

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA USO AGRICOLA”**

**POR**

**MARTHA ANGÉLICA MOTA GUIZAR**

**MONOGRAFÍA**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN AGROECOLOGÍA**

**TORREÓN, COAHUILA**

**ABRIL DE 2018**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

UNIDAD LAGUNA

DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

"TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA USO AGRICOLA"

POR

MARTHA ANGÉLICA MOTA GUIZAR

MONOGRAFIA:

QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR COMO  
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN AGROECOLOGÍA


APROBADA POR:

PRESIDENTE:



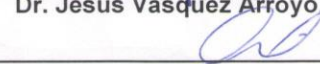
M.C. Eduardo Blanco Contreras

VOCAL:



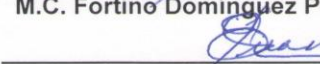
Dr. Jesús Vásquez Arroyo

VOCAL:

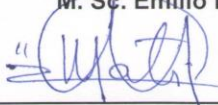


M.C. Fortino Domínguez Pérez

VOCAL SUPLENTE:



M. Sc. Emilio Duarte Ayala



M.C. Víctor Martínez Cueto

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS

TORREÓN, COAHUILA

ABRIL DE 2018

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”**

**UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**“TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES PARA USO AGRICOLA”**

**POR  
MARTHA ANGÉLICA MOTA GUIZAR**

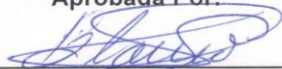
**MONOGRAFIA:**

**QUE SOMETE A CONSIDERACION DEL COMITÉ DE ASESORÍA COMO  
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO EN AGROECOLOGIA.**

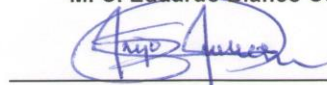
**Aprobada Por:**

**ASESOR PRINCIPAL:**



**M. C. Eduardo Blanco Contreras**

**ASESOR:**



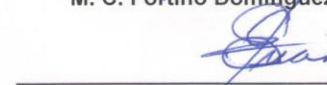
**Dr. Jesús Vásquez Arroyo**

**ASESOR:**



**M. C. Fortino Domínguez Pérez**

**ASESOR:**



**M. Sc. Emilio Duarte Ayala**



**M.C. Víctor Martínez Cueto**

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**TORREÓN, COAHUILA**

**ABRIL DE 2018**

## AGRADECIMIENTOS

*A dios:*

Por permitirme disfrutar de este maravilloso momento por darme fuerza y fortaleza para salir adelante y concluir con mis estudios gracias dios.

*A mis padres:*

Gracias por haberme dado su amor su comprensión sus sabios consejos y sobre todo su confianza agradezco enormemente todo lo bueno que me han brindado.

*Universidad autónoma agraria Antonio narro:*

Por haberme abierto sus puertas para estudiar una carrera y proporcionarme las herramientas y conocimientos necesarios para mi formación.

## **DEDICATORIA**

**A mis padres:**

**Roger Domingo Mota Moguel  
María Lulía Guizar Santos**

**Gracias por la confianza que me brindaron por el apoyo incondicional y sobre todo muchas gracias por estar conmigo en todo momento, este logro es resultado de su esfuerzo y dedicación como padres.**

**A mi familia:**

**Christian Walter Rodríguez Díaz (espos)**

**Christian Alejandro Rodríguez Mota (hijo)**

**Ana Victoria Rodríguez Mota (hija)**

**Este logro se los dedico a ustedes por ser parte fundamental de mi vida el motivo por el cual lucho día a día especialmente a mi esposo gracias por todo el apoyo que me has dado por acompañarme siempre este sueño lo empezamos juntos y hoy gracias a dios se cumple los amo inmensamente.**

**A mis asesores**

**Gracias por sus sabias enseñanzas, dedicación, entrega, observaciones, pero sobre todo muchas gracias por su gran apoyo incondicional.**

## RESUMEN

Se calcula que la Tierra tiene 1,386 millones de  $\text{Km}^3$  de agua. Es la única sustancia presente en la naturaleza que puede encontrarse tanto en forma sólida, líquida o gaseosa. Solamente el 0.007 % de esta es accesible para el consumo humano directo. Su calidad se reduce con los años debido a que se contamina. El agua renovable es la cantidad máxima que es factible de explotarse anualmente en una región sin alterar el ecosistema, se calcula que es de 471,5  $\text{Km}^3$  al año. De cada 100 L de agua empleada, 76 se utilizan en actividades agropecuarias, 50 provienen de aguas superficiales y 26 del subsuelo. En México se siembran 22 millones de hectáreas, los rendimientos de riego son 2.2 a 3.3. Veces más que los de temporal. En el mundo se generan cada año 330  $\text{Km}^3$  de agua residual urbana que podrían irrigar y fertilizar cultivos agrícolas y producir biogás para suministrar energía a millones de productores. Éstas aguas, tratadas o sin tratar, se utilizan principalmente para irrigar regiones áridas y semiáridas. Sin embargo, solo una pequeña porción es tratada y la proporción que se reutiliza de manera segura, es aún más reducida. En México, solo 34 de cada 100 municipios cuentan con servicios de tratamiento de aguas residuales municipales. A nivel nacional se cuenta con 1,941 plantas del sector privado y para-estatal. Las plantas de tratamiento existentes con frecuencia se basan en tecnologías contaminantes, altas en consumo de energía y generación de residuos tóxicos. Con el fin de construir la infraestructura urbana sostenible es necesario recurrir a tecnologías alternativas, que permitan la reutilización y reciclaje del agua con parámetros de normatividad internacional y nacional para su retorno a la naturaleza. Su tratamiento tienen por objeto, reducir la concentración de los contaminantes y permitir la descarga de los efluentes tratados, útiles para los agroecosistemas teniendo en cuenta los requerimientos de cultivos y tipos de suelo, el presente estudio, propone el uso de aguas residuales como un recurso alternativo, siempre que se traten y manejen apropiadamente. Privilegiando la seguridad agroecológica o bien el riego de cultivos destinados a la transformación industrial y para un consumo humano directo.

**Palabras claves:** reúso del agua residual, agricultura, sustentabilidad, agroecología, cultivos industriales.

<b>ÍNDICE</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	I
<b>DEDICATORIA</b> .....	II
<b>RESUMEN</b> .....	III
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	54
2.1 Definición del agua residual .....	4
2.1.1 Problemática del agua en el mundo.....	4
2.1.2 Problemática del agua en México .....	5
2.1.3 Problemática del agua en la Comarca Lagunera.....	6
2.2 Aguas residuales .....	7
2.2.1 Composición de las aguas residuales.....	8
2.2.2 Tipos de aguas residuales.....	9
2.2.3 Características de las aguas residuales .....	10
2.3 Tratamiento de aguas residuales .....	11
2.3.1 Sistemas de tratamiento.....	12
2.4 Métodos de tratamiento de aguas residuales .....	12
2.4.1 Método de tratamiento físico.....	12
2.4.1.2. Sedimentación .....	13
2.4.1.3. Filtración .....	14
2.4.1.4. Flotación .....	14
2.4.1.5. Coagulación-Floculación .....	15
2.4.2. Métodos de tratamiento químico.....	16
2.4.2.1. Precipitación .....	16
2.4.2.2. Procesos Electroquímicos.....	16
2.4.2.3. Adsorción.....	17
2.4.2.4. Desinfección .....	18
2.4.3. <i>Método de tratamiento biológico</i> .....	19
2.4.3.1. Tratamiento biológico anaeróbico .....	20
2.5 Etapas y Caracterización de los Tratamientos. ....	24
2.5.1. Tratamiento preliminar.....	24
2.5.2. Necesidad del tratamiento.....	28
2.5.3 Finalidad de los sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (TAR).....	28

2.6 Generalidades del tratamiento de aguas residuales. ....	29
2.6.1 Constituyentes de interés en el (TAR). ....	30
2.6.1.1. Principales constituyentes de interés en el tratamiento de agua residual. ....	30
2.7 Reutilización de aguas residuales .....	31
2.7.1 Contaminantes básicos .....	33
2.7.2 Contaminantes patógenos y parasitarios .....	33
2.7.3 Reúso del agua residual en servicios al público con contacto directo. ....	33
2.8. Potencialidad del agua residual en sistemas agrícolas .....	34
2.8.1. Presencia de nutrimentos en el agua residual .....	35
2.8.2. Impacto del uso de aguas tratadas en el medio agrícola .....	35
2.8.3. Alternativas para hacer el uso adecuado de las AR en el medio agrícola. ....	37
2.9 Estrategias para el manejo agrícola de las aguas residuales tratadas. ....	38
2.9.1 Ventajas y limitaciones del uso de las aguas residuales y/o aguas tratadas en el sistema agrícola. ....	39
2.9.2. Criterios de calidad para la irrigación con aguas residuales en la agricultura. ....	42
2.9.3. Algunas cifras de las aguas residuales tratadas y no tratadas utilizadas en el medio agrícola a nivel mundial .....	42
2.9.4. Aparición de los metales pesados en las aguas de riego .....	45
2.9.4.1. Remoción de metales pesados .....	45
3.1 Sustentabilidad en el uso de aguas residuales en el medio agrícola .....	46
3.1.1 Infraestructura sustentable para obtener beneficios favorables en el medio agrícola.....	47
3.1.2 Relación entre agroecología y aguas residuales en el uso agrícola .....	48
<b>CONSIDERACIONES FINALES</b> .....	49
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	50
<b>CONCLUSION</b> .....	51
<b>REFERENCIAS</b> .....	53



## INDICE DE CUADROS Y FIGURAS

### CUADROS

Cuadro 1: composición de las aguas residuales -----	8
Cuadro 2: características afectadas de aguas superficiales por aguas residuales ---	10
Cuadro 3: eficiencia de los procesos de tratamientos de las aguas residuales -----	23
Cuadro 4: objetivos de los procesos de pre tratamiento -----	24
Cuadro 5: tratamientos secundarios -----	26
Cuadro 6: procesos de tratamientos terciarios y cuaternarios -----	27
Cuadro 7: características de los niveles de tratamiento -----	29
Cuadro 8: cultivos que reúsan las aguas residuales domesticas -----	36
Cuadro 9: cultivos tolerantes del agua residual -----	38
Cuadro 10: mayores rendimientos para cultivos irrigados con aguas residual -----	40
Cuadro 11: comparativo de rendimientos al regar con negras y blancas -----	40
Cuadro 12: países con mayor superficie agrícola con aguas residuales -----	43

## FIGURAS

Figura 1: comportamiento del influente de la planta de tratamiento de agua residual -----6

Figura 2: comportamiento del efluente de la planta de tratamiento de agua residual -----7

## INTRODUCCIÓN

El agua renovable es la cantidad máxima que es factible de aprovecharse anualmente en una región sin alterar el ecosistema, se calcula que es de 471,5 Km<sup>3</sup> al año. De cada 100 L de agua empleada, 76 se utiliza en actividades agropecuarias, 50 provienen de aguas superficiales y 26 del subsuelo. En México se siembran 22 millones de hectáreas, los rendimientos de riego son 2.2 a 3.3 veces más que los de temporal. A nivel mundial, la agricultura de riego origina el 40% de la producción agrícola (SEMARNAT, 2014).

El consumo de agua para la producción lechera en México se estima en 2,382 m<sup>3</sup> Ton<sup>-1</sup>, mientras que para la producción de maíz forrajero resultó ser de 1,744 m<sup>3</sup> Ton<sup>-1</sup> (Hoekstra y Chapagain, 2006).

En los próximos 50 años, la agricultura gradualmente estará entrando a una nueva época. El crecimiento económico contribuirá sustancialmente a las demandas globales de alimentos y fibras. Los patrones de consumo cambiarán significativamente y la demanda, de una agricultura multifuncional también se incrementará. La agricultura no únicamente estará teniendo un papel preponderante en las funciones tradicionales de sostener la seguridad alimentaria y el desarrollo de la economía nacional, sino que tendrá una misión histórica de mitigar la crisis energética global y de promover un ambiente favorable para la supervivencia humana. Para el 2050, deberá cubrir la demanda para 9,000 millones de personas al suministrar fibras y alimentos en cantidad y calidad, por una parte y por la otra, el incremento de la generación de bioenergía será una amenaza directa para la seguridad alimentaria; además, la agricultura encarará los riesgos del cambio climático global y la degradación de los recursos (Zhao, et al., 2009).

Sobre el concepto de agua residual, una vez que el agua ha sido utilizada, cualquiera que sea el fin, no debería ser considerada como algo «residual». En otros

idiomas se la llama, en forma literal, «agua utilizada» (eaux usées en francés), «agua de desperdicio» (wastewater en inglés) o «agua tras su uso» (Abwasser en alemán). Sin embargo, cada vez habremos de convencernos de que el agua residual sigue siendo un recurso. (Uhlenbrook y Connor, 2017).

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las municipales corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado, urbanos y rurales, en tanto que las segundas son aquellas descargadas a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida. Durante el año 2014, las 2,337 plantas en operación a lo largo del país, trataron  $111.3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , es decir el 52.8% de los  $211.0 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  recolectados a través de los sistemas de alcantarillado (CONAGUA, 2015).

Los métodos de tratamiento de las aguas residuales, donde se aplican fuerzas físicas se conocen como operaciones unitarias, mientras que los métodos de tratamiento en donde la remoción de contaminantes se debe a reacciones químicas o biológicas se llaman procesos unitarios. Actualmente operaciones y procesos unitarios se asocian para el tratamiento de aguas residuales municipales. Para realizar el tratamiento de las aguas residuales existen tres tipos de procesos: Físicos, fisicoquímicos y biológicos (Torres et al., 2006).

En el mundo se generan cada año  $330 \text{ Km}^3$  de agua residual urbana que podrían irrigar y fertilizar cultivos agrícolas y producir biogás para suministrar energía a millones de productores (Mateo-Sagasta *et al.* 2015). Sin embargo, solamente una pequeña porción son tratadas y, la proporción que se reutiliza de manera segura es aún más reducida que la que existe para reúso directo e indirecto sin tratar (Mateo-Sagasta *et al.* 2015).

Más del 80% de las aguas residuales en los países en vías de desarrollo se descargan sin tratamiento, contaminando ríos, lagos y zonas costeras (Scott *et al.* 2004). En México se genera  $6.7 \text{ Km}^3$  de aguas residuales, con una cobertura de

tratamiento del 47.5% (CONAGUA, 2015). Un porcentaje importante del agua que se trata se realiza de manera deficiente, siendo poca el agua disponible para reutilizarse y resulta de baja calidad, por lo que son poco aprovechadas (Mahapatra *et al.*, 2013). Existen normas internacionales que regulan la calidad de las aguas residuales para su reúso en la agricultura, algunos países no tienen implementadas normas propias (Veliz Lorenzo *et al.* 2009).

Uno de los factores principales de crisis urbana tiene que ver con la disposición de agua. Obtener nuevas fuentes se complica, dado que la población crece y demanda este recurso en las ciudades y en el campo (Bermúdez *et al.*, s/f). La problemática del manejo del agua en las zonas urbanas se agrava cada día conforme aumentan los caudales de aguas servidas urbanas, las cuales plantean un reto a las autoridades encargadas de su disposición (Meinzen y Rosegrant, 2001).

Las aplicaciones de un marco de sostenibilidad para el tratamiento y la gestión de aguas residuales son muy recientes y limitadas, aunque se han estudiado un número mayor de casos en la gestión de los recursos hídricos, desde la perspectiva de la sostenibilidad (Isosaari *et al.*, 2010).

Finalmente, un panel de expertos en el manejo del agua, identificaron las vías en las cuales el mundo deberá acelerar el progreso para asegurar la “disponibilidad y manejo sostenible del agua y saneamiento para todos” Objetivo 6. De la Agenda 2030 de Naciones Unidas. (Ambienta, 2018).

### **Objetivo.**

La presente monografía pretende en la medida de acceso a la información científica, presentar un panorama del uso sustentable de las aguas residuales en la agricultura.

## **REVISIÓN DE LITERATURA**

Se denomina agua residual al agua que ha sido utilizada en las actividades diarias de tipo doméstico, industrial, agrícola u otro y que se contaminaron con sustancias fecales, orina, procedentes de desechos orgánicos de origen antropogénica, animales, además de residuos procedentes de la actividad industrial (Meza Bazán, 2013), dando como resultado una modificación a su composición inicial (Guzmán Tristán, 2012).

### **2.1 Definición del agua residual**

En la legislación mexicana de acuerdo con la norma oficial mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996) se consideran como aguas residuales a 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 (NOM-SEMARNAT, 1996).

#### **2.1.1 Problemática del agua en el mundo**

El agua, es uno de los recursos naturales más valiosos y también uno de los más sobre Explotados, lo cual genera una escasez cada vez mayor del vital líquido. La insuficiencia de agua dulce en el planeta, es un problema de prioridad internacional, de acuerdo a las últimas cumbres realizadas sobre tierra, agua y medio ambiente (Barkin, s/f). Aunado a la falta de agua, se tiene la falta de toda una cultura en el mejor uso y aprovechamiento de la poca que se dispone.

Los recursos hídricos en México, al igual que en el resto del mundo, se encuentran bajo una creciente presión. El crecimiento demográfico, la urbanización y el aumento en el consumo del agua en los hogares, la agricultura y la industria, han incrementado significativamente el uso global. Este desarrollo conduce a la escasez y perjudica gravemente el avance del desarrollo de las diferentes actividades productivas generan diversos desechos, que son las fuentes principales de contaminación de ríos, canales y lagos; en consecuencia se traduce en la desaparición de vegetación natural, así como muerte de peces y demás animales acuáticos (De la Peña *et al.*, 2013).

### **2.1.2 Problemática del agua en México**

México tiene una población de 112 millones 336 mil 538 habitantes, de los cuales 15 millones 175 mil 862 se concentran en la zona metropolitana de la Ciudad de México (INEGI, 2010). Los grandes demandantes del agua se encuentran ubicados en el norte y centro del país, lo cual se vuelve un problema para nuestro país, puesto que México presenta un marcado contraste territorial de escasez y abundancia de agua, ya que más de dos terceras partes de su territorio son áridas o semiáridas, principalmente en el norte y el centro (CNA, 2001).

Al 2013 se tenía en México, 2,287 plantas para centros de población y 2,617 plantas para las aguas residuales industriales. La industria genera 210.3 m<sup>3</sup> por segundo de aguas residuales, se trata solo el 29 % (SEMARNAT, 2014).

En México, solo 34 de cada 100 municipios cuentan con servicios de tratamiento de aguas residuales municipales. A nivel nacional se cuenta con 1,941 plantas del sector privado y para estatal. La organización de naciones unidas declaró para 2017 el lema “agua y aguas residuales” (INEGI, 2017).

### 2.1.3 Problemática del agua en la Comarca Lagunera

La Comarca Lagunera, se encuentra ubicada entre los Estados de Coahuila y Durango, México. Esta región presenta escasez de agua tanto para su uso productivo como doméstico, debido a la aleatoriedad climática y a las recurrentes sequías por cambio climático. En la región, el promedio de precipitación es de apenas 240 mm anuales; lo que indica la necesidad de aprovechar al máximo todas las posibles fuentes de agua como las residuales (calderón, s/f).

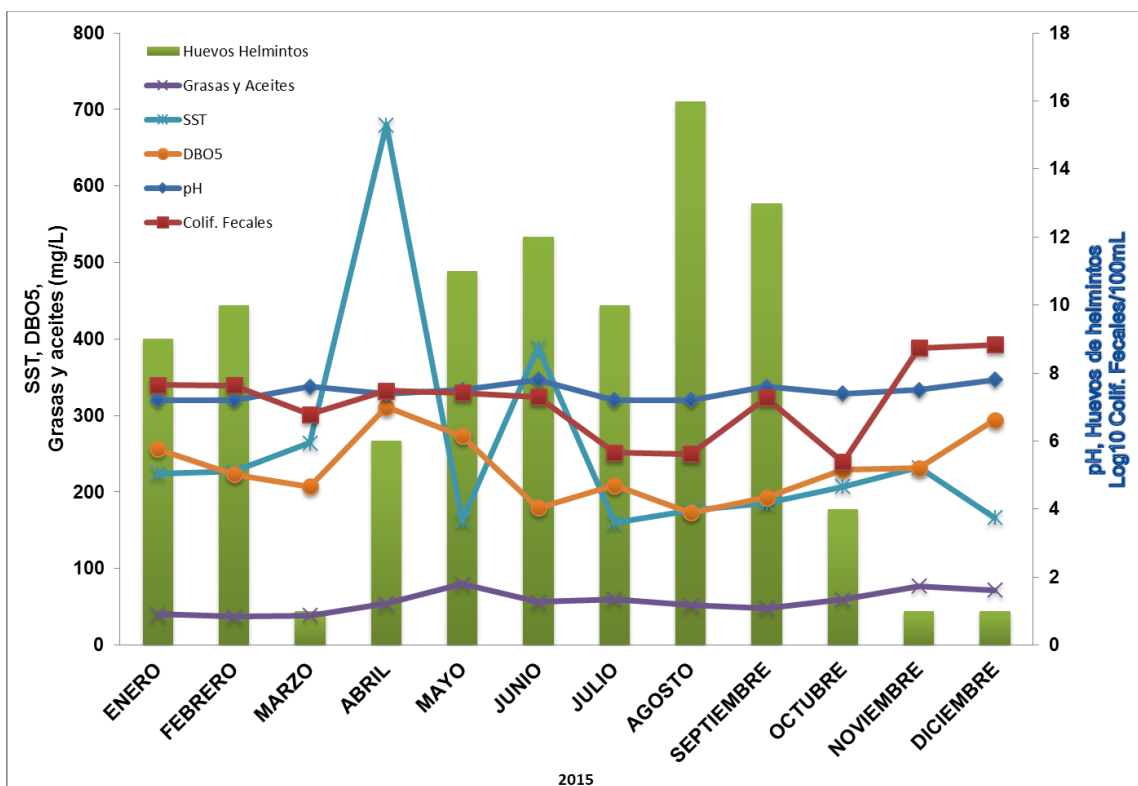


Figura 1. Comportamiento del influente de la planta de tratamiento de agua residual, Torreón, Coahuila (López 2016).



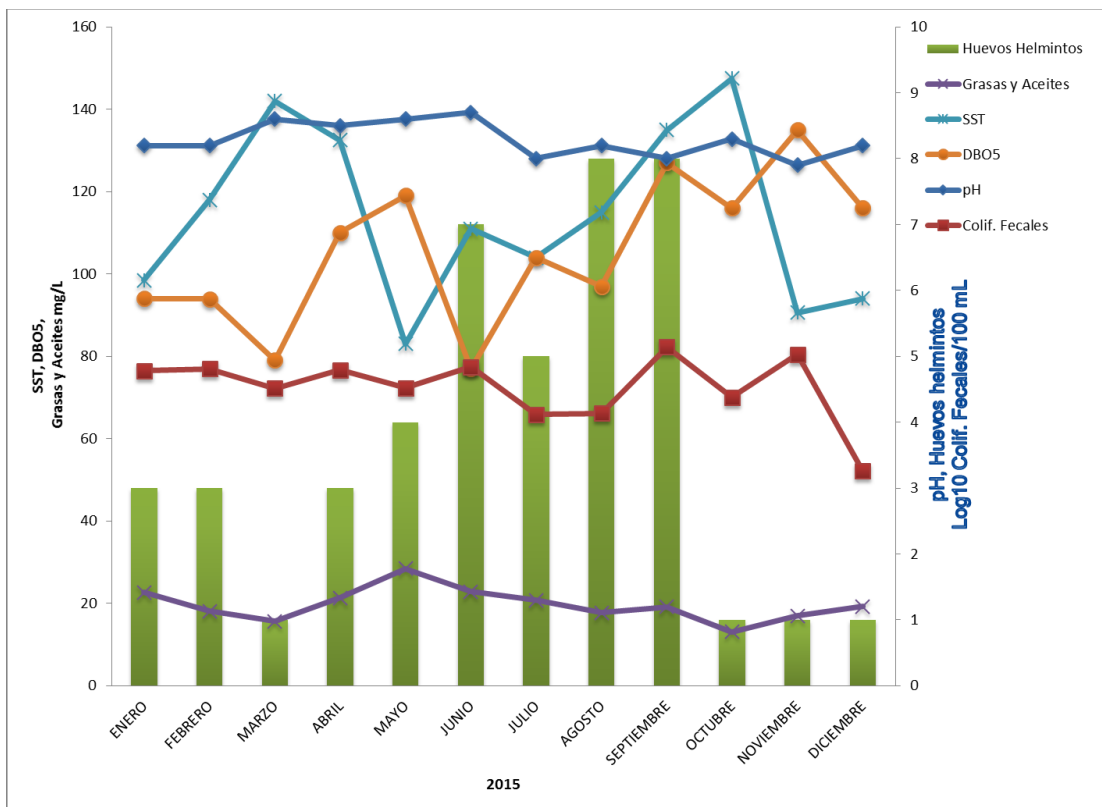


Figura 2. Comportamiento del efluente de la planta de tratamiento de agua residual, Torreón, Coahuila (López 2016).

## 2.2 Aguas residuales

De acuerdo a (Serrano, 1997) las aguas residuales son las aguas potables después de haber sido utilizadas en los diversos procesos llevado a cabo en las poblaciones. Que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias (Rodríguez 2009).

Según su origen, las aguas residuales resultan de la combinación de líquidos y residuos sólidos transportados por el agua que proviene de residencias oficinas, edificios comerciales e instituciones, junto con los residuos de las industrias y de actividades agrícolas, así como de las aguas subterráneas superficiales o de

precipitación que también pueden agregarse eventualmente al agua residual (Blázquez and montero, 2010)

### 2.2.1 Composición de las aguas residuales

Las aguas residuales se componen, básicamente, de un 99% de agua en su estado conocido como agua potable y de un 0.1% por peso sólidos, sean estos disueltos o suspendidos. Este 0.1 referido es el que requiere ser removido para que el agua pueda ser reutilizada. El agua sirve o actúa como medio de transporte de estos sólidos, los que pueden ser disueltos, en suspensión o flotando en la superficie del líquido. El agua residual contiene componentes físicos, químicos y biológicos. Es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos en el agua. La mayor parte de la materia orgánica consiste en residuos de alimentos, heces, material vegetal, sales minerales orgánicas y materiales diversos como jabones detergentes sintéticos (Rojas 2002).

**Cuadro 1.** Composición de aguas residuales (CEPIS/OMS, 2002).

<b>Constituyente</b>	<b>Alto</b>	<b>Medio</b>	<b>Bajo</b>
Sólidos totales	1200	700	350
Disueltos	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
En suspensión	350	200	100
Fijos	75	50	30
Volátiles	275	150	70
Sólidos sedimentales ml/l-h	20	10	5
DQO	570	380	190
Nitrógeno total N	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniacal	50	25	12
Fosforo total p	20	10	6
Cloruros Cl	100	50	30
Alcalinidad CaCO <sub>3</sub>	200	100	50
Grasas	150	100	50
Calcio Ca	110	50	10
Magnesio Mg	10	9	8
Sodio Na	100	50	23

### 2.2.2 Tipos de aguas residuales

Se hace respecto a la fuente generadora de la misma, es decir, va a depender del uso que se le haya dado al agua, ya que este depende de la composición concentración y característica de la misma de acuerdo con Gutiérrez (2003).

- **Aguas residuales biológicas:** presenta concentraciones altas de microorganismos muy peligrosos para la salud, algunos de ellos bacterias, virus, compuestos químico (ácidos, sustancias, volátiles, entre otros los cuales se generan en hospitales, laboratorios clínicos, laboratorios de investigación, laboratorios químicos y biológicos.
- **Aguas residuales comerciales:** son generadas por establecimientos como: aeropuertos, almacenes, centros comerciales, estaciones de servicio, bares, hoteles, lavanderías, y restaurantes. Es muy similar al agua doméstica.
- **Aguas residuales domesticas:** llamadas también como aguas grises o aguas negras. Es el agua procedente de residencias instalaciones comerciales públicas y similares. los contaminantes o desechos contenidos en este tipo de agua residual generalmente son de residuos orgánicos (residuos de comida heces fecales), detergentes (todo tipo de jabones), algunos productos químicos como cloro se calcula que el 57% de las aguas residuales son generadas por la población en general.
- **Aguas residuales industriales:** predominan los productos de desecho de los procesos industriales. El volumen y las características de esta agua varían, mucho dependiendo del tipo de industria. Estas aguas están integradas por las descargas generadas en las actividades de extracción y transformación de recursos naturales usando bienes de consumo y satisfacción para la población. Se calcula que la industria genera el 43% de las aguas residuales.

- **Aguas residuales de origen pluvial:** es el agua resultante del escurrimiento superficial de las lluvias, no se considera como agua residual, sin embargo debido a su gran carga de contaminantes si está considerado como tal además de que la mayoría de los casos es mezclada con el agua residual en la red de drenaje .

### 2.2.3 Características de las aguas residuales

En la descarga de las aguas residuales domesticas e industriales en las corrientes y cuerpos superficiales de agua, conducen a un deterioro de la calidad de dichas aguas superficiales hasta un grado tal que se puede inutilizar como fuente de abastecimiento para una comunidad, además altera y perpetua el equilibrio ecológico del ecosistema y del medio general (Vega, 2004).

Según Valencia, (2001), al mezclar las aguas residuales con las aguas superficiales se produce un cambio considerable en las características físico-químicas y biológicas del agua, lo cual resulta un deterioro de su calidad, y en la disminución de su potencial de uso como fuente de abastecimiento para la población, la agricultura y la industria (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Características afectadas de Aguas superficiales por Aguas residuales, (Valecia, 2001).

<b>Características</b>	<b>Origen de la afectación.</b>
<b>FISICAS</b>	
Solidos	Suministro de agua, con residuos industriales y domésticos
Temperatura	Residuos industriales y domésticos
Color	Residuos industriales y domésticos
Olor	Descomposición de residuos líquidos
<b>QUÍMICAS</b>	
<b>Orgánicos</b>	
Proteínas	Residuos comerciales y domésticos
Carbohidratos	Residuos comerciales y domésticos

Aceites y grasas	Residuos comerciales, industriales y domésticos
Tensoactivos	Residuos industriales y domésticos
Fenoles	Residuos industriales
Pesticidas	Residuos agrícolas
<b>Inorgánicos</b>	
Ph	Residuos industriales
Cloruros	Suministro de agua residuos industriales e infiltraciones
Nitrógenos	Residuos agrícolas y domésticos
Fósforos	Residuos agrícolas, industriales y domésticos
Azufre	Suministro de agua y residuos industriales
Tóxicos	Residuos industriales
Metales pesados	Residuos industriales
Gases	
Oxígeno	Suministro de agua e infiltraciones
Hidrogeno sulfurado	Residuos domésticos
Metano	Residuos domésticos
	<b>BIOLÓGICAS</b>
Virus	Residuos domésticos
Bacterias	Residuos domésticos
Protozoarios	Residuos domésticos
Nematodos	Residuos domésticos

### 2.3 Tratamiento de aguas residuales

El tratamiento de aguas residuales consiste en una serie de procesos físicos químicos y biológicos tiene como finalidad eliminar los contaminantes presentes en el agua del efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir un efluente del uso humano. El objetivo del tratamiento es producir efluente tratado o reutilizable y u residuo sólido también llamado biosolido o lodo) convenientes para reusó. Se pretende disminuir controlar o eliminar aquellos elementos que alteren las condiciones originales del agua (Blázquez and montero, 2010).

Los métodos de tratamiento donde se aplican fuerzas físicas se conocen como operaciones unitarias, mientras que los métodos de tratamiento en donde la remoción de contaminantes se debe a reacciones químicas o biológicas se llaman procesos unitarios. Actualmente operaciones y procesos unitarios se asocian para el tratamiento de aguas residuales municipales. Para realizar el tratamiento de las aguas residuales existen tres tipos de procesos físicos, fisicoquímicos y biológicos (Valencia 2001).

### **2.3.1 Sistemas de tratamiento**

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales consisten generalmente en una secuencia de procesos que dependen de las características del agua residual a tratar y del grado de purificación requerido según los niveles de contaminación permitidos por la legislación, lo que depende fuertemente del lugar de descarga y cuerpo receptor. La secuencia de procesos consiste básicamente en una serie de tratamientos denominados tratamiento previo, primario, secundario y, eventualmente, terciario y cuaternario (CEPIS, 2012).

## **2.4 Métodos de tratamiento de aguas residuales**

### **2.4.1 Método de tratamiento físico**

#### **2.4.1.1. Desbaste**

Es una operación en la que se trata de eliminar sólidos de mayor tamaño que el que habitualmente tienen las partículas que arrastran las aguas y evitar que dañen equipos posteriores del resto de tratamientos. Suele ser un tratamiento previo a cualquier otro (Fernández-Alba et al., 2006). De acuerdo a (Cerro, 2005) el desbaste retiene y separa los sólidos voluminosos (ya sean flotantes o en suspensión). Los elementos más usados son las rejas (desbaste grueso) y los tamices (desbaste fino).

#### **2.4.1.2. Sedimentación**

Las sustancias de sedimentación que se acumulan dependiendo de las condiciones físicas e hidráulicas del río, adyacente del puesto del vertido, originan acumulaciones considerables en el fondo de materia orgánica, con facilidades de descomposición, generando una demanda de oxígeno del agua y llevando a condiciones anaerobias en el fondo y una degradación general del hábitat en dichas zonas (Metcalf, 1985).

Este proceso está planteado como complementario en el desarrollo total de la limpieza del agua. La función básica de la sedimentación es separar las partículas suspendidas del agua. Los sistemas de decantación pueden ser simples, es decir trabaja únicamente con la gravedad, eliminando las partículas grandes y pesadas, o bien, se pueden utilizar sistemas coagulantes, para atraer las partículas finas y retirarlas del agua (Edward and Hardenberg., 1987).

Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en el fondo del sedimentador. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación (Fernández-Alba et al., 2006).

Realmente, este tipo de partículas (grandes y densas, como las arenas) se tienen en pocas ocasiones en aguas industriales. Lo más habitual es encontrar sólidos poco densos, por lo que es necesario, para hacer más eficaz la operación, llevar a cabo una coagulación-floculación previa, que como se explicará más adelante, consiste en la adición de ciertos reactivos químicos para favorecer el aumento del tamaño y densidad de las partículas (Fernández-Alba et al., 2006).

#### **2.4.1.3. Filtración**

La filtración es una operación que consiste en hacer pasar un líquido que contiene materias en suspensión a través de un medio filtrante que permite el paso del líquido pero no el de las partículas sólidas, las cuales quedan retenidas en el medio filtrante. De este modo, las partículas que no han sedimentado en el decantador son retenidas en los filtros (Haydee, 2007). El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0.15 y 0.3 mm.

Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación). En aguas industriales hay más variedad en cuanto al material filtrante utilizado, siendo habitual el uso de Tierra de Diatomeas. También es habitual, para mejorar la eficacia, realizar una coagulación-floculación previa (Fernández-Alba et al., 2006).

De acuerdo a (Romero, 2002) Una vez que se ha decantado el agua para terminar el proceso de clarificación, se hace pasar por una etapa de filtración, la cual consiste en hacer pasar el agua que todavía contiene materias en suspensión a través de un medio filtrante que permite el paso del líquido pero no el de las partículas sólidas, las cuales quedan retenidas en el medio filtrante.

#### **2.4.1.4. Flotación**

La flotación es una operación unitaria que se emplea para la separación de partículas sólidas o líquidas de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo finas gotas de gas, normalmente aire, en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas, y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto de partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido (ESPE,



2012). Obviamente, esta forma de eliminar materia en suspensión será adecuada en los casos en los que las partículas tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, así como en el caso de emulsiones, es decir, una dispersión de gotas de un líquido inmiscible, como en el caso de aceites y grasas. En este caso las burbujas de aire ayudan a —flotarll más rápidamente estas gotas, dado que generalmente la densidad de estos líquidos es menor que la del agua (Fernández Alba et al., 2006).

#### **2.4.1.5. Coagulación-Floculación**

La Coagulación consiste en la desestabilización de las partículas coloidales, empleando productos químicos (coagulantes) que neutralizan la carga eléctrica de los coloides; la Floculación consiste en la agrupación de las partículas coloidales desestabilizadas, formando agregados de mayor tamaño denominados —floculosll, los cuales sedimentan por gravedad (Haydee, 2007). Los coagulante y floculantes son usados por una eficiente separación de sólidos suspendidos. El lodo generado tiene un alto contenido de humedad, por el cual requiere un tratamiento de deshidratación antes que su disposición final (Kurimexicana, 2011).

Las impurezas se encuentran en el agua superficial como Materia en suspensión y materia coloidal. Las especies coloidales incluyen arcilla, sílice, hierro, otros metales y sólidos orgánicos (Romero, 2002). Como ya se ha mencionado en varias ocasiones, en muchos casos parte de la materia en suspensión puede estar formada por partículas de muy pequeño tamaño ( $10^{-6}$  –  $10^{-9}$  m), lo que conforma una suspensión coloidal. Estas 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. Es una

operación que se utiliza a menudo, tanto en el tratamiento de aguas residuales urbanas y potables como en industriales (industria de la alimentación, pasta de papel, textiles, etc. (Fernández-Alba et al., 2006).

## **2.4.2. Métodos de tratamiento químico.**

### **2.4.2.1. Precipitación**

Consiste en la eliminación de una sustancia disuelta indeseable, por adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo, facilitando así su eliminación por cualquiera de los métodos descritos en la eliminación de la materia en suspensión. El término precipitación se utiliza más para describir procesos como la formación de sales insolubles, o la transformación química de un ion en otro con mayor o menor estado de oxidación que provoque la formación de un compuesto insoluble (Fernández-Alba et al., 2006). Las operaciones de precipitación y sedimentación química, llevadas a cabo de manera independiente o en combinación con reacciones de oxidación-reducción, se utiliza ampliamente para la eliminación de metales. También se emplean carbonatos de sodio y calcio para metales cuando su solubilidad correspondiente (Trinidad, 2006).

### **2.4.2.2. Procesos Electroquímicos**

En este proceso se mezcla el agua residual con agua de mar y se hace pasar célula simple que contiene electrodos de carbón. En razón de las densidades relativas del agua de mar y de la mezcla del agua de mar y residual, la primera se acumula en la superficie del ánodo en la parte inferior de la célula la última lo hace en la superficie del cátodo cerca de la parte superior de la célula. La corriente eleva el pH en el cátodo, precipitando con ello Fósforo y Amoniaco. Las burbujas de hidrogeno generadas en el cátodo elevan el fango a la superficie, donde es arrastrado y eliminado por métodos convencionales. El cloro desarrollado en el ánodo de la celda

desinfecta el efluente y la mezcla sobrante de agua residual-de mar es seguidamente vertida al mar (Miranda, 2004).

Algunos procesos electroquímicos a gran escala han sido (y son en algunos casos) causantes de importante impacto ambiental fundamentalmente relacionado con la emisión de contaminantes al aire y/o cursos de agua. Dentro de las industrias electroquímicas potenciales generadoras de contaminantes, se encuentran la producción de cloro (proceso cloro-soda) y las plantas de electro depósitos. Compensando este panorama negativo, la electroquímica también aporta herramientas para estudiar, controlar, mitigar, o tratar residuos industriales. El estudio y control está relacionado con las posibilidades que brinda el electroanálisis (Edward and Hardenberg., 1987).

El intercambio iónico es un proceso en que los iones que se mantiene unidos a grupos funcionales en la superficie del sólido por fuerzas electrostáticas se intercambian por especies diferentes en disolución. Ya que la desmineralización se puede llevar a cabo mediante intercambio iónico, es posible utilizar procesos de tratamientos de corriente continua , en los que el parte del agua residual del efluente se desmineraliza y se combina después con parte del efluente que ha sido desviado del tratamiento para producir un efluente de calidad específica (Miranda, 2004).

El intercambio iónico empleando minerales porosos naturales, como las zeolitas, permite la separación de cationes metálicos en solución que se difunden a través de intersticios del material, ocupando el sitio de iones fácilmente permutables hacia la solución, como el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{K}^+$ , entre otros (Miel et al., 2005)

Es una operación en la que se utiliza un material, habitualmente denominado resinas de intercambio iónico, que es capaz de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, los mantiene temporalmente unidos a la superficie, y los cede frente a una disolución (Fernández-Alba et al., 2006).

#### **2.4.2.3. Adsorción**

La absorción puede ser física o química, según el gas que se disuelva en el líquido absorbente o reaccione con él dando un nuevo compuesto químico (según exista o no interacción química entre el soluto y el absorbente) (ESPE, 2012).

El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento esté en auge. Es considerado como un tratamiento de refino, y por lo tanto al final de los sistemas de tratamientos más usuales, especialmente con posterioridad a un tratamiento biológico (Fernández-Alba et al., 2006).

#### **2.4.2.4. Desinfección**

La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que puedan causarnos enfermedades, dado que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. Los organismos causantes de enfermedades pueden ser bacterias, virus, protozoos y algunos otros. La desinfección se hace imprescindible para la protección de la salud pública, si el agua a tratar tiene como finalidad el consumo humano. En el caso de aguas residuales industriales, el objetivo puede ser no solo desactivar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo, si lo que se pretende es reutilizar el agua (Fernández-Alba et al., 2006).

La utilización de desinfectantes persigue tres finalidades: producir agua libre de patógenos u organismos vivos, evitar la producción de subproductos indeseables de la desinfección y mantener la calidad bacteriológica en la red conducción posterior. Los reactivos más utilizados son los siguientes (Fernández-Alba et al., 2006)

La etapa final del proceso de tratamiento de aguas siempre es la desinfección. En algunos casos en las plantas muy sencillas, ésta es la única etapa del proceso. Hay tres tipos básicos de desinfección: Tratamientos físicos, tratamientos químicos y radiación (Romero, 2002).

### **2.4.3. Método de tratamiento biológico**

En los sistemas biológicos, el tratamiento anaerobio solo o combinado con otros procesos es una tecnología consolidada para el tratamiento de ARD, principalmente en países con condiciones climáticas favorables que permiten una elevada biodegradabilidad—lo que representa una ventaja técnica y económica —, ya que en estos procesos hay una verdadera reducción de la materia orgánica, menor producción de lodos digeridos en el mismo reactor anaerobio, menores requerimientos de área comparados con otros métodos y generación de un subproducto altamente energético, como es el metano contenido en el biogás; adicionalmente, presentan un bajo o nulo requerimiento de insumos químicos, dadas las condiciones adecuadas de pH, alcalinidad y nutrientes (Torres, 2010)

Los procesos biológicos son ampliamente usados para el tratamiento de aguas residuales, debido a que una parte importante de la materia orgánica presente en las aguas residuales es biodegradable; la presencia de microorganismos en el proceso degrada esta forma de contaminación principal. La fracción afectada es estimada por la determinación de la DBO5, principio con el que se reproduce este fenómeno. En contraste con el proceso fisicoquímico, el objetivo de los procesos biológicos es eliminar la parte biodegradable soluble de la materia orgánica, generalmente por aireación, siendo las ventajas la mineralización de la materia y la producción de lodo. Este último punto es muy importante porque productos solubles son convertidos en sólidos fácilmente removidos por precipitación en un sedimentado (Díaz, 2010).

En la degradación de las aguas residuales que son utilizadas mediante curtidumbres, se activan mediante un proceso de lodo. Los procesos de lodo activado, se ven afectado por muchos factores en cuanto al rendimiento. En diversos parámetros de una importancia relativa es la utilización del sustrato, para el crecimiento de los microorganismos que baja el funcionamiento del reactor incluyendo el medio tiempo de resistencia celular (Durai and Rajasimman, 2011). Sin embargo los procesos aerobios no son considerados como una opción adecuada de tratamiento debido a los altos requerimientos de energía para

aireación, limitaciones en rangos de transferencia de oxígeno en la fase líquida, y grandes cantidades de producción de lodo (Maldonado, 2009).

#### **2.4.3.1. Tratamiento biológico anaeróbico**

Podemos considerar que en los procesos anaerobios que consiste en una serie de procesos microbiológicos que ocurren dentro de un recipiente hermético, que realizan la digestión de la materia orgánica con producción de metano. Pueden intervenir diferentes tipos de microorganismos, pero es desarrollado principalmente por bacterias. Ejemplos de tratamientos anaeróbicos son los tanques sépticos y los reactores anaerobios que tratan el agua en un sistema sin luz, oxígeno ni movimiento (Rossi, 2010).

La digestión anaeróbica o descomposición produce metano, dióxido de carbono, y un número de otros gases en cantidades pequeñas, cantidades menores de calor, y un producto final de estabilizados lodos con contenido de nitrógeno superior a la producida por digestión aerobia (Arthurson, 2008).

Las ventajas principales sería que generalmente requiere de instalaciones menos costosas, y no hay necesidad de suministrar oxígeno, por lo que el proceso es más barato y el requerimiento energético es menor. Produce una menor cantidad de lodos (el 20% en comparación con un sistema de lodos activos) (Rossi, 2010).

De acuerdo a (Lorenzo and Obaya, 2006) es una de las ventajas que La producción de lodos estabilizados en exceso es mínima y fácilmente drenable hasta de 30 a 40 % y, por tanto, los costos de tratamiento del lodo y su transportación posterior son relativamente bajos.

- Se pueden aplicar altas cargas hidráulicas y orgánicas con eficiencias aceptables.
- El reactor necesita poco espacio.
- Los lodos anaerobios adaptados pueden mantenerse sin alimentación por largos períodos de tiempo, por lo que el proceso resulta muy adecuado para las industrias que trabajan de forma cíclica.

- Su construcción no es compleja y los costos de operación y mantenimiento son relativamente bajos.

Una ventaja importante de anaeróbico durante la digestión aeróbica es que el dióxido de carbono y metano (biogás) se generan como fin productos, así suplir las necesidades energéticas del tratamiento facilidad. Biogás normalmente contiene aproximadamente 60 a 70% de metano, 30 a 40% de dióxido de carbono, y pequeñas cantidades de otras gases, incluyendo amoníaco, sulfuro de hidrógeno y mercaptano, por lo que es un gas extremadamente valioso que es rica en fácilmente energía extraíble. Además, la digestión anaeróbica no requieren la entrada de aire o de oxígeno en el sistema, que es extremadamente costo-efectiva en relación con los sistemas de tratamiento de lodos que requiere oxígeno (Arthurson, 2008).

Por otro lado, sus desventajas sería que es más lento que el tratamiento aeróbico, es decir, requiere un mayor tiempo de contacto o retención hidráulica, así como más tiempo de aclimatación, lo que impide el tratamiento de grandes volúmenes de aguas servidas (Rossi, 2010).

El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno (Fernández-Alba et al., 2006).

El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado —biogásll, formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos (Fernández-Alba et al., 2006).

Durante el arranque y operación de los reactores anaerobios se recomienda el seguimiento de algunos parámetros fisicoquímicos y el uso de algunas herramientas que permitan evaluar su desempeño (Torres and Pérez, 2010).

Según (Arango and Sánchez, 2009) Algunas ventajas del proceso anaerobio son:

- Producción de metano, gas combustible utilizado como fuente de energía
- Menor consumo de energía comparado con los tratamientos aeróbicos, resultando en costos operacionales más reducidos.
- La fracción de materia orgánica convertida en células bacterianas es relativamente baja (cerca de 10%) en relación al tratamiento aerobio (cerca de 50%). Esto significa que la cantidad de fango biológico formado es menor, resultando en menores problemas de disposición de los mismos.
- Las unidades de tratamiento son cerradas evitando la generación de olores
- Tolerancia a elevadas cargas orgánicas

El agua residual doméstica puede ser tratada de una forma eficiente a través de procesos biológicos como los anaerobios, principalmente en países de clima tropical donde las condiciones de temperatura (mayor a 20 °C) son favorables para el adecuado desarrollo de los procesos anaerobios (Edith et al., 2010). Recientes desarrollos en los procesos de tratamiento anaerobios, han demostrado que los reactores con biopelículas anaerobias desarrolladas en soportes de origen natural o sintético han sido usados con éxito para el tratamiento de agua residual de rastro obteniendo altas eficiencias de remoción de la DQO empleando altas velocidades de carga orgánica, con un tiempo de arranque rápido (Maldonado, 2009).

Estudios experimentales se evalúan como un método de tratamiento para los influentes industriales en los tratamientos biológicos de las aguas residuales. Los Tratamientos son desechos de bacterias que implican una estabilización de residuos por descomposición en ellos son inofensivos sólidos orgánicos, ya sean por procesos aeróbicos y anaeróbicos. (Durai and Rajasimman, 2011).

En el proceso aeróbicos de la tasa de descomposición es más rápido que el proceso anaeróbico y no está acompañada por olores desagradables, mientras que en el



proceso anaeróbico se requiere una detención de un periodo y da olores muy desagradables (Durai and Rajasimman, 2011).

Estudios experimentales indicaron que en el flujo ascendente anaerobio que consto de una operación y el mantenimiento es de un 30 a 60% más bajo el costo de operación que otros sistemas que podamos encontrar, pero principalmente debido a los requisitos de baja energía (Nada et al., 2011).

**Cuadro 3.** Eficiencia de los procesos de tratamientos de las aguas residuales (Referencia) (CEPIS, 2012).

PROCESO	DBO	DQO	SOLIDOS SUSPENDIDOS
<b>TRATAMIENTO PRELIMINAR</b>			
Cribado fino	5-10	5-10	2-10
Cloración crudo o sedimento	15-30	-	-
<b>TRATAMIENTO PRIMARIO</b>			
Sedimentación simple	25-40	20-35	40-70
Precipitación química	50-85	40-70	70-90
<b>TRATAMIENTO SECUNDARIO</b>			
Lodos activos	55-95	50-80	50-92
<b>LAGUNAS</b>			
Primarias	75-85	60-70	85-95
Secundarias	90-95	60-70	85-95
Terciarias	85-95	60-70	85-95

## 2.5 Etapas y Caracterización de los Tratamientos.

Por costumbre en Latinoamérica y el caribe, se definen las etapas de tratamiento de la manera siguiente manera (wichern ,2003)

- ❖ Tratamiento preliminar.
- ❖ Tratamiento primario.
- ❖ Tratamiento secundario.
- ❖ Tratamiento avanzado o terciario.
- ❖ Desinfección.
- ❖ Disposición de lodos.

### 2.5.1. Tratamiento preliminar.

Está destinado a la preparación o acondicionamiento de las aguas residuales con el objetivo específico de protegerlas instalaciones el funcionamiento de las obras de tratamiento y eliminar o reducir sensiblemente las condiciones indeseables relacionadas principalmente a la apariencia estética de las plantas de tratamiento.

**Cuadro 4.** Objetivos de los procesos de pretratamiento.

PROCESO	OBJETIVO
<b>Rejas o tamices</b>	<b>Eliminación de solidos gruesos</b>
Trituradores	Desmenuzamiento de solidos
<b>Desarenadores</b>	<b>Eliminación de arenas y gravilla</b>
Desengrasadores	Eliminación de aceites y grasas
<b>Preareacion</b>	<b>Control de olor y mejoramiento del comportamiento hidráulico</b>

- **Tratamientos primarios**

Previo y primario tienen como finalidad acondicionar el efluente para los tratamientos posteriores. Consisten en eliminar por medio de métodos físicos elementos que puedan dañar a los equipos o procesos subsiguientes en la planta, así como estabilizar el caudal o ajustar el pH. Estos equipos, entre los que se pueden enumerar decantadores, sedimentadores primarios, tamices,

desgrasadores y tanques de estabilización, eliminan sólidos inorgánicos de las aguas residuales y gran parte de la materia orgánica presente. También se pueden incluir dentro de esta clasificación procesos químicos de coagulación y floculación. Los tratamientos secundarios incluyen procesos biológicos y químicos (Wichern, 2003).

#### Ejemplos

- Sedimentación primaria
- Flotación
- Precipitación química
- Filtros gruesos
- Oxidación química

Coagulación, floculación, sedimentación y filtración (Wichern, 2003).

-

#### • **Tratamientos secundarios**

Los procesos de tratamiento secundario de las aguas residuales por barros activados emplean, en general, un reactor tubular o una serie de reactores de mezcla completa en los que se pone en contacto el efluente proveniente del tratamiento primario con un líquido que contiene microorganismos. Estos reactores tienen sistemas de burbujeo y/o agitación que garantizan las condiciones apropiadas (aerobias, anóxicas o anaerobias) para las reacciones microbiológicas. El efluente proveniente de la cadena de reactores se alimenta generalmente a un decantador que separa esta corriente en el efluente líquido clarificado y en los barros. Una fracción de estos barros se recicla a la red de reactores y la otra se desecha o purga para compensar el aumento de la concentración de biomasa debido a su crecimiento. El agua clarificada se somete a tratamientos posteriores para pulido final o se descarga en el cuerpo receptor en el caso que se hayan conseguido los estándares de calidad establecidos. Las estrategias de operación

posibles incluyen la distribución de la alimentación a lo largo de la zona de reacción y el reciclo de corrientes de un reactor a otro (Wichern, 2003).

### Ejemplos

- Procesos aerobios basados en la eliminación de los contaminantes orgánicos para su transformación en biomasa bacteriana, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O.
- Procesos anaerobios, que transforman la sustancia orgánica en biogás mezcla de metano y CO<sub>2</sub>

**Cuadro 5.** Tratamientos secundarios (Rojas, 2002).

a) Filtración biológica	<b>Baja capacidad</b>	
	Alta capacidad	Filtros comunes
		Biofiltros
		Aero-filtros
		Accelo-filtros
B) Lodos activos	Convencional	
	Alta capacidad	
	Contacto de estabilización	
	Aeración prolongada	
C) Lagunas	Estabilización	Aerobia
		Facultativa
		Maduración
		Mezcla completa
		Aerada facultativa
	Aerada	Facultativa con aireación mecánica
		Difusión al aire
D) otros	Oxígeno puro	
	Discos rotatorios	



Múltiple	80-90-	50-70	40-60	10-40
----------	--------	-------	-------	-------

#### 2.4.2. Necesidad del tratamiento.

El tratamiento de las aguas residuales, es un proceso necesario para mantener y cuidar la integridad del ecosistema en que vivimos los seres humanos, por eso tratamos de no contaminar el agua. En los contaminantes biodegradables, que encontramos a los microorganismos que aceleran la descomposición de la materia orgánica (Chang, 2007).

El descubrimiento de la conexión entre enfermedades, como el cólera, y la calidad de las aguas revolucionaron la forma de gerenciar los sistemas acuáticos. Se construyeron canales cerrados y conductos para transportar las aguas servidas y alejarlas de las áreas urbanas. El sistema de colección de aguas residuales continuó su expansión y cada vez mayores cantidades de aguas residuales se fueron depositando en zonas específicas, lejos de los cuerpos de aguas. Esto constituyó el paso más importante hacia la solución de los problemas de las epidemias transportadas por el agua, pero surgió entonces un nuevo problema: el tratamiento de esas aguas contaminadas. Con la proliferación de la industrialización se incrementó el consumo de agua y la facilidad de la disposición final de las aguas residuales trajo aparejado un rápido crecimiento de los impactos en los ecosistemas acuáticos. A fines del siglo XIX comenzaron los descubrimientos de los efectos de las aguas residuales en los cauces de agua y, consecuentemente, los experimentos en el campo de la purificación de las aguas. La preocupación principal fue la de mejorar su aspecto físico, concentrando los esfuerzos en los procesos de filtrado y sedimentación, a los que le siguió el tratamiento químico. Los procesos de barros activados se desarrollaron a comienzos del siglo XX (Rodríguez, 2009)

#### 2.5.3 Finalidad de los sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (TAR).

Los tratamientos tienen como finalidad acondicionar el efluente para los tratamientos posteriores. Consisten en eliminar por medio de métodos físicos

elementos que puedan dañar a los equipos o procesos subsiguientes en la planta, así como estabilizar el caudal o ajustar el pH (Nicoella, 2000).

## 2.6 Generalidades del tratamiento de aguas residuales.

Los métodos de tratamiento de las aguas residuales se desarrollaron inicialmente como respuesta a su aparición en la salud pública y a los escenarios adversos causados por los vertidos de aguas residuales en el medio ambiente. A partir de los últimos años, se ha emprendido un importante esfuerzo para extender el uso del tratamiento de agua residual y hacerlo más eficiente. Este esfuerzo ha sido consecuencia de una mejor comprensión de las condiciones producidas en el entorno por el vertido de agua residual cruda o parcialmente tratada ; el conocimiento de los efectos causados a largo plazo por el vertido de alguno de los constituyentes específicos encontrados en el agua residual; por la protección del medio ambiente; el desarrollo del conocimiento científico y su aplicación tecnológica; la necesidad de conservar los recursos naturales y la reutilización del agua residual. Como consecuencia de todo esto, el grado de tratamiento requerido ha aumentado sustancialmente y se han añadido objetivos y metas adicionales de tratamiento (Nicoella, 2000).

**Cuadro 7.** Características de los niveles de tratamiento (Nicoella, 2000).

<b>NIVEL DE TRATAMIENTO</b>				
<b>ITEM</b>	<b>Preliminar</b>	<b>Primario</b>	<b>Secundario</b>	<b>Terciario</b>
Contaminantes Removidos	Sólidos gruesos (basuras, arenas) Grasas Acondicionamiento	Sólidos suspendidos sedimentables Materia orgánica	Sólidos no sedimentables Materia orgánica suspendida	Contaminantes específicos Materia orgánica fina y soluble (pulimento)

	químico (pH)	suspendida (parcialmente)	fina/soluble (parcialmente) Nutrientes (parcialmente) Patógenos (parcialmente)	Nutrientes patógenos (principalmente)
Eficiencias de Remoción	DBO: 0-5% Coliformes Nutrientes	SS: 60-70% DBO: 30-40% Coliformes: 30-40%	SS: 60-99% DBO: 60-99% Coliformes: 60-99% Nutrientes: 10-50%	SS: > 99% DBO: > 99% Coliformes: > 99,9% Nutrientes: > 90%
Mecanismo Predominante	Físico	físico	Biológico químico	Biológico químico
Cumple patrón de Vertimiento	No	No	Usualmente si	Si

## 2.6.1 Constituyentes de interés en el (TAR).

### 2.6.1.1. Principales constituyentes de interés en el tratamiento de agua residual.

La calidad del agua residual no es una condición estática ni puede ser definida por la medición de un solo parámetro de referencia, ya que es función del tiempo, del lugar y de los aportes contaminantes que en su momento estén presentes. Es por eso que resulta ambiguo si tomamos en cuenta la actividad en la que se desee emplear, ya que el agua presenta diferentes niveles de calidad útiles a diferentes actividades y por lo tanto representa diferentes beneficios para cada persona



- **Sólidos suspendidos:** promueven el desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias cuando el agua residual no tratada es descargada en el ambiente acuífero.
- **Orgánicos biodegradables:** compuestos por proteínas, carbohidratos y grasas; son medidos en términos de DQO y DBO. Si son descargados en el oxígeno y el desarrollo de condiciones anaerobias.
- **Patógenos:** varias enfermedades pueden transmitirse por organismos  
Nutrientes: Nitrógeno y fosforo son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando son descargados en ambientes acuáticos, originan el crecimiento de seres indeseables, si son descargados en cantidades excesivas en tierra pueden provocar contaminación en mantos acuíferos
- **Contaminantes prioritarios:** compuestos orgánicos e inorgánicos catalogados por ser carcinógenos, mutagénicos, o altamente tóxicos.
- **Orgánicos refractarios:** tienden a resistir métodos convencionales de tratamiento. Incluyen los surfactantes, fenoles y pesticidas agrícolas.
- **Metales pesados:** Provenientes de actividades industriales y comerciales
- **Inorgánicos disueltos:** constituyentes inorgánicos como calcio, sodio, cloruros y sulfatos incorporados o bien presentes en la fuente de suministros de agua

El monitoreo de dichos parámetros es muy importante para monitorear los niveles de contaminación por aguas residuales tanto domesticas e industriales, así como desechos agrícolas y procesos erosivos en tierras de cultivo y zonas deforestadas (Conagua, 2012).

## 2.7 Reutilización de aguas residuales

La reutilización de agua constituye una alternativa de gran relevancia en los estados áridos y semiáridos del país, donde uno de los principales problemas son los escasos de este recurso (Escalas, 2006).

En las regiones áridas y semiáridas de México se aplican durante décadas de riegos agrícolas con aguas residuales crudas. Esta ha sido una respuesta a la escasez de agua, impulsada también por la fácil disponibilidad de las aguas residuales crudas frente al agua pozo que debe bombearse o conducirse.

Según Garza, (2000). A principios de los noventa, el instituto nacional de ecología (INE) estimaba que el 44.3 de las aguas residuales municipales, normalmente no tratadas, se empleaban en el riego agrícola. Según el mismo autor, 350,000 ha se irrigaban por este procedimiento, según datos de la primera mitad de los noventa.

En los riegos con el agua residual cruda o mal tratada tienen implicaciones graves sobre el suelo y los mantos acuíferos y sobre la salud de la población, con especial incidencia en las enfermedades intestinales (Chávez, 2009).

La reutilización de las aguas residuales municipales por regantes agrícolas se encuentra a veces amparada por concepciones legales o los regantes. Otras veces en cambio, se trata de situaciones de hechos difícil de resolver. En todo caso, la preexistencia de reutilización de aguas residuales crudas tiene implicaciones sociales y legales de importancia, que se pone de manifiesto al llevar a cabo proyectos de saneamiento de esos caudales. Entonces el agua tratada, es apta su reutilización industrial, para su uso público urbano o para la recarga de acuíferos, no puede ser usada según las prioridades que establezca las autoridades pagan su tratamiento, si no que estas deben pactar el futuro uso del agua tratada con los usuarios tradicionales, legítimos (Chávez, 2009).

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 (Semarnat, 1998).

La reutilización de agua es muy frecuente en los estados áridos y semiáridos de nuestro país, en donde uno de los principales problemas es la escasez de agua, en

muchas de estas regiones, estas aguas son utilizadas en el riego de campos agrícolas sin importar el alto grado de contaminantes que éstas contienen, pudiendo llegar a contaminar los cultivos y generar problemas a la población (CONAGUA, 2008).

### **2.7.1 Contaminantes básicos**

Son aquellos compuestos o parámetros que pueden ser removidos o estabilizados mediante procesos convencionales. En lo que corresponde a esta norma oficial mexicana solo se consideran los siguientes grasas, y aceites, materia flotante, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos (SEMARNAT 1998).

### **2.7.2 Contaminantes patógenos y parasitarios**

Son los microorganismos, quistes y 5 huevos de parásitos que pueden estar presentes en las aguas residuales y que representan un riesgo a la salud humana, flora fauna. En lo que corresponde a esta Norma Oficial Mexicana solo se consideran los coliformes fecales medidos NMP o UFC/100 ml y los huevos de helminto medidos como h L<sup>-1</sup> (huevos por litro) (SEMARNAT,1998).

### **2.7.3 Reúso del agua residual en servicios al público con contacto directo.**

Es el que se destina a actividades donde el público usuario este expuesto directamente o en contacto físico. En lo que corresponde a esta norma oficial mexicana se consideran los siguientes reúsos llenado de lagos y canales artificiales recreativos con paseos en lancha, remo, canotaje, y esquí, fuentes de ornato, lavado de vehículos, riego de parques y jardines (SEMARNAT, 1998)

## 2.8. Potencialidad del agua residual en sistemas agrícolas

Una de las alternativas para tratar de remediar en parte la falta de agua, es aprovechar el agua residual para riego agrícola, generada tanto por la población urbana, como por las industrias. Sin embargo, son pocos los estudios relacionados con la calidad sanitaria y productividad agrícola de tales recursos hídricos. En México, es escasa la investigación sobre el aprovechamiento de los nutrientes, la evaluación de la calidad sanitaria en ciertos cultivos, y las propiedades físicas y químicas de suelo debido al riego con aguas residuales (Rascón, 2005).

El uso en riego de aguas de baja calidad es una práctica cada vez más frecuente en el mundo, porque es una fuente barata para zonas con régimen pluvial errático y por la escasez creciente de agua para riego (Rivera, 2007). El uso de agua residual para riego agrícola tiene sus orígenes en la construcción de una salida para las aguas residuales del Valle de México. En el año de 1890 se comenzaron a aprovechar estas aguas en la región del Valle del Mezquital en Tula, Hidalgo, para el riego por inundación de cereales, hortalizas y forrajes como alfalfa. No había control sanitario, hasta la aparición de la NOM 032 y 033 en su versión de Norma Técnica Ecológica de 1988. La NOM 067 completaba el esquema regulatorio, el cual ahora se incluye en la NOM 001/ECOL-196 (Rascón, 2005).

La mayoría de hortalizas (col, coliflor, tomate, zapallo, espinaca, nabo) y tubérculos (papa y camote) tiene una sensibilidad moderada. Casi todos los frutales son bastante sensibles a la salinidad, salvo el caso del higo, papaya, olivo y piña, que muestran una tolerancia moderada, también podría presentarse exceso de ciertos elementos tóxicos, como sodio, cloruros, boro, etc., los que limitan el rendimiento de algunos cultivos sensibles. El problema de la toxicidad es diferente al de la salinidad, ya que sucede dentro de la planta y no por escasez de agua un aspecto adicional es el alto nivel de nitrógeno que caracteriza a los efluentes de lagunas de estabilización y que provocan un desarrollo vegetativo excesivo de la planta en

detrimento de los frutos. Esta característica debe ser considerada como un criterio para seleccionar los cultivos de forrajes (Naredo y Parra Supervia, 2003).

### **2.8.1. Presencia de nutrimentos en el agua residual**

La presencia de ciertas formas de nutrientes en las aguas residuales beneficiaría más a algunos cultivos que a otros. Para la aplicación del rehusó sobre un cultivo específico, es necesario tener en cuenta aspectos como: la capacidad de asimilación de nutrientes, el consumo de agua, la presencia de iones tóxicos, la concentración relativa de Na y el contenido de sales solubles, ya que en ciertas condiciones climáticas puede salinizarse el suelo y modificarse la composición iónica, alterándole características como el desarrollo vegetativo y la productividad (Medeiros, 2005). Algunos cultivos, como forrajes perennes y turbas y ciertas especies arbóreas y cultivos, como el maíz, el sorgo y la cebada, requieren una elevada capacidad de asimilación de nutrientes, alto consumo de agua, elevada tolerancia a la humedad del suelo, baja sensibilidad a los constituyentes del agua residual y mínima necesidad de control. Otros cultivos, como leguminosas, la mayoría de cultivos de campo (algodón y cereales) y algunos frutales, como cítricos, manzanos y uvas, no requieren agua en exceso, favoreciendo el rehusó de las aguas residuales (valencia 1998).

### **2.8.2. Impacto del uso de aguas tratadas en el medio agrícola**

El principal uso del agua residual en México es el agrícola. La superficie dedicada a las labores agrícolas en México varía entre los 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada de entre 18 a 22 millones de hectáreas por año (CONAGUA, 2006). En el cuadro No 6. Se presenta la información sobre la superficie agrícola nacional

Sin embargo, a pesar de la importancia del riego agrícola y su potencial impacto en la salud humana y ambiental, no existe seguimiento y evaluación de los impactos relacionados con el uso de aguas residuales en la agricultura, como son: salinización de los suelos, contaminación de aguas superficiales y subterráneas, fijación y migración de contaminantes en suelos y plantas, y su eventual impacto por consumo de alimentos por parte del ser humano, (Normas OPS y EPA, 2014).

**Cuadro 8.** Cultivos que reúsan de aguas residual domesticas (CEPIS, 2003).

<b>Cultivos regados con agua residual</b>	<b>Área</b>	<b>Caudal</b>
Forestales	97	99
Frutales	46,772	40
Industriales	391,418	1,473
Forrajes	6,943	1,172
Hortalizas	48,691	1,511
Otros	4806	696
Totales.	494,727	4,491

El cuadro 9. Muestra los principales cultivos en los que se aplica el reusó de aguas residuales domesticas en América Latina (Cepis, 2003). En esta tabla se observa que el mayor porcentaje (83,1%) de las aguas residuales es usado principalmente en tres tipos de cultivos: hortalizas (30,2%), industriales (29,5%) y forrajes (23,4%). Esta situación es preocupante, pues mientras los cultivos industriales se someten previamente a un proceso de transformación, el forraje lo consumen directamente los animales y las hortalizas, los seres humanos, lo que eleva el riesgo de contaminación microbiológica o parasitológica y, por lo tanto, la generación de problemas de salud pública significativos. La misma situación ocurre para los

cultivos de frutales, cuya área regada también representa un elevado porcentaje (Lara y Hernández, 2003).

Las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) se diseñan para producir efluentes que garanticen el cumplimiento de estándares de calidad, de acuerdo con las reglamentaciones existentes y con el aprovechamiento, la descarga de aguas residuales se ha hecho sin considerar las condiciones del medio donde se ha realizado, siendo el vertimiento directo a los cuerpos de agua superficiales (ríos, lagos y mares) y al suelo los métodos de evacuación de aguas residuales más comunes en la mayoría de ciudades de los países pobres; sin embargo, estas prácticas no respetan las regulaciones municipales o los estándares de calidad para el agua de riego, representando problemas ambientales y riesgos para la salud (Escalas, 2006).

#### 2.8.3. Alternativas para hacer el uso adecuado de las AR en el medio agrícola.

Una de las alternativas para tratar de remediar en parte la falta de agua, es aprovechar el agua residual para riego agrícola, generada tanto por la población urbana, como por las industrias. Sin embargo, son pocos los estudios relacionados con la calidad sanitaria y productividad agrícola de tales recursos hídricos. En México, es escasa la investigación sobre el aprovechamiento de los nutrientes, la evaluación de la calidad sanitaria en ciertos cultivos, y las propiedades físicas y químicas de suelo debido al riego con aguas residuales. El tratamiento y el reuso del agua juegan un papel fundamental en la administración y manejo de este recurso en todos los países. Los tipos de reuso más comunes son el aprovechamiento del agua tratada en actividades agrícolas, industriales, recreativas y recarga de acuíferos. En cuanto a la recarga de acuíferos, en varios países se han realizado investigaciones para medir los impactos asociados a la salud pública por patógenos, virus, metales pesados y, en general, por el transporte de contaminantes. Desde 1992 se han desarrollado normas para el control de esta actividad (Arreguín et al, 2000).

## 2.9 Estrategias para el manejo agrícola de las aguas residuales tratadas.

La eficiencia del uso de las aguas residuales en la agricultura depende básicamente de las estrategias que se adopten para optimizar la calidad y cantidad de la producción, a la vez que se mejora la productividad del suelo, el ambiente y la salud pública. Una combinación apropiada de los diferentes componentes permitirá el resultado óptimo para la condición específica que se maneje. Para ello es requisito fundamental contar con la información sobre las características del efluente que se utilizará y del área que se pretende habilitar. Los tres componentes básicos que deberán combinarse son:

- a) los tipos de cultivos.
- b) los métodos de riego.
- c) las prácticas de manejo (Bartone, 1990).

La cantidad total y la disponibilidad de agua permitirán determinar la magnitud del área agrícola, el programa de siembras y cosechas, la frecuencia y horario de riego y las necesidades adicionales de almacenamiento. La calidad del agua en términos de concentración de nutrientes, sales e iones determinará el tipo de cultivo en función de su tolerancia a las concentraciones de sales, el método de riego, la fertilización y otras prácticas de manejo véase en el siguiente cuadro.

**Cuadro 9.** Cultivos tolerantes al agua residual (Bartone, 1990).

<b>TOLERANTES</b>	<b>SEMITOLERANTES</b>	<b>SENSIBLES</b>
Cebada	Avena	Frijoles



Algodón	Soya	Lentejas
Betarraga	Trigo	Zanahoria
Alfalfa	Sorgo	Cebolla
Esparrago	Caña de azúcar	Maíz

### 2.9.1 Ventajas y limitaciones del uso de las aguas residuales y/o aguas tratadas en el sistema agrícola.

Durante el avance de esta investigación nos hemos dado cuenta que el riego realizado con aguas residuales se viene incrementando notablemente con el transcurso del tiempo. Este crecimiento se debe a que aporta a la agricultura ventajas como las siguientes:

- Disponibilidad permanente del agua: El uso de aguas residuales permite la recarga de los acuíferos, que en muchas ocasiones son las principales fuentes de agua potable.
- Aporte de gran cantidad de nutrientes: ( Moscoso, 1995); dice que el aporte de grandes cantidades de nutrientes es una de las grandes razones para preferir el riego con aguas residuales. La reducción o eliminación de la práctica de fertilización con abonos químicos, lograda con el riego de aguas residuales, representa muchas veces hasta el 50% del costo de producción.
- Incremento del rendimiento de los cultivos: Las aguas residuales también permiten obtener rendimientos mayores en los cultivos que cuando éstos son regados con aguas blancas o fertilizados con abonos químicos. (Shende, 1985), cita algunos rendimientos comparativos de cultivos agrícolas en t/ha/año tal y como se muestra en la tabla siguiente.

**Cuadro 10.** Mayores rendimientos para cultivos irrigados con aguas residuales en t/ha/año. (Shende, 1985).

<b>Tipo de agua</b>	<b>Trigo</b>	<b>Arroz</b>	<b>Papa</b>	<b>Algodón</b>
Blanca con abonamiento	2.70	2.03	71.16	1.70
Residual sin tratar	3.34	2.97	23.11	2.56
Residual tratada en lagunas de estabilización	3.34	2.94	20.78	2.56

En la tabla siguiente Shende, 1985; también muestra la diferencia de rendimientos de varios cultivos regados con aguas negras y blancas en Tacna, Perú.

**Cuadro 11.** Comparativo de rendimientos al regar con aguas negras y blancas (IBID).

<b>Cultivo</b>	<b>Aguas negras (T/Ha)</b>	<b>Aguas blancas (T/ha)</b>
Alfalfa	12	10
trigo	5	2
Maíz	3	2
Cebada	4	2
Avena forraje	22	12
Tomate	35	18
Papa	30	12

El aumento en la producción se atribuye a que los nutrientes se encuentran bajo la forma de compuestos que son muy solubles en las aguas residuales y por lo tanto son asimilables por la planta, así como también son aportados con la misma frecuencia que el riego. Los fertilizantes, en cambio, son aplicados al inicio de cada campaña, es decir; una parte es disuelta por el agua de riego, otra es arrasada con el agua de percolación, otra se pierde por evaporación y forman compuestos menos solubles.

- Mejora de la calidad de los suelos: (Moscoso, 1995); menciona que el aporte de materia orgánica permite mejorar la textura del suelo y que ésta es más importante en suelos arenosos de alta permeabilidad y poco contenido de materia orgánica; además dice que se puede lograr mejorar la calidad de aquellos suelos eriazos que nunca tuvieron actividad agrícola alguna, como ocurre en las zonas áridas y semiáridas alejadas de los ríos y con mínima precipitación, tal es el caso de nuestra zona de estudio.
- Ampliación de la frontera agrícola: un caso típico del aprovechamiento de las aguas residuales para ampliar la frontera agrícola es la del Valle del Mezquital, Hidalgo, México, en donde desde 1995 se habilitaron 70 000 ha agrícolas gracias a un aporte de 43 m<sup>3</sup>/s de las aguas residuales que se generan en la ciudad de México.

Todas estas ventajas contribuyen a que todas las áreas agrícolas cercanas a las ciudades cumplan con las funciones de abastecimiento de alimentos o materias primas, recargan el acuífero y oxigenan el medio ambiente urbano. Aun cuando estas importantes ventajas justifican ampliamente el uso de las aguas residuales en la agricultura, también existen restricciones o riesgos potenciales que se deben de tomar en cuenta, como los siguientes:

- Contaminación microbiológica de los productos
- La bioacumulación de los productos tóxicos
- La salinización e impermeabilización del suelo
- El desbalance de nutrientes en el suelo

Por esta razón es muy importante considerar las diversas estrategias del manejo agrícola que pueden contribuir a reducir significativamente los riesgos potenciales antes mencionados.

### **2.9.2. Criterios de calidad para la irrigación con aguas residuales en la agricultura.**

Los criterios de calidad para la irrigación con aguas residuales en la agricultura dependen también del tipo de cultivo tal como nos lo dice la bibliografía siguiente: OMS, 1989; cuando el reúso agrícola se realiza en cultivos que se consumen crudos y no se procesan comercialmente, como es el caso de las hortalizas frescas, el riego es restringido; cuando se aplican en cultivos que se consumen y se procesan comercialmente, como es el caso del tomate enlatado, y en cultivos que no se consumen por el hombre, como pastos, el riego con aguas residuales no es restringido.

El (Cepis, 2003); muestra los principales cultivos en los que se aplica el reúso de aguas residuales domésticas en América Latina. El 83.1% de las aguas residuales es usado principalmente en tres tipos de cultivos: hortalizas 30.2%, industriales 29.5% y forrajes 23.4%. Esta situación es crítica dado que los cultivos industriales se someten previamente a un proceso de transformación, el forraje es consumido directamente por los animales y las hortalizas los seres humanos, lo que eleva el riesgo de contaminación microbiológica o parasitológica y por lo tanto los problemas de salud pública significativa.

### **2.9.3. Algunas cifras de las aguas residuales tratadas y no tratadas utilizadas en el medio agrícola a nivel mundial**

Bartone y Arlosoroff, (1987) señalan hace 25 años, que existían cerca de dos millones de hectáreas regadas con aguas residuales en el mundo. En el cuadro 14, se presentan cifras de los países que contaban con mayor superficie agrícola regada con aguas residuales para el año de 1987, tan solo China, México y la India contribuían con el 94% de la superficie regada de ese año. También muestra algunos datos relevantes sobre el incremento del reúso de aguas residuales tratadas con datos del año 2008 en donde nuevamente destacan los países de China y México como países líderes en el reúso de aguas residuales tratadas; solas

que 20 años después el reuso era de 20 millones de hectáreas irrigadas con aguas residuales, nueve veces más que las de la década de los ochenta.

Mara y Carnicross, (1990) y Bakker et al., (2000), mencionan que en países del sudeste asiático, de América Latina y de África, el riego con aguas residuales se hizo durante décadas de manera espontánea y no planificada por parte de los agricultores más pobres de las áreas urbanas y periurbanas. Post, (2006) menciona que en Israel el 67% del agua residual es usada para riego; en India el 25% y en Sudáfrica el 24%.

**Cuadro 12.** Países con mayor superficie agrícola regada con aguas Residuales en 1987 y 2008

PAÍS	HECTÁREAS EN 1987	HECTÁREAS EN 2008
China	1 330 000	1 500 000
México	250 000	350 000
Otros	165 000	18 150 000
Totales	1 745 000	20 000 000

Con base en Bartone y Arlosoroff (1987) y Carranza F. (2009).

Colombia tiene una superficie irrigada con aguas residuales de 1.230.193 ha; con un 27% de agua residual tratada y un 73% sin tratar, por lo general diluida con aguas superficiales. En este país, al igual que sucede con el resto de América Latina, no se cuenta con información completa y confiable sobre el tema de reuso (Cepis, 2003; en Silva et al., 2008) y solamente se trata 8% del total de las aguas residuales que se producen. (WSP et al, 2007; en Silva et al 2008).

Bartone y Arlosoroff et, al., (1987) estimaban que para la década de los 80's en América Latina se estaban regando alrededor de 500 000 hectáreas, aunque no se

contaba con datos oficiales de la mayoría de los países. Sin embargo estas cifras nos dan a conocer que desde hace mucho tiempo las aguas residuales de muchas ciudades se están utilizando directa o indirectamente en la mayoría de las que tienen áreas agrícolas aledañas.

Otros datos más actuales son los de (Scott, 2004); quienes mencionan que con frecuencia se desconoce la forma como se han producido los alimentos; sin embargo mencionan que se utilizan aguas residuales no tratadas para el riego del 10% de los cultivos del mundo. Aunque ésta es una práctica oculta y sancionada en un gran número de países, muchos agricultores, especialmente aquellos ubicados en las áreas urbanas, utilizan las aguas residuales porque, además de los beneficios de su uso, no tienen ningún costo y son abundantes, aun durante las épocas de sequías.

León y Moscoso, (1995) mencionan que en 1991 el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) brindó asistencia técnica al Ministerio de Agricultura del Perú para evaluar el grado de la sustitución de los fertilizantes por el aporte de nutrientes de las aguas tratadas. Ahí se evaluaron diferentes dosis de fertilizantes desde un testigo de aguas residuales solamente (sin abono adicional) hasta niveles de fertilización que normalmente se aplican en los cultivos. Se ensayaron diferentes cultivos comerciales como frijol, ejotes, brócoli, col, maíz, etc. Los cultivos evaluados mostraron rendimientos de producción muy similares en todos los tratamientos, incluido el testigo sin fertilización. Se demostró que las aguas residuales aportan los nutrientes requeridos por los cultivos, lo que permite ahorrar los costos de fertilización, que muchas veces representan más del 50% del costo de producción.

Un estudio mucho más claro es el que nos menciona la bibliografía de (Moscoso, 1995); quien dice que en el año de 1990 el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS) concentró sus esfuerzos en establecer el grado de sustitución de fertilizantes por el aporte de nutrientes de las aguas

tratadas. Esta experiencia fue realizada en San Juan de Miraflores, Lima, donde evaluaron diferentes dosis de fertilización, desde una muestra con aguas residuales solamente (sin fertilizantes) hasta niveles de fertilización que normalmente se aplican en los cultivos comerciales.

#### **2.9.4. Aparición de los metales pesados en las aguas de riego**

Los Metales Pesados (MP) en las aguas de riego provienen de la geología del suelo cuando el agua viene de pozos profundos, cuando son de una fuente superficial (presa, lago, río) por lo general es debido a la contaminación antropogénica. Soto (2004), menciona que los análisis temporales y espaciales de la calidad del agua subterránea del acuífero principal de la región de la comarca lagunera presentan contaminación de arsénico. Señalan que el origen natural del metaloide es principalmente por actividad hidrotermal y diagénesis (Oporto, 2007). En sus actividades diarias de producción, la industria de recubrimientos metálicos genera una gran cantidad de efluentes con elevadas concentraciones de cianuros y metales pesados (Cu, Ni y Zn). En los últimos años, las concentraciones de Zn en los suelos agrícolas han aumentado gradualmente, particularmente en países industrializados como consecuencia de las actividades humanas. Se han dado niveles de Zn total en los suelos de varias centenas y millares de mg Zn/kg

##### **2.9.4.1. Remoción de metales pesados**

Los metales pesados son contaminantes medio ambientales comunes que se producen como resultados de actividad industrial, comercial y domesticas (Lara, y Hernández 2003). Se considera que los contaminantes del agua con metales pesados que se han ido incrementando en los últimos 50 años, principalmente como consecuencias de las actividades industriales, afectando a los ecosistemas en general. Entre los metales y metaloides reglamentados por las legislaciones

internacionales debido a su grado de toxicidad se encuentran: Arsénico, Cadmio, Plomo, Cromo, Níquel, entre otros (Magdalena, 2008).

La presencia de metales pesados en las aguas residuales industriales y municipales exigen un tratamiento efectivo de las mismas para su uso posterior o bien para un confiable desecho a corrientes y cuerpos de agua. Los metales pesados en las aguas de los desechos (Proal, 1997).

En algunos metales como son el arsénico, cobalto, germanio, níquel, rubidio y uranio juegan un papel muy importante en la vida de muchos organismos, no obstante que algunos metales son esenciales para la vida, pero con un exceso de esto puede ser de gran amenaza para la salud humana y para el medio ambiente (Soto , 2004).

La remoción de contaminantes de las aguas residuales producidas por actividades agrícolas e industriales, con el fin de estimular al sector industrial a 48 invertir en tecnologías de tratamiento, que permitan no sólo cumplir con la norma y el ahorro en el pago de multas a la autoridad ambiental, sino también hacer un ciclo de reciclaje de agua de proceso, lo que trae consigo una disminución en los costos de servicios industriales. Toda esta problemática se ha generado a la concepción de una legislación cada vez más estricta en materia (Restrepo, 2008).

### **3.1 Sustentabilidad en el uso de aguas residuales en el medio agrícola**

Las soluciones convencionales de tratamiento de aguas residuales, incluyendo fosas sépticas, sistemas combinados de alcantarillado y el tratamiento centralizado no conducen a una solución integrada. La mezcla de las diferentes corrientes de aguas residuales hace difícil la recuperación de los diferentes recursos (agua, energía, nutrientes) asociados a las aguas residuales, la dilución de los caudales de las aguas residuales que contienen agentes patógenos y compuestos tóxicos como metales pesados y micro contaminantes orgánicos hacen que el tratamiento sea más complejo y que requiera mayores niveles de recursos como la energía, dinero, espacio y experiencia, mientras sigue creciendo la presión al medio ambiente a través de las emisiones (Balkema , 2002).



Su objetivo es apoyar el proceso de desarrollo del subsector agua y saneamiento en zonas rurales del país, basándose en tres componentes: desarrollo institucional, atención social y participación comunitaria, e infraestructura de agua potable y saneamiento. En este programa las acciones de saneamiento se enfocan a la construcción de sistemas de drenaje sanitario y de baños ecológicos (CONAGUA 2012).

### **3.1.1 Infraestructura sustentable para obtener beneficios favorables en el medio agrícola**

Como Altieri 1987, lo ha señalado, el crédito de gran parte del desarrollo inicial de la agricultura ecológica en las ciencias formales le pertenece a ( Klages 1928), quien sugirió que se tomaran en cuenta los factores fisiológicos y agronómicos que influían en la distribución y adaptación de las especies específicas de cultivos para comprender la compleja relación existente entre una planta de cultivo y su medio ambiente , expandió su definición e incluyó en ella factores históricos, tecnológicos y socioeconómicos que determinaban qué cultivos podían producirse en una región dada y en qué cantidad.( Papadakis 1938) recalcó que el manejo de cultivos debería basarse en la respuesta del cultivo al medio ambiente. La ecología agrícola fue aún más desarrollada en los años 60 por (Tischler 1965) e integrada al curriculum de la agronomía en recursos orientados al desarrollo de una base ecológica a la adaptación

Para ir construyendo una infraestructura urbana sustentable, es necesario optar por tecnología alternativa que permita reutilizar los caudales y/o regresarlos a la naturaleza con buena calidad, sin hacer un uso intensivo de energía y sin producir contaminantes. Este tipo de plantas de tratamiento de aguas existen hace ya varios años y están en funcionamiento en varias partes del país. Expondremos en seguida algunos ejemplos que cubren el tratamiento a nivel de vivienda y el de aguas negras

municipales, para demostrar la viabilidad técnica y económica de estas opciones (Velázquez, 2006).

El cambio de perspectiva, inducida para lograr mejoras en el marco de la sustentabilidad, da inicio a este proceso de cambio. Sin embargo, antes de cambiar hacia un enfoque más descentralizado, se necesita una visión contemplando diferentes sistemas bajo diferentes circunstancias. Dado que los sistemas alternativos tienen ventajas y desventajas, estas deben ser analizadas cuidadosamente. Por lo tanto se necesita el uso de una evaluación que contemple varios criterios en la selección de los sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales dentro del marco de la sustentabilidad. Se requiere indicadores de sustentabilidad que permitan la selección de sistemas. De una manera más holística y no simplemente seleccionar sistemas desde un punto de vista técnico (Carabias, 2002).

### **3.1.2 Relación entre agroecología y aguas residuales en el uso agrícola**

La Agroecología es un enfoque distinto del desarrollo agrícola convencional, porque se basa en un paradigma científico diferente. El paradigma es holístico, los sistemas sociales y agroecológicos se reflejan mutuamente, pues han evolucionado juntos. La investigación de la ciencia natural y de la ciencia social, lo mismo que sus prescripciones, no se pueden separar. El paradigma es nuevo y está evolucionando todavía, pero la Agroecología comparte el paradigma con numerosos otros campos de investigación. (Durham 1978, Lorenz 1977).

El desarrollo de la agricultura moderna privilegió la visión del investigador o el técnico en el desarrollo de las tecnologías, sin considerar o tener en cuenta la participación del agricultor, ni las condiciones biofísicas en que estos sistemas se desarrollan.

Los enfoques agroecológicos se basan en metodologías que son realizadas por equipos de investigación de carácter multidisciplinario, donde se da importancia a la participación del agricultor, el investigador, el técnico y el especialista en ciencias sociales y económicas. También se tiene en cuenta las condiciones ecológicas y socioeconómicas en las cuales los productores tienen sus predios. En esta sección se mostrarán las diferentes metodologías en las cuales se basan los enfoques agroecológicos. Al final de la sección se presentarán algunas herramientas de carácter práctico para evaluar el desempeño de sistemas agrícolas sustentables.

En lo más íntimo del pensamiento agroecológico subyace la idea de que un campo de cultivos es un ecosistema dentro del cual los procesos ecológicos que ocurren en otras formaciones vegetales « naturales » también se dan. De esta forma, algunos autores se plantean el concepto de Agro ecosistemas para interferirse a la unidad ambiental en la que se desarrolla la actividad agraria -entiéndase agrícola, forestal y ganadera- y a partir de ahí formalizar a nivel global el análisis del conjunto de procesos o interacciones y sinergismos que intervienen en el mismo. Aunque ambos sistemas -ecosistemas « naturales » y agroecosistemas- tienen en común su más amplia y conocida definición que los describe como « el conjunto de organismos que viven e interactúan en un ambiente determinado y la parte física del ambiente que de una manera u otra les afecta »; sin embargo, un sistema agrícola difiere en varios aspectos fundamentales de un ecosistema (Cala, 2001).

## **CONSIDERACIONES FINALES**

Las plantas de sustentabilidad podrían suministrar el servicio básico de agua de un gran e importante sector poblacional, que el gobierno está obligado a brindar; sin embargo, éste se ha visto imposibilitado de hacerlo, ya sea por falta de voluntad política, por la escasez de recursos o por la dificultad de suministrarlos debido a sus condiciones topográficas, por lo tanto se puede concluir que existe una preocupación por la falta de agua apta para el consumo humano. En consecuencia, las respectivas leyes procuran su manejo adecuado, así como ofrecen incentivos

para programas que ayuden a mejorar su utilización, aprovechamiento y conservación. Es importante trabajar todos los proyectos relacionados con la recolección de agua pluvial de la mano con la concientización de la población, ya que los problemas que ahora experimentamos derivan de una falta de conciencia que ahora debemos implementar y que más aparte permitirá que dichos proyectos se desempeñen de manera óptima y eficiente, . La articulación entre hombre y agro ecosistema se manifiesta en una estructura de auto-mantenimiento, autorregulación y auto-renovación. Por lo tanto, las diferentes sociedades producen sus condiciones de existencia y desarrollo a partir de su relación con la naturaleza y su mecanismo.

### **RECOMENDACIONES**

El agua es el sustento de la vida, es un recurso limitado .con nuestros hábitos y actividades la estamos contaminando. Todos debemos de ayudar a conservarla y usarla adecuadamente con acciones sencillas, es necesario tomar conciencia y decidir una acción sobre la situación por la que estamos atravesando, producto de la poca o nula atención que hemos brindado a los recursos renovables como el agua. No estamos plenamente conscientes, ni tenemos el real conocimiento de que la capacidad de renovación de cuerpos es finita y se ha abusado de la creencia de la asimilación ilimitada por la naturaleza. De este modo, en los niveles de decisión política, de nuestros países tanto central como local, no se le ha otorgado la prioridad necesaria de la descontaminación de los recursos superficiales del agua.

Debido a la situación ahí se desarrollan las alternativas sustentables al tratamiento de agua residual para así darle el manejo adecuado en el sistema agrícola

## CONCLUSION.

El pensamiento científico convencional aplicado a la agricultura local, ha abordado el aprovechamiento aislado de los factores agrarios circundantes, tales como la biodiversidad, el suelo, el agua, la sociedad y el cambio climático entre otros. La **Agroecología** sugiere un enfoque global haciendo uso de distintas ciencias naturales y sociales para comprender los procesos agronómicos, económicos y culturales.

Por otra parte, para ir construyendo una infraestructura urbana sustentable, es necesario optar por tecnología alternativa que permita reutilizar los caudales y/o regresarlos a la naturaleza con buena calidad, sin hacer un uso intensivo de energía y sin producir contaminantes. Este tipo de plantas de tratamiento de aguas existen hace ya varios años y están en funcionamiento en varias partes del país tratar las aguas usadas en los hogares sin hacer grandes y costosas plantas, utilizando muy poca energía y sin obtener residuos tóxicos ni generar emisiones de contaminantes al aire durante el proceso.

La clave de su éxito radica en la escala, en la tecnología usada y en el involucramiento de la población, ya que la agricultura es el principal sector consumidor de recursos hídricos; la disponibilidad de aguas residuales domésticas, puede combinarse con las técnicas agroecológicas y siempre es recomendable tratarlas antes de su uso, pues en la práctica predomina en todos los países de América Latina el empleo de aguas residuales crudas, diluidas en cuerpos de agua superficiales y, en menor proporción, el de aguas tratadas, aunque no necesariamente de forma adecuada.

El empleo seguro en actividades agrícolas requiere un tratamiento y un manejo apropiados, el reusó de aguas residuales es recomendado principalmente para aquellos cultivos que sufrirán una transformación industrial; sin embargo, en América Latina hay un uso elevado en cultivos de consumo directo, como el de

hortalizas, lo que representa riesgos para la salud pública que deben ser considerados.

## REFERENCIAS.

- Ambienta, 2018. La Agenda 2030 de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas. Subdirección General de Relaciones Internacionales y Asuntos Comunitarios. MAPAMA.
- Annelies J, J. Balkema, Heinz A. Preising, (2002) Indicators for the sustainability treatment of assessment wastewater treatment systems, *Journal of urban water*, 4, 153-161.
- Arango, B.O., Sánchez, S.L., 2009, Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo uasb. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 7, 1-9.
- Arreguín C. F. I., Moeller C. G., Escalante E. V. y Rivas H. A. (s/f). El reúso del agua en México. Hacia la Calidad: Necesidad para el Próximo Milenio. Fecha de consulta. Marzo del 2018. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/acodal42/reuso.pdf>.
- Arthurson, V., 2008, Proper Sanitization of Sewage Sludge: a Critical Issue for a Sustainable Society. *American Society for Microbiology.*, 5267-5275.
- Bakker, N; M. Dubbeling, U. Gundel, S. Koschella y H. de Zeeuw. (2000). Growing cities. Growing food, urban agriculture on the policy agenda, DSE, Alemania.
- Balkema, AJ. H. A. Preising, R. Otterpojl y F.J.D. Lambert. Indicators for the sustainability treatment of assessment wastewater treatment systems, *Urban Water*. 2002, 4,153-161.
- Barkin D. (s/f). Herramientas y metodologías para trabajar la concentración social en el manejo del agua. Universidad Autónoma Mexicana-Unidad Xochimilco. Fecha de consulta: marzo del 2017. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/dbarkin.pdf>
- Bartone, C. 1990. International perspective on water resources management and wastewater reuse: appropriate technologies. *Water Sci. Technol.*, 23,10-12.
- Bartone, C. and Arlosoroff, S. (1987). "Irrigación reuse of pound effluents in development countries", *Water Science and Technology*; 19(12): 289-297, 1987.
- Bermúdez, R.C., S. Rodríguez, M. C. Martínez y A.I. Terry. (s/f). Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. Fecha de consulta. Marzo del 2017. Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/267241848\\_Ventajas\\_del\\_empleo\\_de\\_reactores\\_UASB\\_en\\_el\\_tratamiento\\_de\\_residuales\\_liquidos\\_para\\_la\\_obtencion\\_de\\_biogas](https://www.researchgate.net/publication/267241848_Ventajas_del_empleo_de_reactores_UASB_en_el_tratamiento_de_residuales_liquidos_para_la_obtencion_de_biogas).

- Blázquez, P., Montero, M.C., 2010, Reutilización de agua en bahía blanca plata 3era cuenca. Fecha de consulta: 23 de junio del 2012. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua\\_reutilizacion.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/agua_reutilizacion.pdf)
- Calderón, M. C. G. (s/f). Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua. Fecha de consulta. Mayo del 2017. Disponible en: [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Sistemas\\_secundarios.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Sistemas_secundarios.pdf)
- Carabias, J. (2002), “Conservación de los ecosistemas y el desarrollo rural sustentable en América Latina: condiciones, limitantes y retos”, en E. Leff, E. Ezcurra, I. Pizant y P. Romero (comps.), La transición hacia el desarrollo sustentable. Perspectivas de América Latina y el Caribe. Semarnat/INE/ UAM/ONU/PNUMA, México.
- CEPIS. (2003). Inventario de la situación actual de las aguas residuales domesticas en México. Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: realidad y potencial. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Perú. 131 pp.
- Cerro, C.M., 2005, Tratamiento estándares de aguas residuales. Fecha de consulta: 5 de diciembre del 2012. Disponible en: <http://www.olivacordobesa.es/TRATAMIENTO%20ESTANDAR%20AGUAS%20RESIDUALES.pdf>.
- Chang, J. (2007). Evaluación de impactos ambientales del sistema de tratamiento de aguas residuales de la urbanización —valle alto iill, aplicando modelo de simulación para las descargas del efluente. Fecha de consulta. 15 de julio del 2011. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/208/1/330.pdf>.
- CONAGUA (2009), Situación del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Comisión Nacional del Agua. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 167p.
- CONAGUA (2012), Situación del Subsector de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México.
- CONAGUA, 2015. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Pág. 71.



[https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197610/Inventario\\_2015.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/197610/Inventario_2015.pdf)

Consultado el 14 de marzo 2018.

- Díaz, R.P. (2010). Estimación de la fracción fácilmente biodegradable de la demanda química de oxígeno en aguas residuales municipales por el método de desconvolución
- Durai, G., Rajasimman, M., 2011, Biological treatment of tannery wastewater-a review. *Journal of environmental science and technology*. 4, 1-17.
- Edward, R.B., Hardenberg., 1987, Tratamiento de aguas residuales capítulo IV. Fecha de consulta: 5 de diciembre del 2012. Disponible en:[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lar/oropeza\\_b\\_vm/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lar/oropeza_b_vm/capitulo4.pdf).
- Escalas, C.A., 2006, Tecnologías y usos de las aguas residuales en México. fecha de consulta: 29 de mayo del 2012. disponible en: <http://www.docstoc.com/docs/37877175/Tecnologas-y-usos-de-las-aguas-residuales-en-M%C3%A9xico>.
- ESPE, 2012, Flotación. Fecha de consulta: 5 de diciembre del 2012. Disponible en: <http://procesosbio.wikispaces.com/Flotaci%C3%B3n>.
- Fernández-Alba, A.R., Letón, G., P., Rosal, G.R., Dorado, V.M., Villar, F.S., Sanz, G.J.M., 2006, Tratamientos avanzados de agua residual industrial. *vigilancia tecnologica*. 1, 1-137.
- Gil, C., J. Ramos, y R. Boluda. 2002. Niveles estándar de Cu, Zn, y Co y evaluación de la contaminación en los suelos de los invernaderos de la comarca del poniente (Almería, España). *Edafología*, 9, 283-294.
- Gutiérrez, R.E., Espinoza, B.A., Palomo, G.A., Lozano, G.J.J., Antena, G.O., 2004, Aptitud combinatoria de híbridos de maíz para la comarca lagunera. *Revista fitotecnia mexicana*. 27, 1-7.
- Hoekstra, A.Y. and Chapagain, A.K. (2007a) Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern, *Water Resources Management* 21(1): 35–48
- Illera V.I y Cala V. (2001). Niveles de metales pesados en *Thymus zygis* desarrollado en suelos enmendados con residuos orgánicos urbanos. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 17, 179-186.
- INEGI (2010). Censo de población y vivienda 2010. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México. Fecha de consulta. Mayo del 2017. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/comunicados/default.aspx?c=17181&s=est>
- INEGI. (2017). Comunicado de prensa Num. 127/17. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Fecha de consulta. Marzo del 2018.

- Disponibile en:  
[http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2017/agua2017\\_nal.pdf](http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2017/agua2017_nal.pdf)
- Isoaari P, Hermanowicz SW, Rubin Y. Sustainable natural systems for treatment and disposal of food processing wastewater. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2010;40:662–697.
- Kaviyarasan, K., 2014. Application of UASB reactor in industrial wastewater treatment- A review. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 5, 584-589.
- Kurimexicana, 2011, Tratamiento de efluentes industriales parte III. Fecha de consulta: 5 de diciembre del 2012. Disponible en: [http://www.kurimexicana.com/pdf/aqualog\\_oct11.pdf](http://www.kurimexicana.com/pdf/aqualog_oct11.pdf).
- Lahera Ramón, V. (2003), Viabilidad hidráulica de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 18, 387-411.
- Lara, J.A. y A. Hernández (2003). Reutilización de aguas residuales: aprovechamiento de los nutrientes en riego agrícola. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Instituto Cenara, Universidad del Valle. pp. 237-242.
- López-Hernández, I., J., Vásquez-Arroyo, y V. P. Álvarez Reyna, (2016). Remoción biológica de nutrientes en aguas residuales urbanas con fotobiorreactores utilizando microalgas. *Rev. Mex. Ciencias Agrarias*, 17, 3569-3580.
- Lorenzo, Y., Obaya, M.C., 2006, La digestión anaerobia y los reactores UASB. Generalidades ICIDCA. Sobre derivados de la caña de azúcar. . *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*. XL, 13-21.
- Magdalena, A.D., 2008. Remoción de metales pesados, cadmio y níquel, en modelos de soluciones acuosas, por la técnica de aglomeración esférica. Instituto Politécnico Nacional, Victoria de Durango.
- Maldonado, C.A., 2009. Tratamiento de agua residual del rastro, mediante biopelículas anaerobias desarrolladas en *Opuntia imbricata* Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila
- Mara, D. y S. Carnicross. (1990). Directrices para el uso sin riegos de aguas residuales y excretas en agricultura y acuicultura. Organización Mundial de la Salud (OMS), Ginebra.
- Mateo-Sagasta, J., Raschid-Sally, L. y Thebo, A. 2015. Global wastewater and sludge production, treatment and use, In: Drechel, P., Qadir, M., Wichelns, D. (Eds.) *Wastewater*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 15-38.
- Medeiros, S., A. Soares, P. Ferreira, J. Neves, A. de Matos y J. de Souza. 2005. Utilizacao de agua residuaria de origem domestica na agricultura: estudo

- das alteracoes quimicas do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental 9(4), 603-612.
- Metcalf, E., 1985, Caracterización de las aguas residuales urbanas de uso doméstico. Fecha de consulta: 5 de diciembre del 2012. Disponible en:<http://desastres.usac.edu.gt/documentos/pdf/spa/doc9629/doc9629-c.pdf>
- Meza Bazán, P., 2013. Remoción de coliformes y metales en aguas residuales mediante diatomeas. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería, México.
- Miel, M.V., Chapa, L.M., Carrera, M.S., Mendieta, M.M., Cisneros, B.J., 2005, Tratamiento terciario de aguas residuales por filtración e intercambio iónico. Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.
- Miranda, J., 2004, Tratamiento analítico de las aguas servidas. Fecha de consulta: 5 de diciembre del 2012. Disponible en: <http://cabierta.uchile.cl/revista/6/aguas.htm>.
- Moscoso, J. 1995. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). División de Salud y Ambiente, Organización Panamericana de la Salud (OPS). Oficina Sanitaria Panamericana. Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud. Lima, 1995.
- Nada, T., Moawad, A., El-Gohary, F.A., Farid, M.N., 2011, Full-scale municipal wastewater treatment by up-flow anaerobic sludge blanket ( UASB) in Egypt. Desalination and Water Treatment. 1, 134-145.
- Naredo, J.M.y F. Parra Supervia. (2003) Hacia una ciencia de los recursos naturales. Ed. Siglo XXI. Madrid.
- Nicolella, C., M.C.M. van Loosdrecht, and J.J. Heijnen, (2000). Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. Journal of Biotechnology, 80,1-33.
- NOM-001-SEMARNAT. (1996), Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales y bienes nacionales. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- NOM-021-RECNAT. (2000). Establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación.
- Oporto, C., C. Vandecasteele, and E. Smolders. 2007. Elevated cadmium concentrations in potato tubers due to irrigation with river water contaminated by mining in Potosí, Bolivia. J. Environ. Qual., 36, 1181-1186.

- Post, J. (2006). Wastewater treatment and reuse in the Eastern mediterranean región. *Water* 21, 36-41.
- Prieto, M. J., C. A. González, A. D. Román, y F. Prieto, (2009). Contaminación y fototoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical agroecosystems*, 10, 29-44.
- Proal, N.J.B., Martínez, T.L., Muller, M., 1997, Estudio sobre el tratamiento de aguas residuales industriales altamente concentradas en metales pesados bajo aglomeración esférica. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 41, 51-56.
- Rascón A. E., C.R., Peña López, S.M., Cantú y F.E.A., Narro. (2005). Impacto en algunas propiedades físicas del suelo por aplicación de aguas residuales. *TERRA Latinoamericana*, 26, 69-74.
- Restrepo, G.M., L.A. Ríos, J.M. Marín, J.F. Montoya, y J.A. Velásquez (2008), Evaluación del tratamiento foto catalítico de aguas residuales industriales empleando energía solar, *Dyna Medellín*, 75, 145-153.
- Rodríguez, R.E., 2009, Microbiología de las aguas residuales, aplicación de biosólido en suelo. Fecha de consulta: 21 de junio del 2012. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/sem\\_fi\\_qui\\_micrb\\_09/biosolidos\\_en\\_suelo.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/sem_fi_qui_micrb_09/biosolidos_en_suelo.pdf).
- Rojas R. (2002). Gestión integral de tratamiento de aguas residuales. CEPIS/OPS-OMS, 19.
- Romero, M., 2002, Tratamiento utilizados en potabilización de agua. Fecha de consulta: 4 de diciembre del 2012. Disponible en: [http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL\\_08\\_ING02.pdf](http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_08_ING02.pdf). Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar.
- Rossi, G.M.G., (2010). Oportunidades de mejoras ambientales por el tratamiento de aguas residuales en el Perú. *FONAM*, 1, 1-37.
- Salazar, S.M. (2009). Sistemas integrales de tratamiento de aguas residuales, mediante el uso cambiando de digestión anaerobia y microalgas. Iztapalapa, México. Departamento de biotecnología UAM. México.
- Scott, C, N.I. Faruqui y L. Raschid. (2004). Wastewater use in irrigated agriculture: confronting the livelihood and environmental realities. IWMI, IDRC, CABI, Sri Lanka. 240 p.
- SEMARNAT (2014). Normas oficiales Mexicanas .México, D.F.secretaría de medio ambiente y recursos naturales.
- Serrano, E.L., 1997, Las aguas residuales y su tratamiento., Vol 1, 247 pp.
- Shende, G.B. (1985). "Status of Wastewater treatment and agricultural reuse with special reference to Indian experience and research and development needs", FAO Regional Seminar on the Treatment and Use of Sewage Irrigation. Roma, FAO, 1985. p. 157-182.

- Silva, J., P. Torres y C. Madera. 2008. Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, vol. 26, núm. 2, pp. 347-359. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia
- Soto Regalado, E., T. Lozano Ramírez, J.M., Barbarin Castillo, y M., Alcalá Rodríguez. (2004), Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. *Ingeniería* 7, 46-51.
- Soto, R.J., Lozano, R.T., Barbarin, C.J.M., Alcalá, R.M., 2004, Remoción de metales pesados en aguas residuales mediante agentes químicos. *Ingeniería* 7, 46-51.
- Torres, P., Cruz, C., Marmolejo, L.F., Cajigas, A. y Pérez, A. (2006). Producción Más Limpia aplicada al proceso de extracción de almidón de yuca. Informe final. Colciencias – Universidad del Valle, Colombia.
- Trinidad, G.E., 2006. Cuantificación de bacterias nitrificantes, fijadoras de nitrógeno y heterótrofas de humedales artificiales sub-superficiales para tratamiento de aguas residuales. Universidad de Pamplona., Pamplona.
- Uhlenbrook, S. y R. Connor, 2017. Aguas Residuales, el recurso no explotado, Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. UNESCO. Prefacio. Pág. viii.
- Valarezo García, N.A., 2010, Efecto de la concentración de la biomasa y la presencia de aceites vegetales, aceites vegetales quemados, sales e hidrocarburos en los lodos activados. Tesis de Licenciatura. Universidad de San Francisco de Quito. Quito, Ecuador. 104 p.
- Valencia Montoya., 2001, Características de las aguas residuales y lodos. Tesis Doctoral. Universidad del Valle. Cali Colombia. 45p.
- Veliz Lorenzo, Eliet, Llanes Ocaña, José Guadalupe, Asela Fernández, Lidia, Bataller 2009. Venta, Mayra, Reúso de aguas residuales domesticas para riego agrícola. Valoración crítica. *Revista CENIC. Ciencias Biológicas*, 40 (Enero-Abril) : [Fecha de consulta: 5 de marzo de 2018] Disponible en:<<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181221574007>> ISSN 0253-5688.
- Vega, M.R., (2004). Tratamiento de aguas residuales. Fecha de consulta: 5 de diciembre del 2017. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/47025289/25/Uso-de-organismos-indicadores->.
- Wichern, M.; M. Lübken, R. Blömer and K.H. Rosenwinkel (2003). Efficiency of the Activated Sludge Model Nº 3 for German wastewater on six different WWTPs. *Water Sci. Technol.*, 2003, 47, 211-218.
- Zhao, X., Chen, B., Yang, Z.F. (2009) National water footprint in an input-output framework - A case study of China 2002, *Ecological Modelling* 220(2): 245-253.