



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**CARACTERIZACIÓN Y PROPUESTA DE TRATAMIENTO DEL AGUA
RESIDUAL DOMÉSTICA DE LA LOCALIDAD DE ARCELIA, GUERRERO**

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta:

PLACIDO ALDÁN MARTÍNEZ RODRÍGUEZ

Asesores académicos:

DR. En C. A. JULIÁN CRUZ OLIVARES

DR. En C. Q. CESAR PÉREZ ALONSO

Toluca, México, 2019

Patria, Ciencia y Trabajo



RESUMEN

La comunidad de Arcelia localizada en el estado de Guerrero ha vivido por décadas una problemática medio ambiental. Actualmente, sus aguas residuales son descargadas sin previo tratamiento al arroyo principal de la comunidad, el cual se desplaza entre las colonias principales de esta. Además, han optado por desechar otro tipo de residuos como basura. Estas acciones en conjunto con las descargas irresponsables, han provocado desagradables impactos sociales y ambientales.

El presente trabajo tuvo como objetivo proponer un sistema de depuración viable para descarga del agua residual doméstica de la comunidad mencionada de acuerdo a la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Para la respectiva propuesta, primeramente, se muestreó el agua residual del arroyo mediante un muestreo compuesto, en base a la norma mexicana NMX-AA-03-1980, la cual, establece los lineamientos generales para muestrear las descargas de las aguas residuales, con el fin de determinar los análisis correspondientes. Además se determinó el caudal y se efectuaron los análisis de los parámetros de campo; pH, temperatura y materia flotante.

Posteriormente, se analizaron los siguientes parámetros a nivel laboratorio: sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, grasas y aceites, nitrógeno total Kjeldahl, fósforo total, DQO y DBO₅, los cuales, son de acuerdo a la teoría los principales parámetros de caracterización para este tipo de agua residual, debido a su gran homogeneidad. De acuerdo a los resultados arrojados, se observó que a pesar de que el agua residual visualmente denotaba muy contaminada, solo la DBO₅ estaba fuera de normatividad, por lo que el posterior desarrollo del proyecto se centralizó en depurar a este parámetro.

Subsiguientemente, se realizó un análisis de criterios de selección de tecnologías de acuerdo a los resultados arrojados para elegir una propuesta de tratamiento adecuada y se eligió un proceso físico-químico mediante la adición de Policloruro de Aluminio como coagulante y Poliacrilamida catiónica de peso molecular medio con carga alta como floculante.

Finalmente, se caracterizaron nuevamente los parámetros para determinar que el sistema de depuración efectivamente funcionaba.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme tener el privilegio de tener a tan buenas personas a mí alrededor que me apoyaron en cada decisión y proyecto, principalmente a mi familia, que han sido participes durante toda mi estancia en la universidad y mi vida.

Gracias a mis padres que han sido los principales promotores de mi sueño, por regalarme los mejores aprendizajes de la vida, por apoyarme y dar lo mejor de ellos hacia mí. Un texto simplemente no reflejaría cuan agradecido estoy hacia ustedes. Gracias por su amor puro y sincero que me brindan día con día.

Gracias a mis hermanas, que al igual que mis padres son un ejemplo de desarrollo profesional, gracias por apoyarme en todo momento, por ser mis principales cómplices de locuras y cubrirme cuando se necesitaba.

Les agradezco a mis profesores, por haberme compartido conocimientos y experiencias, por la formación, facilidades y apoyo que me brindaron.

Agradezco a los Ingenieros, Julián y Cesar por haberme permitido realizar mi tesis con ellos, por dedicarme de su tiempo y compartir sus conocimientos y facilidades conmigo. Excelentes como personas y excelentes como profesionistas.

Contenido

RESUMEN	2
AGRADECIMIENTOS.....	3
Contenido de tablas	7
Contenido de ilustraciones.....	8
Contenido de ecuaciones	9
INTRODUCCIÓN.....	10
ASPECTOS GENERALES	11
Definiciones	11
Aguas residuales	11
Clasificación de las aguas residuales	11
Composición de las aguas residuales domésticas.....	12
Principales contaminantes de las aguas residuales domésticas	18
Principales parámetros de caracterización de las aguas residuales domésticas	18
Marco normativo	20
NOM-001-SEMARNAT-1996.....	21
NOM-002-SEMARNAT-1996.....	21
NOM-003-SEMARNAT-1997.....	21
NOM-004-SEMARNAT-2002.....	21

NOM-087-ECOL-SSA1-2002.....	21
Permisos de concesión o descarga.....	22
Definición de los niveles de tratamiento y tecnologías de depuración.....	22
Línea de agua	22
Pre-tratamiento	22
Tratamientos primarios	24
Tratamientos secundarios.....	26
Tratamientos terciarios.....	41
Línea de lodos	41
Espesamiento.....	42
Estabilización	42
Acondicionamiento.....	42
Deshidratación.....	42
Criterios de selección de tecnologías de depuración de aguas residuales	43
JUSTIFICACIÓN.....	49
OBJETIVOS	50
Objetivo General	50
Objetivos particulares	50
METODOLOGÍA	51

Muestreo del agua residual doméstica	51
Caracterización del agua residual doméstica de entrada	53
Procedimiento experimental.....	55
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	74
Resultados de caracterización del agua residual doméstica de entrada.....	74
Análisis de criterios de selección de tecnologías de depuración de aguas residuales .	75
Propuesta de tratamiento del agua residual doméstica	78
Caracterización del agua residual doméstica de salida.....	81
CONCLUSIONES	83
Bibliografía	84

Contenido de tablas

Tabla 1. Valores típicos de los principales contaminantes de un agua residual doméstica.	20
Tabla 2. Materiales de muestreo.	51
Tabla 3. Reactivos y patrones.	55
Tabla 4. Materiales.	58
Tabla 5. Variantes de la prueba de jarras.	79
Tabla 6. Caracterización del agua residual doméstica de entrada.	74
Tabla 7. Resultados visuales de la prueba de jarras.	79
Tabla 8. Resultados de la caracterización del agua residual doméstica de salida.	82

Contenido de ilustraciones

Ilustración 1. Laguna aireada.	28
Ilustración 2. Lodos activados.	28
Ilustración 3. Filtro percolador.....	30
Ilustración 4. Componentes de un filtro percolador.....	31
Ilustración 5. Discos biológicos rotatorios.	32
Ilustración 6. Filtro Sumergido Anaerobio (FSA).	32
Ilustración 7. Fosa Séptica / Tanque Imhoff.....	35
Ilustración 8. Laguna anaerobia.	36
Ilustración 9. Digestores de tasa alta y baja.	37
Ilustración 10. Filtro anaerobio.....	38
Ilustración 11. Reactor UASB.	39
Ilustración 12. Reactor EGSB.....	40
Ilustración 13. Arroyo "El grande" de la localidad de Arcelia, Guerrero.....	49
Ilustración 14. Resultados visuales del proceso de coagulación-floculación, 1.	80
Ilustración 15. Resultados del proceso de coagulación-floculación, 2.....	81

Contenido de ecuaciones

Ecuación 1. Cálculo de caudal.	53
Ecuación 2. Contenido de Sólidos Suspendidos Totales.	64
Ecuación 3. Contenido de Grasas y Aceites.	66
Ecuación 4. Demanda Química de Oxígeno.	68
Ecuación 5. Demanda Bioquímica de Oxígeno.	69
Ecuación 6. Calculo de concentración de Nitrógeno Total Kjeldahl.	72
Ecuación 7. Concentración de Fósforo.	73

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso indispensable para la vida y la salud, además de ser un recurso central para el desarrollo sustentable, es por esto que se deben disponer de estrategias hacia la obtención de agua con calidad y cantidad adecuada para poder soportar las actividades de desarrollo.

La generación de aguas residuales es una consecuencia inevitable de las actividades humanas. Estas actividades modifican las propiedades y características de las aguas de partida, contaminándolas y convirtiéndolas en la mayoría de los casos en algo inservible, es por ello que surge la necesidad de implementar sistemas de tratamiento que compensen estos hechos y que por medio de procesos químicos, físicos y/o biológicos reduzcan la concentración de contaminantes.

En este contexto, este trabajo está enfocado en la generación de aguas residuales de la comunidad de Arcelia, Guerrero. Debido a la falta de cultura, la población ha optado por no solo desechar las heces y orina humanas en el arroyo principal, llamado “el grande”, sino también en desechar basura en sus orillas para posteriormente quemarle. Esto ha ocasionado que los residuos se adhieran al caudal, ya sean carbonizados o no, provocando finalmente un desagradable impacto visual, malos olores y evidentemente cambio en la composición del agua.

En relación a lo anterior, la finalidad de este proyecto es dar iniciativa a esta problemática y proponer una alternativa de tratamiento para descarga para este tipo de agua residual.

ASPECTOS GENERALES

Definiciones

Aguas residuales

Se definen, según la Ley de Aguas Nacionales de México, como “aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas” (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 5).

Clasificación de las aguas residuales

Debido a lo general de la definición, se incluyen los siguientes conceptos:

Aguas residuales domésticas o aguas negras

Proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal, de la cocina y de la limpieza de la casa. Suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, lejía y grasas (Espigares García & Pérez López, 1985, pág. 22).

Aguas blancas

Pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en los que las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, éstas pueden evacuarse por separado para que no saturen los sistemas de depuración (Espigares García & Pérez López, 1985, pág. 22).

Aguas residuales industriales

Proceden de los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales. Contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas y otros productos y subproductos

de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales (Espigares García & Pérez López, 1985, pág. 22).

Aguas residuales agrícolas

Procedentes de las labores agrícolas en las zonas rurales. Estas aguas suelen participar, en cuanto a su origen, de las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin un tratamiento previo (Espigares García & Pérez López, 1985, pág. 22).

Para fines de este trabajo, el tipo de agua de interés son las aguas residuales domésticas o aguas negras, específicamente las aguas residuales de la comunidad de Arcelia, Guerrero, por lo tanto, el posterior desarrollo se centralizará en este tipo de aguas.

Composición de las aguas residuales domésticas

Cada agua residual doméstica es única en sus características, factores como tamaño de la población, sistema de alcantarillado, grado de industrialización, incidencia de la pluviometría y el propio caudal que llevan, son algunos de importancia en la diferencia de estas. Se pueden clasificar en tres principales características:

Características físicas

Temperatura

Refleja el grado de calor en el agua. Oscila entre 10 °C y 20 °C. Una temperatura alta contribuye al desarrollo indeseable de microorganismos, además del agotamiento del oxígeno disuelto.

Turbidez

Este término está relacionado con la materia en suspensión, hace referencia al grado de transparencia que pierde el agua o algún otro líquido por la presencia de estas partículas. Por lo tanto, cuanto mayor es la presencia de materia en suspensión, mayor es la turbidez, siendo

un buen parámetro para determinar la calidad del agua. A mayor turbidez, menor calidad del agua.

Color

Suele confundirse color con turbidez, sin embargo, color se asocia al tiempo de las mismas. Generalmente, un agua residual doméstica reciente tiene una coloración beige claro, pero con el paso del tiempo esta va pasando a ser de color gris o negro. Este cambio de coloración ocurre debido a la descomposición bacteriana de la materia orgánica.

Olor

Al igual que el color, el olor se puede asociar con el tiempo de las mismas. Generalmente las aguas residuales domésticas recientes no presentan olores desagradables, sin embargo, a medida que pasa el tiempo y la materia orgánica se va descomponiendo, el olor aumenta.

Sólidos

De forma genérica, los sólidos son todos aquellos elementos o compuestos presentes en el agua residual urbana que no son agua. Entre los efectos negativos sobre los medios hídricos, caben destacar entre otros, disminución en la fotosíntesis por el aumento de la turbidez del agua, deposiciones sobre los vegetales y branquias de los peces, pudiendo provocar asfixia por colmatación de las mismas; formación de depósitos por sedimentación en el fondo de los medios receptores, favoreciendo la aparición de condiciones anaerobias o aumentos de la salinidad e incrementos de la presión osmótica (Martín García, y otros, 2006, pág. 22).

Características químicas

Materia orgánica

Representan una tercera parte del agua residual doméstica aproximadamente.

Principalmente compuesta por proteínas, carbohidratos, grasas y aceites y sus derivados:

- **Proteínas:** constituyen entre un 40 y 60 %, y estas junto con la urea y el amoníaco constituyen las principales fuentes de nitrógeno.
- **Carbohidratos:** representan entre el 25 y 50 % de la materia orgánica. Algunos de ellos son la glucosa, lactosa, sacarosa, fructuosa, galactosa y celulosa, siendo este último componente el más importante por su resistencia a la descomposición y el volumen que ocupan.
- **Grasas y aceites:** representan un 10 % aproximadamente de la materia orgánica. Componentes importantes por la interferencia que pueden ocasionar en los procesos de tratamiento y la vida biológica.

Materia inorgánica

Los componentes inorgánicos más importantes son:

- **pH:** no es materia orgánica, pero viene asociado con los componentes inorgánicos. Indica el grado de acidez o basicidad que tiene alguna solución. Un pH entre 5 y 9 no suele tener un efecto negativo sobre la mayoría de las especies, sin embargo, un pH ácido puede contribuir a la solubilización de sustancias. Las aguas residuales domésticas generalmente tienen un pH próximo al neutro.
- **Cloruros:** procedentes principalmente de las excretas humanas, infiltración de aguas marinas o al uso de sustancias ablandadoras en el tratamiento del agua.

- **Alcalinidad:** mide la cantidad de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes en el agua residual. Se neutralizan con elementos como el calcio, magnesio, sodio, amoníaco, etc.
- **Nitrógeno:** el nitrógeno es un parámetro importante en un agua residual doméstica, ya que puede contribuir tanto positivamente como negativamente. Positivamente por el hecho de que es esencial para el crecimiento de microorganismos y plantas, pero negativamente porque a concentraciones altas, este puede contribuir al agotamiento del oxígeno y la eutrofización. El nitrógeno generalmente proviene de los fertilizantes utilizados en la agricultura, abonos de animales, así como de las excretas humanas y está presente en forma de proteínas y urea que son fácilmente degradables por las bacterias a amonio, y a partir de él nitritos y nitratos. Estas conversiones de nitrógeno están influenciadas por el pH y la temperatura del medio.
- **Fósforo:** al igual que el nitrógeno, el fósforo es otro nutriente importante para el crecimiento de microorganismos y plantas, y contribuyente a la eutrofización. Se puede encontrar básicamente en tres formas; ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico.
- **Azufre:** este componente no se encuentra directamente en un agua residual reciente, pero cuando se propicia el proceso de descomposición de las proteínas, estas lo liberan.
- **Metales pesados:** algunos de los siguientes se pueden encontrar en las aguas residuales confiriéndoles un carácter tóxico: cobre, cromo, boro, plomo (causante de saturnismo y acumulación en moluscos), plata (puede producir argüiría), arsénico (melanodermia del pie y acumulación en mariscos), antimonio (efecto cancerígeno),

bario (efectos sobre el corazón, vasos sanguíneos y nervios), flúor (fluorosis) y selenio produce cáncer y caries) (Espigares García & Pérez López, 1985, pág. 16).

Gases

- **Oxígeno disuelto:** uno de los parámetros necesarios para el desarrollo de la vida de los organismos aerobios, además de que evita malos olores en el agua, sin embargo, los procesos de eutrofización pueden contribuir a su agotamiento.
- **Sulfuro de hidrogeno:** este compuesto es el resultado de la descomposición anaerobia de la materia orgánica principalmente. La característica principal de este componente es el olor desagradable que presenta.
- **Metano:** este compuesto es el principal subproducto de la degradación anaeróbica de la materia orgánica. Es un hidrocarburo incoloro, inodoro y con gran valor como combustible y generalmente no se encuentra en grandes niveles, sin embargo, es necesaria su precaución por ese mismo hecho, ya que puede provocar alguna explosión.

Características biológicas

Bacterias

Predominan las especies pertenecientes a los siguientes grupos: Escherichia, Salmonella, estreptococos fecales, Proteus, Pseudomonas, Aeromonas, Serratia, Bifidobacterium, Clostridium, Zooglea, Flavohacterium, Nocardia, Achromobacter, Alcaligenes, Mycohacterium, Nitrosomonas, Nitrobacter, etc (Espigares García & Pérez López, 1985, pág. 18).

Virus

Proceden de las excretas humanas y de los animales. Se pueden encontrar virus pertenecientes a distintos grupos: Polio virus, virus Echo, Coxsackievirus A y E, virus de la hepatitis, agente de Norwalk, Rotavirus, Reovirus, Adenovirus y Parvovirus (Espigares García & Pérez López, 1985, pág. 18).

Algas

Su crecimiento está favorecido por la presencia en las aguas residuales de distintas formas de fósforo y nitrógeno, así como de carbono y vestigios de elementos tales como hierro y cobalto, dando lugar a procesos de eutrofización. Este fenómeno está producido principalmente por algas de los géneros Anacystis, Anabaena, Gleocystis, Spirogyra, Cladophora, Enteromorpha, Stigeoclonium 2 Ulothrix, Chlorella, Euglena y Phormidium, etc (Espigares García & Pérez López, 1985, pág. 18).

Protozoos

Los que se encuentran más frecuentemente en las aguas residuales son amebas, flagelados y los ciliados libres y fijos. Estos organismos juegan un papel muy importante en los procesos de tratamiento biológico, especialmente en filtros percoladores y fangos activados. Pueden eliminar bacterias suspendidas en el agua, ya que éstos no sedimentan, evitando la producción de efluentes con turbidez (Espigares García & Pérez López, 1985).

Hongos

La mayoría son aerobios estrictos, pueden tolerar valores de pH relativamente bajos, y tienen baja demanda de nitrógeno. Esto les hace desempeñar una función importante en el tratamiento de aguas residuales industriales. Los géneros que pueden encontrarse son:

Geotrichium, Mucor, Aureobasidium, Subbaromyces, Fusarium, Sepedonium y Sphaerotilus.
(Espigares García & Pérez López, 1985, pág. 19).

Principales contaminantes de las aguas residuales domésticas

Los principales contaminantes que aparecen en este tipo de aguas residuales se pueden resumir en:

- Objetos grandes, como trozos de madera, plásticos, ropa, basura, entre otros;
- Grasas y aceites;
- Sólidos en suspensión;
- Compuestos orgánicos e inorgánicos procedentes de los desechos humanos y de productos utilizados en la comunidad;
- Nutrientes (nitrógeno y fósforo), procedentes de las actividades agropecuarias, así como de los detergentes utilizados;
- Agentes patógenos, organismos procedentes de los desechos humanos.

Principales parámetros de caracterización de las aguas residuales domésticas

Debido a la gran homogenización en este tipo de aguas, los parámetros de caracterización de uso más habitual son:

Aceites y grasas

El contenido en aceites y grasas presentes en un agua residual se determina mediante su extracción previa, con un disolvente apropiado y la posterior evaporación del disolvente. En esta medición, no se mide una sustancia específica, sino un grupo de sustancias cuyas características físico-químicas son similares, tales como ácidos grasos, jabones, grasas, ceras, aceites e hidrocarburos.

Sólidos en suspensión

Se denomina de este modo a la fracción de los sólidos (sedimentables, suspendidos y coloidales) que quedan retenidos por una membrana filtrante de un tamaño determinado.

Sustancias con requerimiento de oxígeno

Para la cuantificación de estas sustancias los dos parámetros más utilizados son:

Demanda Bioquímica de Oxígeno a los 5 días (DBO₅)

Es la cantidad equivalente de oxígeno (mg/L) necesaria para oxidar biológicamente los componentes de las aguas residuales. En el transcurso de los cinco días de duración del ensayo (cinco días) se consume aproximadamente el 70% de las sustancias biodegradables.

Demanda Química de Oxígeno (DQO):

Es la cantidad equivalente de oxígeno (mg/L) necesaria para oxidar los componentes orgánicos del agua utilizando agentes químicos oxidantes.

La relación DBO₅/DQO indica la biodegradabilidad de las aguas residuales urbanas:

$$\left\{ \begin{array}{l} \geq 0.4 \text{ Aguas muy biodegradables} \\ 0.2 - 0.4 \text{ Aguas biodegradables} \\ \leq 0.2 \text{ Aguas poco biodegradables} \end{array} \right.$$

Nitrógeno

Para su cuantificación se recurre generalmente a métodos espectrofotométricos.

Fósforo

Al igual que las distintas formas nitrogenadas, su determinación se realiza mediante métodos espectrofotométricos.

Organismos patógenos

Los organismos patógenos se encuentran en las aguas residuales en muy pequeñas cantidades siendo muy difícil su aislamiento, por ello, se emplean habitualmente los coliformes como organismo indicador.

Algunos valores típicos de los principales contaminantes de un agua residual doméstica son los siguientes:

Tabla 1. Valores típicos de los principales contaminantes de un agua residual doméstica.

Parámetro	Rango habitual
Sólidos en Suspensión (mg/L)	150 – 300
DBO ₅ (mg/L)	200 – 300
DQO (mg/L)	300 – 600
Nitrógeno (mg N/L)	50 – 75
Fósforo (mg P/L)	15 – 20
Grasas (mg/L)	50 – 100
Coliformes totales (UFC/100 mL)	10 ⁶ - 10 ⁷

(CENTA, 2008)

Marco normativo

En México, la normativa que regula los sistemas de abastecimiento y distribución de agua tratada son:

NOM-001-SEMARNAT-1996

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. (SEMARNAT, NOM-001-SEMARNAT-1996, 1997).

NOM-002-SEMARNAT-1996

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. (SEMARNAT, NOM-002-SEMARNAT-1996, 1998).

NOM-003-SEMARNAT-1997

Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reúsen en servicios al público. (SEMARNAT, NOM-003-SEMARNAT-1997, 1998).

NOM-004-SEMARNAT-2002

Establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana (SEMARNAT, NOM-004-SEMARNAT-2002, 2002)

NOM-087-ECOL-SSA1-2002

Establece la clasificación de los residuos peligrosos biológico-infecciosos, así como las especificaciones para su manejo. Esta Norma Oficial Mexicana es de observancia obligatoria para los establecimientos que generen residuos peligrosos biológico-infecciosos y los

prestadores de servicios a terceros que tengan relación directa con los mismos.
(SEMARNAT, NOM-087-ECOL-SSA1-2002, 2002)

Permisos de concesión o descarga

Por el cual se obtiene el permiso para la descarga de aguas residuales que se genera en cuerpos receptores, terrenos que sean bienes nacionales o en otros terrenos a través de los que se puedan contaminar el subsuelo o los mantos acuíferos. Se otorga a la permisionaria indicando la ubicación, la descripción y los límites máximos permisibles para la descarga de aguas residuales. La fecha de emisión y vigencia del permiso es específica.

Definición de los niveles de tratamiento y tecnologías de depuración

Un sistema de tratamiento se refiere a la aplicación de procesos físicos, biológicos y químicos con el objetivo de reducir o eliminar los contaminantes del agua residual del modo más económico, conforme a límites legales existentes.

El nivel de tratamiento para un agua residual dependerá del cual uso o disposición final se le desea dar. El orden de eliminación de los contaminantes es: objetos gruesos, arenas, grasas, materia orgánica sedimentable, materia orgánica disuelta o coloidal, nutrientes y patógenos, aunque en varios niveles de tratamiento algunos contaminantes se eliminan paralelamente.

A continuación se describen los niveles de tratamiento:

Línea de agua

Pre-tratamiento

Las aguas residuales domésticas debido a su procedencia traen consigo muchos sólidos de tamaño grande y mediano. La función del pre-tratamiento es precisamente separar del agua residual la mayor cantidad posible de estos mediante operaciones físicas y mecánicas.

La importancia de esta etapa recae en evitar problemas operativos y de mantenimiento en el proceso, es decir, un correcto diseño indicaría que no hay obstrucción en las tuberías, válvulas, desgaste de bombas, etc.

Las operaciones que comprende el pre-tratamiento generalmente son: desbaste, desarenado, y desengrasado.

Desbaste

Consiste en la eliminación de los sólidos de tamaño grande y mediano (trozos de madera, trapos, raíces, etc.), así como de finos, que de otro modo podrían deteriorar o bloquear los equipos mecánicos y obstruir el paso de la corriente de agua. El procedimiento más usual consiste en hacer pasar las aguas a través de rejillas, que de acuerdo con la separación entre los barrotes pueden clasificarse en:

- Desbaste de gruesos: el paso libre entre los barrotes es de 50 a 100 mm;
- Desbaste de finos: el paso libre entre los barrotes es 10 a 25 mm.

(Martín García, y otros, 2006, pág. 43).

Tamizado

Tiene por objeto la reducción del contenido de sólidos en suspensión de las aguas residuales, mediante su filtración a través de un soporte delgado dotado de ranuras de paso. Para el pre-tratamiento de las aguas residuales urbanas se recurre al empleo de tamices con luces de paso comprendidas entre 0.2 y 6 mm (Martín García, y otros, 2006, pág. 43).

Desarenado

Su objetivo es la extracción de la mayor cantidad posible de las arenas presentes en las aguas residuales. Dentro de la denominación “arenas” se incluyen las arenas propiamente dichas, gravas y partículas más o menos grandes de origen mineral u orgánico. Con esta

operación se pretende proteger los equipos mecánicos contra la abrasión y el desgaste, además de evitar la acumulación de estas materias pesadas. Normalmente, se dimensionan los desarenadores para la eliminación de partículas de tamaño superior a los 0,2 mm (Martín García, y otros, 2006, pág. 44).

Desengrasado

En esta operación se eliminan las grasas y demás materias flotantes de menor densidad que el agua. Normalmente, las operaciones de desarenado y desengrasado se llevan a cabo de forma conjunta en unidades de tratamiento conocidas como desarenadores-desengrasadores aireados (Martín García, y otros, 2006, pág. 44).

Tratamientos primarios

Los sistemas de tratamiento primario son procesos de tipo físico o fisicoquímico que tienen como objetivo eliminar una porción de sólidos y materia orgánica.

Los tratamientos más habituales en esta etapa son los tratamientos físico-químicos típicamente en combinación con una decantación primaria.

Tratamiento físico-químico

Este tipo de tratamiento se consigue, mediante la adición de agentes químicos, los cuales incrementan el tamaño y densidad de los mismos, mediante procesos de coagulación-floculación.

Coagulación-Floculación se refiere a la sedimentación de partículas en suspensión de sistemas coloidales, alterando las propiedades físico-químicas de las partículas, acelerando su decantación (Jordi & Peñuela, pág. 33).

Los floculantes tienen por objeto, desestabilizar las partículas en suspensión, es decir, facilitar su aglomeración. Los coagulantes por su parte, favorecen el contacto entre las

partículas desestabilizadas. Estas partículas se aglutinan para formar un floc que pueda ser fácilmente eliminado por los procedimientos de decantación y filtración. Algunos de los coagulantes y floculantes más comunes son:

- Hidroxicloruro de aluminio, $[Al_2(OH)_3Cl]$: habitualmente llamado policloruro de aluminio o PAC, es un coagulante principalmente utilizado en la potabilización, tratamiento de aguas residuales, en la industria del papel, del cuero, entre otras. Sus principales ventajas son su efectividad en un amplio rango de pH y temperatura. Además de que bajo ciertas condiciones se puede reducir su consumo frente a otros coagulantes.
- Sulfato de aluminio, $[Al_2(SO_4)_3]$: es uno de los coagulantes más ampliamente utilizados por su gran disponibilidad tanto en forma líquida como en forma seca y su facilidad de disolverse. Su desventaja es que la eficacia solo funciona en cierto intervalo de pH.
- Cloruro férrico, $[FeCl_3]$: utilizado a escala industrial principalmente y se comercializa habitualmente a granel.
- Sulfato de hierro $[Fe_2(SO_4)_3]$: es un compuesto químico de forma sólida de color amarillenta. Su principal ventaja es que la coagulación con este, es posible en rangos de pH muy bajos, además su flóculo es más pesado que el flóculo formado con sulfato de aluminio.
- Poliacrilamida catiónica: es un floculante, disponible en varias cargas, densidades de carga, pesos moleculares y formas. Sus principales ventajas son, que aumentan el tamaño de los coágulos creando flóculos, permitiendo una sedimentación más

rápida, sus costos son relativamente bajos y bajo ciertas condiciones pueden minimizar los recursos para la depuración del agua residual.

Es muy importante que los procesos de coagulación-floculación sean utilizados correctamente, factores como el pH, turbiedad, temperatura, tipo de coagulante, condiciones de mezcla y color son algunos que pueden interferir en la eficiencia de este. Además la producción de un floc muy pequeño o muy ligero produce una decantación insuficiente; ya que, el agua que llega a los filtros contiene una gran cantidad de partículas de floc que rápidamente ensucian los filtros y necesitan lavados frecuentes. Por otro lado cuando el floc es frágil, este se rompe en pequeñas partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la calidad del agua producida.

Decantación primaria

Su objetivo es la eliminación de la mayor parte de los sólidos sedimentables, bajo la acción exclusiva de la gravedad.

La retirada de estos sólidos es muy importante, ya que en caso contrario originarían fuertes demandas de oxígeno en el resto de las etapas de tratamiento de la estación (Martín García, y otros, 2006, pág. 45).

Tratamientos secundarios

Esta etapa es uno de los niveles críticos en un sistema de tratamiento. Se trata de la degradación de materia orgánica biodegradable principalmente soluble y en ciertos casos nutrientes como nitrógeno y fósforo, mediante procesos biológicos.

El principio de esta etapa es que los microorganismos (biomasa) presentes en el agua transforman a los contaminantes orgánicos (sustrato) en materia celular, la cual se aglomera en forma de flóculos, conocidos como lodos o fangos.

Existen diversas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales domésticas, algunas surgiendo como mejora de otra tecnología, reduciendo los costos operativos y de mantenimiento, tiempos de residencia, etc.

Se pueden clasificar en dos principales grupos: sistemas de tratamiento aerobios y sistemas de tratamiento anaerobios.

Sistemas de tratamiento aerobios

Estos sistemas de tratamiento consisten en la degradación de la materia orgánica por microorganismos aeróbicos, mediante la presencia de oxígeno, teniendo como productos principales, el dióxido de carbono, moléculas de agua y biomasa microbiana.

A continuación, se presentan las principales tecnologías de depuración mediante procesos aerobios.

Sistemas de lagunas

La simbiosis, término que se refiere al beneficio mutuo para el desarrollo vital y en este caso entre algas y bacterias provoca un equilibrio de oxígeno disuelto en estos tipos de sistemas. Las bacterias consumen la materia orgánica y oxígeno y producen CO₂, mismo que las algas procesan y mediante la fotosíntesis producen oxígeno disuelto.

Este tipo de sistemas generalmente están compuestas de dos o tres estanques conectados en serie y existen diversas variantes.

La primera generalmente es del tipo facultativa que se refiere a una zona aerobia en la parte superior y una zona anaerobia en la parte inferior. Este estanque tiene una profundidad de 1 a 2 m. La segunda es del tipo oxidación o pulimento, en la cual no hay zonas anaerobias. Esta laguna, logra abatir la concentración de microorganismos patógenos y tiene una profundidad menor a 1 m. Cabe mencionar también, que en algunos sistemas, la primera

laguna instalada es del tipo anaerobia, con profundidades de 3 a 5 m y posteriormente una segunda laguna tipo facultativa.

Otras de las variantes de este tratamiento es que se pueden instalar lagunas aireadas (Ilustración 1) mediante mecanismos artificiales y dependiendo de la modalidad el proceso, se pueden instalar estanques totalmente aireados o bien aireados facultativos. La profundidad de esta modalidad varía entre 2 y 5 m.



Ilustración 1. Laguna aireada.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 17).

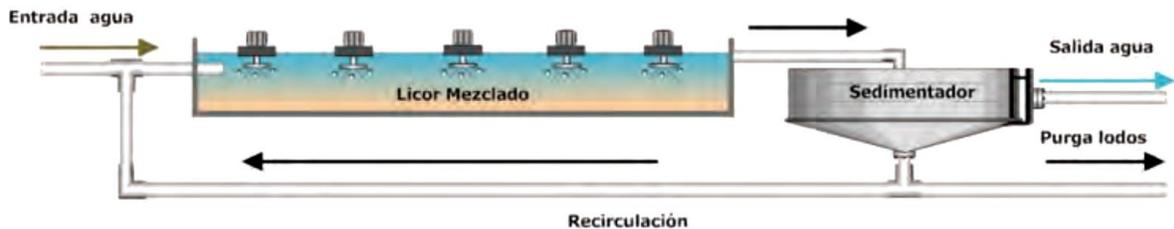


Ilustración 2. Lodos activados.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 17).

Proceso de lodos activados

Este es uno de los procesos más utilizados en el mundo por su gran efectividad y sus variantes con las que se puede utilizar.

Una variante particular es el reactor secuencial por lotes (Squencing Batch Reactor, SBR), el cual opera en forma discontinua con las etapas de alimentación, reacción,

sedimentación y vaciado. La gran ventaja de este sistema es que se lleva a cabo en un solo tanque, el cual cuenta con dispositivos para proveer aeración, mezclado y sedimentación. Este sistema debe contar con al menos dos tanques que funcionen en forma alternada (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 18).

El principio de este proceso (Ilustración 2), es que los microorganismos del agua residual, mediante una adecuada aireación a través de difusores de aire o aireadores mecánicos se alimentan de la materia orgánica disuelta. Esto provoca que la biomasa crezca y se agrupe. El contenido total en el reactor se le llama licor mezclado, y la masa activa de microorganismos se le llama lodo activo. El licor mezclado procede a otra etapa de clarificación en la que el lodo activo sedimenta. Una parte de esta biomasa se recircula al reactor para mantener una apropiada relación sustrato-microorganismo y permitir así una adecuada degradación de la materia orgánica y otra parte se purga.

Filtros percoladores

En este tipo de tratamiento la palabra “filtro” no se refiere a la acción de filtrar partículas en el agua, sino al material de empaque utilizado.

El principio de estos dispositivos (Ilustración 3), es que se pone en contacto las aguas residuales con microorganismos adheridos en forma de biopelícula en los empaques suficientemente espaciados para que circule el aire de forma natural.

Estos dispositivos operan con distintas cargas orgánicas en función o no de recirculación. La tasa de recirculación dependerá de la cantidad de agua tratada que se retorna a la entrada y de la carga orgánica y superficial.

Los empaques son la clave para este tipo de sistema, por lo cual es importante seleccionar un tipo de empaque adecuado con una alta relación área/volumen, ser inerte, resistente,

durable y de bajo costo. En la práctica, estos atributos no se encuentran en un solo empaque por lo que suelen utilizarse empaques naturales (pétreos) y sintéticos (diversas geométricas de piezas de plástico).

Una de las principales ventajas de este sistema (Ilustración 4) es que la aireación se lleva a cabo por convección natural, es decir, mediante diferencia de temperaturas entre el ambiente interno y externo el aire fluye a través del empaque. Esto conlleva a reducir los costos operativos en consumo de energía y a su vez obtener altas eficacias de remoción de contaminantes en función de la carga aplicada.

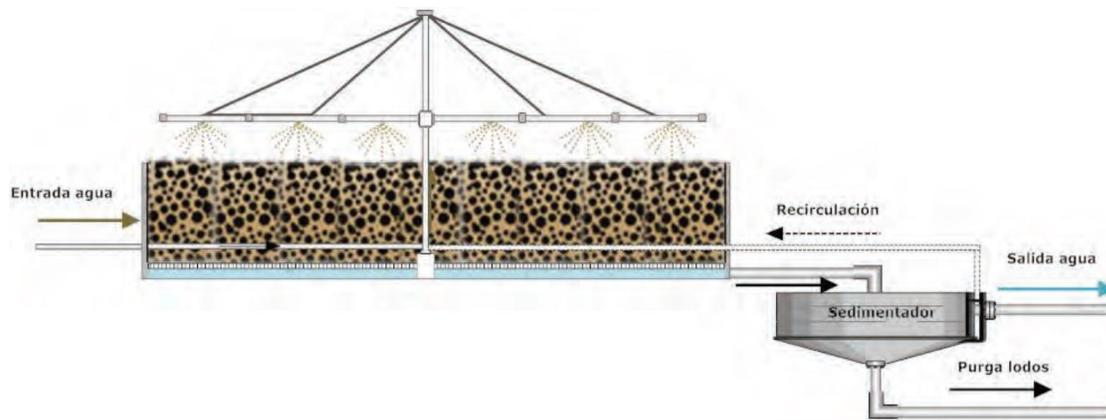


Ilustración 3. Filtro percolador.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 17).

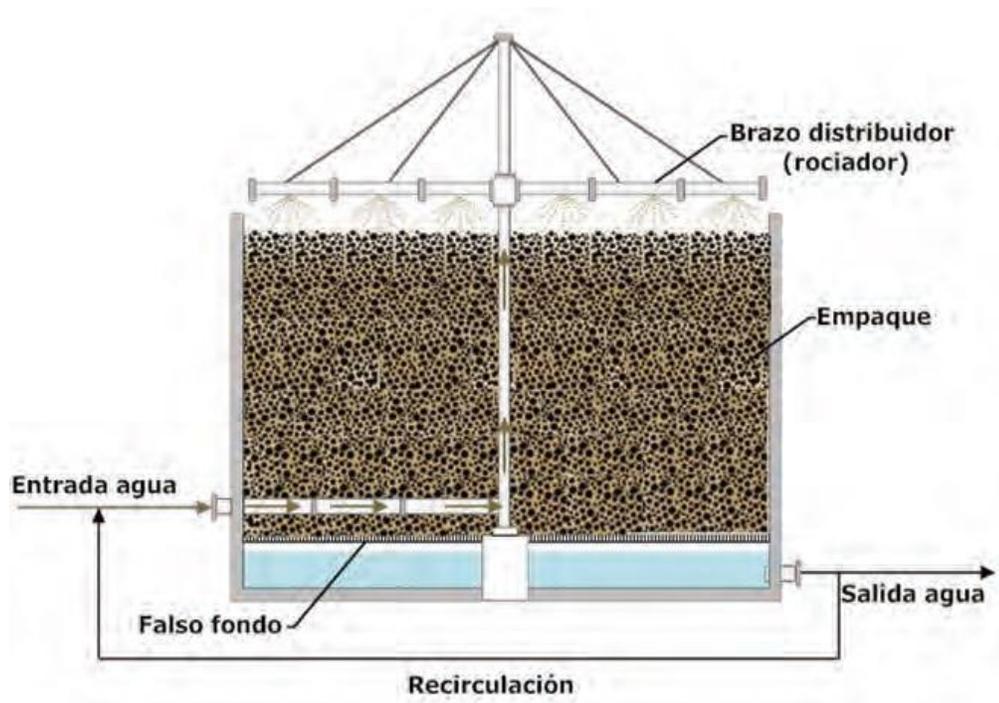


Ilustración 4. Componentes de un filtro percolador.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 21)

Sistema de discos biológicos rotatorios

Este sistema (Ilustración 5) consiste en un empaque circular giratorio en el cual se adhiere la biomasa. Una parte de este dispositivo metálico se sumerge y otra queda con contacto con el ambiente. Esto provoca que la biomasa adherida este en contacto sucesivo con el aire y el agua. Posteriormente, pasa a un sedimentador que retira los lodos, los cuales no requieren ser recirculados, simplemente disponer de ellos adecuadamente.

Estos dispositivos son muy ingeniosos y muy efectivos, pero su principal desventaja recae en la parte mecánica, ya que utilizan un eje metálico que descansa en rodamientos. Estos elementos pudieran fallar durante la operación debido a desalineamiento o mala lubricación.

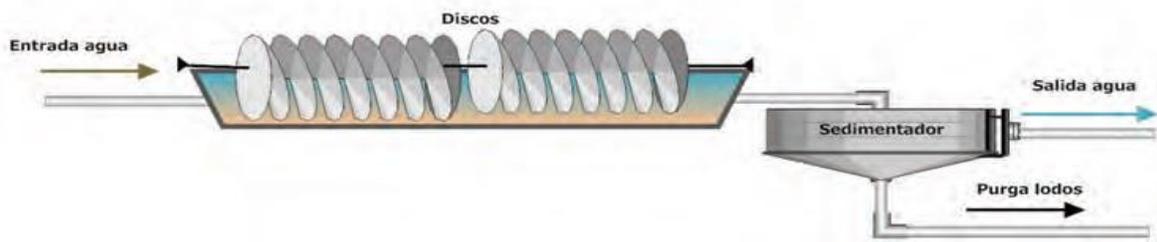


Ilustración 5. Discos biológicos rotatorios.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 17).

Filtro sumergido aerobio (FSA)

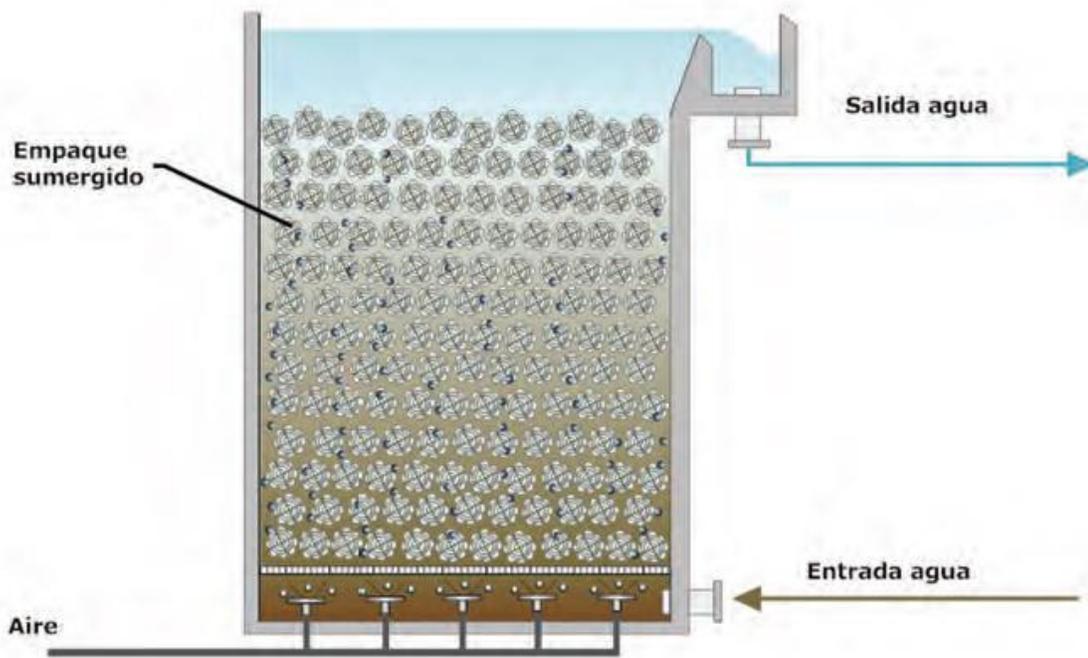


Ilustración 6. Filtro Sumergido Anaerobio (FSA).

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 23).

Este sistema (Ilustración 6) se lleva a cabo mediante empaques sumergidos en un tanque, pero a diferencia de los filtros percoladores, en este sistema se provee con aireación artificial,

esto provoca una mayor área para la adherencia de los microorganismos, pero un aumento en los costos operativos y de mantenimiento.

Reactor aerobio acoplado a membranas

Este tipo de sistemas es relativamente reciente y como el nombre lo dice, funciona mediante membranas acopladas. Estos reactores son llamados MBR por sus siglas en inglés y funcionan con un módulo de membranas que filtran partículas muy pequeñas hasta de 0.01 μm . Estos módulos pueden ser externos al reactor o bien sumergidos en el mismo tanque.

La ventaja de este tratamiento es la alta calidad de agua que se obtiene (libre de sólidos suspendidos y de microorganismos), sin embargo, la desventaja es aún mayor, las membranas tienen un tiempo de vida útil muy corto y son muy caras, además que requieren procesos de limpieza frecuentes. Por lo tanto, este tipo de sistemas no son adecuados para los sistemas operadores de agua y saneamiento municipales.

Sistemas de tratamiento anaerobios

Los sistemas de tratamiento anaerobios consisten en una serie de reacciones bioquímicas que transforman la materia orgánica contaminante en biogás. Los componentes principales son el CH_4 y CO_2 , entre otros como H_2S e H_2 .

Este proceso transcurre en ausencia de oxígeno, y el metano (CH_4) tiene la particularidad de ser recuperado y usado como combustible (energía) en el mismo proceso para calentar la caldera, debido a que los microorganismos anaeróbicos realizan esta digestión a una temperatura entre 30-37 °C (Metcalf y Eddy, 1995).

Una desventaja del proceso es que la puesta en marcha es delicada, debido al lento crecimiento de los microorganismos anaeróbicos.

Dentro de estos sistemas se pueden encontrar variantes con respecto al tipo de generación, siendo los de primera generación los más básicos. Los sistemas de segunda generación, por su parte ya consideran otros factores que favorecen la transferencia de masa y por ende son más eficaces. Los sistemas de tercera generación son sistemas avanzados que incorporan una velocidad de flujo ascendente en el reactor, aunado a una elevada producción de biogás, esto provoca que sean capaces de recibir carga orgánica volumétrica elevada. Es de importancia mencionar, que a medida que se hacen sistemas más completos, son más complejos de diseño y mayores costos. La interacción sustrato-microorganismo y la relación entre los tiempos de retención hidráulica y celular son factores importantes para diferenciar el tipo de generación que se tiene.

A continuación, se presentan las principales tecnologías de depuración mediante procesos anaerobios.

Fosa séptica

La fosa séptica (Ilustración 7) es un sistema de tratamiento limitado, ya que es una de las más antiguas tecnologías. Limitado por el hecho de que solo se puede utilizar para poblaciones pequeñas que generalmente no tienen servicio de drenaje. Este sistema permite la sedimentación y eliminación de flotantes debido a largos tiempos de residencia, normalmente de uno o dos años y también a la falta de mezclado y a la temperatura ambiente. Cabe mencionar también, que el efluente de este sistema no posee características físico-químicas para ser descargado directamente a un cuerpo receptor, por ello es de importancia efectuar un pos tratamiento.

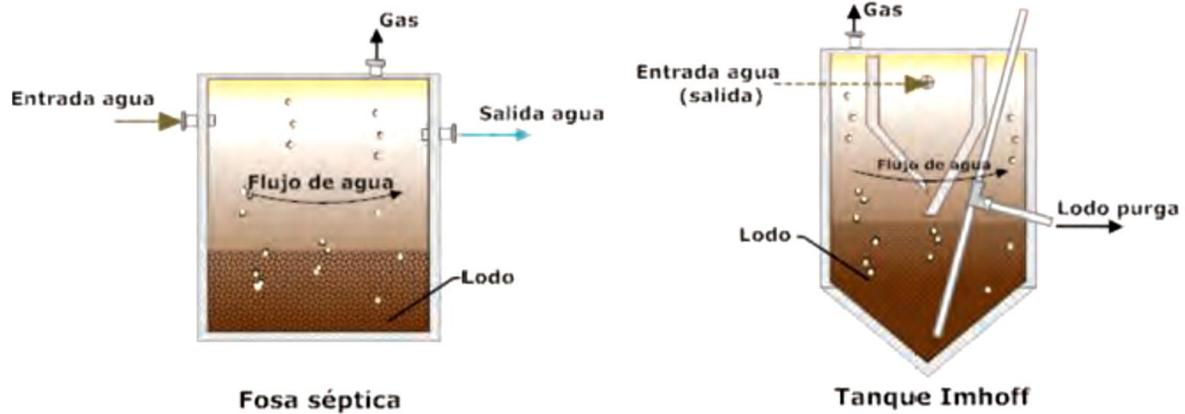


Ilustración 7. Fosa Séptica / Tanque Imhoff.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 25).

Tanque Imhoff

El tanque Imhoff (Ilustración 7) es otra de las tecnologías casi obsoletas por la disponibilidad de otras opciones tecnológicas más eficaces, además que así como las fosas sépticas, el efluente de un tanque Imhoff también debe recibir un post tratamiento. La diferencia de una fosa séptica y un tanque Imhoff es que en este último se separa la zona de sedimentación de la de retención y digestión del lodo, además tienen una mayor capacidad de tratamiento del sistema para dar servicio a un mayor tamaño de población, pero sigue siendo limitado. Esta configuración impide el paso de gases y lodos desde la zona de retención y digestión a la de sedimentación, evitando que afecten a la sedimentación de los sólidos en suspensión.

Este sistema tiene por lo general una forma rectangular con una tolva en la parte inferior, está integrado además por una cámara superior que recibe el agua residual, la cual a su vez está conformada por mamparas de concreto donde sedimenta la materia orgánica.

Lagunas anaerobias

Este tratamiento es empleado principalmente en aguas de desecho industrial evacuadas a temperatura mayor a la del ambiente y con cierto grado de sólidos sedimentables. Son lagunas (Ilustración 8) hasta de 10 m sin cubierta para captar el biogás, siendo problemático este punto por los malos olores que se desprenden por esta configuración.

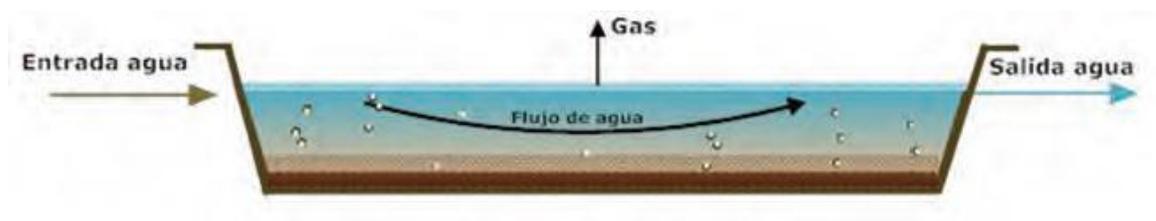


Ilustración 8. Laguna anaerobia.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 25).

Digestor anaerobio convencional (Sin mezcla)

Consiste de un tanque (Ilustración 9) cerrado sin agitación y sin calentamiento en donde el desecho a tratar se estratifica en zonas definidas. Este sistema, al igual que los ya mencionados está limitado porque posee tiempos de retención hidráulica mayores a 60 días, por lo que es aplicable solo para pequeños núcleos de población.

Digestor anaerobio de alta tasa (Con mezcla y calentamiento)

A diferencia del digestor anaerobio convencional, este sistema (Ilustración 9) incluye mezclado y control de temperatura. Esto favorece la interacción entre el sustrato y el microorganismo incrementando la eficacia.

Debido a los costos por mezclado y calentamiento, este sistema se utiliza en plantas de tratamiento de aguas residuales con caudales superiores a los 500 l/s.

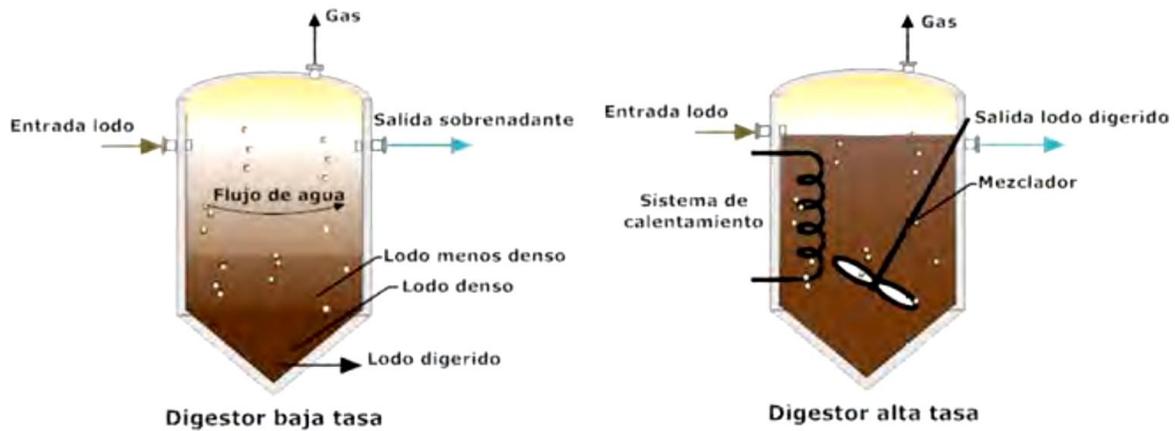


Ilustración 9. Digestores de tasa alta y baja.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 25).

Reactor de contacto anaerobio

Esta tecnología es la equivalente al reactor de los lodos aerobios, siendo un sistema menos eficaz por la ausencia de oxígeno.

Una de las grandes problemáticas de este sistema es que no se lleva a cabo una adecuada separación de los lodos anaerobios por la presencia del biogás en el interior del floculo, por lo tanto, la biomasa tiene a flotar.

Este sistema se limita al tratamiento de aguas residuales concentradas, por lo que en la actualidad debido a la presencia de tecnologías más completas se ha ido sustituyendo.

Filtro anaerobio

Es un reactor (Ilustración 10) empacado con soportes plásticos o piedras de 3 a 5 cm de diámetro promedio, es de segunda generación y funciona con flujo ascendente o descendente. Este empaque permite una mejor interacción entre el sustrato y el microorganismo, remueve alrededor de un 65% de DQO, pero para condiciones estrictas de normatividad es necesario una etapa de pos tratamiento.

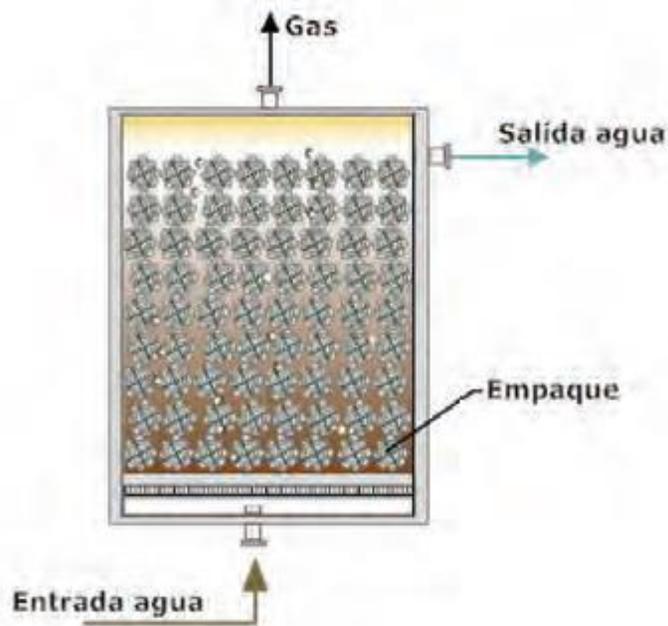


Ilustración 10. Filtro anaerobio.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág.

Reactor anaerobio de lecho de lodos con flujo ascendente

Más conocido como reactor UASB (Ilustración 11) (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), es un sistema de segunda generación que a diferencia del filtro anaerobio, no requiere de material de empaque. El reactor se basa en el principio de sedimentación, aproximadamente 1/3 del volumen total del tanque se sitúa en el fondo. A su vez, tiene incorporado un sistema de captación de biogás (campanas colectoras) que tiene por objetivo, crear una zona libre de biogás para que se favorezca la sedimentación. La zona entre la cama de lodos y las campanas colectoras se denomina expansión de lodo, en esta zona se aloja el lodo expandido por acción del biogás y la velocidad ascendente del agua.

La particularidad de este sistema es que la biomasa sedimentada es muy densa, lo que aumenta considerablemente el tiempo de retención celular. Este hecho, hace posible reducir

los tiempos de retención hidráulica y el volumen total del tanque y aun así conservar buenas eficiencias de remoción de materia orgánica. En adicción a ello, la turbulencia que provoca el biogás, fungen positivamente, ya que también favorece la interacción del microorganismo y el sustrato.

Este sistema tiene eficiencias de remoción hasta del 70% de DQO para aguas residuales municipales.

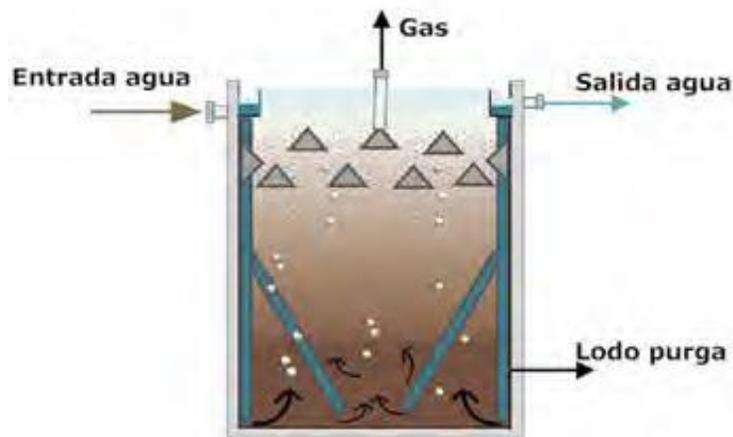


Ilustración 11. Reactor UASB.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 26).

Reactores de lecho expandido o fluidicado

También conocido como reactor EGSB (Ilustración 12) (Expanded Granular Sludged Blanket), es un sistema de tercera generación orientado principalmente al tratamiento de aguas residuales industriales por sus grandes concentraciones de materia orgánica que favorecen la granulación. Se basa en un material de empaque de pequeño tamaño, no mayor a 1 mm de diámetro, en el cual se adhiere la biopelícula anaerobia.

Aunque este sistema requiere de mayores costos de operación y control, es de resaltar la alta eficiencia que puede alcanzar, siendo apropiado para industrias con afluentes muy contaminados.

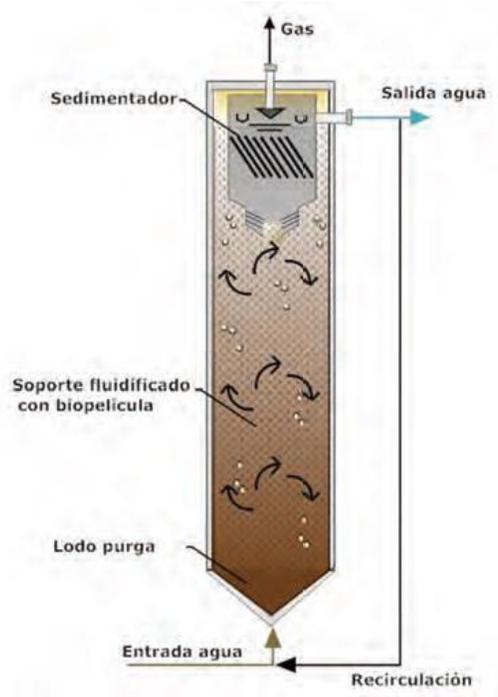


Ilustración 12. Reactor EGSB.

Fuente: (Noyola, Morgan-Sagastume, & Güereca, 2013, pág. 26).

Clasificación de los sistemas de tratamiento anaerobio

Como se mencionó anteriormente, dentro de los sistemas anaerobios se encuentran dos principales variables para definir el tipo de generación que es y por ende la eficacia del sistema. Se pueden definir como:

- **Interacción entre el sustrato y los microorganismos:** esta variable se puede entender como el grado de contacto del sustrato o alimento con el microorganismo,

es decir, que tan disponible se encuentra el sustrato para el microorganismo, entendiéndose el sustrato como la materia orgánica.

- **Relación entre el tiempo de retención hidráulica (TRH) y el tiempo de retención celular (TRC):** TRH se refiere al tiempo en que el agua residual estará siendo procesada en el tanque y TRC por su parte, se refiere al tiempo de contacto entre el microorganismo y el sustrato. Es importante entonces esta relación para definir qué tan distinto es el TRH con respecto al TRC, siendo deseable que el TRC sea mucho mayor que el TRH, ya que así se asegura la permanencia dentro del tanque de los microorganismos y permite también que se consideren tanques más pequeños, sin embargo, un TRC alto sin el adecuado contacto del microorganismo con el sustrato, no es útil.

Tratamientos terciarios

Este tipo de tratamiento también llamado avanzado se refiere a todo tratamiento hecho después del tratamiento secundario con el fin de obtener mejores rendimientos de eliminación de materia en suspensión, DBO₅, nutrientes y metales. Esta etapa solo es necesaria cuando se requieren cumplir con condiciones estrictas, por ejemplo, potabilización, ya que, en este tratamiento se alcanza calidad de agua muy alta.

Línea de lodos

Como cualquier proceso, la ley de la conservación de la materia no está exenta en el tratamiento de aguas residuales y es algo que también se debe tomar en cuenta. Al depurar un agua residual se producen residuos sólidos, algunos provenientes de la etapa primaria y otros en su mayoría provenientes de la etapa secundaria. Estos sólidos, tal como el agua del afluente, tienen en su composición potenciales contaminantes, orgánicos en su mayoría, por

lo cual, es importante así como la línea de agua que se le dé un adecuado tratamiento. Algunas operaciones son:

Espesamiento

Se incrementa la concentración del lodo mediante la eliminación del agua que contiene. Los métodos más habituales son: por gravedad y por flotación; siendo este último más apropiado para el espesamiento de los lodos secundarios o biológicos (Martín García, y otros, 2006, pág. 50).

Estabilización

Se reduce la fracción biodegradable presente en los lodos, para evitar su putrefacción y la consecuente generación de olores desagradables. La estabilización puede hacerse mediante:

- Digestión aerobia o anaerobia, eliminándose en torno al 40-50% de la materia orgánica presente en el lodo;
- Estabilización química, mediante la elevación del pH por adición de cal;
- Tratamiento térmico.

(Martín García, y otros, 2006, pág. 50).

Acondicionamiento

Mediante la adición de productos químicos, se mejora la deshidratación de los lodos, facilitando la eliminación del agua (Martín García, y otros, 2006, pág. 51).

Deshidratación

Se elimina parte del agua contenida en los lodos, con el objeto de transformarlos en sólidos fácilmente manejables y transportables. Los métodos más habituales son:

- Centrifugación;
- Filtración (bandas, vacío, presión, etc.;

- Secado térmico;
- Eras de secado.

(Martín García, y otros, 2006, pág. 51).

Criterios de selección de tecnologías de depuración de aguas residuales

Como en todo proceso, una tecnología adecuada es aquella que tenderá a ser sustentable, es decir, debe considerar el menor uso de recursos y energía sin afectar al medio social, ambiental y económico. Algunas consideraciones son:

Tamaño de la población a tratar

Es importante este aspecto para tener en cuenta la capacidad que debe tener la tecnología de depuración, para disponer de la mejor cantidad de recursos y energía.

Condiciones climáticas de la zona a tratar

En relación a este criterio, los sistemas que más se ven afectados son los sistemas naturales, aquellos como filtros verdes, humedales y lagunajes, ya que estos se basan en procesos totalmente naturales, por lo que las condiciones climáticas los afectan directamente.

La radiación solar incidente es especialmente importante en los lagunajes, al afectar directamente a los procesos de fotosíntesis que llevan a cabo las microalgas en las lagunas facultativas y de maduración.

Para los lechos bacterianos, contactores biológicos rotativos y aireaciones prolongadas, la temperatura es el principal factor climático a considerar. Los contactores, al operar bajo cubierta, son los que se ven menos afectados por las circunstancias meteorológicas imperantes.

Impacto ambiental por la instalación de tratamiento

Debe prestarse especial atención a los posibles impactos ambientales (estéticos, olfativos, sonoros, etc.) que la implantación de la estación depuradora puede originar. Las tecnologías naturales son las que presentan una mejor integración medioambiental.

En el caso de los lechos bacterianos, contactores biológicos rotativos y aireaciones prolongadas, se hace precisa la instalación de motores, cuya potencia necesaria es creciente en el orden en que se han enumerado las tecnologías. Estos motores, en función de su potencia, provocarán impactos sonoros más o menos acusados en el entorno.

Los lechos bacterianos, al estar constituidos por depósitos de unos 5 m de altura, provocan un importante impacto visual en el entorno. Este impacto puede minimizarse recurriendo a su pintado o a su “forrado” con plantas tapizantes.

Características del agua residual

Para una adecuada selección, las características del agua residual son de las consideraciones más importantes. La caracterización consiste en determinar, mediante pruebas de laboratorio la concentración de los elementos presentes de un agua residual, estos pueden ser físicos, químicos o biológicos.

La variación del caudal, tipo y concentración de los contaminantes se ven afectados por las diferentes actividades que se realizan en el área urbana. En este sentido, las aguas residuales domésticas son relativamente homogéneas, por lo que no es necesario una caracterización exhaustiva y comparativamente son fáciles de tratar. En el apartado “Principales parámetros de caracterización de las aguas residuales domésticas” se detallan redundantemente los principales parámetros de caracterización de las aguas residuales domésticas. Para áreas urbanas con actividad industrial, es importante una caracterización

del agua formal para seleccionar una tecnología de tratamiento adecuada, ya que, es evidente que las diferentes industrias descargan diversos contaminantes.

Uso o disposición final del agua tratada

El municipio deberá identificar el destino final del agua tratada, ya sea para descarga, reutilización o incluso potabilización, para así definir la calidad de agua que se requiere.

Diversidad de oferta tecnológica

El mercado de tecnologías con diferentes marcas es muy amplio, sin embargo, en muchas ocasiones las diferentes tecnologías presentan ligeras variantes, muchas veces por cuestiones de mercadotecnia. Referente a la disponibilidad de tecnologías para el tratamiento de aguas domésticas se observa que debido al lento desarrollo tecnológico en este campo, las tecnologías se reducen a menos de ocho. Requerimientos tales como energía e insumos que la tecnología necesita para operar son los elementos que tendrán peso en una decisión final.

Costo de inversión y recursos para operación y mantenimiento

El costo de inversión es otra de las consideraciones importantes para seleccionar un adecuado tratamiento, ya que, es lo que puede darle continuidad al proyecto o no. El costo de inversión a su vez, debe estar ligado con los costos de operación y mantenimiento para una completa consideración, debido a que cada tecnología requiere diversas demandas, por ejemplo, puede que una tecnología no requiera de una gran inversión, pero si sus costos de operación y mantenimiento fueran altos, provocaría incluso un mayor desembolso de una tecnología con mayor costo de inversión.

Remoción de sólidos suspendidos, sedimentables y flotantes

Para la remoción de sólidos gruesos se utiliza el cribado, así como la sedimentación de arenas y flotantes en equipos conocidos como desarenadores.

La coagulación - floculación es una técnica normalmente usada para remover sólidos en un sedimentador primario.

La flotación es utilizada para la remoción de grasas y aceites o material flotante, pero para el caso de aguas residuales domésticas, estos contaminantes no se presentan en grandes cantidades. Si después de la caracterización se observa que si se presentan grandes cantidades es recomendable utilizar medios mecánicos.

Remoción de materia orgánica biodegradable

Sistemas aerobios

Dentro de los sistemas aerobios, aunque existen diversas variantes, existen básicamente 5 tecnologías; lodos activados, lagunas de estabilización, filtro percolador, filtro sumergido y disco biológico rotatorio. Las lagunas de estabilización por su parte requieren de grandes cantidades de terreno, lo que en áreas urbanas es una limitante muy fuerte, su ventaja por su parte son los bajos costos, ya que no requiere equipo electromecánico y los requerimientos de personal son bajos, sin embargo, a largo plazo si se tienen que considerar los costos por la disposición de los lodos acumulados. La elección de las cuatro tecnologías restantes estará en función de los costos de operación y mantenimiento, así como del impacto ambiental.

Para aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica es recomendable implementar una variante que incluya sistemas aerobios y anaerobios.

Sistemas anaerobios

Dentro de la gama de posibilidades de los sistemas anaerobios, el reactor anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (UASB) es la tecnología más favorecida, ya que por sus grandes ventajas, como la producción de poco lodo y la generación de biogás que se puede reutilizar, se ve beneficiada en los bajos costos de operación. Sin embargo, es importante

saber que aunque es un reactor relativamente sencillo, algunos diseños internos no están estandarizados, por lo que el diseñador de este reactor debe tener los conocimientos y experiencia necesaria para diseñarlo.

Procesos acoplados (Anaerobio-aerobio)

Como se mencionó anteriormente, un proceso acoplado es recomendable para aguas residuales con altas concentraciones de materia orgánica, ya que este sistema aumenta la eficiencia energética y reduce los costos de operación y mantenimiento. En la etapa anaerobia se elimina la mayor cantidad de materia orgánica, reduce la generación de lodos y produce un elemento energético. La etapa aerobia por su parte pule el efluente anaerobio.

Remoción de nutrientes

La remoción de nutrientes es importante siempre y cuando no tenga disposición final en riego, ya que estos nutrientes se comportan como fertilizantes que pueden ayudar a disminuir la aportación de agentes químicos. Por otra parte, es importante su remoción porque pueden causar eutrofización, favoreciendo el crecimiento de algas, reduciendo el oxígeno disuelto y por ende la vida acuática.

Los sistemas biológicos son los más adecuados para este tratamiento. Existen sistemas de tratamiento con biomasa suspendida concebidos para la remoción simultánea de nitrógeno y fósforo.

Remoción de patógenos

La remoción de patógenos es sinónimo de desinfección, por lo tanto, es importante realizarla cuando este destinada a un uso. Para la remoción de estos, el agente más usado por su disponibilidad en el mercado es el cloro, ya sea en forma de hipoclorito de sodio o dióxido de cloro.

Existen otras alternativas a considerar e igual de efectivas como la desinfección mediante luz ultravioleta o mediante ozono.

Generación y tratamiento de lodos

Como se mencionó anteriormente, la generación de lodos es inevitable e importante, sobre todo por los costos que implica su adecuado manejo. El proceso de depuración dependerá de la cantidad y calidad de lodos que se generen.

JUSTIFICACIÓN

En la comunidad de Arcelia, Guerrero, la generación de aguas residuales no es una excepción. La población ha optado por desechar las heces y orina humana en el arroyo principal de la comunidad (Ilustración 13), además de desechar mucho tipo de residuos, entre los que destacan productos utilizados en la misma como botellas de plástico y de vidrio, bolsas de detergentes y frituras, ropa y ocasionalmente otros residuos de mayor tamaño como llantas, muebles, etc.

Además, este arroyo se desplaza entre las colonias principales de la comunidad, ocasionando un aspecto visual desagradable y en la mayoría de las ocasiones un olor insoportable, lo que causa un impacto social y ambiental negativo hacia la comunidad.

En este contexto, este trabajo está enfocado en dar iniciativa hacia esta problemática que se ha vivido por décadas y proponer un sistema de tratamiento para este tipo de agua residual.



Ilustración 13. Arroyo "El grande" de la localidad de Arcelia, Guerrero.

OBJETIVOS

Objetivo General

Caracterizar el agua residual doméstica de la comunidad de Arcelia, Guerrero con la finalidad de proponer un sistema de depuración viable.

Objetivos particulares

- Caracterizar el agua residual doméstica de acuerdo a parámetros establecidos para este tipo de agua.
- Proponer un sistema de depuración del agua residual doméstica de acuerdo a los resultados de caracterización, basado en la norma NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

METODOLOGÍA

Muestreo del agua residual doméstica

El muestreo del agua residual se realizó mediante la norma NMX-AA-03-1980-AGUAS RESIDUALES-MUESTREO, la cual, establece los lineamientos generales y recomendaciones para muestrear las descargas de las aguas residuales, con el fin de determinar los análisis correspondientes. (NMX-AA-03-1980-AGUAS RESIDUALES-MUESTREO, 1980).

A continuación, se presenta de manera general lo que se realizó.

Materiales

Tabla 2. Materiales de muestreo.

Parámetro	Materiales	Objetivo de material
Muestreo	2 recipientes de polietileno de 3 litros	Recipientes inertes para el transporte y conservación de las muestras
	1 recipiente de vidrio de 1 litro	Recipiente inerte para el transporte y conservación de las muestras dirigido al análisis de grasas y aceites
	Hielera	Recipiente con el fin de preservar la muestra en refrigeración durante el transporte

Procedimiento

1. Identificación de las muestras

Para llevar un adecuado control de las muestras, se identificaron los recipientes con la siguiente información:

- Identificación de la descarga
- Número de la muestra
- Fecha y hora de muestreo
- Punto de muestreo
- Temperatura de la muestra
- Profundidad de muestreo
- Nombre y firma de la persona que efectuó el muestreo

2. Hoja de registro

Con el fin de identificar las muestras correctamente, se llenó una hoja de registro con los requisitos citados para identificar las muestras y además se registraron otros datos como el flujo volumétrico y descripciones cualitativas del olor y el color del agua residual. Para el cálculo del flujo volumétrico se realizó lo siguiente:

2.1. Se acotó una parte del río con cuerdas y se lanzó un objeto pequeño, para lo cual, se registró el tiempo que tomaba el objeto en cruzar el tramo del río. Este registro se realizó 3 veces y posteriormente se promediaron los tiempos.

2.2. Se midieron las dimensiones del tramo del río (altura, ancho y largo) con el fin de calcular el volumen.

2.3. Una vez teniendo los datos de volumen y tiempo, se calculó el caudal con la siguiente fórmula:

$$\text{Caudal} = \text{Volumen}/\text{Tiempo}$$

Ecuación 1. Cálculo de caudal.

3. Muestreo

Una vez identificadas las muestras correctamente y el punto apto para muestrear, es decir, que el agua residual fluyera libremente en forma de chorro y fuera representativa, se procedió al muestreo, para lo cual se tomaron diferentes muestras simples durante un día con dos horas de intervalo y se mezclaron para formar una muestra compuesta.

4. Preservación de las muestras

Finalmente, para preservar la composición de las muestras durante el transporte hacia el laboratorio, se conservaron en la hielera procurando que la temperatura se mantuviera a 4 °C.

Para el caso del frasco de vidrio y un frasco de polietileno además del enfriamiento, se preservaron con ácido clorhídrico (1:1).

Caracterización del agua residual doméstica de entrada

Como se menciona en los antecedentes y en los objetivos, el hecho de que las aguas residuales domésticas fueran homogéneas, permitió que la caracterización no fuera tan exhaustiva. Para el caso de este proyecto, la caracterización de los principales parámetros se basó en las siguientes normas:

- **NMX-11-007-SCFI-2013** - Análisis de agua - medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. (SCFI, NMX-11-007-SCFI-2013, 2013).
- **NMX-AA-008-SCFI-2016** - Análisis de agua - medición del pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de. (SCFI, NMX-AA-008-SCFI-2016, 2016).

- **NMX-AA-034-SCFI-2015** - Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. (SCFI, NMX-AA-034-SCFI-2015 , 2015).
- **NMX-AA-004-SCFI-2013** - Análisis de agua - medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. (SCFI, NMX-AA-004-SCFI-2013 , 2013).
- **NMX-AA-006-SCFI-2010** - Análisis de agua - determinación de materia flotante en aguas residuales y residuales tratadas-método de prueba. (SCFI, NMX-AA-004-SCFI-2013 , 2013).
- **NMX-AA-005-SCFI-2013** - Análisis de agua - medición de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. (SCFI, NMX-AA-005-SCFI-2013, 2013).
- **NMX-AA-026-SCFI-2010** - Análisis de agua - medición de Nitrógeno Total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. (SCFI, NMX-AA-026-SCFI-2010 , 2010).
- **NMX-AA-029-SCFI-2001** - Análisis de aguas - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. (SCFI, NMX-AA-029-SCFI-2001 , 2001).
- **NMX-AA-028-SCFI-2001** - Análisis de agua - determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas - método de prueba. (SCFI, NMX-AA-028-SCFI-2001 , 2001).

- **NMX-AA-030-SCFI-2001** - Análisis de agua - determinación de la Demanda Química de Oxígeno en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba. (SCFI, NMX-AA-030-SCFI-2001 , 2001).

Procedimiento experimental

A continuación se presentan los reactivos, patrones y materiales de relevancia en cada análisis:

Reactivos y Patrones

Tabla 3. Reactivos y patrones.

Parámetro	Reactivos y patrones
Temperatura	Agua destilada
pH	Agua destilada o desionizada Patrón de referencia Patrón de trabajo Disoluciones amortiguadoras de pH de referencia Electrolitos para relleno de electrodos de referencia
Sólidos Suspendidos Totales	Agua destilada Disolución control (NaCl, CaCO ₃ , celulosa microcristalina, tierra de diatomáceas y almidón)
Sólidos Sedimentables	NA
Materia flotante	NA
Grasas y Aceites	Agua destilada Ácido clorhídrico concentrado (HCl)

	Hexano (C ₆ H ₁₄)
	Ácido sulfúrico concentrado (H ₂ CO ₄)
	Suspensión de tierra de diatomeas-sílice (10 g/L de agua)
	Ácido clorhídrico (1:1)
	Aceite de referencia
	Sílice gel
DBO ₅	Agua destilada
	Fosfato monobásico de potasio (KH ₂ PO ₄)
	Fosfato dibásico de potasio (K ₂ HPO ₄)
	Fosfato dibásico de sodio heptahidratado (Na ₂ HPO ₄ •7H ₂ O)
	Cloruro de amonio (NH ₄ Cl)
	Sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO ₄ •7H ₂ O)
	Cloruro de calcio anhidro (CaCl ₂)
	Cloruro férrico hexahidratado (FeCl ₃ •6H ₂ O)
	Ácido sulfúrico concentrado (H ₂ SO ₄)
	Hidróxido de sodio (NaOH)
	Sulfito de sodio (Na ₂ SO ₃)
	2-cloro-6 (triclorometil) piridina
	Glucosa grado patrón primario (C ₆ H ₁₂ O ₆)

	Ácido glutámico grado patrón primario ($C_5H_9NO_4$)
	Ácido clorhídrico (HCl)
	Ácido nítrico (HNO_3)
DQO	Agua destilada
	Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$)
	Sulfato ferroso amoniacal hexahidratado ($Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$)
	Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
	Sulfato de plata (Ag_2SO_4)
	1,10 fenantrolina ($C_{12}H_8N_2$)
	Sulfato mercuríco ($HgSO_4$)
	Biftalato de potasio patrón primario ($HOOC C_6H_4 COOK$)
	Sulfato ferroso heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)
Nitrógeno Total Kjeldahl	Agua destilada
	Tetraborato de sodio decahidratado ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$)
	Hidróxido de sodio (NaOH)
	Ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4)
	Ácido bórico (H_3BO_3)
	Indicador de rojo de metilo
	Indicador de azul de metileno

	Alcohol etílico (CH ₃ CH ₂ OH)
	Sulfato de cobre (II) anhidro (CuSO ₄)
	Sulfato de potasio (K ₂ SO ₄)
	Tiosulfato de sodio pentahidratado (Na ₂ S ₂ O ₃ •5H ₂ O)
	Carbonato de sodio anhidro (Na ₂ CO ₃), patrón primario
	Cloruro de amonio (NH ₄ Cl), patrón primario
Fósforo Total	Agua destilada
	Fosfato monobásico de potasio anhidro (KH ₂ PO ₄)
	Fenolftaleína
	Ácido sulfúrico concentrado (H ₂ SO ₄)
	Persulfato de amonio [(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈]
	Hidróxido de sodio (NaOH)
	Ácido nítrico concentrado (HNO ₃)
	Glicerol (C ₃ H ₈ O ₃)
	Cloruro estanoso dihidratado (SnCl ₂ •2H ₂ O)
	Heptamolibdato de amonio tetrahidratado [(NH ₄)Mo ₇ O ₂₄ •4H ₂ O]

Materiales

Tabla 4. Materiales.

Parámetro	Materiales
-----------	------------

Temperatura	Termómetro
pH	Potenciómetro
Sólidos Suspendidos Totales	Horno de secado
	Balanza analítica
	Mufla eléctrica
	Equipo de filtración al vacío
	Parrilla de calentamiento
	Cápsulas de evaporación
	Desecador
	Filtro de vidrio de vidrio
	Soporte de secado
	Dispositivo de filtración
Sólidos Sedimentables	Cono de sedimentación tipo Imhoff
	Base para cono Imhoff
	Agitador largo
	Cronómetro
Materia flotante	Malla metálica de 2.8 mm
Grasas y Aceites	Recipiente de boca ancha de 5 L
	Espátula
	Cartuchos de extracción de celulosa
	Papel filtro con tamaño de poro medio
	Algodón

	Embudo Büchner
	Matraz Kitazato
	Probeta graduada de 1 L
	Pinzas
	Desecador
	Equipo de extracción por recirculación
	Bomba de vacío
	Horno de secado
	Balanza analítica
	Parrilla de calentamiento
	Potenciómetro
DBO ₅	Equipo de aireación con difusor
	Incubadora controlada por termostato
	Balanza analítica
	Medidor de oxígeno disuelto
	Botellas Winkler de vidrio de 300 mL
	Contratapa de polietetrafluoroetileno para botella Winkler
	Bureta
	Material de vidrio para preparación de disoluciones
DQO	Equipo de destilación

	Parrilla de calentamiento
	Bureta
Nitrógeno Total Kjeldahl	Digestor con sistema de extracción de humos
	Destilador con sistema de condensación
	Potenciómetro
	Balanza analítica
	Balanza granataria
	Material volumétrico
	Matraz tipo Kjeldahl
Fósforo Total	Balanza analítica
	Placa de calentamiento
	Autoclave
	Espectrofotómetro
	Material volumétrico
	Papel filtro
	Embudo de filtración

Metodología

A continuación se presenta de manera general los procedimientos de caracterización de los parámetros de acuerdo a las normas correspondientes antes establecidas.

Temperatura

Para la medición de este parámetro no se requirió de preparación o conservación de las muestras, ya que, las determinaciones se efectuaron en campo, es decir, en el lugar de muestreo.

Se utilizó un termómetro de inmersión parcial directamente en el cuerpo de agua y se esperó el tiempo suficiente para que el termómetro alcanzara el equilibrio térmico y los resultados fueran exactos. Esta operación se realizó tres veces, enjuagando el instrumento en cada medición con el agua destilada. Finalmente se promediaron las mediciones y se registró la temperatura en °C.

pH

El valor de pH es un parámetro importante porque puede cambiar rápidamente en la muestra por los diferentes procesos químicos, físicos o biológicos que se presenten, siendo además un parámetro estrechamente relacionado con la temperatura por el equilibrio de disociación. Por lo tanto, este valor se reportó en conjunto con la temperatura y se midieron directamente en el cuerpo de agua.

Primeramente, se atemperaron las disoluciones patrón de referencia para la calibración y patrones de trabajo para la verificación controlando que no variaran de ± 5 °C de la muestra problema. Para la selección de las disoluciones de patrón de referencia, se realizó un análisis de pH rápido de la muestra problema mediante tiras indicadoras.

Se calibró el electrodo en el intervalo observado durante el análisis rápido de pH de la muestra problema utilizando los patrones de referencia.

Una vez realizada la calibración, se comprobó que de verdad el potenciómetro estuviera funcionando de manera exitosa. Para ello, se midieron 3 lecturas independientes consecutivas

de los patrones de referencia cuidando que no se desviara de ± 0.05 unidades de pH. Se realizó el mismo procedimiento, pero ahora de la disolución patrón de trabajo parecida a la muestra problema.

Para la medición del valor de pH de la muestra problema, se sumergió el electrodo, se agitó y se esperó para que la lectura de pH se estabilizara. Se realizaron 3 mediciones y entre cada medición se enjuagó el electrodo del equipo con agua destilada.

Finalmente se promediaron las tres lecturas realizadas (las cuales no estaban diferidas de más de 0.05 unidades) acompañadas del valor de temperatura promediado.

Sólidos Suspendidos Totales

Para el análisis de este parámetro se utilizó 1 L del recipiente de polietileno.

De acuerdo al procedimiento establecido, los materiales se deben mantener a masa constante, es decir, deben presentar una diferencia menor o igual a 0.005 g en dos ciclos completos de calentado, enfriado y pesado. Por lo tanto, para la preparación del dispositivo de filtración se introdujo al horno a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 20 minutos, posteriormente se llevó al desecador y se pesó. Este procedimiento se realizó hasta que el material se mantuvo constante.

Para la instalación del sistema de filtración, con ayuda de unas pinzas se colocó el filtro de fibra de vidrio al dispositivo de filtración con la cara rugosa hacia arriba.

Con respecto a la medición de los sólidos suspendidos totales, se agitó la muestra con el fin de homogenizarla y se filtró a través del sistema de filtración.

Se introdujo el soporte de secado con el filtro al horno a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 h, se retiró el filtró con el fin de llevarlo a masa constante y finalmente, se registró la masa obtenida.

La ecuación para el cálculo de los sólidos disueltos fue la siguiente:

$$SST = \frac{(m_2 - m_1)}{V} * 1000000$$

Donde:

SST = Sólidos Suspendidos Totales, en g/mL;

M₂ = masa del soporte de secado con el filtro, en g;

M₁ = masa del soporte de secado con el filtro antes de la filtración, en g;

V = volumen de muestra, en mL.

Ecuación 2. Contenido de Sólidos Suspendidos Totales.

Sólidos Sedimentables

Para el análisis de este parámetro se utilizó un poco más de 1 L del recipiente de polietileno. Primeramente se dejó reposar la muestra para que estuviera a temperatura ambiente. Posteriormente se mezcló con el fin de asegurar la homogeneidad de esta y se colocó en el cono Imhoff hasta la marca de 1 L.

Se dejó sedimentar 45 minutos y una vez transcurrido este tiempo, se desprendieron suavemente los residuos adheridos en el cono con ayuda de un agitador y se dejó reposar otros 15 min. Finalmente, se registraron los sólidos sedimentables en mL/L directamente de la lectura del cono Imhoff.

Materia flotante

El análisis de este parámetro hace referencia a todo aquel material que se mantuvo retenido en una malla de 2.8 mm.

El volumen para este estudio fue de 3 L y al igual que la temperatura y el pH, se realizó en campo. Se muestreó este volumen en el recipiente de boca ancha. Posteriormente se vertió

en la malla y con ayuda de la espátula se arrastraron los residuos adheridos en las paredes del recipiente hacia la malla. Para este parámetro solo se reportó si se observaba presencia o ausencia de materia flotante.

Grasas y Aceites

El principio de este método se basó en la adsorción de grasas y aceites en tierra de diatomeas, los cuales posteriormente fueron extraídos mediante un equipo de extracción por recirculación empleando hexano como disolvente, el cual a su vez finalmente se pasó a un proceso de evaporación.

Para este análisis se utilizó la muestra acidificada con ácido clorhídrico (1:1) del frasco de vidrio de 1 L. Primeramente se corroboró que el pH fuera de 2 o menor con el pHmetro y se prepararon los matraces de extracción a masa constante.

Se preparó un sistema de filtración colocando el papel filtro en el embudo Büchner, el cual a su vez se colocó en el matraz Kitazato. A este sistema se le agregaron 100 mL de la suspensión de tierras de diatomeas-sílice.

Una vez preparado el material filtrante, se transfirió la muestra poco a poco, mediante la aplicación de vacío. Una vez que cesó toda la muestra, con ayuda de pinzas, se transfirió el material filtrante al cartucho de extracción, antes limpiando todas las paredes internas del embudo y frasco con trozos de algodón previamente impregnados con hexano. Todos estos trozos se colocaron en el mismo cartucho de extracción.

Se dejó secar el cartucho de extracción en el horno a una temperatura de 103 ± 2 °C por un periodo de 30 minutos y se procedió a colocarlo en el equipo de extracción.

Con respecto al sistema de extracción con recirculación, se colocó el matraz con un poco de hexano y este a su vez se colocó sobre la parrilla de calentamiento para controlar la

temperatura de reflujo y la velocidad (20 ciclos/hora). Este sistema estuvo funcionando 4 horas a partir del primer reflujo de n-hexano.

Una vez terminada la etapa de extracción, se recuperó el disolvente y se evaporó el remanente. El recipiente de extracción libre se dejó reposar para que llegara a temperatura ambiente, se pesó y por diferencias de masas se midió la cantidad de grasas y aceites en mg.

Finalmente, se analizó una muestra control de calidad bajo las mismas condiciones de la muestra y se calculó el contenido de grasas y aceites mediante la siguiente formula:

$$GYA = \frac{(m_f - m_i)}{V_m} - Blanco$$

Donde:

GYA = Grasas y Aceites recuperables, en mg/L;

M_f = masa del recipiente de extracción con el residuo, en mg;

M_i = masa constante del recipiente de extracción vacío, en mg;

V_m = volumen de la muestra, en L;

Blanco = valor del blanco de reactivo, en mg/L.

Ecuación 3. Contenido de Grasas y Aceites.

DQO

El principio de este método se basó en la oxidación de la materia orgánica mediante ácido crómico en un medio ácido en presencia de un catalizador a reflujo abierto con una posterior titulación del dicromato no reducido con el objetivo de determinar la cantidad de dicromato consumido, para poder finalmente calcular la materia oxidable en términos de oxígeno equivalente.

Primeramente, se prepararon las disoluciones correspondientes para el análisis; dicromato de potasio cuya función fue oxidar la materia orgánica, sulfato ferroso amoniacal cuyo objetivo fue como agente valorante, ácido sulfúrico-sulfato de plata cuya función fue como agente catalizador, 1,10-fenantrolina como indicador y estándar de biftalato de potasio como estándar de calidad. Cabe mencionar que el manejo de los reactivos y disoluciones se realizó con extremo cuidado ya que representan peligros potenciales a la salud.

Con respecto al procedimiento del análisis y tomando en cuenta teóricamente que la demanda química de oxígeno fue superior a 50 mg/L, primero se diluyó la muestra, posteriormente se agregó sulfato mercurico para evitar la interferencia de los cloruros, algunas perlas de vidrio y una alícuota de la disolución estándar de dicromato de potasio (cantidades especificadas en la norma).

Se conectó el matraz Erlenmeyer al condensador tipo Friedrich y se instaló el sistema de forma que el agua de enfriamiento se mantuviera en recirculación.

Por el extremo superior del condensador se agregó lentamente la disolución de ácido sulfúrico-sulfato de plata y se agitó para homogenizar.

Se calentó el matraz durante 2 h a reflujo a partir del momento de la primera ebullición y pasado este tiempo se dejó enfriar a temperatura ambiente.

Finalmente, para determinar el dicromato de potasio consumido, se valoró la disolución con 1,10 fenantrolina y la disolución de sulfato ferroso amoniacal.

Se realizó el mismo procedimiento simultáneamente con un blanco y se calculó el DQO con la siguiente formula:

$$DQO = \frac{V_1 - V_2 * M * 8000}{V_3}$$

Donde:

DQO = Demanda Química de Oxígeno, en mg O₂/L;

V₁ = volumen en mL de la disolución de sulfato ferroso amoniacal requerido para la valoración del blanco;

V₂ = volumen en mL de la disolución de sulfato ferroso amoniacal requerido para la valoración de la muestra;

V₃ = volumen en mL de la muestra;

M = molaridad de la disolución de sulfato ferroso amoniacal utilizada en la determinación.

Ecuación 4. Demanda Química de Oxígeno.

DBO₅

El principio en este análisis se basó en determinar la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y el oxígeno disuelto final al cabo de cinco días de incubación a 20 °C mediante el método electrométrico.

Primeramente, se prepararon las disoluciones correspondientes para la preparación del agua de dilución; disolución de sulfato de magnesio, disolución de cloruro de calcio, disolución de cloruro férrico y disolución amortiguadora de fosfatos. Para la preparación propiamente del agua de dilución, se añadió 1 mL de cada disolución y se llevó a 1 L. Antes de usar esta agua, se saturó con oxígeno aireado con aire filtrado, libre de materia orgánica por 1 h.

De acuerdo a los valores de DQO, se procedió a diluir la muestra a 0.5 y 1% del volumen del frasco Winkler con el agua de dilución y se tomó lectura del oxígeno disuelto inicial mediante un medidor de oxígeno disuelto con electrodo de membrana sensitiva al oxígeno

tipo galvanizado y se incubó a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1$ por 5 días. Pasado este tiempo se midió nuevamente el oxígeno disuelto y se calculó la DBO_5 mediante la siguiente fórmula:

$$\text{DBO}_5 = \frac{\text{OD}_i - \text{OD}_5}{\%}$$

Donde:

DBO_5 = Demanda Bioquímica de Oxígeno al quinto día, en mg/L;

OD_i = Oxígeno Disuelto inicial, en mg/L;

OD_5 = Oxígeno Disuelto al quinto, en mg/L;

% = porcentaje de dilución, en decimales.

Ecuación 5. Demanda Bioquímica de Oxígeno.

Finalmente, se empleó un blanco del agua de dilución como control de calidad, es decir, se preparó sin agregar muestra y se realizó el mismo procedimiento electrométrico.

Nitrógeno Total Kjeldahl

El principio de análisis de este parámetro se basó en la metodología Kjeldahl, en la cual, los compuestos nitrogenados se descomponen con ácido sulfúrico concentrado en caliente, transformándose la mayor parte de nitrógeno de los grupos funcionales orgánicos en amonio. Una vez completada la descomposición, la disolución se enfría, se diluye y se alcaliniza con hidróxido de sodio concentrado. El amoníaco liberado se destila y se adsorbe en una disolución de ácido bórico.

Primeramente, se prepararon las disoluciones requeridas; disolución indicadora de ácido bórico con mezcla de indicadores, disolución de Tetraborato de sodio, disolución amortiguadora de boratos, disoluciones de hidróxido de sodio, disolución valorada de ácido

sulfúrico, reactivo para digestión, disolución reactivo de Hidróxido-Tiosulfato de sodio, disolución madre de amonio y disolución patrón de amonio.

EL volumen aproximado en este análisis fue de 2 litros del muestreo del recipiente de polietileno.

El Nitrógeno Total Kjeldahl es la suma del nitrógeno orgánico y nitrógeno amoniacal, por lo tanto, el procedimiento estuvo constituido en dos fases:

- Nitrógeno amoniacal

Se seleccionó el volumen de muestra de acuerdo a la tabla 1 de la norma correspondiente y se diluyó con agua a 500 mL.

Se añadió la disolución amortiguadora de boratos y se ajustó el pH con la disolución de hidróxido de sodio. Esta disolución se transfirió al matraz Kjeldahl y se añadieron unas perlas de ebullición para que la destilación fuera homogénea.

Se destiló la disolución cuidando que la temperatura no pasara de 29 °C recolectando el condensado en el matraz colector, el cual tenía añadidos 50 mL de la disolución de boratos y la mezcla de indicadores.

La destilación se completó cuando se recolectaron 300 mL, incluyendo los 50 mL de la disolución de boratos y la mezcla de indicadores.

Finalmente, se retiró el matraz colector y se tituló con ácido sulfúrico hasta que la solución pasó de un verde esmeralda a morado.

- Nitrógeno orgánico

Primeramente, se dejó enfriar el residuo del matraz Kjeldahl. Para la digestión, se añadió el reactivo de digestión y algunas perlas de vidrio.

Se mezcló y se llevó a ebullición bajo campana de extracción hasta que el volumen se redujo entre 25 y 50 mL y se observó desprendimiento de vapores blancos. A partir de aquí, se continuó con la digestión otros 30 minutos más,

Se dejó enfriar y se diluyó con agua a 300 mL. Se agregó la disolución de Hidróxido-Tiosulfato de sodio para formar una capa alcalina en el fondo del matraz y se agitó de tal manera que el pH fuera mayor a 11.0.

Se destiló la disolución cuidando que la temperatura fuera menor a 29 °C y se recolectó el destilado en el matraz colector, el cual tenía añadidos 50 mL de la disolución de ácido bórico y mezcla de indicadores. La destilación terminó cuando se alcanzó un volumen de 250 mL.

Finalmente, la disolución se valoró con ácido sulfúrico hasta el cambio de verde esmeralda a morado.

Las fórmulas para los cálculos correspondientes fueron las siguientes:

$$\frac{mg (N_{tk})}{L} = \frac{(A - B)(N)(14)(1000)}{V}$$
$$\frac{mg (NH_3 - N)}{L} = \frac{(A - B)(N)(14)(1000)}{V}$$
$$\frac{mg (N_{-ORG})}{L} = \frac{(A - B)(N)(14)(1000)}{V}$$
$$\frac{mg (N_{tk})}{L} = \frac{mg (NH_3 - N)}{L} + \frac{mg (N_{-ORG})}{L}$$

Donde:

A = mL de ácido sulfúrico gastados en la titulación de la muestra;

B = mL de ácido sulfúrico gastados en el blanco;

N = normalidad del ácido sulfúrico;

14 = peso equivalente del nitrógeno.

Ecuación 6. Calculo de concentración de Nitrógeno Total Kjeldahl.

Fósforo

El principio de este análisis se basó en la reacción del fósforo contenido en la muestra en forma de ortofosfato con el ácido molíbdico para formar el ácido 12-molibdofosfórico, el cual a su vez es reducido por el cloruro de estaño a azul de molibdeno, compuesto de descomposición desconocida que contiene una mezcla de Mo (VI) y Mo (V), que absorbe a 690 nm.

Para el análisis de este parámetro se consideraron 500 mL de muestra del recipiente de polietileno. Primeramente, se prepararon las disoluciones requeridas; disolución madre de fosfato, disolución de ácido fuerte, disolución de cloruro estanoso y disolución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado.

Se preparó la muestra por medio de la digestión con persulfato mediante 50 mL de muestra, fenolftaleína, la disolución de ácido fuerte y el persulfato de amonio. Se calentó hasta romper la ebullición y se mantuvo sobre la placa de calentamiento hasta que el volumen bajó a 10 mL. Se dejó enfriar, se diluyó con agua, se adicionó fenolftaleína y se neutralizó hasta desvanecer el color rosa pálido con hidróxido de sodio, se aforó a 100 mL y se volvió a ajustar el pH de la muestra mediante fenolftaleína y unas cuantas gotas de la disolución de ácido fuerte.

Para el desarrollo del color, se adicionó en agitación la disolución de heptamolibdato de amonio tetrahidratado y la disolución de cloruro estanoso y se midió la intensidad del color espectrofotométricamente después de 10 minutos de haber desarrollado el color, pero antes

de 12 minutos. Este intervalo se manejó para todas las mediciones a 690 nm y se comparó contra la curva de calibración.

Fue necesario medir instantáneamente el blanco de agua y el blanco de reactivos para obtener la curva de calibración en condiciones iguales en tiempos de desarrollo de color y medición.

Se calculó la concentración de la muestra mediante la ecuación obtenida de la curva de calibración, la cual se modeló linealmente con la siguiente ecuación:

$$Y = mX + b$$

Donde:

Y = absorbancia;

m = pendiente;

b = ordenada al origen;

X = concentración, en mg P/L.

Ecuación 7. Concentración de Fósforo.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Resultados de caracterización del agua residual doméstica de entrada

Tabla 5. Caracterización del agua residual doméstica de entrada.

Parámetros	Resultados	Límites máximos permisibles	Unidades	Referencia NMX-AA
Temperatura	20.3	40	°C	007-SCFI-2013
pH	7.08	5-10	Unidades de pH	008-SCFI-2016
Sólidos				
Suspendidos	66	200	mg/L	034-SCFI-2015
Totales				
Sólidos Sedimentables	1.5	2	mg/L	004-SCFI-2013
Materia Flotante	Ausente	Ausente	RMN3mmCLC*	006-SCFI-2010
Grasas y Aceites	8.4	15	mg/L	005-SCFI-2013
Nitrógeno Total Kjeldahl	7.0	40	mg/L	IDO-2026
Fosforo Total	5.0	20	mg/L	NMX-AA-029-SCFI-2001

D.B.O. ₅	206	150	mg/L	028-SCFI-2001
D.Q.O.	646	N.A.	mg/L	030-SCFI-2001

De acuerdo a los resultados de caracterización del agua residual de entrada (Tabla 5), es decir, antes de la depuración se puede observar que a pesar de que visualmente el agua residual denotaba muy contaminada, los resultados no fueron tan significantes, de hecho la mayoría de ellos resultaron incluso bajos del promedio para este tipo de aguas residuales, sin embargo, no deja de ser una gran problemática para la comunidad, ya que en algún futuro estos niveles podrían superar los límites permisibles.

Solo la D.B.O.₅ resultó fuera de los límites permisibles, por lo que el sistema de depuración se inclinó para reducir la materia orgánica y por ende este parámetro.

Análisis de criterios de selección de tecnologías de depuración de aguas residuales

Debido a que los resultados de los análisis no fueron tan considerables, no fue necesario realizar un análisis tan exhaustivo para seleccionar una tecnología adecuada de depuración, por lo tanto, solo se tomaron en cuenta los criterios de relevancia.

Tamaño de la población a tratar

Según los datos que arrojó el II Censo de Población y Vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con fecha censal del 12 de junio de 2010, el municipio de Arcelia tenía hasta ese año un total de 32, 181 habitantes. De acuerdo a la misma fuente, la proyección de la población para el 2017 fue de 33, 159 habitantes. Además,

de acuerdo a cifras históricas, se ha mantenido ese rango de población durante las últimas tres décadas.

Condiciones climáticas de la zona a tratar

La localidad de Arcelia, Guerrero es de tipo subhúmedo cálido, con una temperatura que oscila entre los 22 y los 34 °C; muy caluroso la mayor parte del año, con precipitaciones pluviales anuales entre 1100 y 1200 mm.

Características del agua residual

Agua residual de tipo doméstica o municipal con Demanda Bioquímica de Oxígeno fuera de normatividad lo cual indicaba que evidentemente tenía un contenido de materia orgánica.

La caracterización se llevó a cabo mediante un muestreo compuesto y el caudal del afluente resultó aproximadamente de 15 L/s.

Oferta tecnológica

De acuerdo al tipo de agua a tratar, los tipos de tecnologías disponibles se reducen al tratamiento mediante lodos activados y procesos físico-químicos.

Uso o disposición final del agua tratada

El propósito de la disposición final es para descarga al mismo arroyo.

Costo de inversión y recursos para operación y mantenimiento

Debido a falta de datos no se pudo realizar un estudio de costos en este apartado, sin embargo, se tomaron las siguientes consideraciones referentes a un proceso biológico y un proceso físico-químico, los cuales son los procesos de tratamiento más comunes para este tipo de agua residual.

- Caudal de 15 L/s, por lo que diariamente se tendrían que tratar alrededor de 1, 300, 000 litros aproximadamente.

- Considerando un tiempo de retención hidráulica de 30 minutos para el proceso físico-químico y de acuerdo al caudal, se puede calcular el volumen total:

$$V = (TRH)(Q) = (30 \text{ min}) \left(\frac{900L}{\text{min}} \right) = 27,000 L = 27 m^3$$

Con ello, se pueden considerar 2 depósitos de 16 m³ para cubrir la demanda con dimensiones de altura x ancho x largo de 2 m x 2 m x 4 m.

- Considerando un tiempo de retención hidráulica de 24 horas para el proceso biológico, tomando en cuenta la tecnología más utilizada en el mercado (lodos activados) y de acuerdo al caudal, se puede calcular el volumen total:

$$V = (TRH)(Q) = (24h) \left(\frac{54000L}{h} \right) = 1,296,000 L \approx 1,300m^3$$

Con ello, se pueden considerar 2 depósitos de 750 m³ para cubrir la demanda, con dimensiones de altura x ancho x largo de 5 m x 10 m x 15 m.

- Las consideraciones anteriores indicarían que un proceso físico-químico requeriría de un menor espacio.
- En el caso de un tratamiento físico-químico, los depósitos tendrían que tener incorporado un sistema de agitación. En el caso del proceso de lodos activados, los reactores tendrían que tener incorporado un sistema de aireación. Debido al tamaño de cada sistema, los costos asociados a un proceso de lodos activados serían más altos.
- El precio del coagulante y floculante es de \$10/Kg y \$30/Kg respectivamente aproximadamente. De acuerdo a la cantidad añadida aproximada, se requerirían alrededor de 0.3 Kg y 5 Kg respectivamente, es decir, un costo diario de \$150.

Remoción de materia orgánica biodegradable

Tomando en cuenta que la DBO₅ resultó de 206 y la DQO de 646, el agua residual contenía un índice de biodegradabilidad de 0.3, lo cual indica que el agua residual es biodegradable.

Generación y tratamiento de lodos

De acuerdo a las actividades agrícolas cerca de la localidad, la disposición de lodos más adecuada es mediante un sistema de composteo, con una estabilización y deshidratación como etapas previas.

Propuesta de tratamiento del agua residual doméstica

De acuerdo al análisis de los criterios anteriores, se eligió como propuesta final un proceso físico-químico. Esto, debido principalmente a los menores costos de inversión y recursos para operación y mantenimiento, ya que es un sistema que ocuparía un menor espacio, por ende menor inversión, menores recursos eléctricos y menor personal. Además de que el precio de los floculantes y coagulantes son relativamente bajos. Aunado a esta decisión, el agua residual no contenía un porcentaje alto de materia orgánica, por lo que un proceso de lodos activados no es la mejor opción.

Para el tratamiento del agua residual, se eligió al Hidroxicloruro de aluminio como coagulante y la Poliacrilamida catiónica como floculante debido a lo amigables con el ambiente con respecto a otros coagulantes y floculantes, la alta disponibilidad de estos, su bajo costo y la facilidad de su manejo. Los datos de estos agentes químicos fueron los siguientes:

- Coagulante: Policloruro de Aluminio (PAC), $\rho=1.2$;
- Floculante: Poliacrilamida catiónica, peso molecular medio, carga alta.

Para la propuesta de este sistema se realizó una prueba de jarras a 100 rpm durante 3 minutos con las variantes mostradas en la Tabla 6, añadiendo primero el coagulante, seguido del floculante con 10 segundos entre la adición.

Tabla 6. Variantes de la prueba de jarras.

# Prueba	Volumen prueba (mL)	Volumen, Concentración Coagulante	Volumen, Concentración – Floculante
1	1000	0.1 mL (100 ppm)	15 mL (15 ppm)
2	1000	0.2 mL (200 ppm)	15 mL (15 ppm)
3	1000	0.3 mL (300 ppm)	15 mL (15 ppm)
4	1000	1 mL (1000 ppm)	15 mL (15 ppm)
5	1000	0.3 mL (300 ppm)	5 mL (5 ppm)
6	1000	0.3 mL (300 ppm)	10 mL (10 ppm)
7	1000	0.3 mL (300 ppm)	15 mL (15 ppm)
8	1000	0.3 mL (300 ppm)	20 mL (20 ppm)

Tabla 7. Resultados visuales de la prueba de jarras.

# Prueba	Resultado visual
1	×
2	✓
3	✓
4	×

5	✓
6	✓
7	✓
8	✓

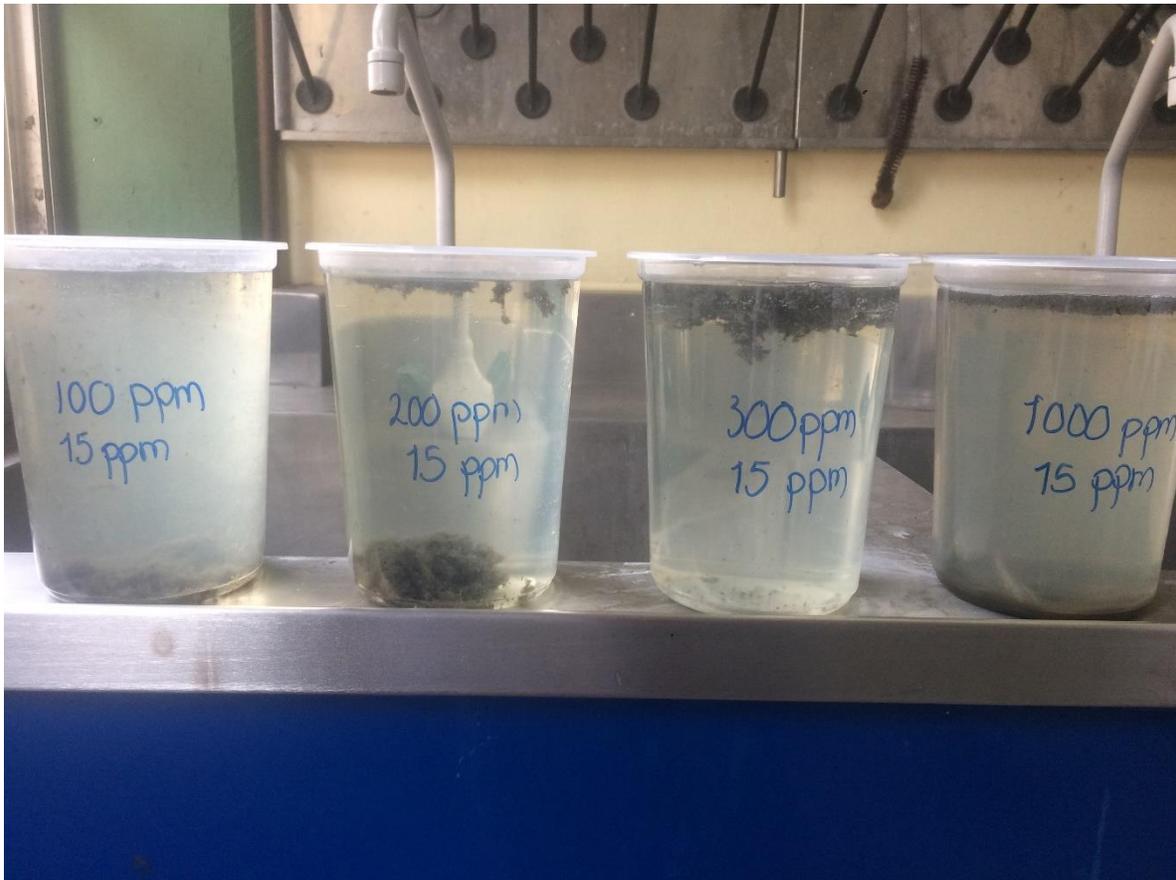


Ilustración 14. Resultados visuales del proceso de coagulación-floculación, 1.

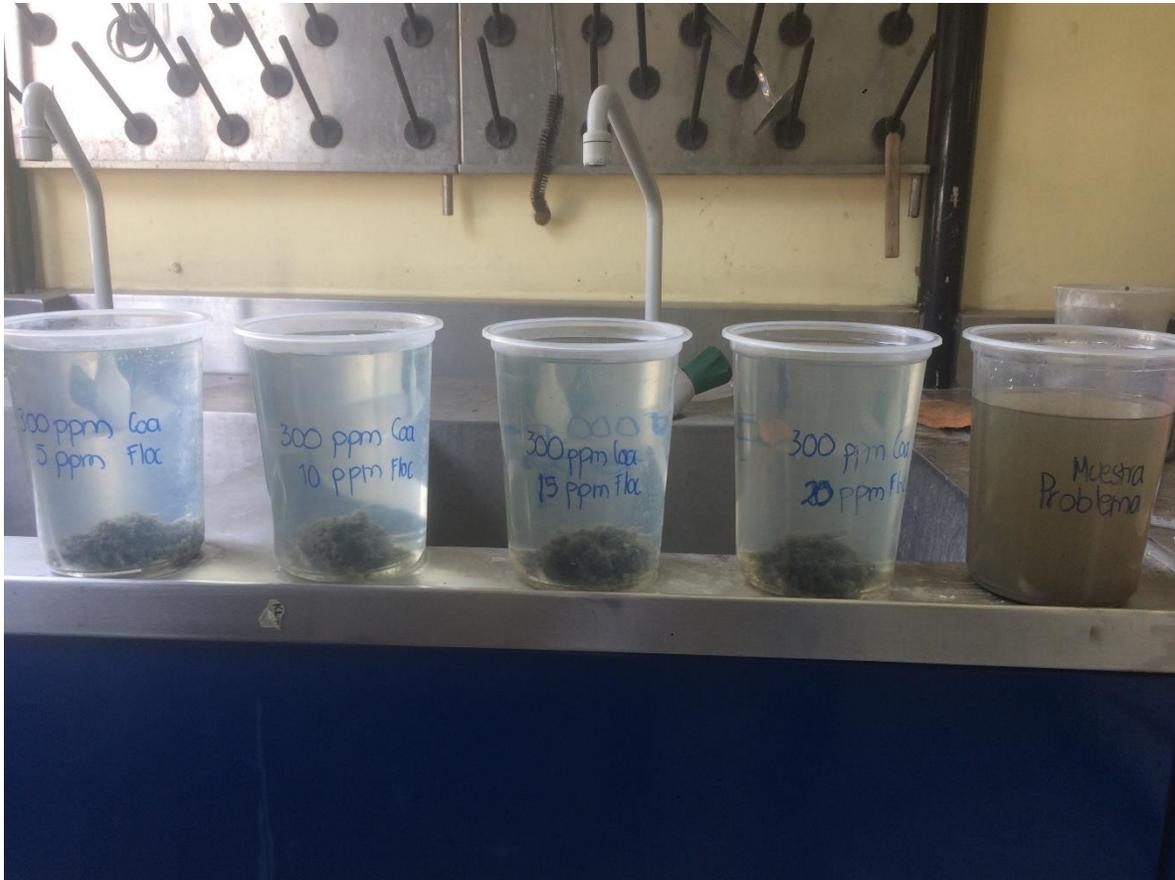


Ilustración 15. Resultados del proceso de coagulación-floculación, 2.

De acuerdo a los resultados visuales (Tabla 7, Ilustración 14, Ilustración 15) se puede observar que más de una prueba resultó positiva, afirmando que el proceso de coagulación-floculación se llevó a cabo de manera eficiente, sin embargo, por cuestiones de reducir recursos la variante que se considera óptima es la prueba # 5, es decir, mediante la adición de 0.3 mL de coagulante y 5 mL de floculante.

Caracterización del agua residual doméstica de salida

De acuerdo a lo mencionado anteriormente y tomando en cuenta que solo la DBO₅ estaba fuera de normatividad, se procedió a realizar solo la caracterización de este parámetro, en conjunto con el pH y la temperatura. Se midió el pH y la temperatura por lo cambiantes que pueden llegar a ser, sobre todo por la adición de los agentes químicos.

No fue necesario caracterizar el resto de los parámetros ya que además de que sus mediciones no estaban fuera de los límites permisibles, estas iban a bajar más después de la depuración. Los que no se iban a ver afectados son los nutrientes, pero sus límites resultaron tan bajos en la caracterización de entrada que no representaban algún problema, por el contrario, el tener un poco de contenido de nutrientes favorece al crecimiento de microorganismos y plantas.

Tabla 8. Resultados de la caracterización del agua residual doméstica de salida.

Parámetros	Resultados	Límites máximos permisibles	Unidades	Referencia NMX-AA
D.B.O. ₅	93	150	mg/L	028-SCFI-2001
Temperatura	20.1	40	°C	007-SCFI-2013
pH	6.9	5-10	Unidades de pH	008-SCFI-2016

De acuerdo a los resultados de caracterización del agua residual de salida del sistema de depuración (Tabla 8), se puede observar que efectivamente, el proceso físico-químico fue suficiente para depurar el agua residual, ya que bajaron los niveles de materia orgánica un 65 % y los parámetros terminaron dentro de los límites máximos permisibles.

CONCLUSIONES

Ante la problemática medioambiental que se ha vivido por décadas no solo en la localidad de Arcelia, sino en todo el mundo, el tratamiento de aguas residuales se ha convertido en un tema más que de importancia, indispensable para el desarrollo humano, ya que literalmente dependemos de este valioso recurso para sobrevivir y una mala gestión podría causar impactos realmente negativos.

Estamos en tiempos en los que cada vez nos quedamos sin opciones, los recursos están cada vez más limitados, por lo que la búsqueda de soluciones en este tema resulta de mucha importancia, ya que el agua es un recurso potencial para la salud pública y para el medio ambiente. Descargarlo irresponsablemente como actualmente se hace en muchas comunidades afecta las condiciones adecuadas de los ecosistemas, propiciando otros problemas medioambientales y riesgos a la salud de las personas.

Dentro del contexto nacional, a pesar de las limitaciones de recursos y economía considero que la aplicación de tecnologías de depuración de aguas residuales es un tema que se le tiene que dar más peso, ya que actualmente, son pocas las comunidades que tratan el agua antes de descargarla a los medios naturales.

Con respecto al proyecto, a pesar de que los resultados de caracterización de entrada no fueron tan significativos y por lo tanto, no fue necesario realizar un análisis tan exhaustivo para elegir alguna tecnología, no quitó la dificultad del tema. El proponer algún sistema de depuración requiere de conocimientos teóricos y técnicos, se tienen que tomar en cuenta criterios sociales, económicos y ambientales, además de consideraciones propias.

BIBLIOGRAFÍA

- CENTA. (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Sevilla: Alianza por el Agua.
- Espigares García, M., & Pérez López, J. (1985). Aguas residuales. Composición. En M. Espigares García, & J. Pérez López, *Aspectos Sanitarios del estudio de aguas*. Granada: Universidad de Granada. Servicio de publicaciones. Obtenido de Aguas residuales.
- Jordi, M., & Peñuela, G. (s.f.). *Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas*. Red ALFA TESCPAR .
- Martín García, I., Betancort Rodríguez, J., Salas Rodríguez, J. J., Peñate Suárez, B., Pidre Bocado, J., & Sardón Martín, N. (2006). *Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población*. Canarias: Daute Diseño, S.L.
- Noyola, A., Morgan-Sagastume, J. M., & Güereca, L. P. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*. México: Ruth Eunice Pérez Pérez.
- NMX-AA-03-1980-AGUAS RESIDUALES-MUESTREO. (1980). *Diario Oficial de la Federación*.
- Normas, D. G. (1980). NMX-AA-3-1980. *Diario Oficial de la Federación*.
- SCFI. (2001). NMX-AA-028-SCFI-2001 . *Diario Oficial de la Federación*.
- SCFI. (2001). NMX-AA-029-SCFI-2001 . *Diario Oficial de la Federación*.
- SCFI. (2001). NMX-AA-030-SCFI-2001 . *Diario Oficial de la Federación*.
- SCFI. (2010). NMX-AA-026-SCFI-2010 . *Diario Oficial de la Federación*.

SCFI. (2013). NMX-11-007-SCFI-2013. *Diario Oficial de la Federación.*

SCFI. (2013). NMX-AA-004-SCFI-2013 . *Diario Oficial de la Federación.*

SCFI. (2013). NMX-AA-004-SCFI-2013 . *Diario Oficial de la Federación.*

SCFI. (2013). NMX-AA-005-SCFI-2013. *Diario Oficial de la Federación.*

SCFI. (2015). NMX-AA-034-SCFI-2015 . *Diario Oficial de la Federación.*

SCFI. (2016). NMX-AA-008-SCFI-2016. *Diario Oficial de la Federación.*

SEMARNAT. (6 de Enero de 1997). NOM-001-SEMARNAT-1996. *Diario Oficial de la Federación.*

SEMARNAT. (03 de Junio de 1998). NOM-002-SEMARNAT-1996. *Diario Oficial de la Federación.*

SEMARNAT. (21 de Septiembre de 1998). NOM-003-SEMARNAT-1997. *Diario Oficial de la Federación.*

SEMARNAT. (18 de Febrero de 2002). NOM-004-SEMARNAT-2002. *Diario Oficial de la Federación.*

SEMARNAT. (18 de Febrero de 2002). NOM-004-SEMARNAT-2002. *Diario Oficial de la Federación.*

SEMARNAT. (01 de Noviembre de 2002). NOM-087-ECOL-SSA1-2002. *Diario Oficial de la Federación.*