Para el tratamiento de las aguas, se utilizaron diez tanques circulares de madera de ciprés de 5.2 m de diámetro y 1.8 m de altura, llenos de varios materiales: arena, grava, turba, aluvión, tierra vegetal y arcilla. Los resultados de las pruebas mostraron que cuando se pasan aguas residuales a través de un lecho, la purificación de las aguas ocurre principalmente por oxidación biológica más que por el efecto mecánico de cribado.

En 1893, Joseph Corbett en Salford, Inglaterra, tomando como base los resultados en Lawrence, construyó el primer filtro percolador (FP), aplicando agua rociada sobre el medio en lugar de contenerla en el filtro.

El primer FP en los Estados Unidos fue construido en Madison, Wisconsin en 1901 con carácter experimental y la primera planta municipal que utilizó este procedimiento fue puesta en operación en 1908 en Columbus, Ohio. Hasta 1930 se utilizó el primer distribuidor rotatorio. En 1936, la recirculación fue empleada por primera vez en varias plantas de tratamiento. La primera ecuación de cinética biológica para predecir el funcionamiento de los filtros biológicos fue desarrollada en 1940 y en 1950 fueron utilizados por primera vez los medios plásticos. (MAPAS)

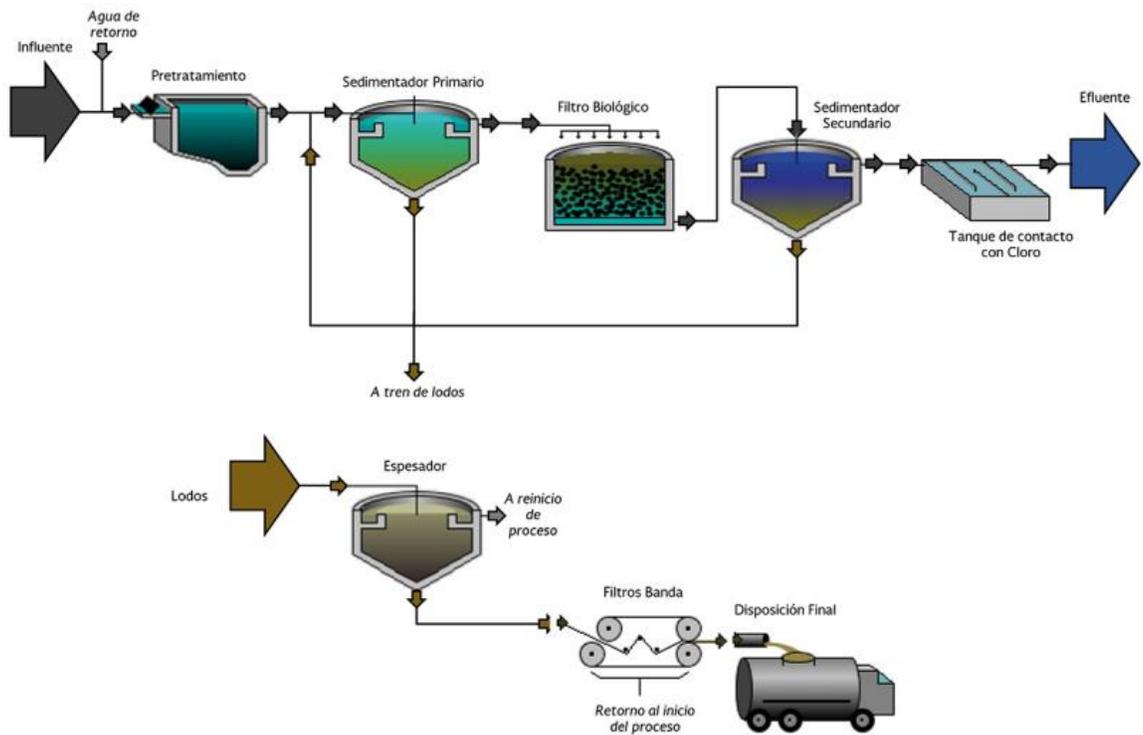
Los filtros percoladores se clasifican por su carga hidráulica o por su carga orgánica en:

- A. Carga baja (estándar): Los filtros de baja carga son de diseño simple con funcionamiento confiable, que producen un efluente de calidad consistente, a pesar de que el afluente tenga concentración variable.
- B. Carga intermedia: Al recircular el agua residual, se admiten cargas orgánicas mayores a las tratadas en filtros estándar, logrando la misma remoción, además previenen enlagueamientos y se disminuyen las molestias causadas por la generación de olores y la presencia de moscas.
- C. Carga alta: Prácticamente lo mismo que el filtro de carga intermedia, solo que admite una carga mayor.
- D. Carga súper alta: Aceptan cargas orgánicas e hidráulicas mayores que los tipos anteriores, debido principalmente a la mayor profundidad del medio de soporte. La gran altura es posible por el empleo de módulos de medios plásticos que son muy ligeros.
- E. De desbaste: Se utilizan para tratar altas cargas orgánicas, mayores de 1.6 kg/m<sup>3</sup>d y cargas hidráulicas hasta de 187 m<sup>3</sup> /m<sup>2</sup> d.

F. Por su número de unidades: Una sola etapa y de dos etapas (dos filtros conectados en serie): Se utilizan para tratar afluentes con altas cargas orgánicas o para conseguir la nitrificación. Puede diseñarse con o sin un sedimentador intermedio entre los filtros.

### Filtros biológicos

Estado: Morelos  
Nombre PTAR: Cuautla  
Capacidad instalada: 630 L/s



Fuente: CNA, 2020

Ilustración 17.- Esquema de una PTAR con filtros percoladores (biológicos).



Fuente: CNA, 2020

**Ilustración 18.- Imágenes de PTAR Cuautla, Morelos.**

### ***3.2.1.5.- Lagunas aerobias.***

Son el método más simple de tratamiento de aguas residuales ya que prácticamente es una presa generalmente con forma rectangular que fueron en realidad construidas para embalsar agua para riego y para la producción de algas. Su principal desventaja es que requieren grandes áreas por unidad de DBO5.

Debido a que depende solamente del entorno natural, su funcionamiento se ve afectado por la temperatura, irradiación solar y viento, principalmente. Existen dos tipos de lagunas aireadas:

- ✓ Lagunas aerobias de baja tasa: Tienen una profundidad de 0.9-1.2m y un tiempo de retención de 10-40 día y remociones entre el 80 y 95 % de la DBO soluble.
- ✓ Lagunas aerobias de alta tasa: Tienen una profundidad 0.3 a 0.45 m y un tiempo de retención es de 3 a 5 días y remociones entre el 80 y 95 % de la DBO soluble.

Revisión conceptual del Sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura de la UMSNH.

| RECOMENDACION DE DISEÑO                  | LAGUNAS AEROBIAS DE BAJA TASA | LAGUNAS AEROBIAS DE ALTA TASA |
|--|-------------------------------|-------------------------------|
| Tiempo de retención, d                   | 10 a 40                       | 4 a 6                         |
| Profundidad, m                           | 0.90 a 1.20                   | 0.30 a 0.45                   |
| Carga superficial <sup>b</sup> , kg/ha.d | 67 a 135                      | 90 a 180                      |
| Conversión de DBO <sub>5</sub> , %       | 80 a 95                       | 80 a 95                       |

Notas:

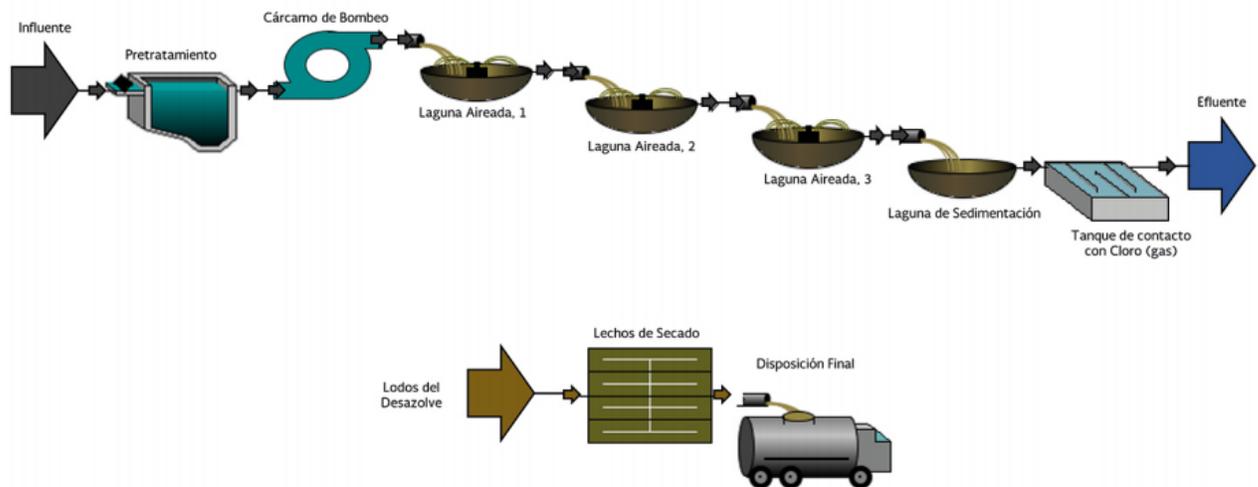
<sup>a</sup> Dependiendo de las condiciones climáticas.

<sup>b</sup> Valores típicos. Se han aplicado valores muy superiores en diferentes plantas.

Fuente: Metcalf & Eddy, 1991

### Lagunas aireadas

Estado: San Luis Potosí  
 Nombre PTAR: Norte Tangamanga II  
 Capacidad instalada: 400 L/s



Fuente: CNA, 2020

Ilustración 19.- Esquema de una PTAR con lagunas aerobias.



Fuente: CNA, 2020

**Ilustración 20.- Imágenes de PTAR Norte Tangamanga II, SLP.**

### **3.2.2.- SISTEMAS ANAEROBIOS.**

#### ***3.2.2.1.- Lagunas anaerobias.***

En el manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento de la CNA se describen a las lagunas anaerobias como: profundas y mantienen condiciones anóxicas y anaerobias en todo el espesor de la misma. Esto es parcialmente cierto ya que en un pequeño estrato superficial se encuentra oxígeno disuelto (menos de 50 cm) dependiendo de la acción del viento, la temperatura y la carga orgánica. En general, la zona superior tiene una influencia insignificante en la dinámica microbiana del medio acuático. Con el tiempo se forman natas por arriba del agua residual lo cual evita la presencia de las algas debido a la ausencia de luz solar e impide la difusión de oxígeno del aire.

Las lagunas anaerobias son poco empleadas debido a los problemas relacionados con el olor. A finales de 1940, Parker demostró que si no se excede una determinada carga orgánica los gases malolientes no son de consideración. (MAPAS, 2007)

Para mantener un funcionamiento anaerobio óptimo dentro de la laguna se deben dar las siguientes condiciones:

| <b>Variable</b>            | <b>Óptimo</b> | <b>Extremo</b> |
|----------------------------|---------------|----------------|
| <b>Temperatura</b>         | 30-35°C       | 15-40°C        |
| <b>pH</b>                  | 6.8-7.4       | 6.2-7.8        |
| <b>potencia redox (mV)</b> | -520-530      | -490- --- 550  |

**Fuente: Middlebrooks & cols, 1982**

#### **Conservación de calor**

**La temperatura se mantiene próxima a la de la alimentación**

**Ahorro de terreno**

**La superficie ocupada total desciende en un 40-50%**

**Menor arrastre de sólidos**

**Menor oxigenación**

**La interfase aire-agua es mucho más reducida**

**Mejor compactación de los fangos en el fondo**

**Menores costos de mantenimiento**

**Limpieza a intervalos de 3 a 6 años**

**Mayor flexibilidad de operaciones**

**Varios módulos que puedan operar o ponerse fuera de servicio en función de las necesidades de cada periodo**

Como su nombre indica, en las lagunas anaerobias se produce la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno. En estas condiciones, la estabilización tiene lugar mediante las etapas siguientes (Middlebrooks y col., 1982):

- Hidrólisis. Este término indica la conversión de compuestos orgánicos complejos e insolubles en otros compuestos más sencillos y solubles en agua. Esta etapa es fundamental para suministrar los compuestos orgánicos necesarios para la estabilización anaerobia en forma que puedan ser utilizados por las bacterias responsables de las dos etapas siguientes.
- Formación de ácidos. Los compuestos orgánicos sencillos generados en la etapa anterior son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos. Como resultado se produce su conversión en ácidos orgánicos volátiles, fundamentalmente en ácidos acético, propiónico y butírico. Esta etapa la pueden llevar a cabo bacterias anaerobias o facultativas. Hay una gran variedad de bacterias capaces de efectuar la etapa de formación de ácidos, y además esta conversión ocurre con gran rapidez. Dado que estos productos del metabolismo de las bacterias formadoras de ácido o acidogénicas están muy poco estabilizados en relación con los productos de partida, la reducción de DBO5 o DQO en esta etapa es pequeña.
- Formación de metano. En la figura 5.1. se recoge una representación secuencial de la digestión anaerobia de compuestos orgánicos. Una vez que se han formado estos ácidos orgánicos, una nueva categoría de bacterias entra en acción, y los utiliza para convertirlos finalmente en metano y dióxido de carbono. El metano es un gas combustible e inodoro, y el dióxido de carbono es un gas estable, que forma parte en poca cantidad de la composición normal de la atmósfera.

La liberación de estos gases es responsable de la aparición de burbujas, que son un síntoma de buen funcionamiento en las lagunas anaerobias. Esta fase de la depuración anaerobia es fundamental para conseguir la eliminación de materia orgánica, ya que los productos finales no contribuyen a la DBO5 o DQO del medio.

### ***3.2.2.2.- Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente con Manto de Lodos (UASB).***

es un proceso de tanque simple. Las aguas residuales entran en el reactor por el fondo, y fluyen hacia arriba. Una capa de lodo suspendida filtra las aguas residuales, tratándolas al ir atravesándola.

La capa de lodos está formada por gránulos (pequeñas agrupaciones) de microbios (0.5 a 2 mm de diámetro), microorganismos que por su propio peso se resisten a ser arrastrados por el flujo ascendente. Los microorganismos en la capa de lodos degradan los compuestos orgánicos. Como resultado se liberan gases (metano y bióxido de carbono). Las burbujas ascendentes mezclan los lodos sin necesidad de piezas mecánicas. Las paredes inclinadas vuelcan el material que alcanza la superficie del tanque. El efluente clarificado es extraído de la parte superior del tanque en un área por encima de las paredes inclinadas.

Después de varias semanas de uso, se forman gránulos más grandes de lodos que, a su vez, actúan como filtros de partículas más pequeñas al ir subiendo el efluente por la capa de lodos. Dado el régimen ascendente, los organismos que forman los gránulos son acumulados, mientras que los demás son arrastrados por el flujo.

El gas que asciende hacia la superficie es recolectado en un domo y puede ser usado como fuente de energía (biogás). Se debe mantener una velocidad ascendente de 0.6 a 0.9 m/h para mantener la capa de lodos en suspensión.

Un UASB no es apropiado para comunidades pequeñas o rurales sin fuentes constantes de agua o electricidad. Se requiere un operador capacitado para monitorear y reparar el reactor y la bomba en caso de problemas. Aunque la tecnología es de diseño y construcción simples, aún no está suficientemente probada para las aguas residuales domésticas, pero las investigaciones recientes son prometedoras.

El reactor UASB tiene el potencial de producir efluente de mayor calidad que las Fosas Sépticas (S9), y puede hacerlo con un reactor de menor volumen. Aunque es un proceso bien establecido para procesos de tratamiento de aguas residuales industriales a gran escala, su aplicación al drenaje doméstico aún es nueva.

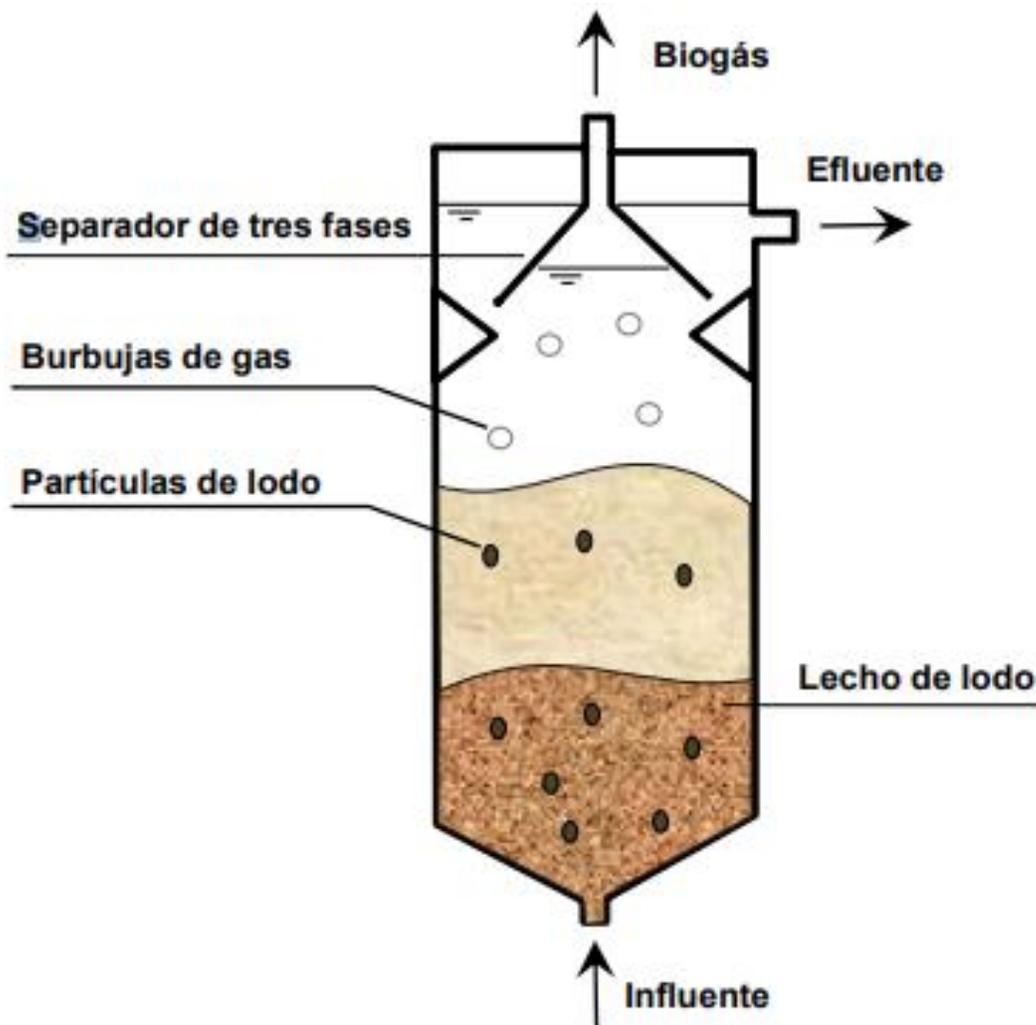
Como el proceso puede eliminar del 85 al 90% de la Demanda de química Oxígeno (DQO), se usa habitualmente para la fabricación de cerveza, destilación, elaboración de alimentos y desechos de pulpa y de papel. El reactor puede no funcionar bien donde el afluente tenga poca fuerza. La temperatura también afecta al rendimiento.

Los procesos anaeróbicos empleando reactores UASB presentan varias ventajas respecto a los procesos aeróbicos convencionales. En general, un reactor UASB presenta las siguientes características:

- ❖ Sistema compacto, con bajos requerimientos de espacio
- ❖ Bajos costes de construcción y operación
- ❖ Baja producción de lodos
- ❖ Bajo consumo energético (solamente para el bombeo del influente, si es necesario)
- ❖ Buenas eficacias de eliminación de materia orgánica, entre el 65 y 75%
- ❖ El lodo en exceso presenta una concentración elevada y buenas características de deshidratación. Aunque el reactor UASB presenta varias ventajas, todavía existen algunas desventajas y limitaciones:
- ❖ Tiempo necesario para la puesta en marcha del sistema elevado
- ❖ Necesidad de una etapa de post-tratamiento

La puesta en marcha del sistema puede ser lenta (entre 4 y 6 meses), pero solamente en situaciones donde no se lleve a cabo la inoculación con lodo anaerobio. En los últimos años, con el uso de metodologías basadas en una buena puesta en marcha y el establecimiento de rutinas de operación apropiadas, se han alcanzado significativos progresos en la reducción del tiempo de puesta en marcha de los sistemas y en la minimización de los problemas operacionales en esta fase. En situaciones donde se usaron pequeñas cantidades de lodo para la inoculación (menos del 4% del volumen del reactor), el periodo de puesta en marcha se redujo a 2 o 3 semanas. En algunos casos, la calidad de la biomasa que debe ser desarrollada en el sistema depende de una rutina de operación apropiada y, consecuentemente, de la estabilidad y eficacia del proceso de tratamiento. El diseño de los reactores UASB es muy simple y no necesita la instalación de ningún equipamiento sofisticado ni medio de relleno para la retención de la biomasa.

El reactor se inocula inicialmente con cantidad suficiente de lodo anaeróbico, y a continuación se comienza a alimentar a velocidades de carga baja, en flujo ascendente. Este periodo inicial se denomina puesta en marcha del sistema, siendo la fase más importante de la operación del reactor. La velocidad de carga del sistema debe aumentarse progresivamente, de acuerdo con una respuesta favorable del sistema. Tras varios meses de operación, un lecho de lodo altamente concentrado (40 a 100 g Sólidos Totales/L) es desarrollado cerca del fondo del reactor. El lodo es muy denso y tiene excelentes características de sedimentación. El desarrollo de lodo granular (diámetros en el rango de 1 a 5 mm) puede ocurrir, dependiendo de la naturaleza del lodo inoculado, de las características del agua residual y de las condiciones de operación del reactor.



Fuente: CNA, 2020

**Ilustración 21.- Vista transversal de un reactor anaerobio de flujo ascendente.**

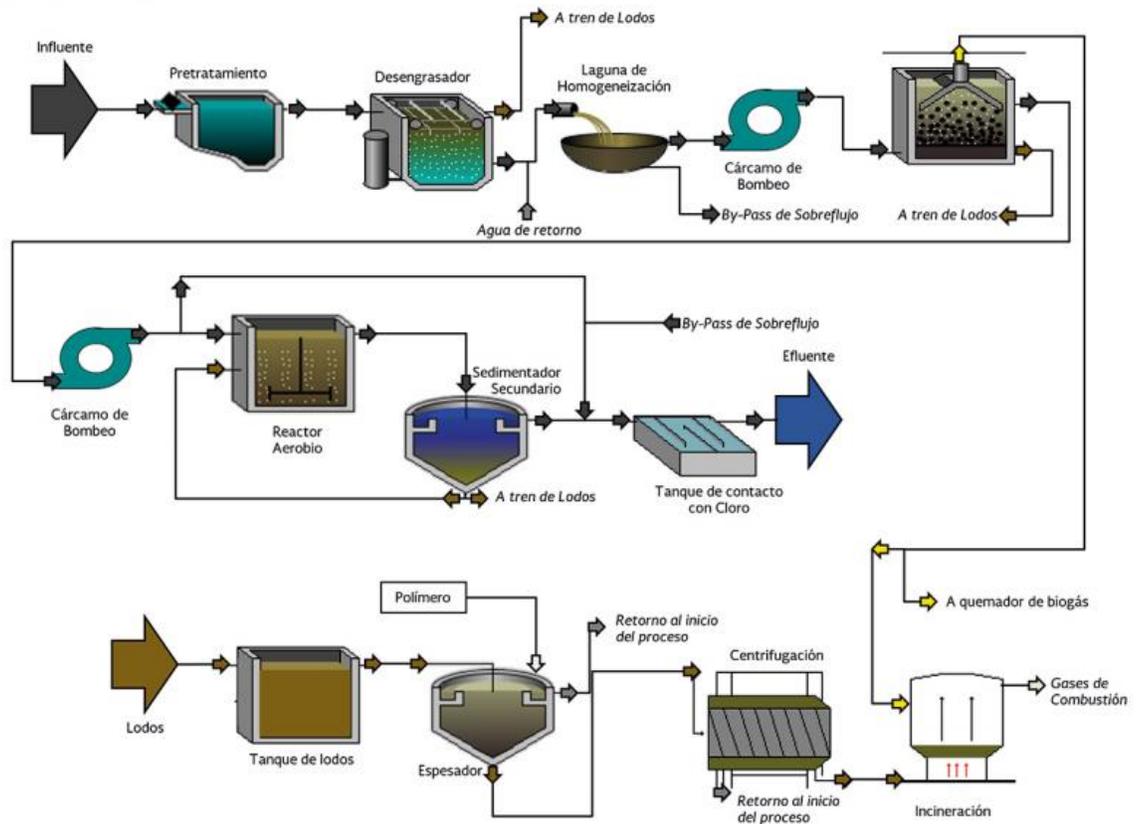
Un área de crecimiento bacteriano más disperso se desarrolla sobre el lecho de lodos, con sólidos que presentan una concentración y velocidades de sedimentación bajas. La concentración del lodo en esta área normalmente varía entre el 1 y el 3%. El sistema se encuentra en agitación debido al movimiento ascendente de las burbujas de biogás y al flujo de la alimentación (influente) a través del reactor. Durante la puesta en marcha del sistema, cuando la producción de biogás es normalmente baja, algunas formas de agitación adicional, como la recirculación de gas o el efluente, pueden ser necesarias. El sustrato se elimina a través del lecho de lodos, aunque esta eliminación es más pronunciada en la parte inferior del lecho de lodo. El lodo es arrastrado por el movimiento ascendente de las

burbujas de gas, siendo necesaria la instalación de un separador de tres fases (gas, sólido y líquido) en la parte superior del reactor, para permitir la retención y devolución del lodo. Alrededor y encima del separador de tres fases existe una zona para la sedimentación, donde el lodo más pesado se elimina de la masa de líquido y se devuelve al compartimento de digestión, mientras que las partículas más ligeras abandonan el sistema conjuntamente con el efluente final. La instalación del separador de gas, sólido y líquido garantiza la devolución del lodo y una alta capacidad de retención de grandes cantidades de biomasa altamente activa, sin necesidad de emplear ningún tipo de material de soporte. Como resultado, los reactores UASB presentan elevados tiempos de residencia de sólidos (edad del lodo), mucho más elevados que los tiempos de retención hidráulica, lo que es una característica de los sistemas anaerobios de alta velocidad de carga. La edad de los lodos en un reactor UASB normalmente supera los 30 días, permitiendo la estabilización del exceso de lodo eliminado del sistema.

| Ventajas   | Desventajas   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Alta reducción de la materia orgánica</li> <li>➤ Puede soportar un elevado índice de carga orgánica (hasta 10 kg de DBO/m<sup>3</sup>/d) y de carga hidráulica.</li> <li>➤ Baja producción de lodos (por lo tanto, desazolve poco frecuente)</li> <li>➤ Se puede usar el biogás como fuente de energía (pero primero es necesario limpiarlo)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Es difícil mantener las condiciones hidráulicas adecuadas (se debe equilibrar el flujo ascendente y el índice de sedimentación)</li> <li>➤ Tiempo de arranque prolongado</li> <li>➤ El tratamiento puede ser inestable con cargas hidráulicas y orgánica variables</li> <li>➤ Se requiere una fuente constante de electricidad</li> <li>➤ No todas las piezas y materiales pueden estar disponibles localmente</li> <li>➤ Es necesario que expertos se encarguen del diseño y la supervisión de la construcción</li> </ul> |

### Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)

Estado: Veracruz  
Nombre PTAR: FIRIOB  
Capacidad instalada: 1 250 L/s



Fuente: CNA, 2020

Ilustración 22.- Esquema de una PTAR con UASB.



Pretratamiento



Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

**Ilustración 23.- Imágenes de PTAR FIRIOB, Ver.**

**3.2.2.3.- Tanque Imhoff.**

El tanque Imhoff es una unidad de tratamiento primario con la finalidad de remoción de sólidos suspendidos los tanques Imhoff tienen una operación muy simple y no se requiere de partes mecánicas, para su uso concreto es necesario que las aguas residuales pasen por los procesos de tratamiento preliminar de cribado y de remoción de arenas.

¿Cómo funciona?

El material sedimentable va depositándose en el fondo del sedimentador desde donde pasa, a través de su abertura inferior, hacia el digestor anaeróbico, donde se produce su estabilización o mineralización.

Una vez mineralizados, los lodos se disponen en lechos de secado hasta alcanzar una humedad manejable que permita su aprovechamiento o disposición final.

Las aguas resultantes son devueltas al sistema de tratamiento o, en su defecto, introducidas en el subsuelo, evaporadas o tratadas en pequeñas lagunas de estabilización.

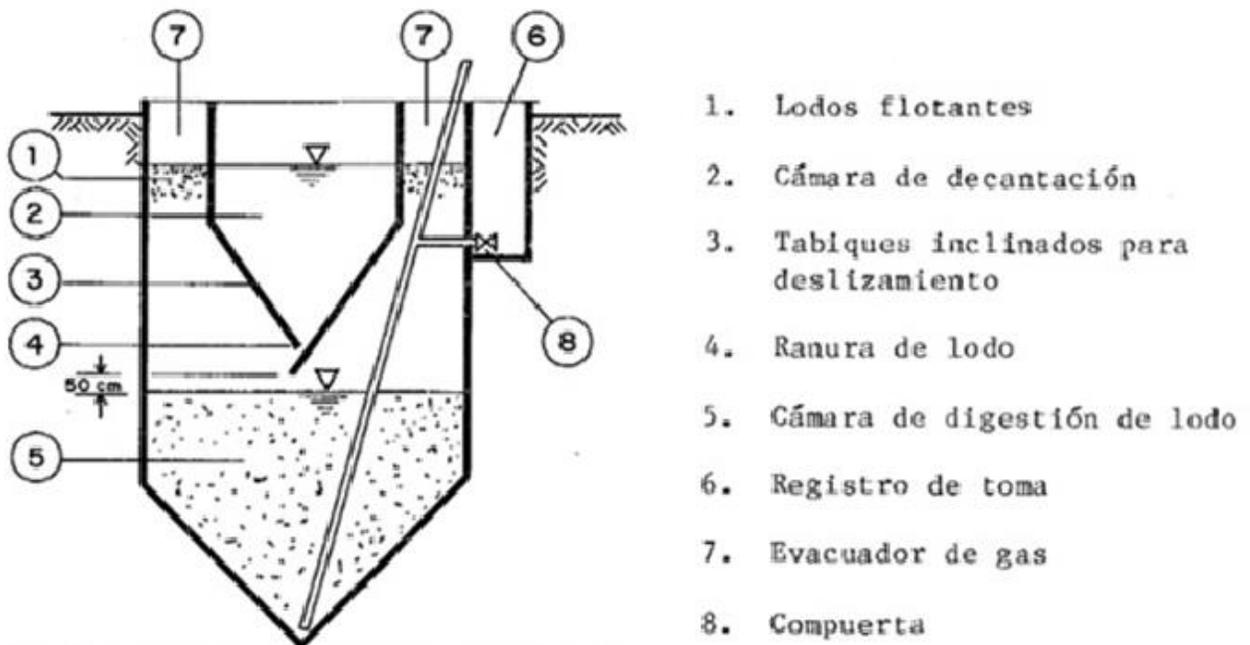
Los tanques Imhoff, conocidos también como tanques de doble cámara, son unidades de tratamiento primario, lo que significa que se utilizan como etapa previa a otros sistemas de depuración, es decir, debe complementarse con un tratamiento secundario de tipo convencional.

Quienes a pesar de sus carencias siguen apostando por este sistema, consideran que ofrece algunas ventajas para la depuración de las aguas negras de comunidades inferiores a 500 habitantes, que disponen de sistema de alcantarillado.

El tanque Imhoff típico es de forma rectangular y se divide en tres compartimientos:

1. Cámara de sedimentación.
2. Cámara de digestión de lodos.
3. Área de ventilación y acumulación de natas.

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



Fuente: [aguasresiduales.info](http://aguasresiduales.info), 2020

Ilustración 24.- Esquema de un tanque Imhoff.

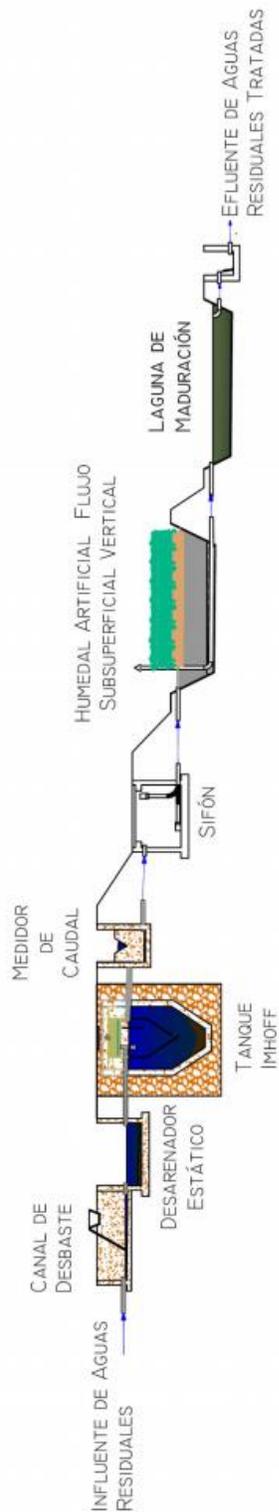
### **VENTAJAS**

- ✚ Contribuye a la digestión del lodo, mejor que un tanque séptico, produciendo un líquido residual de mejores características.
- ✚ No descargan lodo en el líquido efluente
- ✚ El lodo se seca y se evacua con más facilidad que el procedente de los tanques sépticos, esto se debe a que contiene de 90 a 95% de humedad.
- ✚ Las aguas servidas que se introducen en los tanques Imhoff, no necesitan tratamiento preliminar, salvo el paso por una criba gruesa y la separación de las arenas.
- ✚ El tiempo de retención de estas unidades es menor en comparación con las lagunas.
- ✚ Tiene un bajo costo de construcción y operación.
- ✚ Para su construcción se necesita poco terreno en comparación con las lagunas de estabilización.
- ✚ Son adecuados para ciudades pequeñas y para comunidades donde no se necesite una atención constante y cuidadosa, y el efluente satisfaga ciertos requisitos para evitar la contaminación de las corrientes
- ✚

### **DESVENTAJAS**

- ✚ Son estructuras profundas. (> 6m).
- ✚ Es difícil su construcción en arena fluida o en roca y deben tomarse precauciones cuando el nivel freático sea alto, para evitar que el tanque pueda flotar o ser desplazado cuando este vacío.
- ✚ El efluente que sale del tanque es de mala calidad orgánica y microbiológica.
- ✚ En ocasiones puede causar malos olores, aun cuando su funcionamiento sea correcto.

El tanque Imhoff elimina del 40 al 50% de sólidos suspendidos y reduce el DBO en un 25 a 35%. Los lodos acumulados en el digestor del tanque Imhoff se extraen periódicamente se conducen a lechos secados Debido a esta baja remoción de DBO y coliformes, lo que se recomendaría es enviar el efluente hacia una laguna facultativa para que haya una buena remoción de microorganismos en el efluente.



Fuente: Ortega de Miguel, 2020

Ilustración 25.- Esquema de una PTAR con tanque Imhoff.

### 3.3.- Desinfección.

La desinfección consiste en la destrucción selectiva de los organismos que causan enfermedades. Hay tres categorías de organismos entéricos de origen humano las bacterias, los virus y los quistes amebianos. El concepto de desinfección es diferente de esterilización, en él se eliminan todos los microorganismos es decir se busca una eliminación del 100% de los organismos. (Tejero S. T., 1992)

La acción de los desinfectantes se puede explicar mediante 4 mecanismos:

- ❖ Daño a la pared celular.
- ❖ Alteración de la permeabilidad de las células.
- ❖ Alteración de la naturaleza coloidal del protoplasma.
- ❖ Inhibición de la actividad enzimática.

Este proceso es el proceso final del tratamiento del agua y aunque la desinfección con cloro (cloración) es el método más común, existen otros métodos de desinfección.

Para elegir un método de todos estos, es necesario determinar cuál de ellos eliminara la mayor cantidad y variedad de microorganismos que habitan en el agua sin provocar toxicidad ni afectar la calidad química del agua brindando el menor costo. Algunos parámetros para encontrar ese agente desinfectante son:

- ✚ Eliminación de todas las clases de agentes patógenos y en cantidad suficiente.
- ✚ No ser tóxico para el hombre ni animales domésticos.
- ✚ No tener un sabor desagradable.
- ✚ Tener un costo razonable.
- ✚ Ser de manejo, transporte y almacenamiento accesible y seguro.
- ✚ Contrarrestar la posible contaminación en líneas de conducción y tanques de almacenamiento en el caso de agua potable.
- ✚ No reaccionar con los compuestos presentes en el agua para producir sustancias tóxicas.

**Tabla 10.- Comparación de métodos de desinfección.**

| Característica                        | Cloro                  | Hipoclorito de sodio  | Hipoclorito de calcio | Ozono                    | UV                       |
|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| Toxicidad a microorganismos           | Alta                   | Alta                  | Alta                  | Alta                     | Alta                     |
| Solubilidad                           | Ligera                 | Alta                  | Alta                  | Alta                     | N.A.                     |
| Estabilidad                           | Estable                | Ligeramente estable   | Relativamente estable | Inestable                | generarse al usarse      |
| Toxicidad a formas de vida superiores | Alta                   | Alta                  | Tóxico                | Tóxico                   | Tóxico                   |
| Homogeneidad                          | Homogéneo              | Homogéneo             | Homogéneo             | Homogéneo                | Homogéneo                |
| Interacción con materia extraña       | Oxida materia orgánica | Oxidante activo       | Oxidante activo       | Oxida materia orgánica   | Moderada                 |
| Toxicidad a temperatura ambiente      | Alta                   | Alta                  | Alta                  | Alta                     | Alta                     |
| Penetración                           | Alta                   | Alta                  | Alta                  | Alta                     | Moderada                 |
| Corrosión                             | Altamente corrosivo    | Corrosivo             | Corrosivo             | Altamente corrosivo      | N.A.                     |
| Capacidad desodorizante               | Alta                   | Moderada              | Moderada              | Alta                     | Ninguna                  |
| Disponibilidad                        | Bajo costo             | Costo bajo a moderado | Costo bajo a moderado | Costo de moderado a alto | Costo de moderado a alto |

Fuente: Metcalf & Eddy, 1991

### **3.3.1.- Desinfección con métodos físicos.**

Lo que caracteriza a los métodos físicos es que reducen la concentración de microorganismos por daño en la pared celular o alteración en su fisiología, causándoles la muerte. (MAPAS, 2020)

#### ***3.3.1.1.- Filtración.***

Es prácticamente el mismo tipo de proceso que se describió en el tratamiento. Para remoción de microorganismos se utilizan más las membranas, donde destaca la nanofiltración.

#### ***3.3.1.2.- Temperatura.***

Este es un método muy efectivo cuando se busca desinfectar un volumen pequeño de agua, debido a que se tiene que hervir todo el líquido de uno a tres minutos.

#### ***3.3.1.3.- Radiación UV.***

Los efectos germicidas provienen de la luz ultravioleta la cual daña al ácido ribonucleico (ARN) y al ácido desoxirribonucleico (ADN). Tiene dos principales inconvenientes:

- Puede haber fotoreactivación, esto es, que la célula sane y como no hay un efecto desinfectante residual puede haber recrecimiento.
- Es eficiente para aguas claras, pero para aguas turbias su efectividad decrece notoriamente, por lo que antes de este proceso, se necesita otro proceso como filtración.

Como ventajas presenta mayor efectividad a comparación del cloro en la inactivación de virus, esporas y quistes; así mismo, no incrementa la concentración de sólidos disueltos y es más segura pues elimina la necesidad de almacenamiento de químicos peligrosos.

como desventajas se enlistan que no presenta un efecto residual, genera un mayor consumo de energía y reduce su efectividad debido a los contaminantes disueltos presentes en el agua, los cuales afectan la absorbancia y atenúan el efecto de la radiación.



Fuente: Xylem España, 2020

**Ilustración 26.- Desinfección con luz UV.**

***3.3.1.4.- Radiación Gamma.***

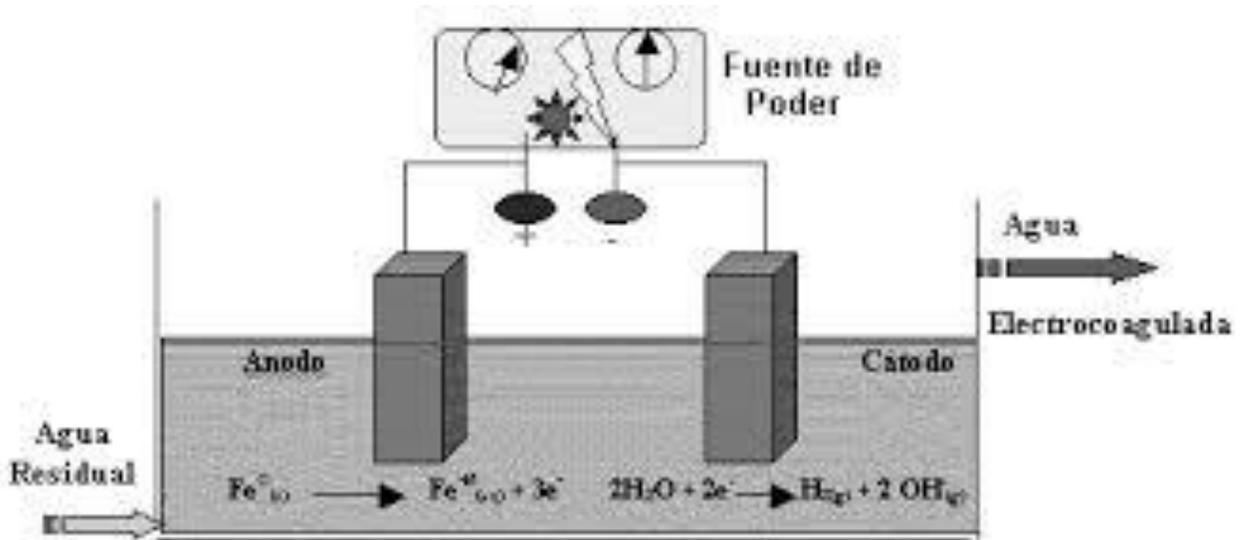
Entre las distintas formas de radiación electromagnética se han utilizado, debido a su poder de penetración, los rayos gamma para desinfectar el agua residual, y pueden ocasionar efectos beneficiosos adicionales en tratamientos terciarios, por alterar las moléculas orgánicas e inorgánicas. La fuente idónea es el Cobalto-60. Debido al alto coste de la energía de radiación. El costo de producción, así como la seguridad de su manejo son una fuerte limitación (Cáceres, 1990).

***3.3.1.5.- Procesos electrolíticos.***

Consisten en hacer pasar el agua a través de cámaras equipadas con electrodos, a los cuales se les aplica una corriente eléctrica. Bajo ciertas condiciones, reduce simultáneamente sólidos suspendidos y microorganismos presentes, incluyendo virus (Wolfgang, 1985). El consumo energético es de aproximadamente 4.5 W/h por cada litro de agua tratada (Caceres, 1990).

Es una técnica electroquímica de tratamiento de aguas donde se genera hipoclorito de sodio in situ, mediante electrólisis de cloruro de sodio (Hinkebeint T. 2005). Para

que el proceso tenga lugar se puede aplicar de dos formas; añadiendo cloruro de sodio al agua a tratar o usando agua de mar.



Fuente: Redalyc, 2020

Ilustración 27.- Desinfección con electrodos.

### 3.3.2.- Desinfección con métodos químicos.

Aquí es donde se utilizan agentes oxidantes. El proceso de esta acción es que el agente penetra la pared celular de los microorganismos y después reacciona con las enzimas paralizando el metabolismo de la glucosa y provocando con ello la muerte del organismo. (MAPAS, 2020)

#### 3.3.2.1.- Cloro.

Es el método más utilizado para desinfección. El proceso consiste en adicionar cloro al agua residual para formar el ácido hipocloroso (HClO) y ácido clorhídrico (HCl). Generalmente se requiere un tiempo de contacto de 15 a 30 minutos para flujos pico. Se puede utilizar cloro en líquido, gas o en alguno de sus derivados:

- ✚ Hipoclorito de sodio: Se presenta en estado líquido color amarillo verdoso y se produce al disolver cloro gaseoso en hidróxido de sodio.
- ✚ Hipoclorito de calcio: Su forma es sólida en forma granular de color blanco o en tabletas. Se obtiene al disolver cloro gaseoso en una solución de óxido de calcio (CaO) e hidróxido de sodio (NaOH).



Fuente: GTM, 2020

**Ilustración 28.- Desinfección con cloro (gas).**

### **3.3.2.2.- Ozono.**

El ozono es un agente efectivo en la desactivación de bacterias, virus y protozoos. Es un compuesto el cual se obtiene cuando una molécula de oxígeno ( $O_2$ ) choca con otra molécula de oxígeno formando un gas inestable de color azul y olor característico. Es uno de los oxidantes más fuertes que se utilizan como desinfectante. El ozono actúa para oxidar químicamente materiales encontrados en el agua residual, pudiendo reducir la DBO y DQO, y formando orgánicos oxigenados intermedios y productos finales, así que aparte de desactivar microorganismos también reduce el contenido de DBO y DQO.

El tratamiento con ozono reduce el color y olor del agua residual. El ozono es inestable y se descompone a oxígeno elemental en un período de tiempo relativamente corto (su vida media es de aproximadamente 20 minutos), por lo que debe ser producido en el sitio de desinfección.



Fuente: Dimasplus, 2020

**Ilustración 29.- Desinfección con ozono.**

# **CAPÍTULO 4.- EFICIENCIA DEL TREN DE TRATAMIENTO**



## 4.- Eficiencia del tren de tratamiento.

El tren de tratamiento utilizado para tratar el agua en esta planta de tratamiento de aguas residuales consta de un pretratamiento donde se utilizan técnicas a base de procesos físicos, después se tiene un tratamiento primario consistiendo en procesos biológicos. Posteriormente se utilizan nuevamente procesos físicos y para finalizar, se utiliza un proceso químico desinfectante.

Para dar inicio con los cálculos, se comienza por saber el gasto entrante a la planta de tratamiento producto de 2 baños para hombres y 2 para mujeres. En el primer baño de hombres se cuenta con 4 W.C. 7 mingitorios, 4 lavamanos y 1 regadera. El segundo baño de hombres cuenta con 3 W.C. y 2 lavamanos. El primer baño de mujeres cuenta con 12 W.C. 7 lavamanos y 1 regadera. El segundo cuenta con 3 W.C. y 2 lavamanos.

### Zona I (Primer baño de hombres)

| Servicio          | Grupos de muebles    | Qi (l/s) | Qt (l/s) | % Simultaneidad | Qr (l/s) | Num de muebles | Unidad Mueble | UM real |
|-------------------|----------------------|----------|----------|-----------------|----------|----------------|---------------|---------|
| Sanit. Caballeros | Para 4 inodoros      | 0.2      | 0.8      | 25%             | 0.20     | 4              | 6             | 24      |
| Sanit. Caballeros | Para 7 mingitorios   | 0.2      | 1.4      | 43%             | 0.60     | 7              | 5             | 35      |
| Sanit. Caballeros | Para 4 lavamanos     | 0.2      | 0.8      | 50%             | 0.40     | 4              | 2             | 8       |
| Sanit. Caballeros | Para 1 regadera      | 0.2      | 0.2      | 100%            | 0.20     | 1              | 4             | 4       |
| Sanit. Caballeros | Para 4I, 7M, 4L Y 1R |          |          |                 | 1.40     | 16             | 17            | 71      |

**Total Zona I = 1.40**

### Zona II (Segundo baño de hombres)

| Servicio          | Grupos de muebles | Qi (l/s) | Qt (l/s) | % Simultaneidad | Qr (l/s) | Num de muebles | Unidad Mueble | UM real |
|-------------------|-------------------|----------|----------|-----------------|----------|----------------|---------------|---------|
| Sanit. Caballeros | Para 3 inodoros   | 0.2      | 0.6      | 33%             | 0.20     | 3              | 6             | 18      |
| Sanit. Caballeros | Para 2 lavamanos  | 0.2      | 0.4      | 50%             | 0.20     | 2              | 2             | 4       |
| Sanit. Caballeros | Para 3I Y 2L      |          |          |                 | 0.40     | 5              | 8             | 22      |

**Total Zona II = 0.40**

Revisión conceptual del Sistema de tratamiento de aguas residuales del Centro de Información, Arte y Cultura de la UMSNH.

| <b>Zona III (Primer baño de mujeres)</b> |                   |          |          |                 |          |                |                 |            |
|--|-------------------|----------|----------|-----------------|----------|----------------|-----------------|------------|
| Servicio                                 | Grupos de muebles | Qi (l/s) | Qt (l/s) | % Simultaneidad | Qr (l/s) | Num de muebles | Unidad Mueble   | UM real    |
| Sanit. Mujeres                           | Para 12 inodoros  | 0.2      | 2.4      | 58%             | 1.40     | 12             | 6               | 72         |
| Sanit. Mujeres                           | Para 7 lavamanos  | 0.2      | 1.4      | 57%             | 0.80     | 7              | 2               | 14         |
| Sanit. Mujeres                           | Para 1 regadera   | 0.2      | 0.2      | 100%            | 0.20     | 1              | 4               | 4          |
| Sanit. Mujeres                           | Para 12I, 7L Y 1R |          |          |                 | 2.40     | 20             | 12              | 90         |
| <b>Total Zona III</b>                    |                   |          |          |                 | <b>=</b> |                |                 |            |
| <b>Zona IV (Segundo baño de mujeres)</b> |                   |          |          |                 | <b>=</b> | <b>2.40</b>    |                 |            |
| Servicio                                 | Grupos de muebles | Qi (l/s) | Qt (l/s) | % Simultaneidad | Qr (l/s) | Num de muebles | Unidad Mueble   | UM real    |
| Sanit. Mujeres                           | Para 3 inodoros   | 0.2      | 0.6      | 33%             | 0.20     | 3              | 6               | 18         |
| Sanit. Mujeres                           | Para 2 lavamanos  | 0.2      | 0.4      | 50%             | 0.20     | 2              | 2               | 4          |
| Sanit. Mujeres                           | Para 3I Y 2L      |          |          |                 | 0.40     | 5              | 8               | 22         |
| <b>Total Zona IV</b>                     |                   |          |          |                 | <b>=</b> |                | <b>UM total</b> | <b>205</b> |
|  |                   |          |          |                 | <b>=</b> | <b>0.40</b>    |                 |            |

Aquí podemos darnos cuenta que la totalidad de los muebles que requieren gasto son 46, dando una suma de unidades mueble de 205.

Para Calcular el coef. de simultaneidad K:

$$K = \frac{1}{\sqrt{x-1}}$$

|                |             |
|----------------|-------------|
| # muebles (x)= | 46          |
| K=             | 0.149071198 |

$Q_{teórico} = 4.60$

$Q_{efect} = Q_m = \sum q \times K$

$K = 0.2$

$Q_{efectivo} = 0.92$

$Q_{efect} = Q_{med}$

$Q_{min} = \frac{Q_{med}}{2}$

$Q_{maxinst} = H * Q_{med}$

$H = 3.8$

Al hacer los cálculos de las fórmulas anteriores, nos encontramos con los siguientes resultados:

|                  |      |
|------------------|------|
| $Q_{min} =$      | 0.46 |
| $Q_{med} =$      | 0.92 |
| $Q_{max inst} =$ | 3.50 |

*Unidades en litros por segundo*

## 4.1.- Pretratamiento.

Aquí es donde se aplican métodos físicos para comenzar a remover contaminantes que se encuentran en el agua a tratar.



Fuente: Propia, 2020

### Ilustración 30.- Pretratamiento existente en la planta.

Para iniciar con el pretratamiento, se calcula en primera instancia el canal de aproximación. El canal tiene paredes y fondo hechas con concreto. Su ancho es de 61 cm.

| Datos                 |         |         |                     |
|-----------------------|---------|---------|---------------------|
| $Q_{med} =$           | 0.00092 | $m^3/s$ | $V_{rec} =$ 0.3 m/s |
| $Q_{min} =$           | 0.00046 | $m^3/s$ | $n =$ 0.013         |
| $Q_{max}$<br>$inst =$ | 0.00350 | $m^3/s$ | $T =$ 0.57 m        |
|                       |         |         | $b_{ca} =$ 0.61 m   |

### 4.1.1.- Canal de aproximación.

En este caso, esta parte del pretratamiento consta de dos partes: una llamada canal de aproximación, y la otra llamada zona de transición. El canal de aproximación tiene dimensiones de 69 cm de largo y 61 cm de ancho. La zona de transición tiene un ancho de 61 cm y una longitud horizontal de 46.8 cm con una inclinación de 20° con respecto al canal de aproximación.

$$A_{ca} = 0.002 \text{ m}^2 \quad A_{ca} = \frac{Q_{min}}{V_{rec}} \quad y_{min} = \frac{A_{ca}}{b_{ca}}$$

$$y_{min} = 0.00 \text{ m}$$

$$A_{ca} = 0.002 \text{ m}^2 \quad P_m = b_{ca} + 2y_{min}$$

$$P_m = 0.615027322 \text{ m} \quad Rh = \frac{A_{ca}}{P_m}$$

$$Rh = 0.002493114 \text{ m}$$

$$Rh^{2/3} = 0.018386318$$

$$S_{min} = 44.9925 \text{ milésimas}$$

$$S_{min} = \left( \frac{V_{rec} * n}{Rh^{2/3}} \right)^2$$

Para el Gasto Máximo Instantáneo, el valor de  $y_{max}$  con  $S_{min}$  sera:

$$Q_{max\ inst} = [b_{ca} * y_{max}] \left[ \frac{1}{n} \sqrt{S_{min}} \left( \frac{b_{ca} * y_{max}}{2y_{max} + b_{ca}} \right)^{2/3} \right]$$

$$Q_{max\ inst} = 0.003496 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$y_{max} = 0.052 \text{ m}$$

Los cálculos de esta parte del pretratamiento arrojan una pendiente mínima de 45 milésimas de metro y un tirante máximo de 0.052 m, lo cual indica que el canal de aproximación esta sobredimensionado.

### 4.1.2.- Canal desarenador doble.

En esta parte, cada canal tiene una longitud de 2.10 m y un ancho de 42 cm. Los canales desarenadores están separados por una pared delgada de concreto, de 12 cm de ancho.

La longitud del canal se regirá por la profundidad requerida por la velocidad de sedimentación y la sección de control y el área de la sección transversal se regirá por la tasa de flujo y por el número de canales. Están diseñados para eliminar nominalmente 95 por ciento de las partículas de 0.15 mm de diámetro (malla 100) con el flujo máximo. La arena en el agua residual tiene una gravedad específica entre 1.5 y 2.7, mientras que la correspondiente a la materia orgánica es de 1.02.

### Calculando la base (bcd) del canal desarenador

$$b_{cd} = \frac{Q_{\max inst}}{V_{rec} * y_{\max}}$$

|                         |          |                                    |
|-------------------------|----------|------------------------------------|
| b <sub>cd</sub> =       |          | Base del canal desarenador (m)     |
| Q <sub>max inst</sub> = | 0.003496 | Gasto max inst (m <sup>3</sup> /s) |
| y <sub>max</sub> =      | 0.052    | Tirante max (m)                    |
| V <sub>rec</sub> =      | 0.3      | Velocidad de recorrido (m/s)       |
| b <sub>cd</sub> =       | 0.22     | m                                  |

### Calculando la longitud (Lcd) del canal desarenador

$$L_{cd} = \frac{V_{rec} * y_{\max}}{V_p}$$

|                    |           |  |
|--------------------|-----------|--|
| L <sub>cd</sub> =  |           | Longitud del canal desarenador (m)                 |
| y <sub>max</sub> = | 0.052     | Tirante máx (m)                                    |
| V <sub>rec</sub> = | 0.3       | Velocidad de recorrido (m/s)                       |
| V <sub>p</sub> =   | 0.0188    | Velocidad de sedimentación de las partículas (m/s) |
| L <sub>cd</sub> =  | 0.8297872 | m  |

*Por seguridad, se agrega un 25%*

|                   |          |   |
|-------------------|----------|---|
| L <sub>cd</sub> = | 1.037234 | m |
|-------------------|----------|---|

### Volumen de arena sedimentado

---

$$h_a = \frac{V_a}{L_{cd} * b_{cd}}$$

Considerando que se tiene una cámara colectora de arenas en los canales desarenadores, considerando que, por las características del agua, se generan 0.00004m<sup>3</sup> de arena por cada m<sup>3</sup> de agua.

|                      |             |                                    |
|----------------------|-------------|------------------------------------|
| V <sub>arena</sub> = | 0.00004     | Arena/m <sup>3</sup>               |
| V <sub>arena</sub> = | 0.085       | m <sup>3</sup> /sem                |
| L <sub>cd</sub> =    | 1.037234043 | Longitud del canal desarenador (m) |
| b <sub>cd</sub> =    | 0.22        | Base del canal desarenador (m)     |
| h <sub>a</sub> =     | 0.36384768  | m/sem                              |

### Cálculo del tiempo de retención

---

$$t_p = \frac{V}{Q_m/n}$$

|                  |           |  |
|------------------|-----------|--|
| tp=              |           | Tiempo de retención a gasto promedio (s) |
| V=               | 0.0120872 | Volumen de la cámara (m <sup>3</sup> )   |
| Q <sub>m</sub> = | 0.00092   | Gasto medio (m <sup>3</sup> /s)          |
| n=               | 2         | Número de cámaras                        |
| tp=              | 26.276596 | s  |

Dado que el tiempo de retención calculado fue de 26.28 segundos, nos podemos dar cuenta que las dimensiones del canal desarenador son demasiado grandes para el gasto a tratar.

#### 4.1.3.- Rejillas.

Al final de cada canal desarenador se cuenta con unas rejillas con la intención de retener material sólido de un diámetro mayor a 1 cm. Las rejillas cuentan con barras de 1 cm de espesor con 1 cm de separación entre ellas, esto es lo que les da a las rejillas la clasificación de “rejillas finas”. Las rejillas están inclinadas a 45 °.

$$A=W*h$$

A= 0.2184 Area del canal (m<sup>2</sup>)  
W= 0.42 Ancho del canal (m)  
h= 0.52 Tirante hidráulico (m)

A= 0.2184

---

### Velocidad de la rejilla

$$V = \frac{Q}{A}$$

V= Vel antes de la rejilla (m/s)  
Q= 0.00092 Gasto (m<sup>3</sup>/s)  
A= 0.2184 Área del canal  
V= 0.004212454 m/s

---

### # espacios rejillas finas

$$n = \frac{W - C}{C + d_b}$$

n= Número de barras  
C= 0.01 Espaciado entre barras  
W= 0.42 Ancho del canal (m)  
db= 0.01 Espesor de la barra (m)

n= 21  
n+1= 22 Número de barras

### **Pérdida hidráulica rejillas finas**

---

$$h_L = \beta \left( \frac{d_b}{C} \right)^{4/3} h_v \sin \theta$$

|            |             |                                      |
|------------|-------------|--------------------------------------|
| HL=        |             | Pérdida de energía                   |
| $\beta$ =  | 1.79        | Factor (1.79 para barras circulares) |
| db=        | 0.01        | Espesor de barra (m)                 |
| C=         | 0.01        | Espaciado entre barras (m)           |
| hv=        | 0.004587156 | Altura aproximada (m)                |
| $\theta$ = | 90          | Ángulo horizontal                    |

hL= 0.027847855

$$h_v = \frac{V_a^2}{2g}$$

hv= 0.00459 m

Se propone la implementación de rejillas medianas, para optimizar este proceso del pretratamiento.

### **# espacios rejillas medianas**

---

$$n = \frac{W - C}{C + d_b}$$

|      |      |                         |
|------|------|-------------------------|
| n=   |      | Número de barras        |
| C=   | 0.04 | Espaciado entre barras  |
| W=   | 0.42 | Ancho del canal (m)     |
| db=  | 0.02 | Espesor de la barra (m) |
| n=   | 6    |                         |
| n+1= | 7    | Número de barras        |

### Pérdida hidráulica rejillas medianas

$$h_L = \beta \left( \frac{d_b}{C} \right)^{4/3} h_v \sin \theta$$

|            |         |                            |
|------------|---------|----------------------------|
| HL=        |         | Pérdida de energía         |
|            |         | Factor (1.79 para barras   |
| $\beta$ =  | 1.79    | circulares)                |
| db=        | 0.02    | Espesor de barra (m)       |
| C=         | 0.04    | Espaciado entre barras (m) |
| hv=        | 0.00459 | Altura aproximada (m)      |
| $\theta$ = | 90      | Ángulo horizontal          |

hL= 0.013923927

$$h_v = \frac{V_a^2}{2g}$$

hv= 0.00459 m

#### **4.1.4.- Cárcamo de bombeo.**

Para finalizar el pretratamiento, se tiene un cárcamo de bombeo cúbico con dimensiones de 1.70 m de largo, 2.10 m de ancho y una profundidad de 55 cm. Cuenta con dos bombas para transportar el agua hacia el tanque de aereación.

|                    |         |                   |
|--------------------|---------|-------------------|
| TRH=               | 1200    | seg               |
| Q <sub>med</sub> = | 0.00092 | m <sup>3</sup> /s |

$$Vol = TRH * Q_{med}$$

|          |             |                |
|----------|-------------|----------------|
| Vol=     | 1.104       | m <sup>3</sup> |
| Tirante= | 0.55        | m              |
| Área=    | 2.007272727 | m <sup>2</sup> |

#### 4.1.5.- Sedimentador primario.

En el libro #26 del manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento de CNA nos dice que los sedimentadores rectangulares tienen “una relación longitud-ancho varía entre 3:1 y 5:1, con profundidades de agua mayores a dos metros, longitud menor de 90 m, ancho de tres a 24 m y pendiente suave (uno a dos por ciento) en el fondo hacia la tolva de lodos. Cuando el ancho es mayor de seis metros se prefiere usar equipo de limpieza múltiple con varias tolvas de lodos, permitiéndose así el uso de anchos iguales o mayores a 24 m.” (MAPAS)

**Tabla 11.- Criterios de diseño de sedimentadores primarios.**

| Tipo de tratamiento                         | Carga superficial m/d |             | Profundidad m | Carga sobre el vertedero L/(s m) | Tiempo de retención h | % remoción |         |
|---|-----------------------|-------------|---------------|----------------------------------|-----------------------|------------|---------|
|   | Caudal promedio       | Caudal pico |               |                                  |                       | DBO        | SS      |
| Primario, seguido de tratamiento secundario | 32 – 49               | 80 – 122    | 3 – 5         | 1.4 – 4.3                        | 1.5 – 2.5             |            | 50 – 70 |
|   | 33 – 49               | 81 – 122    |               | < 5.8                            |                       | 35 - 45    | 50 – 60 |
|   | 32 – 49               | 81 – 122    | 3 – 3.7       | 1.4 – 5.7                        | 1.5 – 2.5             |            |         |
|   | 24 – 33               | 48 – 70     | 3 – 5         | 1.4 – 4.3                        | 1.5 – 2.5             |            | 50 – 70 |
|   | 24 – 33               | 49 – 69     |               | < 5.8                            |                       | 35 - 45    | 50 – 60 |
|   | 24 – 32               | 49 – 61     | 3.7 – 4.6     | 1.4 – 5.7                        | 1.5 – 2.5             |            |         |
| Primario                                    | 30                    | 45          | > 1.5         | < 5.2                            | 2                     | 35 - 40    | 50 – 70 |
|   | 24 – 33               |             | 2.1 – 3.6     | 1.4 – 2.2                        | 1 – 2                 |            |         |

Fuente: Romero Rojas, 2020

**Tabla 12.- Criterios de autores para sedimentadores primarios.**

| Referencias                        | Carga superficial m/d | Tiempo de retención h | Profundidad m | Carga sobre el vertedero L/(s m) |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|----------------------------------|
| Metcalf & Eddy, Inc.               | 32 – 48               | 1.5 – 2.5             | 3 – 5         | 1.4 – 5.8                        |
| Normas de los diez estados         | 41                    | ---                   | >2.1          | <2.2                             |
| Manual de diseño naval             | 49                    | ---                   | 3             | <14                              |
| Ejército Estados Unidos de América | 12 – 41               | 2.5                   | 2.5 – 4.5     | 0.7 – 1.7                        |
| Steel y McGhee                     | 24 – 60               | 1 – 2                 | 1 – 5         | ---                              |
| Fair et al.                        | ---                   | 2                     | 3             | ---                              |
| Sundstrom y Klei                   | ---                   | 1 – 4                 | ---           | ---                              |
| USEPA                              | 24 – 49               | ---                   | 3 – 5         | ---                              |
| Tchobanoglous y Schroeder          | 30 – 60               | ---                   | 3 – 5         | ---                              |
| IWPC                               | 30 – 45               | 2                     | >1.5          | 1.2 – 5.2                        |

Fuente: Romero Rojas, 2020

### Área superficial

---

$$A_s = \frac{Q_m}{H_a}$$

|         |             |   |
|---------|-------------|---|
| $A_s =$ |             | Área superficial (m <sup>2</sup> )  |
| $Q_m =$ | 0.00092     | Gasto medio (m <sup>3</sup> /s)   |
| $H_a =$ | 0.000347222 | Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s)   |
| $A_s =$ | 2.6496      | m <sup>2</sup> <span style="margin-left: 20px;">30 <math>\frac{m^3}{m^2 d}</math> Segun Metcalf &amp; Eddy</span> |

### Dimensionamiento del tanque

---

*Relacion del tanque entre largo y ancho*

|         |        |                                    |
|---------|--------|------------------------------------|
| $L =$   | 7.92   | Largo (m)                          |
| $W =$   | 3.1    | Ancho (m)                          |
|         |        | $V = A_s h$                        |
| $V =$   |        | Volumen (m <sup>3</sup> )          |
| $A_s =$ | 2.6496 | Area superficial (m <sup>2</sup> ) |
|         |        | Tirante hidráulico                 |
| $h =$   | 3.5    | (m)                                |
| $V =$   | 9.2736 | m <sup>3</sup>                     |

### Tiempo de retención hidráulico

---

$$T_{RH} = \frac{V}{Q_m}$$

|            |         |                                 |
|------------|---------|---------------------------------|
|            |         | Tiempo de retención hidráulico  |
| $T_{RH} =$ |         | (s)                             |
| $V =$      | 9.2736  | Volumen (m <sup>3</sup> )       |
| $Q_m =$    | 0.00092 | Gasto medio (m <sup>3</sup> /s) |
| $T_{RH} =$ | 10080   | s                               |
|            | 2.8     | hr                              |

### Cálculo de velocidades

---

#### *Velocidad de arrastre de partículas*

$$V_s = \sqrt{\frac{8k(s-1)gd}{f}}$$

|         |            |                                      |
|---------|------------|--------------------------------------|
| $V_s$ = |            | Velocidad de arrastre (m/s)          |
| $k$ =   | 0.04       | Constante de material unigranular    |
| $s$ =   | 1.3        | Densidad relativa de las partículas  |
| $g$ =   | 9.81       | Gravedad (m/s <sup>2</sup> )         |
| $d$ =   | 0.0002     | Diámetro medio de las partículas (m) |
| $f$ =   | 0.02       | Factor de fricción (Darcy-Weisbach)  |
| $V_s$ = | 0.09704432 | m/s                                  |

#### *Velocidad horizontal a flujo máximo*

$$V_L = \frac{Q_{max}}{A_t n}$$

|             |           |  |
|-------------|-----------|--|
| $V_L$ =     |           | Velocidad horizontal a flujo máximo (m/s)        |
| $Q_{max}$ = | 0.003496  | Gasto máximo instantáneo(m <sup>3</sup> /s)      |
| $A_t$ =     | 10.85     | Área de la sección transversal (m <sup>2</sup> ) |
| $n$ =       | 1         | # de tanques                                     |
| $V_L$ =     | 0.0003222 | m/s  |

*Velocidad de arrastre debe ser mayor que la velocidad horizontal a flujo máximo*

## 4.2.- Tratamiento primario.

En esta planta de tratamiento, el tratamiento primario está a base de un proceso de discos biológicos rotativos.

---

### Remoción de carga

$$K = CH(C_{in} - C_{out})$$

|                    |        |  |
|--------------------|--------|--|
| K=                 |        | Remoción de carga (gr/m <sup>2</sup> -d)             |
| CH=                |        | Carga hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -d) |
| C <sub>in</sub> =  | 198    | Concentración de entrada (gr/m <sup>3</sup> )        |
| C <sub>out</sub> = | 29.7   | Concentración de salida (gr/m <sup>3</sup> )         |
| K=                 | 85.00% | <i>Se propone K = 85%</i>                            |

---

### Área superficial necesaria

$$A = \frac{Q * C_{in}}{K}$$

|                   |         |   |
|-------------------|---------|---|
| A=                |         | Área superficial necesaria (m <sup>2</sup> )  |
| Q=                | 0.00092 | Gasto medio (m <sup>3</sup> /s)               |
| C <sub>in</sub> = | 198     | Concentración de entrada (gr/m <sup>3</sup> ) |
| K=                | 15.00%  | Remoción de carga (gr/m <sup>2</sup> -s)      |
| A=                | 1.2144  | m <sup>2</sup>                                |

---

### Área efectiva del disco

$$A_d = \frac{\pi}{2} (D^2 - d^2)$$

|                  |          |                                 |
|------------------|----------|---------------------------------|
| A <sub>d</sub> = |          | Área efectiva (m <sup>2</sup> ) |
| D=               | 1.5      | Diámetro externo del disco (m)  |
| d=               | 0.35     | Diámetro interno del disco (m)  |
| A <sub>d</sub> = | 3.341877 | m <sup>2</sup>                  |

---

### Número de discos necesarios

$$N = \frac{A}{A_d}$$

|                  |          |  |
|------------------|----------|--|
| N=               |          | Número de discos                             |
| A=               | 1.2144   | Área superficial necesaria (m <sup>2</sup> ) |
| A <sub>d</sub> = | 3.341877 | Área efectiva (m <sup>2</sup> )              |
| N=               | 0.363    | 1  |

### Carga hidráulica

---

$$CH = \frac{Q}{A}$$

|     |             |  |
|-----|-------------|--|
| CH= |             | Carga hidráulica                             |
| Q=  | 0.00092     | Gasto medio (m <sup>3</sup> /s)              |
| A=  | 1.2144      | Área superficial necesaria (m <sup>2</sup> ) |
| CH= | 0.000757576 | m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -s            |

### Velocidad periférica

---

$$V_p = \pi * v * D$$

|                  |        |   |
|------------------|--------|---|
| V <sub>p</sub> = |        | Velocidad periférica (rpm)                |
| v=               | 1.5    | Velocidad de rotación de los discos (rpm) |
| D=               | 1.5    | Diámetro externo del disco (m)            |
| V <sub>p</sub> = | 7.0686 | m/min                                     |

### Longitud del tanque

---

$$l = (e + N) + a(N - 1) + 2b$$

|    |      |                                     |
|----|------|-------------------------------------|
| l= |      | Longitud del tanque (m)             |
| e= | 0.3  | Espesor de los discos (m)           |
| N= | 0.36 | Número de discos                    |
| a= | 3    | Distancia entre discos (m)          |
| b= | 1.5  | Distancia entre discos y etapas (m) |

l= 1.753554395 m  
3.507108789 m son 2 etapas

### Ancho del tanque

---

*El ancho depende de las dimensiones de los biodiscos a utilizar.*

b= 2.6 Ancho del tanque (m)

### Volumen del tanque

---

$$Vol = l * b$$

Vol= Volumen del tanque (m<sup>3</sup>)  
l= 3.507108789 Longitud del tanque (m)  
b= 2.6 Ancho del tanque (m)  
T= 1.08 Tirante hidráulico (m)

Vol= 9.847961481 m<sup>3</sup>

### Tiempo de retención hidráulico

---

$$TRH = \frac{V_e}{Q}$$

TRH= Tiempo de retención hidráulico (s)  
V<sub>e</sub>= 5.909 Volumen efectivo del tanque (m<sup>3</sup>)  
Q= 0.00092 Gasto medio (m<sup>3</sup>/s)

TRH= 6422.583574 s  
107.0430596 hr

### Volumen efectivo del tanque

---

$$V_e = \%Sum * Vol$$

V<sub>e</sub>= Volumen efectivo del tanque (m<sup>3</sup>)

|                  |        |                                      |
|------------------|--------|--------------------------------------|
| %Sum=            | 40.00% | % sumergido de los biodiscos         |
| Vol=             | 9.848  | Volumen del tanque (m <sup>3</sup> ) |
| V <sub>e</sub> = | 5.909  | m <sup>3</sup>                       |

En los cálculos de esta etapa, nos podemos dar cuenta que los discos necesarios son 0.363, por lo que se puede pensar que el proceso de discos biológicos rotativos no es necesario para esta planta de tratamiento.

#### 4.2.1.- Sedimentador secundario.

##### Área superficial

---

$$A_s = \frac{Q_m}{H_a}$$

|                  |             |   |
|------------------|-------------|---|
| A <sub>s</sub> = |             | Área superficial (m <sup>2</sup> )                        |
| Q <sub>m</sub> = | 0.00092     | Gasto medio (m <sup>3</sup> /s)                           |
| H <sub>a</sub> = | 0.000347222 | Carga superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> /s)     |
| A <sub>s</sub> = | 2.6496      | m <sup>2</sup> 30 $\frac{m^3}{m^2d}$ Segun Metcalf & Eddy |

##### Dimensionamiento del tanque

---

$$V = A_s h$$

|                  |        |                                    |
|------------------|--------|------------------------------------|
| V=               |        | Volumen (m <sup>3</sup> )          |
| A <sub>s</sub> = | 2.6496 | Área superficial (m <sup>2</sup> ) |
| h=               | 3.5    | Tirante hidráulico (m)             |
| V=               | 9.2736 | m <sup>3</sup>                     |

### Tiempo de retención hidráulico

---

$$T_{RH} = \frac{V}{Q_m}$$

|            |         |                                    |
|------------|---------|------------------------------------|
|            |         | Tiempo de retención hidráulico (s) |
| $T_{RH} =$ |         |                                    |
| $V =$      | 9.2736  | Volumen (m <sup>3</sup> )          |
| $Q_m =$    | 0.00092 | Gasto medio (m <sup>3</sup> /s)    |
| $T_{RH} =$ | 10080   | s                                  |
|            | 2.8     | hr                                 |

### Cálculo de velocidades

---

#### *Velocidad de arrastre de partículas*

$$V_s = \sqrt{\frac{8k(s-1)gd}{f}}$$

|         |            |                                      |
|---------|------------|--------------------------------------|
| $V_s =$ |            | Velocidad de arrastre (m/s)          |
| $k =$   | 0.04       | Constante de material unigranular    |
| $s =$   | 1.3        | Densidad relativa de las partículas  |
| $g =$   | 9.81       | Gravedad (m/s <sup>2</sup> )         |
| $d =$   | 0.0002     | Diámetro medio de las partículas (m) |
| $f =$   | 0.02       | Factor de fricción (Darcy-Weisbach)  |
| $V_s =$ | 0.09704432 | m/s                                  |

#### *Velocidad horizontal a flujo máximo*

$$V_L = \frac{Q_{max}}{A_t n}$$

|             |          |  |
|-------------|----------|--|
| $V_L =$     |          | Velocidad horizontal a flujo máximo (m/s)        |
| $Q_{max} =$ | 0.003496 | Gasto máximo instantáneo(m <sup>3</sup> /s)      |
| $A_t =$     | 10.57    | Área de la sección transversal (m <sup>2</sup> ) |
| $n =$       | 1        | # de tanques                                     |

$$V_L = 0.00033 \text{ m/s}$$

*Velocidad de arrastre debe ser mayor que la velocidad horizontal a flujo máximo*

Los cálculos del sedimentador secundario arrojan dimensiones y tiempos bastante coherentes para el gasto que se requiere tratar. 9.27 m<sup>3</sup> con un tiempo de retención de 2.8 horas son los requeridos para el sedimentador secundario.

## 4.3.- Cloración.

### Volumen del tanque de contacto de cloro

---

$$V_{tc} = Q_{med} * TRH$$

*Según la literatura, para un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 20 min, se utiliza  $Q_{med}$  (SAHOP, 1977)*

$Q_{med} =$  0.00092 Gasto medio ( $m^3/s$ )

$TRH =$  20 min

$V_{tc} =$  1.104 Volumen del tanque de contacto de cloro ( $m^3$ )

### Área superficial del tanque

---

$$A_{tc} = \frac{V_{tc}}{P_{tc}}$$

$A_{tc} =$  Área superficial del tanque ( $m^2$ )

$V_{tc} =$  1.104 Volumen del tanque de contacto de cloro ( $m^3$ )

$P_{tc} =$  1 Profundidad del tanque de contacto de cloro (m)

$A_{tc} =$  1.104  $m^2$

### Área superficial del tanque

---

$A_{tc} =$  1.104  $m^2$

$L =$  4.46 m

$W =$  0.247534 m

### Cálculo de mamparas del tanque

---

$$N_M = \frac{L - E_M}{S_M}$$

|         |      |                            |
|---------|------|----------------------------|
| $N_M =$ |      |                            |
| $L =$   | 4.46 | Lado largo del tanque (m)  |
| $E_M =$ | 0.2  | Espesor de mamparas (m)    |
| $S_M =$ | 1.2  | Separación de mamparas (m) |
| $N_M =$ | 3.55 | mamparas                   |

### Cálculo de cloro requerido

---

Según CNA, se necesitan  $\frac{8mg}{l}$  de cloro

|                        |          |                         |
|------------------------|----------|-------------------------|
| Dosificación de cloro= | 8        | mg/l                    |
| $Q_{med} =$            | 0.00092  | Gasto medio ( $m^3/s$ ) |
| Cloro requerido=       | 0.635904 | kgCl/d                  |

Al darnos un área necesaria para el tanque de contacto de cloro de 1.1 m<sup>2</sup>, nos podemos dar cuenta que al tener una longitud de 4.46 m, el ancho nos da demasiado pequeño, por lo que el tanque de contacto de cloro necesita un redimensionamiento.

## 4.4.- Recomendación de construcción y adaptación de humedal.

### Datos de partida

|                    |         |                   |                                      |
|--------------------|---------|-------------------|--------------------------------------|
| DBO <sub>e</sub> = | 198     | mg/l              | Concentración de entrada de DBO mg/l |
| DBO <sub>s</sub> = | 29.7    | mg/l              | Concentración de salida de DBO mg/l  |
| Q=                 | 0.00092 | m <sup>3</sup> /d | Gasto (m <sup>3</sup> /d)            |

### Cálculo de la constante de temperatura a 20°C

---

$$K_T = K_{20}(1.06)^{T-20}$$

|                   |                      |
|-------------------|----------------------|
| K <sub>20</sub> = | 1.104d <sup>-1</sup> |
| T=                | 16.8                 |

$$K_T = 1.104d^{-1}(1.06)^{16.8-20}$$

$$K_T = 0.91 \text{ d}^{-1}$$

### Cálculo del área superficial necesaria

---

$$A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{K_T * h * n}$$

|                  |  |
|------------------|--|
| A <sub>s</sub> = | Área superficial necesaria (m <sup>2</sup> ) |
| h=               | 0.3 Tirante de diseño del sistema (m)        |
| n=               | 0.35 Porosidad del lecho material (%)        |
| Q=               | 0.00092 Gasto (m <sup>3</sup> /d)            |
| C <sub>o</sub> = | 198 Concentración de entrada de DBO mg/l     |
| C <sub>e</sub> = | 29.7 Concentración de salida de DBO mg/l     |

$$A_s = 0.01827 \text{ m}^2$$

### Cálculo del tiempo de retención hidráulico

---

$$TRH = \frac{A_s * h * n}{Q}$$

TRH=

$A_s = 0.01827$  Área superficial necesaria ( $m^2$ )  
 $h = 0.3$  Tirante de diseño del sistema (m)  
 $n = 0.35$  Porosidad del lecho material (%)  
 $Q = 0.00092$  Gasto ( $m^3/d$ )

TRH= 2.0848 d

### Cálculo de las dimensiones del humedal

---

#### Ancho del humedal

---

$$w = \frac{1}{h} \sqrt{\frac{QA_s}{mK_s}}$$

$w =$  Ancho del humedal (m)  
 $h = 0.3$  Tirante de diseño del sistema (m)  
 $Q = 0.00092$  Gasto ( $m^3/d$ )  
 $A_s = 0.01827$  Área superficial necesaria ( $m^2$ )  
 $m = 0.01$  Pendiente del fondo del lecho (decimales)  
 $K_s = 9750.4$  Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal

$w = 0.00138$  m

#### Longitud del humedal

---

$$L = \frac{A_s}{w}$$

$L =$  Largo del humedal (m)  
 $A_s = 0.01827$  Área superficial necesaria ( $m^2$ )  
 $w = 0.00138$  Ancho (m)

$L = 13.2$  m

### Cálculo del gradiente hidráulico

---

$$s = \frac{m * h}{L}$$

|    |         |   |
|----|---------|---|
| s= |         | Gradiente hidráulico (m/m)                |
| m= | 0.01    | Pendiente del fondo del lecho (decimales) |
| h= | 0.6     | Tirante de diseño del sistema (m)         |
| L= | 13.2    | Largo del humedal (m)                     |
| s= | 0.00045 | m/m                                       |

### Cálculo del área transversal

---

$$A_t = \frac{Q}{K_s * s}$$

|                  |         |  |
|------------------|---------|--|
| A <sub>t</sub> = |         | Área transversal (m <sup>2</sup> )                         |
| Q=               | 0.00092 | Gasto (m <sup>3</sup> /d)                                  |
| K <sub>s</sub> = | 9750.4  | Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal |
| s=               | 0.00045 | Gradiente hidráulico (m/m)                                 |
| A <sub>t</sub> = | 0.00021 | m <sup>2</sup>   |

### Cálculo de la relación largo-ancho

---

$$L:w = \frac{L}{w}$$

|    |         |                       |
|----|---------|-----------------------|
| L= | 13.2    | Largo del humedal (m) |
| w= | 0.00138 | Ancho del humedal (m) |

L:w= 9538.43

*La relación es muy grande, por lo que no es aceptada.*

*Relaciones comunes son 1: 1, 1: 3, 4: 1*

**Utilizando relación 1:3 para dimensiones del humedal (w= ancho; L=largo)**

$$L = 3w$$

$$A_s = Lw$$

$$A_s = (3w)w$$

$$A_s = 3w^2 \quad w = \sqrt{\frac{A_s}{3}}$$

$A_s = 0.01827$  Área superficial necesaria ( $m^2$ )

$w = 0.078$  m

$L = 3(0.078) = 0.234$  m

**Recalculando área transversal**

$$A_t = w * h$$

$w = 0.078$  m

$h = 0.6$  Tirante de diseño del sistema (m)

$A_t = 0.047$   $m^2$

# **CAPÍTULO 5.- CONCLUSIONES**



## 5.- Conclusiones.

- La planta de tratamiento de agua residual está sobredimensionada, tal vez porque es una planta prototipo y no se realizó un cálculo completo.
- En el canal desarenador, solamente se cuenta con un set de rejillas en cada canal desarenador, por sus dimensiones, las rejillas son finas.
- El canal desarenador no cuenta con un sistema óptimo para remoción de arenas sedimentadas.
- En el sedimentador primario se tiene un digestor de lodos residuales, pero no hay un sistema de recirculación de lodos ni de extracción de lodos.
- El estado actual de la planta es inactivo, por lo que la planta necesita mantenimiento. Necesita ser pintada, limpiada, y letreros nuevos.

# **CAPÍTULO 6.- RECOMENDACIONES**



## **6.- Recomendaciones.**

- En los canales desarenadores se recomienda incorporar un set de rejillas medianas.
- Colocar una protección sobre el pretratamiento, esto con la intención de que el agua no sea contaminada con basura externa, como hojas de árboles, papeles, plásticos o cualquier cosa que pueda ser introducida al sistema e impida el correcto funcionamiento del sistema.
- Debido a que el sedimentador es una estructura profunda, se recomienda colocar alguna protección ya que, como está en un espacio abierto, alguna persona caiga dentro de la estructura.
- Considerar y acondicionar el espacio que se tiene a un costado de la planta para ser utilizado como humedal.

# **CAPÍTULO 7.- BIBLIOGRAFÍA**



## 7.- Bibliografía.

- (1996). En M. & Eddy, *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización*. McGraw-Hill.
- (2020). Obtenido de <https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/anaerobias.PDF>
- Baars, J. (s.f.). El Uso de Zanjas de Oxidación en el Tratamiento de Aguas Cloacales Procedentes de Colectividades Pequeñas. En J. Baars, *El Uso de Zanjas de Oxidación en el Tratamiento de Aguas Cloacales Procedentes de Colectividades Pequeñas*.
- Belzona. (2010). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Obtenido de [https://www.belzona.com/es/solution\\_maps/wastewater/money\\_map.pdf](https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf)
- Bermeo Garay, M. M. (2013). *Tratamiento de Aguas Residuales: Tecnicas Convencionales*.
- Bolívar, G. (15 de 02 de 2021). *lifeder*. Obtenido de [lifeder: https://www.lifeder.com/floculacion/](https://www.lifeder.com/floculacion/)
- CNA. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*.
- CNA. (2018). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilizacion y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operacion. Diciembre 2018*.
- CNA. (2019). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*.
- CNA. (s.f.). *MAPAS Libro 23.- Desinfección para Sistemas de Agua Potable*.
- CNA. (s.f.). *MAPAS Libro 26.- Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario*.
- Cols, M. &. (1982). *Stabilization Lagoon Deign, Performance and Upgrading*.
- Eckenfelder, J., & Wesley, W. (2000). *Industrial Water Pollution*. . McGraw-Hill.
- Eddy, M. &. (1985). *Ingeniería Sanitaria*.

- Eddy, M. &. (1996). Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización. En M. &. Eddy, *Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización*. McGraw-Hill.
- EPA. (1978). *Evaluation of Oxidation Ditches for Nutrient Removal*.
- EPA. (1978). Evaluation of the RBC Process for Municipal Wastewater Treatment.
- EPA. (1992). *Rotating Biological Contactors*.
- Jr, E., & Musterman. (1995). *Activated Sludge Treatment of Industrial Wastewater*.
- minera, F. (18 de 02 de 2020). *Flotación minera*. Obtenido de Flotación minera: <https://sites.google.com/site/flotacionenmineria/home>
- Monterroso Lucas, R. (2017). *Diseño de una Planta Modular de Tratamiento Biológico de Aguas Residuales para una Fabrica de Alimentos*.
- Morales, P. A. (2014). *Humedal Artificial Tesis*. Cd Mx: UNAM.
- Ortega de Migel, E. (s.f.). *La Depuración de las Aguas Residuales para Pequeñas Poblaciones*.
- Ramalho, R. (1977). *Introduction to Wastewater Treatment Processes*.
- Ramirez Camperos, E. (2020). Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018834/MEMORIAS2004/Capitulo11/Fundamentosdelprocesodelodosactivados.pdf>
- Reed S. C., C. R. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment - 2nd ed.*
- Romero Rojas, J. (1999). *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño*.
- SEMARNAT. (2009). *Compendio de Estadísticas Ambientales*.
- SSWM. (24 de 08 de 2020). SSWM. Obtenido de SSWM: <https://sswm.info/>
- Tejero, S. (1992). *Depuración de Aguas Residuales*.
- WHO, R. O.-A. (1987). *Wastewater stabilization ponds : principles of planning and practice*.