

Fundamentos teóricos en el tratamiento de aguas residuales

Estefania Freytez Boggio
Nelly Esther Flores Tapia
María José Andrade Albán
Paúl Roberto Pino Falconí

Fundamentos teóricos en el tratamiento de aguas residuales

Estefania Freytez Boggio

Universidad Centrocidental Lisandro Alvarado, Decanato de agronomía, Programa de Ingeniería Agroindustrial. ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-6133-5555>. Correo: estefaniafreytez@uc-la.edu.ve

Nelly Esther Flores Tapia

Dirección de Investigación y Desarrollo, Facultad de Ciencias, Alimentos y Biotecnología, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0851-8117> Correo: ne.flores@uta.edu.ec

María José Andrade Albán

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) – Facultad de Salud Pública, Carrera de Nutrición y Dietética. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5874-4390> correo: maria.andrade@epoch.edu.ec;

Paúl Roberto Pino Falconí

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) – Facultad de Salud Pública, Carrera de Gastronomía. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1255-8154>
Correo: paul.pino@epoch.edu.ec

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica del mismo.

© Publicaciones Editorial Grupo Compás
Guayaquil - Ecuador
compasacademico@icloud.com
<https://repositorio.grupocompas.com>



Freytez, E., Flores, N., Andrade, M., Pino, P. (2023) Fundamentos teóricos en el tratamiento de aguas residuales. Editorial Grupo Compás

© Estefania Freytez Boggio
Nelly Esther Flores Tapia
María José Andrade Albán
Paúl Roberto Pino Falconí

ISBN: 978-9942-33-734-4

El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del copyright.

Agradecimientos:

1. DIRECCION DE INVESTIGACION Y DESAROLLO – DIDE de la Universidad Técnica de Ambato y al auspicio del proyecto "Descontaminación de Aguas Residuales Industriales en la Provincia de Tungurahua con Métodos Electroquímicos Combinados con Fitorremediación," que ha sido un pilar fundamental en su labor de investigación y desarrollo.
2. Consejo de desarrollo científico humanístico y tecnológico de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. CDCHT-UCLA

ÍNDICE GENERAL

PROLOGO	11
INTRODUCCIÓN	14
CAPITULO I	21
DEFINICIÓN, ORIGEN Y TIPOS DE AGUAS RESIDUALES	21
1. Introducción	21
2. Definición de aguas residuales	22
3. Tipos de aguas residuales	22
4. Aguas residuales generadas según el tipo de industria	24
CAPITULO II.....	29
CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	29
1. Introducción	29
2. Características físicas de las aguas residuales	30
3. Características químicas de las aguas residuales.....	36
3.1 Constituyentes químicos orgánicos.....	36
3.2 Constituyentes químicos inorgánicos.....	44
3.3 Características biológicas de las aguas residuales	46
4. Legislación ambiental existente a nivel mundial.....	47
4.1 Legislación mundial:	48
4.2 Legislación en América Latina (CEPAL, 2020):	49
4.3 Legislación en Ecuador:.....	50
4.4 Legislación en Venezuela:	51
CAPITULO III	53
CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES	53
1. Introducción	53
2. Métodos de análisis de los parámetros físicos	54
3. Métodos de análisis del contenido orgánico	58
4. Métodos de análisis de los contaminantes biológicos	67
5. Métodos de análisis de los gases presentes en las aguas residuales.....	68

CAPITULO IV	70
TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	70
1. Introducción	70
2. Tratamiento preliminar.....	71
2.1 Desbaste	72
2.2 Desarenado.....	76
2.3 Flotación	79
2.4 Homogenización de caudales.....	81
2.5 Ajuste de pH	83
CAPITULO V	87
TRATAMIENTO PRIMARIO APLICADO A LAS AGUAS RESIDUALES	87
1. Introducción	87
2. Tratamiento primario.....	88
2.1 Sedimentación (por gravedad o asistida).....	88
2.2 Coagulación - Floculación	96
Principios de la coagulación - floculación.....	97
Mecanismos de coagulación - floculación	97
Tipos de floculación	98
Factores que influyen en la coagulación - floculación.....	98
Usos principales del proceso de coagulación y floculación.....	98
Equipos de coagulación – floculación.....	98
CAPITULO VI.....	101
TRATAMIENTO SECUNDARIO APLICADO A LAS AGUAS RESIDUALES.....	101
1. Introducción	101
2. Tratamiento biológico o secundario aplicado a las aguas residuales.....	103
3. Clasificación de los tratamientos biológicos.....	108
3.1 Tratamientos aerobios aplicados a las aguas residuales	111
3.2 Tratamientos anaerobios aplicados a las aguas residuales	133

CAPITULO VIII	151
TRATAMIENTOS AVANZADOS APLICADOS A LAS AGUAS RESIDUALES.....	151
1. Introducción	151
2. Eliminación biológica de nitrógeno y fósforo	152
2.1 Nitrógeno	152
2.2 Fósforo	157
2.3 Adsorción sobre carbón activado	164
2.4 Isotermas de adsorción.....	166
2.5 Carbón activado	168
2.6 Filtración sobre medio granular	171
2.7 Precipitación química.....	176
CAPITULO VIII	181
TRATAMIENTO TERCIARIO O FINAL.....	181
1. Introducción	181
2. Desinfección.....	183
2.1 Dosificación de cloro	183
2.2 Equipos para la dosificación de cloro	185
3. Radiación UV	185
3.1 Equipos para radiación UV	186
4. Ozonización	187
4.1 Equipos para la ozonización	188
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	190

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	31
Colores de las aguas residuales.	31
Tabla 2.	56
Resultados de la medición de turbidez.	56
Tabla 3.	75
<i>Dimensiones de las rejillas de barreras de limpieza manual y mecánica.</i>	75
Tabla 4.	78
<i>Criterios para el diseño de un desarenador aireado.</i>	78
Tabla 5.	84
<i>Productos químicos utilizados con frecuencia en el ajuste de pH.</i>	84
Tabla 6.	89
<i>Ventajas y Desventajas de la Sedimentación.</i>	89
Tabla 7.	125
Problemáticas que se pueden presentar en las lagunas de oxidación	125
Tabla 8.	131
Variables externas del filtro percolador.....	131
Tabla 9.	136
Ventajas y desventajas de los reactores UASB.....	136
Tabla 10.	143
Resumen de los reactores de alta tasa.....	143
Tabla 11.	148
Criterios de diseño	148
Tabla 12.	148
Rendimiento esperado de las lagunas anaerobias	148
Tabla 13.	182
Técnicas de tratamientos terciarios.	182

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.....	24
<i>Componentes de las Aguas Residuales Urbanas (ARU).</i>	24
Figura 2.....	33
<i>Efectos de los olores de las aguas residuales en los humanos.</i>	33
Figura 3.....	34
<i>Solidos totales en una muestra</i>	34
Figura 4.....	36
<i>Ensayo de turbidez.</i>	36
Figura 5.....	38
<i>Proteínas</i>	38
Figura 6.	39
<i>Carbohidratos</i>	39
Figura 7.....	40
<i>Grasas y aceites</i>	40
Figura 8.	41
<i>Agentes tensoactivos</i>	41
Figura 9.	42
<i>Fenoles</i>	42
Figura 10.....	55
<i>Análisis de turbidez</i>	55
Figura 11.....	68
<i>Método del Número Más Probable.</i>	68
Figura 12.....	72
<i>Rejilla manual para la Operación de Desbaste.</i>	72
Figura 13.....	73
<i>Rejas Manuales Gruesa y Mediana.</i>	73
Figura 14.....	75
<i>Rejas Desbaste de Limpieza Automática.</i>	75
Figura 15.....	76
<i>Estanques Desarenadores en una Planta de Tratamiento.</i>	76
Figura 16.....	77
<i>Esquema del funcionamiento de un desarenador.</i>	77

Figura 17.....	80
<i>Proceso de flotación.</i>	80
Figura 18.....	80
<i>Sistemas de flotación por aire inducido</i>	80
Figura 19.....	81
<i>Tanque de homogeneización de aguas residuales</i>	81
Figura 20.....	85
<i>Equipo de ajuste de pH de un agua residual ácida.</i>	85
Figura 21.....	91
<i>Estanque Sedimentador de un sistema de Tratamiento de Aguas Residuales.</i>	91
Figura 22.....	92
<i>Proceso de Sedimentación sin Coagulantes.</i>	92
Figura 23.....	94
<i>Zonas de un sedimentador.</i>	94
Figura 24.....	99
<i>Disposición adecuada de equipos para la coagulación – floculación.</i>	99
Figura 25.....	104
<i>Bacterias removedores de materia orgánica</i>	104
Figura 26.....	105
<i>Protozoos</i>	105
Figura 27.....	106
<i>Hongos de importancia en las aguas residuales.</i>	106
Figura 28.....	107
<i>Presencia de algas en las aguas</i>	107
Figura 29.....	107
<i>Rotíferos</i>	107
Figura 30.....	108
<i>Nematodos</i>	108
Figura 31.....	109
<i>Clasificación de los tratamientos biológicos</i>	109
Figura 32.....	110
<i>Clasificación de los tratamientos biológicos de aguas residuales</i>	110
Figura 33.....	113
<i>Sistema de tratamiento de aguas residuales</i>	113

Figura 34.	114
<i>Proceso de lodos activados</i>	114
Figura 35.	117
<i>Reactor biológico por carga secuencial (SBR)</i>	117
Figura 37.....	122
<i>Lagunas aerobias</i>	122
Figura 38.	123
<i>Corte transversal de una laguna aerobia</i>	123
Figura 39.	126
<i>Biodiscos</i>	126
Figura 40.	127
<i>Funcionamiento de los biodiscos</i>	127
Figura 41.....	129
<i>Filtro percolador</i>	129
Figura 42.	131
<i>Partes de un filtro percolador</i>	131
Figura 43.	134
<i>Reactor UASB</i>	134
Figura 44.	135
<i>Partes de un reactor UASB</i>	135
Figura 45.	138
<i>Reactor Anaerobio de Lecho de Lodo Granular Expandido</i>	138
Figura 46.	139
<i>Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente</i>	139
Figura 47.	140
<i>Reactor de lecho giratorio o biodisco anaerobio</i>	140
Figura 48.	141
<i>Reactor Anaerobio de Lecho Expandido</i>	141
Figura 49.	142
<i>Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado</i>	142
Figura 50.	144
<i>Laguna anaerobia</i>	144
Figura 51.....	146
<i>Esquema de lagunaje</i>	146

Figura 52.	153
<i>Ciclo del nitrógeno.</i>	153
Figura 53.	154
<i>Transformación del nitrógeno por nitrificación y desnitrificación.</i>	154
Figura 54.	156
<i>Eliminación de nitrógeno en CBR.</i>	156
Figura 55.....	157
<i>Montaje de un Biodiscos en la EDAR de Bélgida (Valencia).</i>	157
Figura 56.	159
<i>Ciclo del Fósforo.</i>	159
Figura 57.....	160
<i>Eliminación de fósforo por precipitación química.</i>	160
Figura 58.	161
<i>Perfil de fósforo inorgánico en fase anaerobia y fase aerobia.</i>	161
Figura 59.	163
<i>Eliminación biológica del fósforo.</i>	163
Figura 60.	163
<i>Planta de eliminación biológica del fósforo.</i>	163
Figura 61.....	167
<i>Isotermas de adsorción.</i>	167
Figura 62.	170
<i>Equipos para la adsorción con carbón activo.</i>	170
Figura 63.	172
<i>Filtro con medio granular.</i>	172
Figura 64.	175
<i>Equipos para filtración en medio granular.</i>	175
Figura 65.	179
<i>Precipitación química en las aguas residuales.</i>	179
Figura 66.	180
<i>Prueba de jarras.</i>	180
Figura 67.	185
<i>Sistema automático de medición y control de la dosificación de cloro.</i>	185
Figura 68.	187
<i>Lámpara de vapor de mercurio con radiación ultravioleta (UV).</i>	187

Figura 69.	188
<i>Generador de ozono de alta capacidad.</i>	188
Figura 70.	189
<i>Aplicación de ozono en aguas residuales.</i>	189

PROLOGO

El agua constituye uno de los recursos de mayor importancia para la vida en el planeta y para la sostenibilidad de cualquier actividad relacionada con la prolongación de esta, sea agrícola, industrial o urbana; lo que significa que el desarrollo, tanto social como económico, también depende de la disponibilidad de agua.

Lamentablemente, según datos del *World Resources Institute* (WRI) alrededor de 1.000 millones de personas viven actualmente en zonas donde escasea el agua, estimándose que para el 2025 esta escasez podría afectar cerca de 3.500 millones de seres humanos, gracias a que a diario, se arrojan indiscriminadamente a importantes acuíferos cantidades de residuos sólidos o líquidos, causando la contaminación e impidiendo que estos tengan usos vitales.

Esta contaminación de las fuentes de aguas a causa de los distintos desechos, así como también por la deforestación y la explotación indiscriminada de los suelos, han causado una disminución del agua disponible en el mundo, siendo esto una muestra de la grave problemática a nivel ecológico que se presenta en la actualidad, tanto en el ambiente, como en la naturaleza misma. América Latina no escapa de esta situación, pues en los últimos 20 años se ha experimentado que este preciado líquido ha sufrido una disminución en la disponibilidad por habitante en un 22%.

La descarga de aguas residuales en los cuerpos de agua genera la contaminación de los mismos, sin embargo, dependiendo del tamaño del cuerpo de agua y de la cantidad de descarga realizada, esta puede ser en menor o mayor grado. En este sentido, si se descarga una pequeña cantidad de aguas residuales en cuerpos de agua de gran tamaño, se generan peligros menores. En ciudades donde existe una gran cantidad poblacional, es necesario realizar el tratamiento de las aguas residuales que serán vertidas, con el propósito de disminuir la carga contaminante y de esta manera se cumpla con la normativa ambiental del país.

De manera que a lo largo de este libro se estará realizando una revisión sobre los fundamentos teóricos del tratamiento de las aguas residuales, el mismo estará

dividido de la siguiente manera: en el Capítulo I se presentará un recorrido por la definición de las aguas residuales, su origen y los tipos existentes, lo que es indispensable conocer para poder diferenciarlas y poder determinar qué tipo de tratamiento se le puede aplicar antes de ser vertidas a los cuerpos de agua.

El conocimiento de las características del agua residual y su grado de contaminación es sumamente necesario, por consiguiente, en los Capítulos II y III se describen de forma breve las características de las aguas residuales, los contaminantes importantes que presentan y como se debe llevar a cabo la caracterización de las mismas, lo cual es una información fundamental a la hora de definir el tipo de tratamiento que se le puede aplicar para ocasionar el menor daño posible al ambiente.

Seguidamente, en el Capítulo IV se presentan los procesos preliminares aplicados a las aguas residuales entre los que se encuentran los procesos físicos, donde se lleva a cabo la separación de los sólidos de mayor tamaño, sólidos flotantes, sólidos suspendidos, grasas, los cuales emplean rejillas, desarenadores y la sedimentación como operaciones iniciales. Además, se abordarán las operaciones que involucran el pretratamiento de las aguas residuales, su objetivo o finalidad, así como también los equipos involucrados.

En el Capítulo V se introduce en el tema del tratamiento primario, el cual tiene como principal objetivo disminuir la demanda biológica de oxígeno por medio de la implementación de procesos fisicoquímicos, además de las operaciones físicas y/o químicas usadas más empleadas en la remoción de la fracción de sólidos sedimentables y en suspensión, orgánicos e inorgánicos que generalmente contienen una alta cantidad de materia orgánica.

Por otra parte, en el Capítulo VI se desarrolla el tratamiento secundario, también llamado “tratamiento biológico”, en el cual las bacterias utilizan la materia orgánica con reacciones bioquímicas catalizadas por enzimas, utilizando como fuente de energía los sólidos disueltos; además se presenta la clasificación de estos tratamientos de acuerdo a la manera en que las bacterias utilizan el oxígeno en: depuración aerobia y depuración anaerobia de aguas residuales. Luego, el Capítulo

VII aborda el Tratamiento Avanzado aplicado a los efluentes de los procesos secundarios de tratamientos de aguas residuales, presentando las diferentes tecnologías desarrolladas clasificadas como Tratamientos Avanzados. Finalmente, el Capítulo VII incluirá el Tratamiento Terciario aplicado a las aguas residuales.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural esencial para todas las formas de vida del planeta, siendo tan vital y necesaria para la vida en la tierra como lo es el oxígeno, pero es necesario que esta fuente de vida que es el agua cuente con las condiciones que le permitan utilizarlas como fuente de abastecimiento para los seres humanos. Esa disponibilidad tanto en cantidad como en calidad se ve impactada por diversos factores tales como: los recursos hídricos disponibles en las cuencas hidrográficas, las precipitaciones que propician además del aumento del flujo superficial la recarga de los acuíferos, las diferentes obras de infraestructura con que se cuente y que permitan su almacenamiento, para luego ser tratadas y finalmente distribuidas a través de las redes a las diferentes comunidades.

El agua se ha considerado durante mucho tiempo como un recurso natural renovable, esto proviene del hecho que se origina a partir del ciclo hidrológico, mediante las diferentes etapas de evaporación, condensación, precipitación y por último la infiltración para la producción de agua subterránea, pero este último proceso es el que ocurre de manera más lenta, llegar hasta la salida de la cuenca puede tardar años, y en general, difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular, a menos que la cuenca sea demasiado pequeña y su suelo muy permeable, además aunado a los efectos extremos del cambio climático ha llevado a empezar a considerar el agua como un recurso natural no renovable.

Por otra parte, es un hecho que en las últimas décadas se ha evidenciado el gran impacto que genera la humanidad sobre los sistemas ecológicos del mundo, éste es un tema de mucha preocupación debido a los efectos que tiene sobre los recursos hídricos disponibles, constituyendo una problemática ambiental que inquieta a la sociedad debido a la alta sensibilidad del tema desde el punto de vista social, ya que

mantiene una estrecha relación con la salud de la sociedad y la integridad del medio ambiente.

Las aguas servidas o aguas residuales, son aquellas que han sido utilizadas o afectadas por el ser humano, principalmente para fines domésticos e industriales, afectando la vida normal que existe en una corriente hídrica. Existen diversos tipos de aguas residuales de acuerdo a su origen, las aguas servidas se catalogan en domésticas o urbanas, industriales, agropecuarias, de origen incontrolado (que incluyen los vertidos ilegales y las infiltraciones) y pluviales. Las aguas cloacales domésticas provienen de la biotransformación realizada por el ser humano y de las actividades del hogar, generalmente contienen grasa, jabón, desperdicios de alimentos, entre otros y las aguas industriales provienen de actividades de producción, y transportan contaminantes como aceite y sustancias químicas.

Se considera que una masa de agua está contaminada cuando las aguas residuales que se vierten en ella generan un impacto medioambiental y sanitario con un efecto tan negativo que impide que las mismas puedan ser utilizadas para el consumo, baño, pesca, entre otros. El vertido de aguas residuales, ya sean domésticas, industriales, agrícolas o pecuaria sin tratar ocasiona la contaminación de las masas de agua que las reciben, generando una disminución de la calidad de las aguas tanto superficiales como subterráneas, por lo que es necesario que las aguas servidas sean depuradas o tratadas antes de que se descarguen en la naturaleza o antes de ser reutilizadas.

Por lo tanto, el impacto antropogénico, ecológico y sanitario de estas aguas puede llegar a ser enorme, ocasionando inconvenientes de contaminación en el medio ambiente cuando no son debidamente dispuestas, causando además enfermedades en la población aledaña. Si bien es cierto que las corrientes de agua pueden asimilar una cierta cantidad de residuos antes de que se les considere que están

contaminados, agregar una cantidad en exceso de cualquier tipo de residuo provocará daños significativos en el ecosistema. En otras palabras, se considera que una corriente está contaminada cuando ésta contiene cantidades excesivas de uno o varios agentes contaminantes. Entre estos agentes contaminantes se pueden mencionar sales inorgánicas, materia orgánica, ácidos, bases o álcalis, sólidos en suspensión, microorganismos, productos químicos tóxicos, entre otros. Cada uno de estos causan diferentes problemas, por ejemplo, las sales inorgánicas provocan un aumento en la dureza del agua, impidiendo que puedan ser utilizadas en los hogares, las industria o en las actividades agrícolas, aunado a esto originan incrustaciones en las tuberías y sistemas de distribución del agua; por su parte, los ácidos y álcalis afectan el pH del agua impidiendo que puedan utilizarse para baños recreativos y afectando la fauna acuática (Beleño et al., 2022)

Por su parte, la presencia de materia orgánica como agente contaminante consume el oxígeno disuelto en las fuentes de agua, provocando malos olores y sabor desagradable, y además ocasionando la muerte de la vida acuática por déficit de oxígeno. Los sólidos en suspensión generan malos olores ya que al precipitar en el fondo se descomponen y además disminuye el contenido de oxígeno en el agua afectando directamente la vida de los seres vivos del sistema, también aumenta la turbidez de las aguas lo que hace que se dificulte el uso adecuado de las aguas (Ferrer & Seco, 2008).

Las sustancias como aceites, grasas, sólidos o líquidos que se están flotando en la superficie de las aguas afectan además de generar un aspecto desagradable no permiten que la luminosidad atraviese el agua impidiendo el crecimiento normal de las plantas que conforman el ecosistema acuático. También pueden resultar tóxico para algunas especies, obstaculizan la reaireación natural de las aguas, otorgan sabores y olores desagradables y disminuyen la posibilidad del uso del agua para la alimentación de calderas o en sistemas de refrigeración. Existe algunas aguas servidas que le otorgan color a los cuerpos de agua en los que se vierten, como por

ejemplo aquellas que se originan en la industria textil, en tenerías, mataderos, entre otros; esta alteración en el color interfiere en el traspaso de la luz solar afectando los procesos fotosintéticos.

La presencia de compuestos minerales y orgánicos en las aguas servidas generan una acción tóxica tanto para la vida animal y la vegetación existente en las aguas receptoras como sobre los consumidores. De la misma forma, la descomposición anaeróbica de las sustancias orgánicas que están presentes en las aguas servidas no tratadas genera gases con malos olores y alteran la apariencia de los cuerpos de aguas que pueden ser usados con fines recreativos. Otro efecto es la contaminación térmica que se origina por efluentes líquidos industriales que tienen temperaturas elevadas al ser vertidos a los cuerpos hídricos receptores.

Las aguas residuales que no son tratadas adecuadamente son un tema de mucha preocupación y que enciende las alarmas de los especialistas en la materia, activistas ambientales y políticos, que coinciden en que esta contaminación afecta a mediano y largo plazo la salud de la población y los ecosistemas marinos. Independientemente del origen de las aguas residuales, ya sean de origen industrial, doméstico, provenientes de la actividad agrícola o pecuaria, la falta de tratamiento produce un gran volumen de desechos y agua contaminadas que generan efectos adversos y dañinos al medio ambiente. Generalmente, estas aguas se vierten sobre ríos, lagos, mares, suelos y subsuelos, por lo que es un tópico que preocupa y que se debe buscar solucionar para minimizar los riesgos de disponer los efluentes líquidos en los cuerpos de aguas que sirven de abastecimiento para la población. Las aguas servidas de origen urbano son aquellas que proviene de viviendas y de los desagües, presentan como sustancias contaminantes principalmente nitrógeno, fósforo, coliformes fecales, materia orgánica, entre otros (Mass & Medrano, 2013).

Se estima que al año se vierten más de 1000 millones de toneladas de aguas servidas a los ríos, lagos y océanos del mundo. Estas aguas servidas llevan metales pesados, aceites, grasas, detergentes, disolventes, ácidos, sustancias radioactivas, fertilizantes, pesticidas y otros reactivos químicos, esto ha pasado a ser un gran inconveniente a nivel mundial que urgen solventar por el bien de la humanidad y del medioambiente. Aquellos países que tienen un nivel de industrialización más avanzado o con actividades agrícolas y pecuarias intensivas son los que tienen una mayor contaminación de los recursos hídricos, y se han visto en la obligación de advertir a la población que no utilicen los ríos ni para baños recreacionales ni para lavar, pescar, u otros, como el caso de China en el cual más del 80% de sus ríos están contaminados o Estados Unidos en donde 2 de cada 5 ríos están contaminados.

En muchos países, sobre todo en los países subdesarrollados, no existen políticas de saneamiento para establecer estrategias que les permitan avanzar en este tema. Además, la carencia de plantas de tratamiento para las aguas servidas en las localidades y las diferentes industrias es otro factor clave que está provocando grandes deterioros al medio ambiente y generando preocupación en la población y en la comunidad científica en aras de encontrar soluciones a la problemática de contaminación y disposición de efluentes líquidos derivados de la actividad doméstica, comercial o industrial sin su debido tratamiento en las aguas que se usan para el suministro de la población, el cual debe ser considerado como un factor prioritario y debe ser suministrada tanto en cantidad suficiente como en calidad para evitar la proliferación de enfermedades y la alteración del medioambiente.

De acuerdo a los estudios consultados, las fuentes de agua no han sido capaz de absorber por sí solas la gran cantidad de agentes contaminantes, lo que ha traído como consecuencia que los ríos, lagos y mares hayan sufrido una degeneración de sus condiciones naturales, tanto en apariencia física como en su capacidad de neutralizar la carga contaminante y mantener con vida a las especies acuáticas, generando un desequilibrio ecológico y quedándose sin las propiedades mínimas

necesarias para que sean aprovechadas de forma racional como fuentes de suministro de agua, de energía o como vías de transporte.

Las aguas cloacales vertidas en una corriente de agua superficial sin haber sido sometidas previamente a algún tratamiento, provocan problemas de contaminación graves que perturban tanto la flora como la fauna. Es por esto que, las aguas servidas, previamente a ser descargadas en los cuerpos hídricos receptores, deben ser tratadas adecuadamente, pasando por procesos que sean capaces de modificar sus características físicas, químicas y microbiológicas, de forma tal que se impida que su vertido origine los inconvenientes señalados anteriormente. El tipo y la cantidad de tratamientos necesarios debe estar indicado para cada caso particular de aguas servidas, debiendo dar respuesta a los atributos de los cuerpos de agua que reciben el vertido.

El objetivo de las plantas de tratamiento de aguas servidas es convertir las aguas provenientes de las cloacas en un efluente de calidad aceptable al finalizar el proceso, cumpliendo con las especificaciones y la normativa que regula la disposición final de las aguas servidas de forma tal que se evite descartar las aguas y éstas sean preservadas para un uso posterior. Generalmente, cuando las aguas residuales son recientes, no exhiben malos olores a temperaturas menores a 25 °C pero luego de aproximadamente dos horas comienza a enturbiarse y a cambiar a color marrón, y pasadas las 6 horas comienza a liberar gases que tienen olores desagradables, se acidifican y se oscurecen aún más. Por otro lado, es importante destacar que las aguas residuales que no sean tratadas adecuadamente presentan microorganismos patógenos y virus, que provienen principalmente de los intestinos, los cuales pueden producir enfermedades como fiebre, diarrea, vómitos, enterocolitis, cólera, amebiasis, poliomielitis, hepatitis, entre otras.

Las aguas residuales también representan una amenaza para la capacidad que tienen algunas especies de pastos marinos de almacenar CO₂, además de poner en

riesgo a las especies que los utilizan como hábitat y su función como criaderos de peces. Adicionalmente, de acuerdo a los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades de los Estados Unidos, las personas que están en contacto con aguas residuales tienen una probabilidad más alta de contraer enfermedades como la poliomielitis, fiebre tifoidea, hepatitis A y hepatitis B.

Los científicos y profesionales del área tienen todavía pendiente la búsqueda de soluciones que permitan reducir los impactos del nitrógeno y los patógenos en los ecosistemas costeros y superar los inconvenientes relacionados con el saneamiento de la vivienda, del hábitat urbano y rural y de las cuencas fluviales; así como también proponer mejoras en la recaudación y colocación final de los residuos sólidos, desagües y proporcionar tratamiento apropiado a las aguas servidas para que se puedan eliminar microorganismos patógenos transmitidos por los humanos y disponer de instalaciones industriales, domésticas, sistemas de cloacas urbanas con el montaje obligatorio de plantas de tratamiento que adecúen las aguas residuales de forma tal de que puedan ser reutilizadas, esto ayudará a priorizar los esfuerzos de conservación.

Por lo anteriormente mencionado surge la necesidad de proponer un tren de tratamiento para cada agua residual generada, que va a depender de las características de la misma y el uso posterior que se le dará. Este libro es una recopilación de los fundamentos teóricos en el tratamiento de las aguas residuales generadas por la actividad humana, donde se presentarán de forma detallada cada uno de los tratamientos existentes y para que contaminante específico se puede aplicar.

CAPITULO I

DEFINICIÓN, ORIGEN Y TIPOS DE AGUAS RESIDUALES

1. Introducción

Los diferentes tipos de aguas residuales que son generadas tanto en las comunidades como a nivel industrial suelen poseer componentes específicos que las diferencian, y su conocimiento resulta muy importante a la hora de seleccionar el tratamiento más adecuado de la misma. Saber diferenciar el tipo de agua, así como conocer sus componentes garantizará que la implementación de un tratamiento sea eficiente, y además se logre un mejor aprovechamiento de los recursos disponibles.

El vertido de estas aguas residuales a receptores acuíferos sin realizar un tratamiento previo puede ocasionar graves daños ambientales. De allí que, se están uniendo esfuerzos para encontrar alternativas eficientes para contrarrestar las consecuencias que esta contaminación de las aguas está ocasionando en el ambiente y la vida; entre las que se puede mencionar el tratamiento de las mismas antes de su disposición final al ambiente.

Por lo tanto, un diseño para el tratamiento de las aguas residuales formulado, planificado y diseñado de acuerdo a las características propias de la misma, considerando a la vez, los recursos económicos y técnicos disponibles, es una de las primeras e importantes alternativas que se deben aplicar antes de verter los efluentes a los cuerpos de agua, y que hasta ahora pueden disminuir notablemente esta afectación al ambiente. Protegiendo de esta manera, la salud pública y el medio ambiente, y permitiendo también la reutilización del agua tratada.

De esta manera, también se cumple con las regulaciones establecidas en las diferentes Leyes y Normas de protección al ambiente y dando al tratamiento de las aguas vertidas un lugar importante en la carrera de proteger y recuperar el medio ambiente. A lo largo del desarrollo de este capítulo se dará a conocer todo lo relacionado con la definición de las aguas que son consideradas como residuales, los tipos que existen dependiendo de la fuente donde es producida y las que son

generadas en los procesos industriales, tomando en cuenta el tipo de industria y los procesos que en ella se desarrollan.

2. Definición de aguas residuales

Como punto de partida resulta importante definir lo que son las aguas residuales, que no son más que las aguas producto de cualquier actividad del hombre que afecte la calidad de las mismas, generalmente su origen puede ser doméstico o industrial, por lo que es común tener aguas que contengan en su composición elementos que se hayan originado en desechos urbanos o industriales.

Según Metcalf & Eddy (1995), un agua residual es definida como el agua que es desechada por las personas, luego que ha sido contaminada a causa de los diferentes usos que se les ha dado. También se define como aquella mezcla de residuos líquidos o aquellas aguas que contienen a los mismos, que pueden proceder de establecimientos públicos, privados, instituciones y comercios y que pueden combinarse posteriormente con aguas subterráneas, fluviales o superficiales. Otra definición es que las aguas residuales son el producto de la mezcla del recogido total de todas las aguas que llegan al sistema colector. Estas aguas también son consideradas como aquellas que han sido utilizadas y que han llegado a las cloacas por algún medio y que son conducidas por la red del alcantarillado. (Nebel & Wright, 1999).

3. Tipos de aguas residuales

Existen 3 tipos de aguas residuales (Crites & Tchonaboglous, 2000):

- Aguas residuales domésticas: son aquellas aguas producto del uso en viviendas, edificios, residencias, edificios comerciales o institucionales que se han generado por las actividades del hombre en el ámbito doméstico. Estas suelen originarse en la cocina y pueden estar constituida por la mezcla de agua, grasas, aceites y

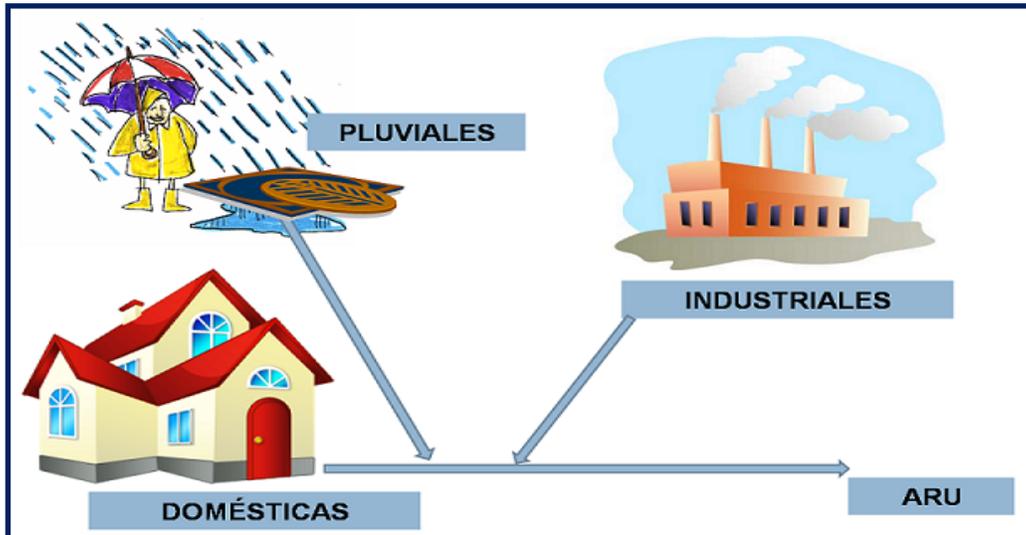
jabón; también se incluye el agua procedente de los baños que están constituidas por la mezcla de jabón, agua, orina y heces.

Es común escuchar términos como aguas negras que son generalmente aquellas que provienen de los inodoros que pueden traer consigo excretas humanas, orina y que son ricas en nitrógeno y coliformes fecales. Otro término común es aguas grises, que no es más que las aguas residuales que provienen de las duchas, lavadoras, lavamanos que aportan demanda química de oxígeno (DQO), grasas y sólidos suspendidos, y que pueden ser las aguas domésticas sin la proveniente de los baños.

- Aguas residuales industriales: constituyen todas aquellas aguas que son el producto de un proceso productivo en específico. Estas aguas industriales están compuestas por las aguas residuales procedentes de las industrias que hace referencia a aquellos vertidos líquidos procedentes de un proceso productivo o centro de producción y las generadas en la agricultura y la ganadería, que son aquellas que se producen por la explotación agrícola y ganadera que incluye contaminantes orgánicos y microorganismos.
- Aguas residuales urbanas: se refiere a aquellas aguas residuales tanto domésticas como industriales, también a aquellas aguas que incluyen las aguas de corriente pluvial. (Figura 1).

Figura 1.

Componentes de las Aguas Residuales Urbanas (ARU).



Fuente: Elaboración propia, (2023).

4. Aguas residuales generadas según el tipo de industria

De acuerdo a lo establecido por Díaz et. al (2020), las aguas generadas de los diferentes procesos industriales en la obtención de productos que son comerciales son consideradas aguas residuales industriales, las cuales son un subproducto o residuo que se obtiene en cada una de las fases del proceso de fabricación de los mismos, y que deben ser tratadas antes de ser vertidas a los cuerpos de agua.

Existe una gran cantidad de procesos industriales que contribuyen a la fabricación de productos para facilitar la vida del ser humano, bien sean en el procesamiento de alimentos, bebidas, textiles, calzado, curtiembre, minería, gas, entre muchos otros, los cuales generan elevadas cantidades de aguas residuales, por lo que se procede a describir algunas de estas industrias:

- Industrias de procesamiento de alimentos: dentro de esta se encuentran las actividades derivadas de la agricultura y la elaboración de productos alimenticios, las cuales se caracterizan por la prevalencia de material orgánico y el uso de productos químicos desde la obtención de la materia prima hasta la

elaboración del producto terminado. Las aguas residuales en este tipo de industria por lo general presentan altas concentraciones de material orgánico, insecticidas, pesticidas, residuos de animales, fertilizantes, entre otros.

- Mataderos: en esta se incluyen las provenientes de los mataderos y de las factorías de procesos cárnicos y sus derivados. Las aguas residuales producidas en esta industria provienen del lavado del suelo donde se realiza el sacrificio y descuartizado de los animales, que por contener grandes cantidades de sangre son de color pardo rojizo, con una alta DBO y DQO, además de elevadas cantidades de sólidos suspendidos, rica en nitrógeno, hierro y fósforo, que amerita un tratamiento biológico por medio de lodos activados o a través de procesos anaerobios.

- Industria láctea: en este tipo de industria se incluyen todos los procesos relacionados con la utilización de la leche en la elaboración de otros productos como el queso, la mantequilla, la leche en polvo y la leche condensada, y las aguas residuales que se obtienen en esta industria por lo general provienen del lavado de los equipos y utensilios requeridos en los procesos, tienden a ser ácidas en el proceso de fabricación del queso por la presencia del suero, con una elevada cantidad de sólidos suspendidos, mientras que en el resto de los procesos las aguas de residuo tienden a ser neutras o ligeramente alcalinas con alto contenido de materia orgánica.

- Industria papelera: en esta industria las aguas residuales que se generan provienen de los procesos de obtención de la pasta y de la producción del papel a partir de esta pasta, en los cuales a su vez se llevan a cabo diferentes procesos que ameritan la utilización de grandes cantidades de agua dependiendo del método que se utilice en la elaboración de la pasta (proceso de sosa, proceso del sulfato y el proceso del sulfito), generándose vertidos que van a contener hidróxido de sodio y pequeñas cantidades de sulfuro de sodio, sulfato de sodio

y carbonato de sodio, sulfito de sodio, sólidos disueltos, sólidos suspendidos y alta DBO.

- Industria de elaboración de productos químicos: en la elaboración de productos químicos las aguas residuales que se producen tienden a ser muy contaminantes debido a las altas concentraciones y a los daños a nivel ambiental que estos producen, por lo general estas contienen amoníaco, sulfuros, cromo, fenoles, grasas, aceites, sólidos en suspensión, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido nítrico, entre otros por lo que existe estrictas normas medioambientales a la hora de verter estas aguas a los cuerpos de agua, ya que estas aguas deben ser neutralizadas antes de ser vertidas por los drenajes o a los cuerpos de agua.
- Industria de explosivos: en estas industrias las aguas de residuo por lo general son fuertemente ácidas y básicas, además de ser muy coloreadas y con altos contenidos de sulfatos, metales y nitrógeno bajo la forma de amoníaco, nitratos y nitritos, cobre, zinc, flúor, pentóxido de fósforo, fósforo elemental, sílice, sólidos en suspensión, aceites y detergentes, requiriendo tratamientos como la ósmosis inversa, la microfiltración, flotación y precipitación química entre otros para depurar estas aguas.
- Minería: las aguas de residuo que se generan en esta industria se conocen también como relaves, el cual es un residuo en forma de lodo, provenientes de los procesos de extracción, lavado de los equipos y de la refinación, su composición va a depender si la mina es subterránea o a cielo abierto y del proceso de refinación que se utilice, y por lo general son aguas ácidas que contienen sulfatos, carbonatos, metales disueltos (hierro, aluminio, magnesio, sodio, manganeso, calcio, entre otros, cloruro de sodio, sólidos suspendidos y elementos radiactivos altamente contaminantes.

- Producción de hierro y acero: las aguas residuales que se obtienen en estos procesos por lo general están contaminadas con amoníaco, cianuro, benceno, antraceno, naftalina, fenoles, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, aceite soluble, entre otros, los cuales son productos químicos muy contaminantes.

- Industrias de acabados metálicos: las operaciones desarrolladas en el acabado de piezas metálicas por lo general dan como resultados lodos que contienen metales disueltos e hidróxidos metálicos como el hidróxido de zinc.

- Industria textil: en esta industria existen diferentes procesos dependiendo de la materia prima que se utilice como lo son el algodón, la lana y las fibras químicas, en los cuales se obtienen aguas de residuo con diferentes componentes, entre los que se encuentran detergentes, carbonato de sodio, grasas, colorantes (ácido acetato sódico), dicromato sódico, ácido sulfúrico, sulfato sódico, hidróxidos, carbonatos, sulfato amónico, monoclorobenceno, batanado, hipoclorito de sodio, entre otros, aportando a estas aguas una elevada DBO, una alta alcalinidad y contenido de sólidos elevado.

- Industria de curtido: en esta industria se llevan a cabo las etapas de adobado, curtido y operaciones húmedas que dan origen a diferentes vertidos con aguas altamente contaminadas, específicamente en el curtido y en las operaciones húmedas, que contienen sales de amonio, carbonato sódico, ácido sulfúrico, cloruro de sodio y cromo, requiriendo por lo general de procesos de coagulación química y de la digestión de lodos.

- Industria del petróleo: en esta industria se generan aguas residuales muy contaminantes provenientes de los procesos de explotación y producción de hidrocarburos, que por lo general contienen crudo libre y emulsionado, mercaptanos, hidrocarburos, sólidos suspendidos, sales, gases, entre otros

compuestos, que le confieren altos valores de DQO, por lo que amerita de tratamientos físicos, químicos y biológicos.

Lo descrito anteriormente, es decir, la definición, origen y tipos existentes, es indispensable para diferenciar las aguas residuales y así poder determinar qué tipo de tratamiento se le puede aplicar antes de ser vertidas a los cuerpos de agua. De igual manera, el conocer el origen del agua residual proporciona una idea clara de los posibles componentes de la misma, lo que permite también visualizar en primera instancia los equipos y reactivos necesarios al momento de ser tratada.

CAPITULO II

CARACTERISTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

1. Introducción

Las aguas residuales son aquellas cargadas de impurezas y provenientes de diferentes vertidos cuyo origen puede ser doméstico, urbano o industrial. Estas aguas residuales pueden contener elementos contaminantes y se caracterizan por sus componentes físicos, químicos y biológicos. Dentro de los componentes físicos más importantes están el color, olor, los sólidos y la temperatura. Con respecto a los componentes químicos presentes en las aguas residuales, estos pueden ser orgánicos o inorgánicos, siendo los orgánicos más comunes: carbohidratos, grasas animales, aceites, pesticidas, fenoles, proteínas, compuestos orgánicos volátiles y otros. Entre los compuestos inorgánicos están los cloruros, metales pesados, nitrógeno, pH, fósforo, azufre y gases como sulfuro de hidrógeno, metano y oxígeno y finalmente dentro de los componentes biológicos más habituales de las aguas residuales están los animales y las plantas (Ecomar Fundación, 2020).

El deterioro de la calidad de estas aguas se debe principalmente a variaciones importantes de la demanda química de oxígeno, los sólidos suspendidos totales, el nitrógeno y fósforo total, la presencia de metales pesados, entre otros elementos. En el caso del fósforo o del nitrógeno, la variación de sus concentraciones, representan fuentes de contaminación que provienen generalmente de los sistemas sépticos, de los desechos animales, de fertilizantes comerciales y de materia orgánica en descomposición, por lo que conocer la composición de las aguas residuales, es de vital importancia para elegir el adecuado método de análisis y de tratamiento, con el fin de mejorar la calidad de la misma (Sica, 2021).

Debido a la importancia de conocer las características de las aguas residuales, este capítulo se dedica enteramente a describir las principales características físicas de estas como lo es el color, olor, sólidos, temperatura y turbidez, sus características químicas debido a la presencia de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos,

como los ya mencionados y también se describen los principales constituyentes biológicos de las aguas residuales como son los microorganismos (bacterias, hongos, protozoos), plantas, animales, virus y demás organismos patógenos con sus indicadores, todo esto con el fin de comprender la composición de las aguas residuales y poder seleccionar el método de tratamiento más adecuado los cuales se describirán en capítulos posteriores.

2. Características físicas de las aguas residuales

Las aguas residuales se caracterizan por la presencia de sólidos, los cuales pueden estar suspendidos, disueltos o sedimentados, además, estas aguas se caracterizan también por su olor, color, temperatura y turbidez, parámetros que se describen a continuación:

a) **Color:** el color resulta una característica física de gran importancia, muchas aguas superficiales procedentes de pantanos frecuentemente presentan altos grados de color, por lo que no son aceptadas para ser usadas en los hogares ni en las industrias sin haber sido tratadas previamente. El color de estas aguas es resultado de su contacto con materiales como hojas, coníferas y madera en descomposición, siendo la principal fuente de color los taninos, los humatos y el ácido húmico que provienen de la descomposición de la lignina. También se encuentra presente el hierro en forma de humato férrico, el cual produce una coloración intensa. El color natural existe debido a las partículas coloidales con carga negativa, cuya remoción se puede llevar a cabo rápidamente por coagulación mediante una sal, la cual debe contener un ion que sea metálico y que sea trivalente como el aluminio o el hierro. En las aguas residuales el color es ocasionado por los sólidos en suspensión, partículas coloidales y sustancias que se encuentran en solución. Esta coloración aparente es causada por los sólidos en suspensión, mientras que el color verdadero o real es ocasionado por las sustancias disueltas y coloidales. En los análisis de agua es importante diferenciar entre color real y aparente. La coloración del agua de residuo aumenta su intensidad generalmente con el aumento del pH y por eso se aconseja medir el pH junto con el color (Crites & Tchonaboglous, 2000).

Para las aguas potables es necesario que sean estéticamente aceptables, y que no vayan a ser rechazadas por los consumidores, por lo que es recomendable que las aguas destinadas para consumo humano no excedan las 15 unidades, que es el nivel contaminante máximo recomendado. Cuantitativamente hablando, el color es utilizado para realizar una estimación de la condición de un agua residual específica. Si el agua presenta un color café claro es indicativo que esta lleva alrededor de 6 horas desde su descarga. Cuando presenta una coloración gris clara indica que aquellas aguas han experimentado un grado de descomposición o han permanecido un tiempo corto en el sistema de recolección. Cuando la coloración es gris oscuro o negro se trata de aguas sépticas que han experimentado una descomposición microbológica en condiciones anaeróbicas, cuyo oscurecimiento se da frecuentemente debido a que se forma sulfuro ferroso (Crites & Tchonaboglous, 2000).

En la Tabla 1 se presenta la descripción antes citada de los colores que presentan las aguas residuales y algunas características de su origen.

Tabla 1.
Colores de las aguas residuales.

Color	Descripción
Café claro	Color del agua después de 6 horas de la descarga.
Gris claro	Color del agua cuando ha sufrido alguna descomposición o que ha transcurrido poco tiempo de su recolección.
Gris oscuro o negro	Color de las aguas sépticas que han experimentado una fuerte descomposición bacteriana en condiciones anaeróbicas.

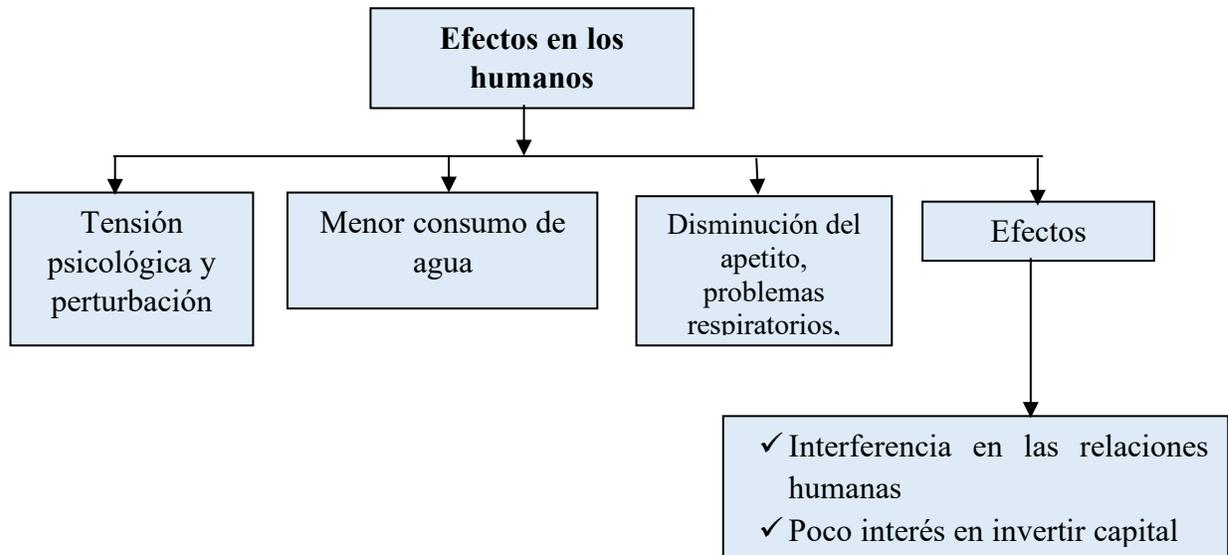
Fuente: Crites & Tchonaboglous (2000).

b) Olor: en las aguas residuales el olor se debe a la liberación de algunos gases cuando ocurre el proceso de descomposición del material orgánico. El olor característico de las aguas residuales resulta ser muy peculiar y desagradable, pero es más tolerable que el de las aguas sépticas. Las aguas sépticas presentan un olor característico que se debe al sulfuro de hidrógeno presente en ellas (olor a huevo podrido), el cual se origina por la reducción de los sulfatos a sulfitos debido a la acción de los microorganismos anaeróbicos (Metcalf & Eddy, 1995). El agua residual fresca posee un olor característico que por lo general es inofensivo, pero al producirse la degradación biológica de estas aguas bajo condiciones de anaerobiosis se libera una gran variedad de compuestos malolientes. Estos olores pueden medirse por medio de la utilización de métodos sensoriales que implican el empleo del sentido del olfato de los humanos para obtener información relevante en niveles muy bajos de detección e instrumentales cuando se lleva a cabo el uso de ciertos equipos (Crites & Tchonaboglous, 2000).

La problemática de los olores ha sido considerada una de las principales causas de rechazo cuando se desea implantar una planta de tratamiento de aguas residuales, por esto se ha tenido en consideración este aspecto en los proyectos relacionados con el diseño y la construcción de dichas plantas. Los olores pueden tener ciertos efectos, aun a bajas concentraciones, estos causan problemas de índole psicológica en el desarrollo normal de la vida humana más que por los daños que puedan causar al organismo. La generación de estos olores resulta molesta y pueden causar una reducción en el apetito, menor consumo de agua, náuseas, vómitos, desequilibrios respiratorios, y perturbaciones mentales. Cuando los olores son más fuertes, pueden crear problemas muchos mayores, como deterioro en la dignidad personal y de la comunidad, interfiere en las relaciones humanas, desaminar la inversión de capital, descenso del nivel socioeconómico y reducir el crecimiento (Metcalf & Eddy, 1995). Cabe destacar la importancia que tienen los olores en la gestión de las aguas residuales, tomando en cuenta los efectos que producen en los seres humanos, como se muestra en el siguiente esquema de la Figura 2:

Figura 2.

Efectos de los olores de las aguas residuales en los humanos.

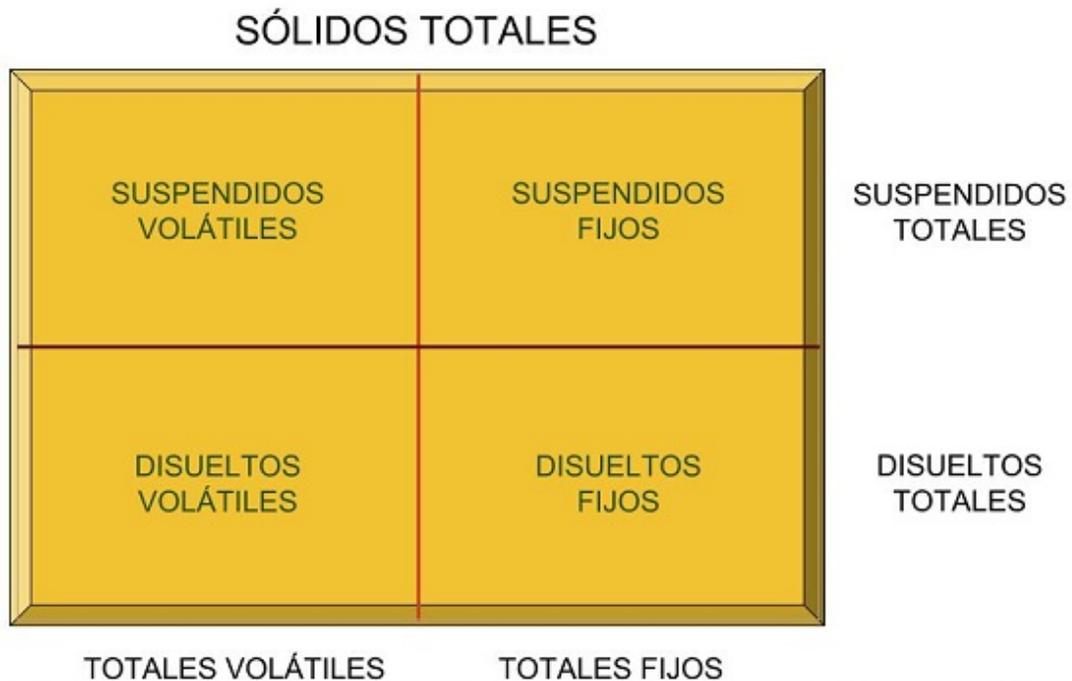


Fuente: Metcalf & Eddy (1995).

b) **Sólidos Totales:** en las aguas residuales se pueden encontrar tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y disueltos. Los sólidos suspendidos se refieren a la cantidad de materia sólida presente en el agua y está muy relacionada con la medición de la turbidez. Los sólidos coloidales son aquellos que no sedimentan, sino después de largo tiempo, están referidos al limo fino, las bacterias, las partículas causantes de color, los virus, entre otros, y afectan el color y la turbiedad de aguas sedimentadas sin coagulación. Los sólidos disueltos, referidos a materia orgánica e inorgánica, no son visibles separadamente, no sedimentan y ocasionan problemas de olor, de sabor, de color y en la salud, por lo que deben ser precipitados y removidos mediante métodos físicos y/o químicos. (Ver Figura 3).

Figura 3.

Sólidos totales en una muestra



Fuente: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/>

d) Sólidos Suspendidos (SS): en las aguas se pueden encontrar tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y disueltos. Los sólidos suspendidos se refieren a la cantidad de materia sólida presente en el agua y está muy relacionada a la medición de la turbidez. También se le denomina Materia en Suspensión (MES); para determinarla se somete a filtración y/o evaporación un volumen de agua, y al final se pesan los sólidos restantes. Este valor es expresado en mg/L. Los menores de 0,01 mm no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables, y los mayores de 0,01 mm son sedimentables.

Los sólidos coloidales son aquellos que no sedimentan sino después de largo tiempo, están referidos al limo fino, las bacterias, las partículas causantes de color, los virus, entre otros, y afectan el color y la turbiedad de aguas sedimentadas sin coagulación. Los sólidos disueltos, referidos a materia orgánica e inorgánica, no son visibles separadamente, no sedimentan y ocasionan problemas de olor, de sabor, de color y en la salud, por lo que deben ser precipitados y removidos mediante métodos físicos y/o químicos.

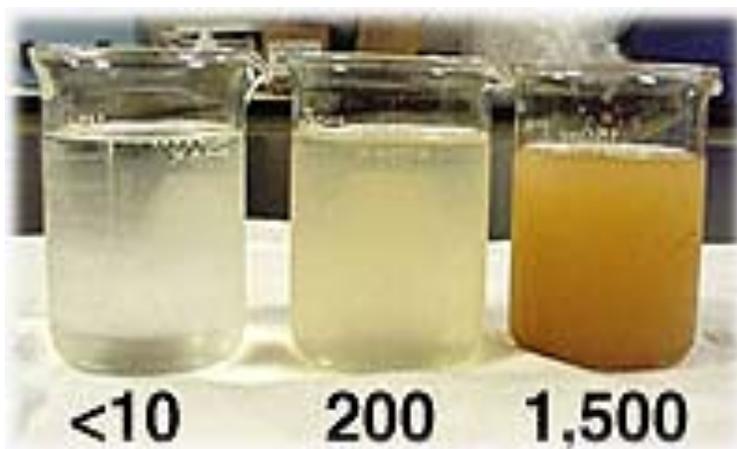
e) Temperatura: esta característica es de mucha importancia debido a que la misma afecta las reacciones químicas, las velocidades de reacción, la vida acuática y la solubilidad del oxígeno. En líneas generales, la temperatura de las aguas residuales es mayor que la del agua potable porque su calor específico es mayor. Además, en aguas residuales, la temperatura se incrementa cuando se vierten grandes cantidades de agua caliente a los receptores. Este aumento de temperatura propicia una disminución del oxígeno presente, trayendo como resultado un alto porcentaje de mortalidad en la vida acuática (Muñoz, 2008).

f) Turbidez: en términos generales, la turbiedad o turbidez, es una característica visual u óptica de un agua residual que permite describir la opacidad o claridad de esta. No está directamente relacionada con el color, sino con la disminución en la transparencia, originada por la presencia de material coloidal y partículas en suspensión. Esta característica repercute significativamente en los ecosistemas acuáticos, ya que afecta el proceso de fotosíntesis al dispersar la luz solar y el proceso de respiración, pues causa una disminución en la concentración del oxígeno. De igual manera, las partículas suspendidas afectan la reproducción de los peces y favorecen la adhesión de compuestos tóxicos y metales pesados. Así que, la turbiedad es catalogada como un índice inverso de calidad del agua, pues mientras más alta sea la turbidez, menor es la calidad del agua residual. Por lo cual, no es deseable que un agua residual que será incorporada a una fuente de agua natural, tenga altos valores de turbiedad. La turbidez se mide por la comparación entre la intensidad de luz dispersa por una muestra determinada y la luz dispersa por una suspensión que es usada como referencia ambas en las mismas condiciones y los

resultados obtenidos son en unidades nefelométricas de turbidez (NTU o UNT), tal como se observa en la Figuras 4.

Figura 4.

Ensayo de turbidez.



Fuente: <https://www.google.com/imgres?imgurl>

3. Características químicas de las aguas residuales

A continuación, se describen los constituyentes químicos que pueden contener las aguas residuales, los cuales pueden ser de origen tanto orgánico como inorgánico.

3.1 Constituyentes químicos orgánicos

El material orgánico presente en las aguas residuales está constituido básicamente por proteínas en un 40 a 60%, grasas y aceites en un 8 a 12% y por carbohidratos en un 25 a 50%. Otro de los componentes de estas aguas de residuo cuando están frescas es la urea, siendo el constituyente que se encuentra en mayor cantidad en la orina, y que debido a su descomposición tan rápida no suele encontrarse en otro tipo de agua. Por otra parte, además de proteínas, carbohidratos, grasas y aceites, este

tipo de aguas contienen cantidades pequeñas de un número grande de moléculas orgánicas que son sintéticas, cuyas estructuras van desde muy simples hasta las que son muy complejas (Crites & Tchobanoglous, 2000).

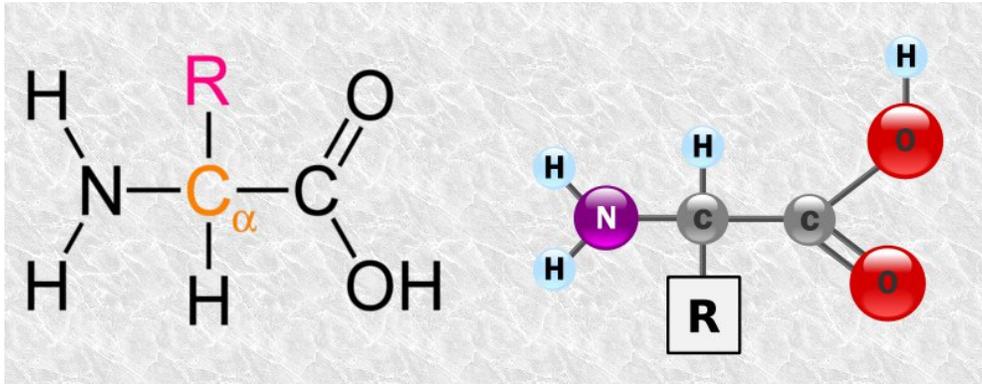
Entre este tipo de moléculas sintéticas se encuentran los pesticidas, fenoles y los agentes tensoactivos, usados en las actividades agrícolas, los cuales experimentan un aumento con el incremento en la síntesis de las moléculas orgánicas. El tratamiento de las aguas residuales se complica con la presencia de este tipo de sustancias debido a que gran parte de ellas no se descomponen biológicamente o su descomposición es muy lenta. Esta situación justifica el aumento en el interés por aplicar la precipitación química y la posterior adsorción con carbón activado para el completo tratamiento de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 1995).

Según Metcalf & Eddy (1995), la materia orgánica que se encuentra presente en las aguas residuales puede estar constituida por:

a) Proteínas: son el principal componente del organismo animal, encontrándose en menor cantidad en las plantas. Los alimentos crudos provenientes de los vegetales y de los animales también contienen proteínas, variando las cantidades presentes desde porcentajes bajos en las frutas que contienen mucha agua como los tomates y en los tejidos que contienen grasas de la carne, hasta altos porcentajes en carnes magras o alubias. Tienen una estructura química que es inestable y compleja, por lo que puede experimentar diversas formas de descomponerse. Algunas de estas son solubles en agua. La formación de estas estructuras químicas se produce por la combinación o la formación de cadenas de una gran cantidad de aminoácidos. En su composición, todas las proteínas poseen carbono, elemento que es común en todas las sustancias de naturaleza orgánica, así como el hidrógeno y el oxígeno. Por otra parte, como característica distintiva, las proteínas contienen una constante y elevada proporción de nitrógeno, la cual se encuentra alrededor del 16%. En la mayoría de los casos, en las aguas residuales representan la principal fuente de nitrógeno y su presencia en grandes cantidades hace posible la producción de olores excesivamente desagradables originados por su descomposición (Figura 5).

Figura 5.

Proteínas

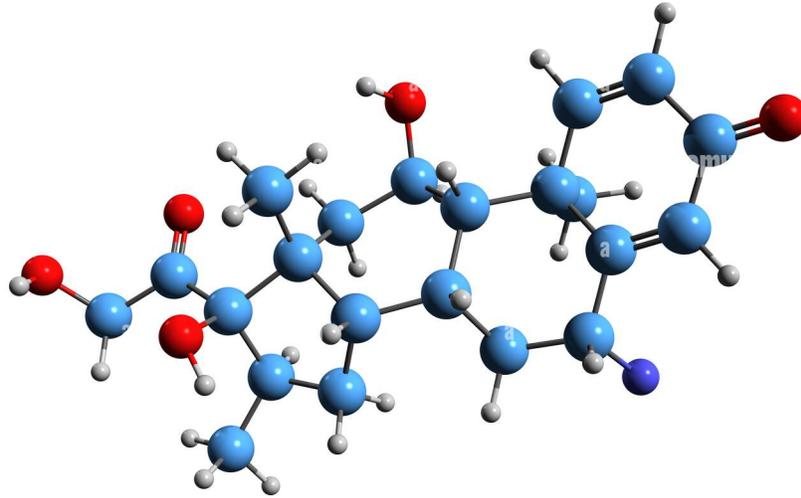


Fuente: <http://www.bionova.org.es/biocast/tema08.htm>

b) Carbohidratos: se encuentran distribuidos de forma amplia en la naturaleza, estos incluyen a los azúcares, la celulosa, los almidones y la fibra de madera, los cuales se encuentran presentes en las aguas residuales. Entre sus componentes se encuentran el carbono, el hidrógeno y el oxígeno. Los carbohidratos contienen seis o un múltiplo de seis átomos de carbono en cada una de sus moléculas, además de hidrógeno y oxígeno en las mismas proporciones en que se encuentran en la molécula de agua. Algunos carbohidratos suelen ser solubles en el agua, como es el caso de los azúcares y hay otros que suelen ser insolubles, como es el caso de los almidones. Los azúcares pueden descomponerse por acción de las enzimas presentes en ciertas bacterias y de los fermentos, ocasionando la fermentación que da como resultado la generación de dióxido de carbono y alcohol. Los almidones suelen ser más estables, sin embargo, ante la acción microbiana y los ácidos minerales diluidos se transforman en azúcares. La celulosa es uno de los carbohidratos considerado más importante en las aguas residuales por ser más resistente a la descomposición y por ocupar un mayor volumen, su destrucción se produce de forma progresiva en el suelo sin dificultad, debido a la actividad de diversos hongos existentes en el mismo, sobre todo cuando hay prevalencia de condiciones con pH ácido (Figura 6).

Figura 6.

Carbohidratos



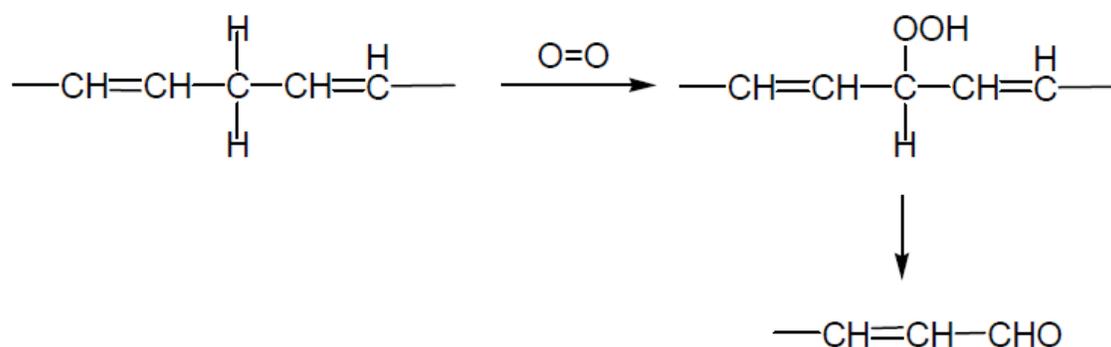
Fuente: <https://www.alamy.es/imagenes/qu%C3%ADmica-de-carbohidratos.html>

c) Grasas y aceites: cuantitativamente constituyen el tercer componente presente en los alimentos. Cuando se habla de grasa, se hace referencia a los aceites, las grasas animales, las ceras y a otros constituyentes presentes en el agua residual. Para determinar su contenido en este tipo de aguas, se realiza un ensayo donde se lleva a cabo su extracción de la muestra por medio de hexano, ya que la grasa es soluble en este compuesto. Entre otras sustancias que son solubles en hexano se encuentran los aceites minerales, como los aceites lubricantes, queroseno y aceites de materiales bituminosos, que son usados para la construcción de vías o carreteras. La combinación del alcohol o el glicerol con los ácidos grasos da origen a las grasas animales y aceites. Estos compuestos en estado líquido a temperatura ambiente son ésteres de ácidos grasos conocidos como aceites y los que están en estado sólido a temperatura ambiente se conocen como grasas, los cuales son muy semejantes químicamente, estando compuestos por diferentes proporciones de carbono, oxígeno e hidrógeno. Su presencia en las aguas residuales se origina por los productos de consumo humano tales como la margarina, la mantequilla, la manteca

de cerdo, aceites vegetales y grasas. Las grasas son compuestos orgánicos muy estables que no son fácilmente descompuestos por las bacterias. Sin embargo, los ácidos minerales sí son fácilmente atacados por las bacterias descomponiéndolos y originando ácido graso y glicerina. En el agua residual el contenido de grasa puede ocasionar serios problemas tanto en los desagües como en las plantas destinadas para su tratamiento, ya que de no ser eliminadas pueden interferir en los ecosistemas acuáticos, creando películas y materiales en flotación que pueden ser imperceptibles (Figura 7).

Figura 7

Grasas y aceites

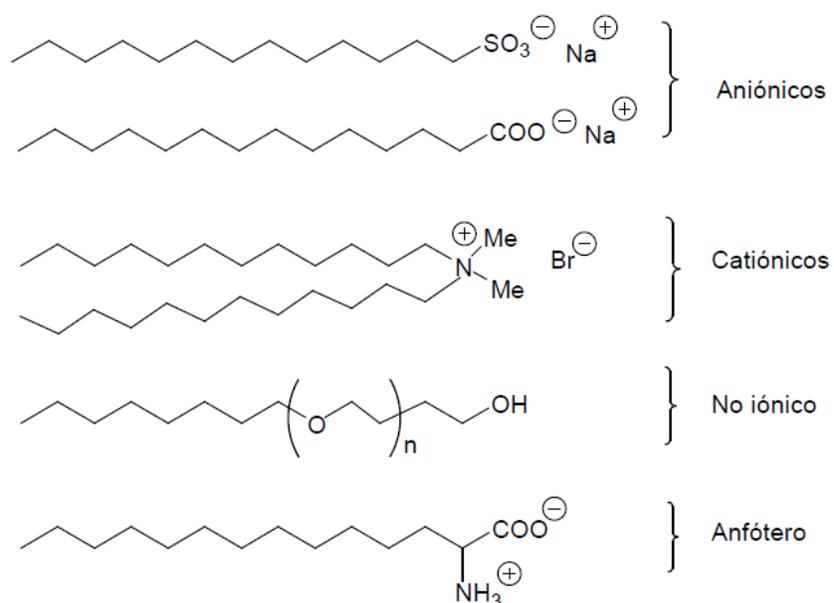


Fuente: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-02.php>

d) Agentes tensoactivos: son grandes moléculas de naturaleza orgánica, poco solubles en el agua, causantes de la formación de espumas en los procesos de tratamiento de las aguas residuales, así como también en los diferentes efluentes residuales. Estos agentes suelen acumularse en lo que se conoce como la interfase aire – agua, los cuales se acumulan en la superficie de las burbujas de aire durante la aireación del agua residual, originando una espuma que es muy estable. Su determinación se realiza con la medición del cambio de color en una solución de azul de metileno previamente normalizada (Figura 8).

Figura 8.

Agentes tensoactivos

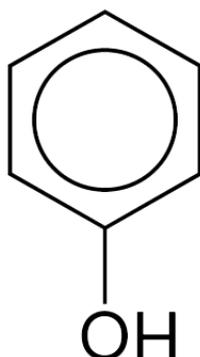


Fuente: <https://www.eii.uva.es/organica/qoi/tema-10.php>

e) Fenoles: estos también son constituyentes importantes del agua de residuo junto a otros compuestos orgánicos de los que se encuentran solo vestigios. Su importancia radica en que los fenoles causan problemas en el sabor del agua, sobre todo cuando esta ha sido clorada. Son producidos principalmente en las operaciones a nivel industrial, por lo que se encuentran en las aguas de desechos industriales. Estos pueden ser oxidados por los microorganismos en concentraciones máximas de 500 mg/L (Figura 9).

Figura 9.

Fenoles



Fuente: <https://www.caracteristicass.de/fenoles/>

f) Pesticidas y productos agrícolas: son compuestos orgánicos que por lo general se encuentran a nivel de trazas en los pesticidas, herbicidas y otros productos químicos utilizados en las actividades agrícolas, son tóxicos para la mayoría de las formas de vida, convirtiéndose en contaminantes muy peligrosos de las aguas superficiales. Son productos que no suelen ser constituyentes comunes de las aguas residuales, sino que tienden a incorporarse a estas a través de las escorrentías de campos agrícolas, parques y tierras en desuso o que han sido abandonadas. Ciertas concentraciones de estos compuestos químicos le pueden ocasionar la muerte a los peces, contaminando la carne del pescado, lo que lo hace no apto para su consumo y disminuyendo de esta manera su valor como fuente de nutrientes en la alimentación, además de producir que empeore el suministro del vital líquido.

g) Gases: incluye el oxígeno, metano y el sulfuro de hidrógeno. En aguas residuales, los gases que más comúnmente se encuentran son: el oxígeno (O₂), el metano (CH₄), el dióxido de carbono (CO₂), el nitrógeno (N₂), el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y el amoníaco (NH₃). Siendo los de presencia más común en la

atmósfera los tres primeros, por lo cual se encuentran en contacto con todas las aguas. Además, se tiene que el amoníaco (NH_3), el metano (CH_4) y el sulfuro de hidrógeno (H_2S) presentes en las aguas residuales, se producen a partir de la descomposición del material orgánico (Aguamarket, 2021).

- Sulfuro de hidrógeno: su fórmula química es H_2S y se forma a partir de una reacción biológica en las aguas residuales, debido a una fermentación anaeróbica del contenido orgánico presente. En el interior de tuberías, si no hay oxígeno, los microorganismos se alimentan y producen este compuesto, que tiene un característico olor a huevo podrido (Bas, 2017).

- Metano: su fórmula química es CH_4 y es un gas incoloro, altamente inflamable y principal componente del gas natural o biogás. Puede almacenarse y/o transportarse a presión como gas líquido. El metano es un gas de efecto invernadero que también se encuentra en condiciones atmosféricas normales en una proporción de aproximadamente 2 partes por millón (ppm). Una exposición elevada a este gas puede provocar dificultades para hablar, problemas de visión y pérdida de memoria (Pratt, 2022).

- Oxígeno disuelto: su fórmula química es O_2 y su concentración normal en la atmósfera es de aproximadamente el 20,9% del volumen. En ausencia de una ventilación adecuada, sus niveles pueden reducirse rápidamente por los procesos de respiración y combustión, también puede reducirse debido a la dilución por otros gases como el CO_2 el N_2 o el He y a la absorción química por procesos de corrosión y reacciones similares (Pratt, 2022).

3.2 Constituyentes químicos inorgánicos

- Alcalinidad: es la capacidad del agua para neutralizar la acidez y se refiere a la presencia de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) e hidróxidos (OH^-) presentes en el agua. Se expresa en mg/L (ppm) de carbonato de calcio (CaCO_3). La alcalinidad le concede al agua la capacidad para resistir los cambios de pH tras la adición de ácido (Sela, 2022).

- Cloruros: son sales que resultan de la combinación de un átomo de cloro en su estado de oxidación Cl^- y otro elemento metálico, y están presentes en todas las fuentes de agua, incluso agua potable. Su cantidad presente en el medio natural, se ve altamente afectada por las descargas de aguas residuales, cuando no son tratadas correctamente. La excesiva presencia de cloruros afecta el equilibrio del medio y las propiedades del agua, por tanto, se considera un indicativo de contaminación (Hanna Instruments, 2018).

- Metales pesados: los principales metales que se encuentran en los efluentes industriales son: cadmio, zinc, cromo, níquel, mercurio y plomo. Estos metales son muy dañinos para los ecosistemas y para la salud humana, por lo que se debe disminuir su concentración en los cuerpos de agua, suelo y aire (Tejada, 2015).

- Nitrógeno: es un contaminante presente en las aguas residuales que debe ser eliminado, ya que reduce el oxígeno disuelto de las aguas superficiales, es tóxico para el ecosistema acuático y representa un riesgo para la salud pública (Iagua, 2018).

- pH: el pH del agua determina la solubilidad y la biodisponibilidad de sustancias químicas como nutrientes y metales pesados. En el caso de los metales pesados, la solubilidad determina su toxicidad, ya que los metales son más tóxicos a valores de pH más bajos debido a que son más solubles. El pH del agua se ve afectado por diversos factores, tanto naturales como sintéticos. La mayoría de los cambios naturales suceden por interacciones con los minerales circundantes como los carbonatos y otros compuestos. El pH también varía con la precipitación y a la descarga de aguas residuales. La concentración de CO₂ afecta también el pH (Carbotecnia, 2022).

- Fósforo: el fósforo total es la suma de todas las formas de fósforo existentes: ortofosfato o fosfatos, fosfatos condensados y fósforo orgánico, el cual suele encontrarse en forma de fosfatos contenidos en el interior o unidos a un compuesto orgánico. Los fosfatos no generan problemas de sabor y olor y tampoco suponen un problema a la hora de consumir agua potable, sin embargo, los altos niveles de fosfato en los vertidos de aguas residuales pueden afectar grandemente al ecosistema del entorno. Los altos niveles de fosfatos pueden acelerar el crecimiento de diversos tipos de algas y plantas, lo que puede provocar la eutrofización, ocasionando que peces y organismos acuáticos no reciban oxígeno, provocando la muerte de los peces de gran tamaño y la destrucción de los hábitats (Hach, 2015).

- Compuestos tóxicos inorgánicos: se refiere a cualquier elemento químico, tanto natural como sintético o microorganismo, que por lo regular no se encuentran en las aguas, pero que pueden eventualmente entrar en ellas y causar contaminación de estas, ocasionando daños ecológicos y a la salud humana. Los de mayor presencia en aguas residuales son: productos farmacéuticos, tales como antiinflamatorios, antibióticos, medicamentos psiquiátricos, analgésicos, hormonas y esteroides, productos de belleza y

cuidado personal (fragancias, repelentes de insectos, protectores solares y antisépticos), aditivos industriales, aditivos de gasolina, productos plastificantes y retardantes de llama (WWAP, 2017).

3.3 Características biológicas de las aguas residuales

A continuación, se describen los principales constituyentes biológicos presentes en las aguas residuales.

a) Microorganismos: pueden ser bacterias, hongos, algas, protozoos. El contenido de bacterias en un agua residual va a depender principalmente de la presencia de compuestos orgánicos, sales inorgánicas, turbidez, luz y la temperatura del agua (Marín, 2014). Las bacterias tienen un papel relevante en los procesos de estabilización y descomposición del material orgánico, a la vez que sirven de indicadores de la contaminación, tal es el caso de la presencia de coliformes que indican contenido de desechos humanos fecales. Las bacterias y virus se pueden encontrar tanto en las aguas subterráneas como en las aguas superficiales, mientras que los protozoos son comunes en las aguas superficiales. El tipo y concentración de microorganismos de un agua residual dependen del estado general de salud de la población, la existencia de portadores de alguna enfermedad y la capacidad de los agentes infecciosos a sobrevivir fuera de los huéspedes bajo diversas condiciones ambientales (Tavares, 2011).

b) Plantas y animales: al hablar de plantas, es importante señalar que en aguas residuales la diversidad es escasa y dominan ciertas especies, siendo las algas las que alcanzan más altas concentraciones. Esto se debe principalmente a la falta de oxígeno y a la variación de pH, las cuales llegan a causar la muerte inminente de plantas acuáticas (Molina & Villatoro, 2006). Con respecto a los animales, se puede decir que estos tienen especial importancia al momento de evaluar la vida biológica y la toxicidad que presenten las aguas residuales. Existen ciertos gusanos cuya presencia es frecuente en estas aguas, como los platelmintos, entre

estos la Turbellaria y la Trematoda y los asquelmintos, dentro de los cuales destacan los nematodos.

- c) Virus: con respecto a los virus, se tiene que los más encontrados en las aguas residuales son los llamados Enterovirus, Adenovirus, Reovirus, Virus ECHO, Coxsack, Poliomiélticos y Virus de la Hepatitis (Marín, 2014).
- d) Organismos patógenos e indicadores: los principales patógenos presentes en las aguas residuales y sus correspondientes indicadores son los siguientes: bacterias (coliformes fecales, E.coli, Streptococcus fecales y Clostridium perfringens), virus (fagos somáticos, F+ y de Bacteroides fragilis), Huevos de helminto (Ascaris lumbricoides) y quistes (Giardia y Cryptosporidium) (Díaz et al, 2013).

4. Legislación ambiental existente a nivel mundial

Los problemas ambientales han dejado de ser problemas de algunos sectores o regiones para convertirse en problemas globales, ocupando lugares principales en las agendas de organizaciones mundiales e impulsando discusiones y acciones a favor de soluciones pertinentes en conferencias, medios de comunicación, foros y hasta en reuniones de Estado (Uribe, Cárdenas, & Cadena, 2010).

El cambio climático, la extinción de especies, la polución, los derrames petroleros en las aguas, el mal manejo de desechos, la contaminación de las fuentes de agua, entre muchos otros, son temas que preocupan a la comunidad internacional, y por lo cual han surgido respuestas jurídicas y legales con la finalidad de controlar y penalizar esta serie de hechos que traen graves consecuencias al medio ambiente. Además de la respuesta internacional global, cada región y país se ha apegado a tratados y convenios en pro del ambiente y ha desarrollado su legislación propia que enmarque sus particularidades (Uribe, Cárdenas, & Cadena, 2010). Así que, a continuación, se presentará una revisión de la legislación más relevante a nivel mundial, referida al manejo de las aguas residuales y a su disposición.

4.1 Legislación mundial:

Es importante señalar que según Programa de la Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA] (2015), estas leyes son pertinentes o aplicables cuando las aguas residuales fluyen hacia cuerpos de aguas internacionales como ríos, lagos o acuíferos, para lo cual específicamente existen dos tratados mundiales.

- 1) Convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacionales para fines distintos de la navegación. Esta Convención fue creada en 1997 por la ONU, pero es a partir de 2014 cuando se aplica. La misma exhorta, en el artículo 7, a los Estados a adoptar medidas que eviten afectar a otros Estados que utilicen un cuerpo de agua internacional, y, además, en el artículo 8, incita a los Estados a cooperar en la protección de estos cursos de agua internacionales. Algunas convenciones regionales, han adoptado estos principios por considerarlos pertinentes y de interés común.
- 2) Convenio sobre la Protección y Utilización de los Cursos de Agua Transfronterizos y de los Lagos Internacionales (el Convenio del Agua). Este Convenio fue creado en 1992 por la Comisión Económica para Europa como un marco legal regional, entrando en vigor en 1996. Sin embargo, a partir de 2013 se han apegado a este convenio todos los Estados miembros de la ONU a nivel mundial. El Convenio del agua plantea los impactos transfronterizos, obliga al control de emisiones contaminantes, abarca los principios de sostenibilidad, de prevención y establece en el artículo 2, la obligación de quién causa contaminación debe pagar; además, establece que antes de disponer aguas residuales al ambiente, se debe estar autorizado.

A partir de estos Convenios se han desarrollados acuerdos y tratados regionales para la resolución legal de problemas bilaterales; además, de otros problemas de gestión de residuos sólidos y peligrosos, y relacionados con la contaminación del aire, que a su vez afectan la calidad de las aguas (PNUMA, 2015). Existen también en cada continente, regiones y países, leyes, tratados y convenios que se aplican a la gestión

de calidad del agua (PNUMA/ORPALC, 2005), a continuación, se hará mención a algunos de ellos:

- En Europa, el Marco sobre el Agua de la Unión Europea, del año 2000, el cual incluye a las aguas residuales.
- El Protocolo sobre Agua y Salud del Convenio sobre el Agua creado por la OMS en 1999 y que entró en vigor en el año 2005.
- En África, el Protocolo sobre Cursos de Agua Compartidos en la región de África Meridional, creado en 1995 por la Comunidad de África Meridional para el Desarrollo.

Además, es importante señalar que existen normas internacionales referidas a las aguas residuales a fin de estandarizar su tratamiento, tal como la siguiente:

- 3) Norma ISO 46001:2019: esta es la nueva norma publicada por la organización internacional ISO, la cual permite una gestión eficiente del agua. Esta norma puede ser certificada e integrada con los sistemas de gestión de otras normas como ISO 14001 o ISO 9001.

ISO 46001 consiste en acciones de monitoreo, medición, documentación, informes, diseño y adquisición de equipos, sistemas, procesos y formación para la gestión de la eficiencia del agua y posee 3 aspectos claves fundamentales que coinciden con las 3R (reducir, reciclar y reutilizar) sustituyendo reciclar por reemplazar (Organización Internacional de Normalización (ISO), 2019).

4.2 Legislación en América Latina (CEPAL, 2020):

Cada país posee legislaciones ambientales y del agua que regulan el funcionamiento interno, enmarcadas en la legislación internacional.

- En Argentina, la Ley General del Ambiente y el Régimen de Gestión Ambiental de Aguas.
- En Perú, el Proyecto de Ley de Aguas.

- En México, la Ley de Aguas Nacionales.
- En Brasil, Política Nacional de Recursos Hídricos.
- En Colombia, normas sobre Agua y saneamiento.
- En Costa Rica, La Ley de Aguas.
- En Uruguay, el Código de aguas. Ley 14859.
- En Chile, Código de aguas.
- En Nicaragua, la Ley General de Aguas Nacionales. Ley 620.
- En República Dominicana, la ley de Aguas.
- En Cuba, el Decreto ley 138 sobre las aguas terrestres.

4.3 Legislación en Ecuador:

En Ecuador se cuenta con una amplia legislación ambiental. Entre las instituciones públicas que se encargan de la regulación de las aguas servidas se encuentran el Ministerio del Ambiente y los Departamentos de gestión ambiental presentes en las Prefecturas provinciales y en las alcaldías. Los principales documentos legales con el que este país cuenta según Peña (2018) están:

- La Ley de Gestión Ambiental y la Ley de Aguas.
- Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiental, Libro VI, Anexo 1 (T.U.L.S.M.A.).
- Demás regulaciones del Sector Hídrico.

4.4 Legislación en Venezuela:

- **Constitución de la República Bolivariana de Venezuela:** la cual dice en su artículo 304: “Todas las aguas son bienes de dominio público de la Nación, insustituibles para la vida y el desarrollo. La ley establecerá las disposiciones necesarias a fin de garantizar su protección, aprovechamiento y recuperación (...)”, (Constitución de la República Bolivariana de Venezuela, 1999).
- **Ley de Aguas:** tanto Venezuela como otros países de la región, poseen una Ley de Aguas, la cual en su artículo 1 declara que la misma “*tiene por objeto establecer las disposiciones que rigen la gestión integral de las aguas, como elemento indispensable para la vida, el bienestar humano y el desarrollo sustentable del país, y es de carácter estratégico e interés de Estado*”, (Ley del Agua, 2007). Esta Ley fue publicada en Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela N° 38.595 de fecha 02 de enero de 2007. Está sustentada en el Artículo 304 de la Constitución de la República Bolivariana de Venezuela.
- **Ley Penal del Ambiente (Gaceta Oficial No. 39.913):** esta Ley cataloga como delito los actos que atenten contra los recursos naturales y del ambiente y aplica las sanciones penales en la República Bolivariana de Venezuela (Ley Penal del Ambiente, 2012).

Además, Venezuela ha firmado algunos tratados y convenios internacionales en materia ambiental (Díaz, 2013), entre los que destacan:

- Tratado de Cooperación Amazónica (28-05-1980 N° 31.993), el cual plantea entre sus objetivos mantener un equilibrio entre el crecimiento de la economía y preservar el medio ambiente.
- Convención sobre los Humedales (Ramsar) (16-09-1988 N° 34.053), la cual trata de la aplicación internacional de acciones a favor de la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos. Fue adoptada en Ramsar, ciudad iraní, entrando en vigencia en 1975.

- Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (27-12-1994 N° 4.825 Ext.).

Describir las características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales, permite tener información precisa y confiables sobre las concentraciones de los posibles contaminantes que estas puedan tener, lo que es un factor muy importante a la hora de prevenir y controlar la contaminación, así como seleccionar el método de tratamiento del efluente para mejorar la calidad del agua y poderla reutilizar en agua para riego, procesos industriales o fines recreativos.

Debido a que el agua es un recurso escaso en algunas regiones del planeta, el tratamiento de las aguas residuales representaría una solución a esta problemática, en este sentido, no se debería considerar a las aguas residuales un desecho, sino más bien como un recurso, lo que representa el principio fundamental de la economía circular: minimizar los residuos y aprovechar al máximo los recursos.

CAPITULO III

CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

1. Introducción

La industrialización a nivel mundial y los avances en el ámbito tecnológico, han introducido muchos beneficios a la sociedad, pero a la par, el creciente auge en la creación de industrias ha traído consigo una serie de problemas ambientales con un fuerte impacto sobre la salud, siendo relacionado este crecimiento industrial con el incremento en la contaminación en gran parte de los países.

Las aguas residuales que son generadas por las industrias por lo general se encuentran contaminadas con productos químicos y material orgánico con características físicas, químicas y biológicas que las hacen nocivas para el ser humano y los animales, por lo que deben ser sometidas a una serie de tratamientos que permitan depurarlas para poder ser vertidas en los cuerpos de agua. El conocimiento de las características del agua residual y su grado de contaminación es fundamental a la hora de definir el tipo de tratamiento que se le puede aplicar para ocasionar el menor daño posible al ambiente.

Si bien es cierto que el agua es un recurso renovable, este proceso de renovación no ocurre con la velocidad que requiere la alta demanda, por lo que debe ser acelerado a través del tratamiento y poder suplir de manera rápida y efectiva las necesidades industriales y de consumo de este recurso. No se puede dejar de recordar que solo el 3% del agua del planeta es apta para el consumo humano, por lo que es necesario reutilizar el agua residual (Veolia, 2021).

En este sentido, a lo largo de este capítulo, se describirán los métodos de análisis para caracterizar las aguas residuales desde el punto de vista físico, químico y microbiológico. Los parámetros físicos que se deben analizar en la caracterización de las aguas residuales son la presencia de sólidos (totales y suspendidos), la temperatura y la turbidez. Para analizar el contenido orgánico se utilizan

parámetros como la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda teórica de Oxígeno (DTeO), el Carbono Orgánico Total (COT) y la Demanda Total de Oxígeno (DTO).

Para determinar los contaminantes biológicos presentes en las aguas residuales, se utilizan comúnmente dos métodos: las unidades formadoras de colonias (UCF) o el Número Más Probable de microorganismos presentes (NMP), los cuales dan como resultado el recuento de organismos indicadores como los coliformes totales y los coliformes fecales. Los coliformes totales son bacterias que comprenden el conjunto de coliformes presentes en aguas contaminadas, suelos y en los desechos, mientras que los coliformes fecales son bacterias de origen intestinal, que están presentes en las heces humanas y animales de sangre caliente, siendo la más conocida la *Escherichia coli* (*E. coli*), causante de enfermedades gastrointestinales que ocasionan diarreas y vómitos, disentería o incluso virus como la polio y la hepatitis.

Dentro del capítulo también se menciona la caracterización de los gases presentes en las aguas residuales, los cuales son originados por la biodegradación de la materia orgánica presente, siendo los más comunes el metano (CH_4), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y dióxido de carbono (CO_2). La medición de estos gases puede ser realizada por cromatografía de gases o por dispositivos portátiles que detectan la concentración de estos.

2. Métodos de análisis de los parámetros físicos

Los parámetros físicos que caracterizan las aguas residuales son los sólidos totales, la turbidez, la temperatura y los sólidos suspendidos. Estos parámetros y sus métodos de análisis se describen a continuación:

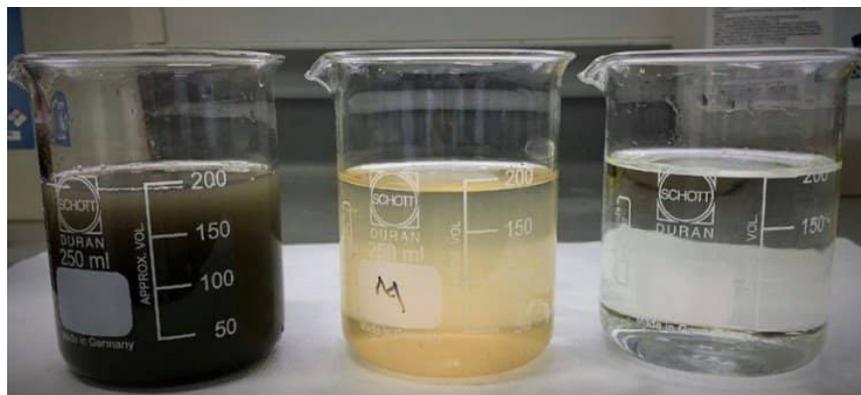
- Sólidos totales: se refiere a toda la materia que permanece en las aguas como residuo de la evaporación a 103 °C de temperatura; incluye toda la materia, con excepción del agua contenida en los materiales líquidos. Estos sólidos llegan a las aguas residuales provenientes de las aguas de abastecimiento, las

aguas industriales, las aguas de uso doméstico y de la infiltración de pozos y aguas subterráneas (Muñoz, 2008).

- Turbidez: la turbidez se mide por la comparación entre la intensidad de luz dispersa por una muestra determinada y la luz dispersa por una suspensión que es usada como referencia, ambas en las mismas condiciones y los resultados obtenidos son en unidades nefelométricas de turbidez (NTU o UNT), tal como se observa en la Figura 10.

Figura 10.

Análisis de turbidez



Fuente: Flowen, (2020).

En la medición de la turbidez, mientras la intensidad de la luz dispersada es mayor, también lo será el valor de la turbidez. Se emplea como solución patrón de turbidez el polímero formacina y el procedimiento que se sigue va a depender del grado de turbidez que presente la muestra. Para muestras con turbidez menor a 40 UNT, se agita la muestra cuidadosamente y una vez que desaparecen las burbujas de aire, se vierte la misma en el tubo del equipo (turbidímetro) y se procede a realizar la lectura de la turbidez en la escala del equipo.

Para muestras con turbidez mayor a 40 UNT se procede a diluir la muestra con un volumen de agua libre de turbidez, se agita la muestra diluida cuidadosamente y una vez desaparecen las burbujas de aire, se vierte la misma en el tubo del turbidímetro, se procede a realizar la lectura de la turbidez en la escala del equipo y se realizan los cálculos para determinar la turbidez de la muestra con la siguiente fórmula:

$$\text{Unidades nefelométricas de turbidez (UNT)} = \frac{(A * (B+C))}{c}$$

Donde:

A = UNT encontradas en la muestra diluida.

B = volumen (ml) de agua de dilución.

C = volumen (ml) de la muestra tomada para dilución.

Los resultados de la medición se expresarán según lo reflejado en la tabla 1.

Tabla 2.

Resultados de la medición de turbidez.

Rango de turbidez UNT	Informe de cifra UNT más próxima
0 – 1	0,05
1 – 10	0,1
10 – 40	1
40 – 100	5
100 – 400	10
400 – 1000	50
> 1000	100

Fuente: Secretaría de Economía de México, (2001).

- Temperatura: para medir la temperatura de aguas residuales, siempre y cuando sea posible, se efectúa directamente en el cuerpo de agua, sin extraer muestra, sumergiendo el termómetro en el agua a examinar. En caso de requerir una muestra, se toma por lo menos 1 litro del agua en un recipiente de polietileno o de vidrio limpio y 500 mL para termopar, en un recipiente similar. Si la temperatura del agua es considerablemente mayor o menor a la del ambiente (diferencia de 5°C), es recomendable tomar la muestra por medio de un recipiente de doble pared, sin embargo, es importante tener en cuenta que puede haber una pérdida térmica durante el tiempo que se toma la muestra y en el momento que se realiza la lectura, esta diferencia de temperatura puede incluso rebasar los $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ (Secretaría de Comercio y Fomento Industrial de México, 1981).

- Sólidos Suspendidos (SS): también se les denomina Materia en Suspensión (MES), para determinarla se somete a filtración y/o evaporación un volumen de agua y al final se pesan los sólidos restantes. Este valor es expresado en mg/L. Los menores de 0,01 mm no sedimentan rápidamente y se consideran sólidos no sedimentables y los mayores de 0,01 mm son sedimentables. El principio para su determinación es un método gravimétrico basado en la retención de los sólidos presentes en muestra homogénea, donde en un filtro hecho de fibra de vidrio; lo retenido en el filtro es secado y el incremento experimentado en el peso del filtro va a representar la cantidad de sólidos suspendidos totales. El procedimiento consiste en montar el equipo de filtración para filtrar una muestra bien mezclada, de volumen conocido, la cual se lava con 10 mL de agua destilada y se realiza el drenaje completo. Terminada la filtración, se somete a secado a una temperatura que oscile entre 103-105 °C durante 1 hora, luego se enfría en un desecador para estabilizar la temperatura y se pesa, repitiendo el proceso de secado, enfriamiento y pesado hasta un valor de peso constante o hasta una pérdida de peso menor del 4% (APHA AWWA

WEF, 1995). Finalmente, se realizan los cálculos correspondientes utilizando la fórmula:

$$\text{mg de SS/L} = (A-B) / \text{volumen de muestra (L)}$$

Donde:

A = peso del filtro (mg) + residuo seco (mg).

B = peso del filtro (mg).

3. Métodos de análisis del contenido orgánico

El contenido orgánico presente en las aguas residuales se determina a través de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la Demanda teórica de Oxígeno (DTeO), el Carbono Orgánico Total (COT) y la Demanda Total de Oxígeno (DTO), parámetros que se describen a continuación.

a) DBO: constituye el parámetro para medir la contaminación con material orgánico que es más utilizado y se aplica tanto para las aguas residuales como para las superficiales, su análisis se realiza a los 5 días (DBO₅). Esta determinación permite medir el oxígeno disuelto que es consumido por los microorganismos durante la oxidación bioquímica del material orgánico. Esta medida es muy importante en el tratamiento de las aguas residuales y para la gestión a nivel técnico de la calidad del agua, ya que se utiliza para lograr determinar qué cantidad de oxígeno aproximada será requerida en la estabilización biológica de la materia orgánica que esté presente. Los resultados obtenidos en el análisis de la DBO son utilizados para determinar qué cantidad de oxígeno aproximada será requerida para estabilizar de forma biológica la materia orgánica que se encuentre presente, determinar el espacio y el tamaño que se requiere para las instalaciones donde se llevará a cabo el tratamiento de estas aguas residuales y verificar la eficiencia de los procesos de tratamiento. Con el objetivo de lograr resultados confiables, la muestra se debe diluir con agua para tal fin, la cual también debe ser preparada con la inoculación de los nutrientes y el oxígeno necesario durante el lapso de incubación

de dicha muestra. Normalmente, son preparadas varias diluciones que permitan obtener una gama completa de resultados. El agua con la que será diluida la muestra debe ser inoculada con un cultivo de bacterias previamente aclimatado. Siendo utilizado un cultivo mixto como inóculo en la preparación del agua de dilución que se usará para el ensayo. Estos cultivos mixtos contienen grandes cantidades de bacterias saprofitas y otros organismos encargados de oxidar el material orgánico. Además, también contienen bacterias autótrofas que contribuyen en la oxidación del material orgánico. Si la muestra a analizar contiene grandes poblaciones de microorganismos, no es necesario efectuar la inoculación.

Generalmente, el lapso utilizado para la incubación de la muestra es de 5 días a 20°C, siendo utilizados también otros lapsos de tiempo y temperaturas. Sin embargo, en el transcurso del análisis, la temperatura deberá ser constante, tras la inoculación debe medirse el oxígeno disuelto en la muestra y calcular la DBO. El proceso de oxidación bioquímica ocurre en un periodo lento, teóricamente se establece que para completarse tarda un tiempo infinito. En un período comprendido de 20 días, se completa de un 95% al 99% de la oxidación y de un 60% al 70% en un lapso de 5 días utilizado en el ensayo de la DBO. La temperatura de 20°C usada es un valor medio para los cursos de agua que circulan a baja velocidad en climas suaves y es fácilmente obtenible en una incubadora.

Las limitaciones de la determinación de la DBO incluyen la necesidad de tener que disponer de una elevada concentración de bacterias activas y aclimatadas que hagan del inóculo, la necesidad de un pretratamiento cuando haya residuos tóxicos y la necesidad de reducir los efectos de los organismos nitrificantes, el arbitrario y prolongado período de tiempo requerido para obtener resultados, el hecho de que solo se midan los productos orgánicos biodegradables, y por último, el que el ensayo no tenga validez estequiométrica una vez que la materia orgánica soluble, presente en la solución, haya sido utilizada. Posiblemente, la limitación más seria estriba en que el periodo de 5 días puede o no corresponder al punto en que la materia orgánica soluble presente haya sido utilizada.

Para determinar la DBO se sigue el procedimiento establecido en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater de la American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation (1995), y es el siguiente:

1. Preparación del agua de dilución:

- Se añade en una botella la cantidad necesaria de agua y en la misma se agrega por cada litro de agua, 1 mL de las soluciones siguientes: CaCl_2 , MgSO_4 , tampón fosfato y FeCl_3 .
- Llevar a 20°C el agua de dilución antes de ser usada y en una botella, la cual debe estar parcialmente llena, proceder a su saturación con oxígeno disuelto por agitación, a través del burbujeo con aire filtrado que debe estar libre de material orgánico o guardarla en unas botellas que sean lo suficientemente grandes y con un tapón de algodón que permitan su saturación.

2. Inoculación: es indispensable que la muestra contenga la población de microorganismos que sean capaces de oxidar el material orgánico biodegradable, pero como algunas muestras no poseen una suficiente población microbiana, es necesario su inoculación con la adición de una adecuada población de microorganismos. El inóculo suele ser el efluente de un sistema de tratamiento biológico o el sobrenadante de las aguas residuales domésticas una vez que ha sido decantada a la temperatura ambiente por un tiempo mínimo de 1 hora, pero que no exceda las 36 h.

3. Tratamiento previo de la muestra: las muestras con alcalinidad cáustica o acidez, se deben neutralizar a un pH entre 6,5 y 7,5 utilizando una solución de hidróxido de sodio (NaOH) o ácido sulfúrico (H_2SO_4) que tenga una concentración tal que su cantidad no produzca la dilución de la muestra en más de 0,5%. El pH aportado por el agua de dilución que es inoculada no debe ser afectado por la menor dilución de la muestra. Las muestras con compuestos residuales de cloro, se deben decolorar y posteriormente inocular con el agua de dilución; si, por el contrario, la

muestra ha sido clorada y no se detecta cloro residual, se procede a inocular el agua de dilución. Para muestras contaminadas con sustancias tóxicas, que generalmente provienen de las industrias como las electroquímicas, se requiere la realización de estudios especiales y deben ser sometidas a un tratamiento antes de proceder a medir la DBO. Muestras que proceden de aguas a temperaturas muy bajas o de aguas donde es alta la producción primaria, los valores que se obtienen de OD a una temperatura de 20°C suelen superar los 9 mg de OD/L. Con la intención de prevenir pérdidas de oxígeno durante el proceso de incubación, se debe llevar a 20°C la temperatura de la muestra en una botella que esté parcialmente llena, mientras se procede a sacudirla fuertemente o se realiza su burbujeo con aire comprimido el cual debe ser limpio y filtrado. Todas las muestras deben tener una temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$ antes de ser diluidas.

4. Inhibición de la nitrificación: para ello se debe adicionar 3 mg de 2-cloro-6-(triclorometil)-piridina (TCMP) a las muestras que están contenidas en las botellas de 300 mL o también puede ser adicionado directamente en el agua de dilución, con la finalidad de conseguir una concentración final de 10 mg de TCMP/L aproximadamente.

5. Dilución de las muestras: las diluciones de las muestras que por lo general arrojan resultados más acertados, son aquellas donde los valores de oxígeno disuelto residual son por lo menos de 1 mg/L y con un consumo de oxígeno disuelto de 2 mg/L por lo menos, posterior a los 5 días de su incubación. Las diluciones que se pueden emplear son de 0,0 a 1,0% para los efluentes líquidos provenientes de las industrias, de 1 a 5% para los efluentes industriales que no han sido tratados ni decantados, de 5 a 25% para los efluentes que han sido sometidos a un tratamiento biológico o secundario y de 25 a 100% para efluentes contaminados. Las diferentes diluciones pueden ser preparadas previamente en probetas y luego ser transferidas a las botellas de DBO o también se pueden preparar en las botellas directamente.

6. Procedimiento: con una pipeta se adiciona el volumen de la muestra a las diferentes botellas para DBO que tienen un volumen conocido. Luego, se agrega, a cada botella el inóculo y se llenan las botellas con el agua de dilución suficiente, de tal forma que cuando se inserte el tapón, sea desplazado todo el aire que haya en el cuello de la botella, sin que se produzcan burbujas. Luego se tapan las botellas

herméticamente, con sello de agua, y se procede a incubarlas durante 5 días a una temperatura de 20°C.

7. Determinación del OD: se procede a la determinación del oxígeno disuelto inicial en las botellas y a llenar la botella remplazando con agua de dilución el contenido desplazado. Se tapan de forma hermética, con sello de agua y se incuban por 5 días a una temperatura de 20°C. Se debe enjuagar el electrodo utilizado para realizar las mediciones de oxígeno disuelto entre cada determinación con el propósito de evitar la contaminación cruzada entre las muestras. Finalmente, se determina el oxígeno disuelto en las muestras diluidas, los patrones y los blancos una vez transcurridos los 5 días de la incubación.

b) DQO: este ensayo es empleado para medir el contenido de la materia orgánica presente en las aguas naturales y en las aguas residuales. Para medir el equivalente de oxígeno que puede ser oxidado en la materia orgánica se utiliza un agente químico, el cual es un fuerte oxidante en un medio ácido, siendo el dicromato de potasio un excelente agente oxidante. Este ensayo se debe realizar a elevadas temperaturas. Por otra parte, es necesario utilizar un catalizador como el sulfato de plata para facilitar el proceso de oxidación de ciertos compuestos orgánicos. Algunos compuestos inorgánicos causan interferencia en el ensayo, por lo que deben ser eliminados previamente. Este ensayo de la DQO también se utiliza para medir la materia orgánica presente en las aguas residuales industriales y las municipales que puedan contener compuestos que sean tóxicos para la vida biológica. La DQO de un agua residual es, por lo general, mayor que la DBO, porque es mayor el número de compuestos que pueden oxidarse por vía química que biológicamente. Otra ventaja es que la DQO es muy útil debido a que puede determinarse en horas en comparación con los 5 días que supone la DBO.

Entonces, se tiene que la principal diferencia entre la DQO y la DBO, es que la primera abarca la segunda, además de incluir más cosas, pues en la DBO solo se determina material orgánico degradado biológicamente, mientras que en la DQO se oxida completamente toda la muestra, así que el material orgánico, biodegradable y

no biodegradable, es oxidado químicamente. De esta manera, el valor de la DQO para una muestra, deberá ser mayor que el de la DBO. Aunque para aguas industriales la DQO y la DBO mantienen esta relación, es posible que la relación entre ellas cambie, si el tipo de agua cambia sus características y procedencia (Induanálisis, 2019).

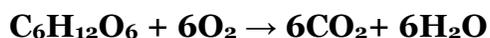
Para la determinación de la DQO se sigue el procedimiento establecido en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater de la American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation (1955), el cual señala lo siguiente:

1. Adicionar 50,0 mL de muestra en un balón de reflujo de 500 mL; adicionar 1 g de HgSO_4 , y para evitar una ebullición brusca de la muestra, se deben adicionar perlas de vidrio, luego de forma muy lenta y con agitación, adicionar 5,0 mL de ácido sulfúrico, para lograr disolver el HgSO_4 .
2. Se deja enfriar y se agita para evitar posibles pérdidas de material volátil que esté presente; adicionar 25 mL de solución de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 0,0417 M y mezclar. Acoplar el balón al condensador y abrir el flujo de agua refrigerante; agregar el remanente del reactivo de ácido sulfúrico (70 mL) a través del extremo superior del condensador. Continuar la agitación mientras se agrega el reactivo de ácido sulfúrico.
3. Agitar muy bien la mezcla de reflujo antes de suministrar calor para prevenir el sobrecalentamiento en el fondo del balón y la formación de espuma.
4. Cubrir con un vaso de precipitado pequeño el extremo superior del condensador con el propósito de evitar que ingresen a la mezcla materiales extraños y se deja en reflujo durante 2 horas. Transcurrido el tiempo se procede a enfriar y a enjuagar el condensador con agua destilada por la parte superior, luego se desconecta el condensador y se diluye la muestra con agua destilada al doble de su volumen.
5. Enfriar la muestra hasta temperatura ambiente y se valora con FAS el exceso de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ utilizando como indicador la ferroína, adicionando de 0,10 a 0,15 mL (2 o 3 gotas); se debe usar el mismo volumen del indicador en todas las muestras que

se vayan a titular. El punto final de la titulación es cuando aparece el primer cambio de color azul-verdoso a café-rojizo, el cual debe ser nítido, pudiendo reaparecer el color azul-verdoso. Este cambio de color del punto final es más nítido en la titulación del blanco de reactivos, en la muestra no es tan nítido debido a que la concentración de ácido en la muestra es mayor. El blanco de reactivos también debe someterse al proceso de reflujo y luego ser titulado en las mismas condiciones que las muestras.

Nota: en muestras con valores bajos de DQO, se debe seguir el procedimiento antes descrito, pero tomando en cuenta dos excepciones: utilizar $K_2Cr_2O_7$ estándar 0,00417 M y realizar la titulación con FAS 0,025 M. Ser extremadamente cuidadosos, ya que la presencia de trazas de materia orgánica bien sea en el material de vidrio o deposiciones que ingresen desde la atmósfera, pueden ocasionar interferencias e introducir errores en los resultados. Elaborar un blanco de reactivos siguiendo el mismo procedimiento que en las muestras. Realizar una prueba con una solución estándar de ftalato ácido de potasio para la evaluación de la técnica y de la calidad de los reactivos a utilizar.

c) DTeO: la presencia de materia orgánica de origen tanto animal como vegetal en las aguas residuales, por lo general, es una combinación de hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno. Entre los grupos principales de estos elementos que se encuentran en el agua residual están las proteínas, los carbohidratos, las grasas y los productos derivados de su descomposición. La demanda teórica de oxígeno, representa la cuantificación estequiométrica del oxígeno que se requiere para poder realizar una oxidación completa de un compuesto, partiendo de su fórmula química. Entonces, la DTeO es la cantidad de oxígeno teórico necesario para la oxidación de la fracción de material orgánico de un residuo hasta la obtención de agua y dióxido de carbono (Raffo & Ruiz, 2014). Según estos autores, el procedimiento para la determinación de la DTeO es el siguiente: la oxidación completa de una solución de 500 mg/L de lactosa, se representa en la reacción:



La determinación del valor de DTeO, se realiza cuando 180 g de lactosa consumen 6(32) =192 g de oxígeno; luego para una solución que contiene 500 mg/L se tiene:

$$192 \times 500 = 533,33 \text{ mg/l}$$

d) COT: este es otro de los ensayos empleados para medir la cantidad de materia orgánica que se encuentre presente en el agua, en especial se aplica en aquellas aguas que presentan materia orgánica en concentraciones pequeñas. Este ensayo se realiza por medio de la inyección de una cantidad conocida de la muestra dentro de un horno a temperatura alta. Una vez en el horno, el carbono orgánico presente en la muestra, frente a un catalizador, se oxida a anhídrido carbónico, el cual es medido cuantitativamente a través de un analizador de infrarrojos. El carbono inorgánico presente en la muestra es eliminado antes de iniciar el ensayo por medio de la aireación y la acidificación de esta y de esta manera se eliminan posibles errores. Este ensayo no requiere de mucho tiempo para su realización, por lo que su uso se ha extendido de forma vertiginosa. Sin embargo, algunos compuestos orgánicos no se oxidan fácilmente, por lo que pueden variar el valor medio de COT, siendo este ligeramente inferior al valor real que tiene la muestra.

Según el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater de la American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution Control Federation (1995), el procedimiento para determinar el COT es el siguiente:

1. Tratamiento de la muestra: si hay presencia de materia insoluble o de sólidos macroscópicos en la muestra, debe ser previamente homogeneizada. De requerirse el proceso de homogeneización en las muestras, también se debe analizar un blanco de reactivos, el cual debe ser sometido al tratamiento de homogeneización. Si se tiene previsto determinar el carbono orgánico disuelto, se filtra la muestra al vacío por medio de filtros de poro de 0,45 μm de diámetro, analizándose un blanco de filtración, para lo cual no debe utilizarse material plástico.
2. Inyección de la muestra: con la ayuda de una jeringa provista de una aguja con punta roma, se toma una porción de la muestra. Se hace la selección del volumen

de muestra siguiendo las directrices que indique el fabricante y se agitan con la ayuda de un agitador magnético, aquellas muestras que presenten partículas. Se hace la selección del tamaño de la aguja con base en el tamaño de las partículas que contenga la muestra y posteriormente son inyectadas en el analizador de carbono orgánico total tanto las muestras como los patrones, siguiendo las directrices indicadas por el fabricante y se anotan los resultados obtenidos. Se repite la inyección de la muestra hasta que se obtengan picos consecutivos que sean reproducibles en un intervalo de ± 10 por 100.

3. Preparación de la curva estándar: se preparan series de carbono orgánico e inorgánico que sirvan de patrón, mediante la dilución de las soluciones de reserva o stock, que cubran el intervalo que se espera en las muestras. Se inyectan y se anotan la altura del pico tanto de los patrones como del blanco de agua de dilución, reportándose en miligramos por litro la concentración de carbono frente a la altura en milímetros del pico corregido en papel milimetrado. En equipos provistos de un lector de concentración digital esto no es necesario. Se prepara una curva estándar por medio de diluciones apropiadas de los patrones, donde las soluciones tengan concentraciones entre 1 y 10 mg/L.

e) DTO: es otro ensayo instrumental utilizado para medir el contenido orgánico de las aguas residuales. Este parámetro indica la cantidad de O_2 que se requiere para oxidar completamente los contaminantes en un efluente. Por otra parte, las especies carbonadas, azufre y los compuestos de nitrógeno que tienen carácter reductor, tales como H_2S y NH_3 , contribuyen también a la DTO. En la realización de este ensayo, tanto las sustancias orgánicas como las inorgánicas (en menor escala), son transformadas en productos finales que son estables, mediante una combustión que es catalizada con platino dentro de una cámara. La DTO es determinada mediante la observación del contenido de oxígeno que se encuentra presente en el gas donde es transportado el nitrógeno. Este ensayo se puede realizar de forma rápida y los resultados obtenidos son correlacionados con la DQO. La determinación es

instrumental y mide el agotamiento del oxígeno finalizada la combustión que se lleva a cabo a temperatura alta (Aguamarket, 2021).

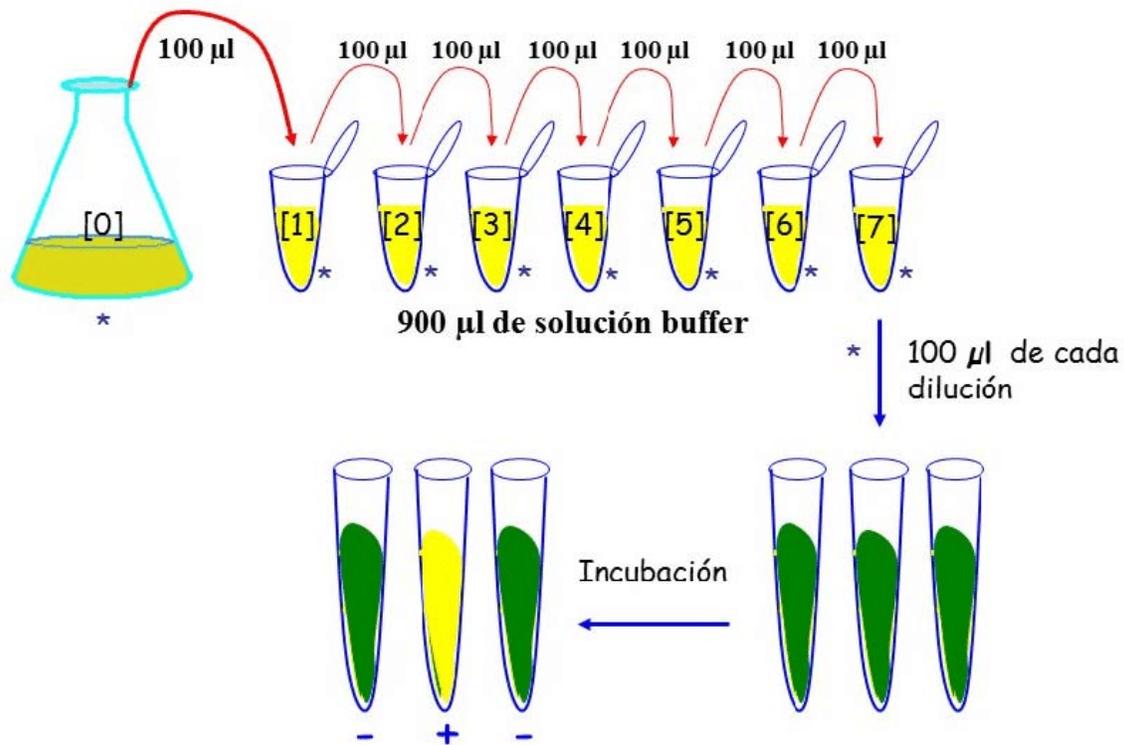
4. Métodos de análisis de los contaminantes biológicos

El diagnóstico de la contaminación biológica se hace a través del análisis microbiológico del agua. Los métodos más utilizados se fundamentan en determinar las unidades formadoras de colonias (UCF) o el número más probable (NMP). Investigar de manera rutinaria la presencia los microorganismos presentes en el agua, puede resultar un tanto complejo, por lo que el control microbiológico se realiza mediante el recuento de organismos indicadores como los coliformes totales y los fecales.

Para determinar las UCF, el recuento de microorganismos cultivables se puede realizar mediante siembra directa en un medio de cultivo de una muestra de agua o previa concentración de esta por filtración a través de membranas de ésteres de celulosa, en ambos casos, cada célula viable crece y genera una colonia contable. El número de UFC contables debe estar comprendido entre 30 y 100, siendo el límite de detección $< 10^2$ UFC / mL. Para determinar el NMP, se puede utilizar el método de Wilson (técnica de fermentación con tubos múltiples) y los resultados se expresan como Número Más Probable de microorganismos existentes, en este método se siembran alícuotas de diluciones seriadas de la muestra en medios de cultivos líquidos específicos y luego de una incubación adecuada, se consideran los números de cultivos (positivos y negativos). El NMP se calcula mediante fórmulas o tablas que emplean la cantidad de tubos positivos en las diluciones, tal como se ilustra en la Figura 11 (Paulino et al, 2010).

Figura 11.

Método del Número Más Probable



Fuente: Paulino et al, (2010).

5. Métodos de análisis de los gases presentes en las aguas residuales

Como se mencionó anteriormente, en las aguas residuales pueden estar presentes diversos gases como el metano, el sulfuro de hidrógeno, dióxido de carbono, entre otros. El principal método para la cuantificación de la concentración de estos gases es a través del análisis cromatográfico, para el cual se requiere una muestra del biogás con el fin de medir el porcentaje de concentración en procesos de laboratorio, este método resulta costoso a la vez que se obtienen pocos datos, por lo que surgen alternativas para la medición de estos gases como lo es el uso de sensores semiconductores de óxido de metales, estos sensores se pueden utilizar para un

monitoreo en línea. El principio de estos sensores se basa en la reacción que tienen en presencia de los gases, reduciendo su resistencia eléctrica mediante un material semiconductor a base de óxido de estaño (SnO_2), modificando sus propiedades conductivas, aumentando el voltaje de respuesta (Ordoñez et al, 2017).

Para determinar el tipo de contaminación presente en las aguas residuales, se necesita realizar una caracterización de estas, con el objetivo de obtener información sobre el tipo de contaminantes y la concentración de estos. En el caso de los gases presentes en las aguas residuales, determinar su concentración es vital, ya que la acumulación de estos puede ocasionar la falta de oxígeno y en algunos casos, podría ocurrir una explosión si se unen a una fuente de ignición. Al analizar los parámetros descritos en este capítulo, se tendrá una idea del contenido de materia orgánica, nutrientes, sólidos en suspensión, microorganismos, gases, metales, entre otros. Por lo que la caracterización integral del agua residual es de vital importancia para poder seleccionar y diseñar con éxito el tipo de tratamiento requerido.

CAPITULO IV

TRATAMIENTO PRELIMINAR DE LAS AGUAS RESIDUALES

1. Introducción

La finalidad de los diversos tratamientos es proteger y mantener la calidad del cauce receptor, lo cual es posible con la implementación de plantas de tratamiento que permiten reducir la cantidad de materia orgánica y con ello la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos totales suspendidos (SST), el fósforo (P), el nitrógeno (N), los microorganismos patógenos, entre otros.

Se estima que en América Latina aproximadamente la mitad de la población posee servicio de alcantarillado, por medio de las cuales se recolecta a diario alrededor de 40 millones de m³ de aguas residuales, que posteriormente van a desembocar en los lagos, ríos y en el mar, y menos del 10% de este volumen recibe previo tratamiento.

Actualmente, se cuenta con diversas opciones para llevar a cabo el tratamiento de las aguas residuales, los cuales van a depender del grado de contaminación y de las características del agua a tratar. En estas plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), por lo general utilizan procesos físicos, químicos, biológicos y bioquímicos, que tienen como función la de eliminar los distintos tipos de contaminantes presentes en el agua residual (Cavallini, 2011).

La implementación de los diferentes tratamientos tiene como principal objetivo el de minimizar la cantidad de contaminantes y de esta manera obtener un agua más limpia que se pueda reutilizar, además de poder ser tratadas en el lugar donde son generadas, o en algunas ocasiones pueden ser trasladadas a la planta de tratamiento por medio de tuberías (Cavallini, 2011).

Entre los procesos preliminares aplicados a las aguas residuales se encuentran los procesos físicos, donde se lleva a cabo la separación de los sólidos de mayor tamaño, sólidos flotantes, sólidos suspendidos, grasas, los cuales emplean rejillas, desarenadores y la sedimentación como operaciones iniciales.

La utilización de aguas residuales que han sido tratadas genera a su vez una serie de beneficios entre los que se encuentran un uso razonable y eficiente de este importante recurso, la generación de abonos orgánicos, además de la creación de una nueva fuente de empleo y de ingresos que harían crecer a la economía de la zona y el aumento de las zonas agrícolas en lugares desérticos. Por consiguiente, en este capítulo se abordarán los tratamientos preliminares aplicados a las aguas residuales, la descripción y el procedimiento de cada uno, así como también algunos equipos utilizados en estos.

2. Tratamiento preliminar

Las aguas residuales contienen sólidos grandes, suspendidos y flotantes, además de arena, que podrían interferir con el proceso de tratamiento, obstruir o desgastar el equipo de tratamiento de aguas.

La arena presente en aguas residuales consiste en sólidos inorgánicos relativamente pesados, que se asientan más rápido que la materia orgánica. Incluye arena, limo y grava, cenizas, cáscaras de huevos, virutas de huesos, basura triturada y otras sustancias pesadas que son lo suficientemente pequeñas para pasar a través de las rejillas y su eliminación es fundamental en un tratamiento preliminar.

Está conformado por un conjunto de operaciones unitarias físicas cuyo fin es la remoción o retención tanto de sólidos de gran tamaño, así como también arenas transportadas por las aguas residuales, previniendo con esto potenciales daños de los equipos, como bombas, o para facilitar la depuración en las subsecuentes operaciones presentes en el sistema de tratamiento.

Las sustancias flotantes, como aceite, grasa, jabón, entre otras, también deben ser eliminadas durante el tratamiento preliminar, pues podrían interferir con el proceso de lodos activados o crear escoria. Dependiendo del tipo de tratamiento de las aguas residuales, este proceso puede involucrar algunas todas o algunas de las siguientes operaciones.

2.1 Desbaste

Proceso en el cual las aguas residuales son obligadas a pasar por unas rejas metálicas, con barras separadas adecuadamente y en donde ocurre la retención, cribado o tamizado de basura o sólidos grandes presentes en las aguas (Figura 12).

Figura 12.

Rejilla manual para la Operación de Desbaste.



Fuente: iagua, (2022).

El objetivo de esta operación al iniciar el tratamiento del agua residual consiste en eliminar toda la materia que sea muy gruesa y arenosa presente en esta agua, capaz de alterar el proceso de tratamiento y funcionamiento de los equipos, maquinarias e instalaciones que conforman la estación de depuración.

Para llevar a cabo la operación de desbaste, se hace necesaria la utilización de rejillas que permitan retener la mayor cantidad posible de impurezas del agua residual, y su elección va a depender del tamaño de la estación depuradora, siendo clasificadas en:

- Horizontales, verticales, inclinadas y curvas.
- Finas, medias y gruesas.
- Fijas o móviles.
- De limpieza automática, semiautomática o manual

Dependiendo de la separación o aberturas de los espacios, las rejas se pueden clasificar en (Figura 13):

- Rejas Gruesas: cuando posee una separación entre las barras de 5cm, presentando un ángulo de inclinación con la horizontal de 30°.
- Rejas Medianas: con una separación entre barras entre 2 cm a 5 cm, presentando un ángulo de inclinación respecto a la horizontal de 45°.
- Rejillas: tienen una separación de barras entre 1 cm a 2 cm, con un ángulo de inclinación respecto a la horizontal de 70°.
- Cedazos Finos: son rejillas con una separación entre barras entre 1/4" a 1/32" (6 mm a 1 mm) o entre 3/16" a 3/32" (5 mm a 2,5 mm).

Figura 13.

Rejas Manuales Gruesa y Mediana.



Fuente: Centro Europeo de Postgrado y Empresa (2022).

Por otro lado dependiendo de la limpieza de las rejas, estas pueden ser (Centro Europeo de Postgrado y Empresa, 2022):

□ **Rejas de limpieza manual** (Figura 13): son usadas cuando los costos de las rejas automáticas son muy altos o cuando la operación de limpieza no sea muy demandante o muy frecuente, se recomienda que el agua tenga una velocidad de aproximación a la reja de 0,45 m/seg en caudal medio con el fin de tener una suficiente superficie de reja para cuando se produzca la aglomeración de basuras o sólidos entre las limpiezas, en el caso que se necesite mayor superficie para la reducción de la velocidad, esto se consigue ensanchando el canal de la reja y colocandola con una pendiente más suave. Estas rejas requieren de una supervisión para: observar y controlar para que no se acumulen muchos sólidos en la reja; retirar los sólidos con cierta regularidad, o para reparar y reponer aquellos barrotes que se hayan dañado.

□ **Rejas de Limpieza automática** (Figura 14): su mayor ventaja es que evitan los problemas de atoramiento y su menor tiempo entre limpiezas, las rejas son colocadas en posición vertical o con cierto ángulo, que depende del sistema mecánico de limpieza, por otro lado estas rejas están protegidas por una reja fija de barrotes con aberturas más separadas (50-100 mm), de limpieza manual. Existen diferentes tipos de mecanismo, siendo el más usado el peine móvil, que limpia la reja frecuentemente, retirando de las mismas los sólidos retenidos para luego ser extraídos.

Figura 14.

Rejas Desbaste de Limpieza Automática.



Fuente: <https://images.app.goo.gl>

En resumen, los criterios para la selección de las rejillas para el desbaste se muestra en la Tabla 3:

Tabla 3.

Dimensiones de las rejillas de barras de limpieza manual y mecánica.

Característica	Limpieza manual	Limpieza mecánica
Tamaño de la barra (mm):		
Ancho	5 – 15	5 – 15
Profundidad	25 – 37,5	25 – 37,5
Separación entre las barras (mm)	25 – 50	15 – 75
Pendiente en relación a la verticas (grados)	25 – 50	50 – 82,5
Velocidad de aproximación (m/s)	150	150
Pérdida de carga admisible (mm)	150	150

Fuente: Metcalf & Eddy, (1996).

2.2 Desarenado

Proceso que sigue al de Desbaste y en el cual el agua es llevada hasta estanques de flujo continuo (Figura 15) especialmente diseñados y construidos generalmente de concreto u hormigón armado, cuyo fin es permitir separar sólidos orgánicos que aún pueden estar suspendidos en el agua, pero sin removerlos, sólidos como arenas, cascaras, semillas y otros sólidos discretos, con tamaño superior a las 200 micras, que pudieron atravesar las rejillas de Desbaste. Estos sólidos tienen valores de densidades mayores a la del agua residual tratada, y que por su naturaleza pueden interferir en las subsecuentes operaciones o en el mantenimiento de los equipos. Para lograr el objetivo de separación, se recomienda que la velocidad horizontal del flujo, independientemente del caudal del flujo tratado, este comprendido entre el rango de 0,15 m/seg y 0,3 m/seg (BOSS TECH, 2020).

El principal objetivo del desarenado consiste en retirar la arena, gravas y cualquier otro material pesado que posea un peso específico superior al de la materia orgánica presente en el agua, además de la protección de los equipos de la abrasión y el desgaste ocasionado por este tipo de material y de disminuir la formación de depósitos de estos sólidos pesados y también reducir las limpiezas frecuentes de los digestores por la acumulación de arena en los mismos.

Figura 15.

Estanques Desarenadores en una Planta de Tratamiento.



Fuente: BOSS TECH, (2020).

El funcionamiento físico de este proceso consiste en causar una disminución en la velocidad del flujo del agua, pasando de un régimen hidráulico crítico a un régimen hidráulico subcrítico, y para lograr esto se aumenta la sección del canal. En el régimen subcrítico las partículas pesadas van depositándose en el fondo del estanque o desarenador. Por esta razón las variables principales en el diseño de un desarenador son la velocidad ascensional y la velocidad horizontal o de arrastre del flujo de agua (Figura 16).

Figura 16.

Esquema del funcionamiento de un desarenador.



Fuente: <https://images.app.goo.gl>

Los desarenadores se ubican generalmente entre la unidad de desbaste y el sedimentador, aunque existen algunas plantas de tratamiento donde son ubicados antes de la unidad de desbaste. Estos se pueden conseguir de tres tipos:

- De flujo horizontal para canales que son cuadradas o rectangulares.
- Aireados.
- De vórtice.

Entre los criterios a tomar en consideración para el diseño de un desarenador están las dimensiones del tanque (ancho, alto y largo), el suministro de aire, las dimensiones del canal, la dirección y la velocidad lineal del flujo, así como también a la carga superficial la cual va a depender del tamaño de la partícula y la temperatura del agua residual. Por otra parte, los desarenadores aireados son diseñados para remover partículas con un tamaño de 0,21 mm y con tiempos de retención de 2 a 5 minutos, con una sección transversal constituida por un canal donde se colecta la arena de 0,9 m de profundidad, con paredes laterales inclinadas que se ubica a lo largo del fondo del tanque, por debajo de los difusores de aire, los cuales se deben ubicar a 0,45m a 0,6 m del fondo del tanque.

En la Tabla 4 se encuentran los criterios más comunes para el diseño de un desarenador:

Tabla 4.

Criterios para el diseño de un desarenador aireado.

Características	Unidad	Intervalo	Valor usual
Tiempos de retención para caudal pico.	min.	2 – 5	3
Dimensiones:			
Profundidad	m	2 – 5	3
Longitud	m	7,5 – 20	12
Ancho	m	2,5 - 7	3,5
Relación ancho-profundidad	Razón	1:1 a 5:1	1,5:1
Relación largo – ancho	Razón	3:1 a 5:1	4:1
Suministro de aire por unidad de longitud	m ³ /m*min.	0,18 – 0,45	0,3

Fuente: WEF, (1992).

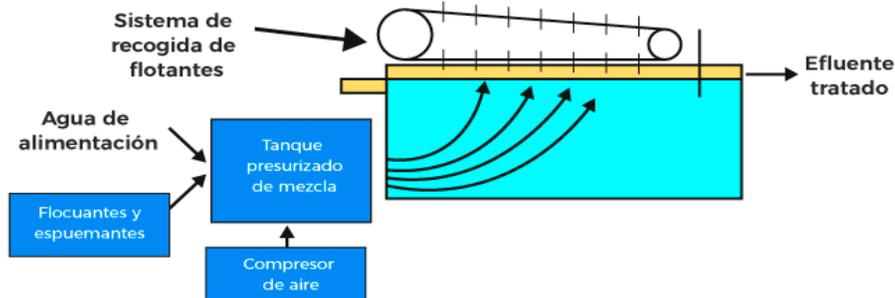
2.3 Flotación

Es una operación unitaria muy versátil, ya que dependiendo del diseño del flotador y de las características de los materiales a separar puede estar ubicado en etapas diferentes de los sistemas de tratamiento y por lo tanto es usado en tratamientos de aguas residuales de industriales y urbanos, reutilización de aguas y en procesos de desalinización. Si se ubica en el Tratamiento preliminar, se remueven los sólidos flotantes de gran tamaño, y al ubicarse en el Tratamiento primario de sistemas que tengan clarificación primaria, permite remover partículas de baja densidad como pueden ser algas, aceites libres y emulsionado, pulpa de papel y grasas o la remoción de partículas más densas que el agua, pero con velocidades de sedimentación bajas. Estas partículas y sustancias presentes en las aguas residuales son dañinas e impiden la correcta degradación de la materia orgánica y su sedimentación.

La flotación por aire disuelto (Figura 17), es una operación físico química que se basa en un fenómeno de formación de un conjunto aire/sólido suspendido mediante la adición de burbujas de aire muy finas, las cuales se pegan o adhieren a las partículas sólidas presentes en el líquido residual, este conjunto tiene una densidad inferior a la del agua, permitiendo separar las partículas sólidas de las líquidas y les otorga una rápida velocidad de ascensión, 5 veces mayor que la velocidad decantación en un decantador convencional, en dicha ascensión se van formando en la superficie una especie de fango (Figura 18), los cuales son arrastrados mecánicamente hasta una tolva para su remoción. Esta característica permite ahorrar tiempo y espacio.

Figura 17.

Proceso de flotación.



Fuente: iagua, (2022).

El objetivo principal de esta operación consiste en separar los sólidos suspendidos que por poseer una menor densidad son capaces de flotar en las aguas residuales, así como grasas y materia espumante.

Figura 18.

Sistemas de flotación por aire inducido



Fuente: Syner Tech S. A. S., (2022).

Respecto al diseño de los equipos de flotación, es necesario tomar en cuenta la naturaleza de las partículas y a partir de esta es indispensable tener presente los siguientes factores: cantidad de aire necesario, velocidad ascendente de las partículas, diámetro de las burbujas, la carga de sólidos, relación kilogramos de aire y sólidos disueltos, entre otros.

2.4 Homogenización de caudales

En los sistemas para el tratamiento de aguas residuales industriales donde existe una gran variación en el caudal o en la concentración de la carga contaminante del efluente, por razones económicas y de eficiente se requiere homogenizar o uniformizar tanto el caudal como la concentración existente de la carga contaminante y para lo cual se debe pasar el agua residual hacia un tanque de homogeneización (Figura 19), logrando los siguientes beneficios (Centro Europeo de Postgrado y Empresa, 2022).

Figura 19.

Tanque de homogeneización de aguas residuales



Fuente: Syner Tech S. A. S., (2022).

El principal objetivo de realizar la homogenización de caudales radica en evitar el deterioro de las instalaciones de depuración debido a las variaciones en la concentración que pueden ocasionar explotaciones de las instalaciones, lo que se traduce en mejoras en la efectividad de los tratamientos aplicados, además de homogenizar el pH del agua residual.

Esta operación trae consigo una serie de ventajas tales como:

- Ayuda a mejorar el tratamiento biológico, porque permite eliminar o reducir las cargas de choque, diluyendo las sustancias inhibitoras y estabilizando el pH del agua residual.
- Permite mejorar tanto la calidad del efluente como el rendimiento en los tanques de sedimentación secundaria ya que se trabaja con cargas de sólidos constantes.
- Permite reducir las superficies requeridas en la filtración del efluente, mejorando los rendimientos de los filtros y permitiendo conseguir la uniformidad en los ciclos de lavado.
- Por otra parte, el amortiguamiento de las cargas contaminantes aplicadas en el tratamiento químico, permite mejorar el control sobre la dosificación establecida de los reactivos, así como la fiabilidad en el proceso.
- Por último, la homogeneización mejora significativamente las operaciones y procesos de tratamiento, uniformizando el caudal e incrementando el rendimiento de las plantas de tratamiento que estén sobrecargadas.

Para llevar a cabo el proceso de homogenización del caudal es necesario la utilización de tanques de homogenización, los cuales deben estar provistos de dispositivos que permiten el control de olores y la sedimentación, entre estos dispositivos se encuentran los aireadores y los mezcladores (Iagua, 2022).

Entre los criterios a tener en consideración para la selección o el diseño de un aireador se encuentra el caudal del aire que se requiere, el cual se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$Q_{\text{aire}} = V_{\text{agua}} * \text{Factor}$$

Dónde: V_{agua} : volumen del agua dentro del tanque (m^3)

Factor: $0,025\text{min}^{-1}$

Por otra parte, los mezcladores deben poseer una potencia de mezcla de 15 a 25 W/m^3 de agua, llegando incluso a ser utilizada de 3 a 4 W/m^3 . Para el diseño de los tanques de homogenización es importante considerar el flujo del caudal, el caudal diario, el tiempo de retención y el volumen.

La composición de las aguas residuales tiende a ser muy variada dependiendo de la fuente que la genera, en este sentido, existe la presencia de diferentes materiales que son arrojados o arrastrados que pueden tener tamaños muy grandes, pueden ser muy pesados, y que deben ser extraídos de estas aguas antes de iniciar su tratamiento de depuración.

2.5 Ajuste de pH

El ajuste del pH es una operación que se realiza con la finalidad de llevar el pH del agua a un valor que esté lo más próximo a la neutralidad que sea posible, o al pH de equilibrio, siendo que, al inicio los efluentes pueden estar ácidos o alcalinos. Este procedimiento se realiza debido a que muchos efluentes industriales presentan condiciones de acidez o alcalinidad que no son compatibles con los tratamientos físicos, químicos y biológicos a los que deben ser sometidos antes de la disposición al ambiente, para dar cumplimiento a las normas de descarga. Los tratamientos biológicos por ejemplo, necesitan un pH entre 6,5 y 8,5 para su operación y para lograr disminuir la DBO (Bermeo et al., 2017).

En algunos procesos industriales, y como existen químicos empleados que presentan valores residuales de acidez o alcalinidad, se generan efluentes tanto ácidos como alcalinos que se pueden aprovechar para lograr un efluente neutro mediante una mezcla de los mismos en un tanque homogeneizador. En otros procesos es necesario ajustar el pH mediante la adición de productos químicos (Ver Tabla 5), que logren una capacidad de amortiguación del pH que es denominada capacidad buffer, la cual está definida como la habilidad que posee un reactor para

resistir cambios en el pH, como, por ejemplo, los producidos por la acumulación de ácidos grasos volátiles (Bermeo et al., 2017).

Tabla 5.

Productos químicos utilizados con frecuencia en el ajuste de pH.

Nombre Químico	Símbolo Químico	Nombre común
Ácido clorhídrico	HCl	Ácido muriático
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Aceite deovritiolo – Vitriolo óleo – 66Be
Carbonato de calcio	CaCO ₃	Calcita, piedra caliza, eso blanco, mármol triturado
Carbonato de sodio	Na ₂ CO ₃	Ceniza de sosa, sal de sosa
Dióxido de carbono	CO ₂	
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	Cal hidratada, cal apagada
Hidróxido de sodio	NaOH	Soda cáustica, lejía, lejía de sosa
Óxido de calcio	CaO	Cal química, cal viva, cal quemada
Carbonato de calcio y magnesio	CaCO ₃ – MgCO ₃	Dolomita
Carbonato de calcio fino (2-9mm)	CaCO ₃	Piedra caliza
Carbonato de calcio grueso (2-12mm)	CaCO ₃	Piedra caliza

Fuente: Bermeo et al. (2017).

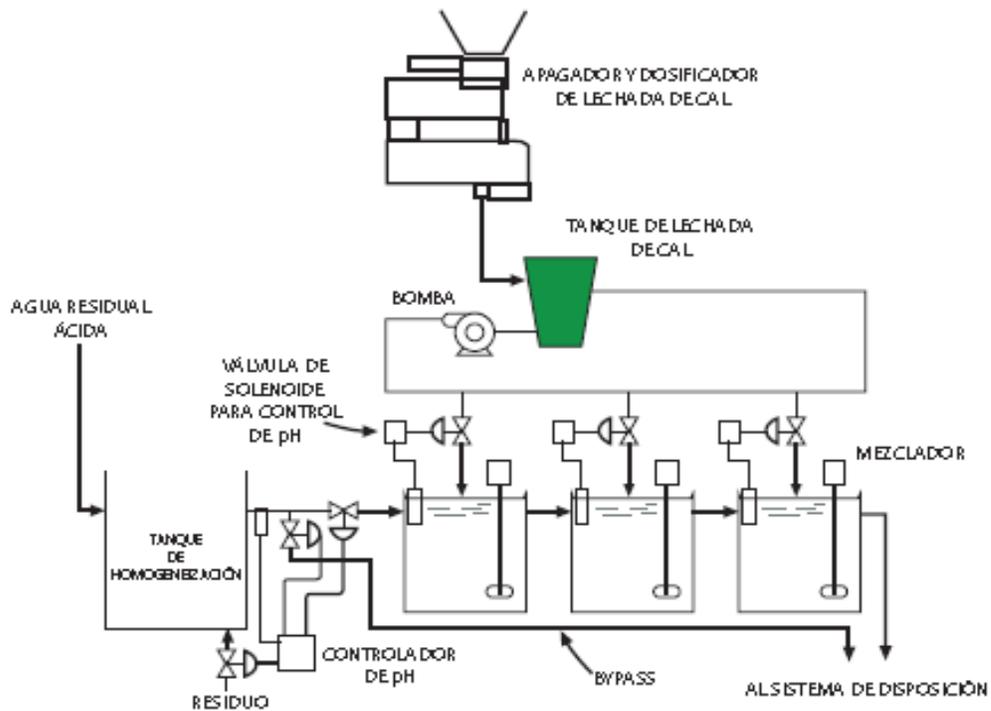
Por lo cual, se tiene que según Bermeo et al. (2017), el ajuste de pH puede realizarse de la siguientes maneras:

- 1) Por homogeneización, mezclando las corrientes ácidas y alcalinas generadas en una planta. Utilizando tanques de homogeneización de nivel constante o variable.
- 2) Por ajuste directo del pH, adicionando ácidos o bases para neutralizar las corrientes alcalinas o ácidas, respectivamente, como los presentados en la Tabla 5.

Utilizando para esto diferentes equipos, de acuerdo al pH inicial del efluente (alcalino o ácido), al agente químico utilizado y al método seleccionado (Ver Figura 20).

Figura 20.

Equipo de ajuste de pH de un agua residual ácida.



Fuente: Bermeo et al. (2017).

Antes del tratamiento de las aguas residuales, es necesario realizar un Pretratamiento o tratamiento preliminar que permita extraer esos sólidos de gran tamaño, los sólidos suspendidos, la arena, entre otros, y de esta manera garantizar que el tratamiento se realizará sin contratiempos, por lo que es necesario aplicar operaciones previas como el desbaste que permite retirar estos materiales por medio de la utilización de rejillas, además de retirar las gravas y arenas presentes mediante el desarenado, el retiro de sólidos suspendidos, espuma, a través de la flotación, y optimizar la eficiencia de la planta de tratamiento mediante la homogenización de los caudales.

CAPITULO V

TRATAMIENTO PRIMARIO APLICADO A LAS AGUAS RESIDUALES

1. Introducción

Las aguas residuales en especial las urbanas provenientes de las actividades humanas que se hacen a diario, son depositadas en la red cloacal y las mismas por lo general contienen desechos originados en las duchas, cocinas, lavamanos, inodoros, lavadoras, entre otros, que posteriormente son trasladadas a las estaciones de depuración de aguas residuales para ser sometidas a tratamientos y que luego puedan ser reincorporadas a los grandes cuerpos de agua (ríos, lagos, mares, entre otros) sin interferir en el medio ambiente o la calidad de vida de las personas (Ramalho, 1996).

El tratamiento de depuración del agua puede llevarse a cabo principalmente, con la intención de reciclar o desechar aguas residuales; el tipo y grado del tratamiento va a depender tanto de la procedencia como del uso que se le vaya a dar posteriormente a esta. La depuración de las aguas servidas a través de plantas de tratamiento se inicia con la remoción de las partículas gruesas como son las ramas, arenas, elementos inorgánicos, entre otros que no participan en el proceso que se lleva a cabo en las mismas.

El tratamiento que se realiza para eliminar todos estos componentes se conoce como tratamiento primario, el cual tiene como principal objetivo disminuir la demanda biológica de oxígeno por medio de la implementación de procesos fisicoquímicos. En este proceso se deja reposar el cuerpo de agua por un tiempo determinado para que los sólidos suspendidos se depositen en el fondo del estanque, y en algunas ocasiones es necesario agregar sustancias químicas como los quelantes que contribuyen a que la sedimentación se realice de una forma más rápida.

Antes de la aplicación de cualquier tratamiento, se debe realizar un pretratamiento siendo considerada una estructura auxiliar que lo precede, con el objetivo de reducir los sólidos suspendidos de diferentes tamaños presentes en las aguas, el contenido

de materia en estado de suspensión en la mayoría de las fuentes superficiales de agua es muy elevado, siendo necesaria su previa remoción (Crites & Tchonaboglous, 2000).

Los procedimientos de separación utilizados para retirar el material muy grueso (rejillas: finas y gruesas) se consideran como pretratamientos y acondicionamientos previos realizados en la planta en unidades como desarenadores y sedimentadores, donde las partículas que se encuentran en el agua pueden ser perjudiciales en los sistemas o procesos de tratamiento debido a que una turbidez elevada inhibe los procesos biológicos y causa el deterioro de la calidad del agua. En el presente capítulo se definirá tratamiento primario y cada una de las operaciones implicadas, así como su objetivo, finalidad y equipo involucrado.

2. Tratamiento primario

El tratamiento primario es el conjunto de operaciones físicas y/o químicas usadas para la remoción de la fracción de sólidos sedimentables y en suspensión, orgánicos e inorgánicos que generalmente contienen una alta cantidad de materia orgánica, así como una alta Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) (Baeza Gomez, 2018). A continuación, se explicará detalladamente cada una de las operaciones que involucra este tratamiento:

2.1 Sedimentación (por gravedad o asistida)

Es un sencillo proceso físico de tratamiento que generalmente se usa antes de tratamiento de purificación como la filtración y la desinfección, el objetivo principal de este proceso es eliminar pequeñas partículas en suspensión (arena limo, arcilla) y de algunos contaminantes biológicos, usando la gravedad, y para eso se mantiene al flujo del agua con una baja velocidad para permitir que dichas partículas se decante o sedimente por la influencia de la gravedad (Sustainable Sanitation and Water Management, 2020).

El objetivo de realizar el proceso de sedimentación en las aguas residuales consiste en remover todos los sólidos sedimentables orgánicos e inorgánicos que se encuentren presentes en ella. Un Sedimentador suele ser similar al desarenador, pero en este es posible la remoción de partículas inferiores a 0,2 mm y superiores a 0,05 mm.

En la Tabla que se muestra a continuación se presentan algunas ventajas/desventajas que presenta este proceso.

Tabla 6.
Ventajas y Desventajas de la Sedimentación.

Ventajas	Desventajas
Tecnología muy sencilla y de bajo costo	Este proceso no es suficiente para la purificación del agua por lo que se deben usar medidas complementarias.
El uso de coagulantes permite reducir el tiempo que se requiere para sedimentar los sólidos en suspensión	Para alcanzar la máxima efectividad de este proceso se requiere un control sobre el PH del agua y sobre la dosis del coagulante a ser aplicado, por otro lado, se necesita conocer la calidad del agua que está en el proceso de purificación.
Se pueden usar coagulantes naturales de bajo costo	Los coagulantes polielectrolitos son muy costosos
Si se usan polielectrolitos, la coagulación permitirá eliminar agentes patógenos como protozoos, bacterias y virus	El tiempo de sedimentación sin el uso de coagulantes se incrementa desproporcionadamente

Contaminantes presentes como el plomo y el bario pueden ser eliminados por coagulación

Se requiere entrenamiento técnico especializado para la dosificación de los coagulantes, y realizar ensayos calibrados para determinar la calidad del agua

Los coagulantes naturales aún no se encuentran en un formato que sea utilizable y deben ser preparados antes de ser usados

Los coagulantes son tóxicos si son sobre dosificados o son usados incorrectamente

La sedimentación por sí sola no puede eliminar los químicos disueltos en el agua tratada

Fuente: Sustainable Sanitation and Water Management, (2020).

La sedimentación en un sistema de tratamiento de aguas residuales se realiza en estanques, llamados sedimentadores, diseñados y construido generalmente en concreto u hormigón armado, generalmente de forma rectangular con una o más cámaras o secciones internas (Figura 21), pero también se construye de forma circular, cuyo diseño toma en cuenta: el área que constituye la superficie de la unidad, la velocidad de asentamiento de las partículas en proceso de remoción además de la profundidad del sedimentador, así como también la velocidad horizontal, el periodo de retención, los aditamentos de distribución (entrada y salida), y las cargas de salida sobre el vertedero. Por otro parte los sedimentadores forman parte de un ciclo de tratamiento que combina los procesos de sedimentación, coagulación/floculación, filtración, desinfección y almacenamiento. Este proceso se puede hacer llenando las cámaras del estanque y manteniendo el agua en ellos, por un tiempo determinado, sin que se mueva para luego decantar el agua del sedimento (Sustainable Sanitation and Water Management, 2020).

Figura 21.

Estanque Sedimentador de un sistema de Tratamiento de Aguas Residuales.



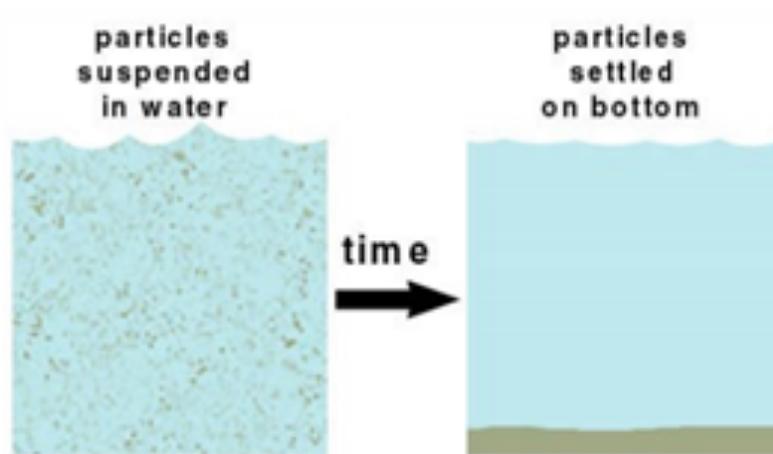
Fuente: Sustainable Sanitation and Water Management, (2020).

Las partículas en suspensión en el agua (Figura 22) tienen diferentes orígenes, cargas eléctricas, composiciones, formas, tamaños y densidades. Gran parte de los sólidos suspendidos en el agua tienen una carga eléctrica negativa, por lo cual, al tener la misma carga eléctrica, estas se repelen cuando se acercan, permaneciendo en suspensión y evitando su agrupación o aglomeración y posterior sedimentación. Las partículas grandes, están bajo la influencia de la gravedad, y con el paso del tiempo se van depositan en el fondo y se pueden remover del agua.

Por otro lado, partículas más pequeñas se logran mantener suspendidas por la acción de fuerzas físicas actuando sobre ellas. Una de estas fuerzas que ejerce un rol dominante en la estabilización del sólido suspendido es resultado de la carga superficial presente en esas partículas. El tiempo de mantenimiento óptimo va a depender de los requisitos de turbidez iniciales y de la calidad del agua para los tratamientos posteriores.

Figura 22.

Proceso de Sedimentación sin Coagulantes.



Fuente: Sustainable Sanitation and Water Management, (2020).

Sin embargo, sólidos muy finos (arcilla) y la mayoría de los virus y bacterias dispersos suelen ser muy pequeños para sedimentar por sedimentación por gravedad. Por esta razón, se usan coagulantes que ayudan a eliminar, de manera efectiva, las partículas que son finas y disminuir el tiempo en la ejecución del proceso de sedimentación. Existen elementos que facilitan el proceso como el uso de semillas de moringa en el tratamiento del agua, consiguiéndose una eficiencia en la reducción de la turbidez del 80% al 99,5%, acompañado de una reducción bacteriana del 90% al 99,99%.

La adición al agua de coagulantes bien sea químicos o naturales puede acelerar la sedimentación de las partículas, entre estos se encuentran el cloruro de polialuminio (PAC), el sulfato de aluminio y el sulfato férrico siendo los productos químicos más comúnmente utilizados para producir la coagulación. Entre los coagulantes naturales más utilizados se encuentran los nopales, las semillas de Moringa y las habas. Existen algunos productos comerciales que ejercen una doble función, ya que contienen coagulantes y desinfectantes. Finalizada la sedimentación, el agua debe ser sometida a un proceso de filtración, la cual puede ser a través de una filtración

lenta de arena, una filtración rápida de arena, entre otras, para eliminar los materiales suspendidos y los patógenos.

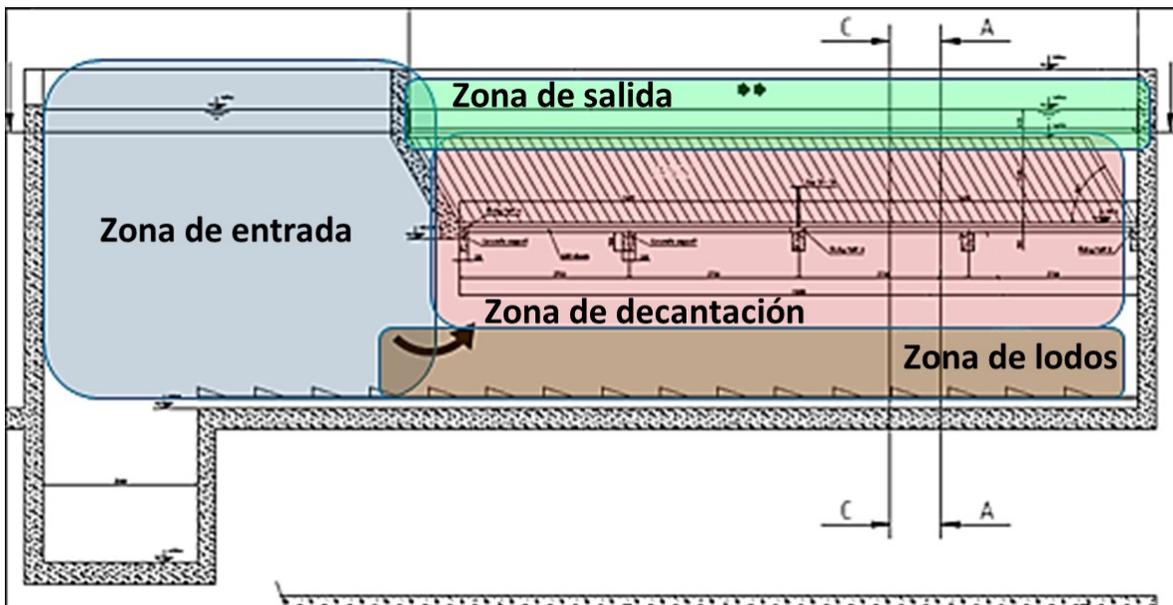
La Organización Panamericana de la salud (OPS) 2005, establece una serie de variables que afectan el proceso de sedimentación como, por ejemplo:

- Corrientes de densidad: son aquellas que se producen dentro del tanque por efecto de las diferencias de densidad en la masa de agua y son ocasionadas por un cambio de temperatura (térmica) y/o por diferencias en la concentración de las partículas suspendidas en las distintas masas de agua (de concentración).
- Corrientes debidas al viento: el viento puede producir corrientes de suficiente intensidad como para inducir cambios en la dirección del flujo.
- Corrientes cinéticas: pueden ser debido al diseño impropio de la zona de entrada o de salida (velocidad de flujo excesiva, zonas muertas, turbulencias) o por obstrucciones en la zona de sedimentación.

Para el diseño del sedimentador se deben tener en cuenta los diversos componentes del mismo, pudiéndose distinguir cuatro partes o zonas (Figura 23) según la OPS (2005).

Figura 23.

Zonas de un sedimentador.



Fuente: OPS, (2005).

De acuerdo a la Figura presentada, las 4 zonas a distinguir son las siguientes:

- Zona de entrada: constituida por una estructura hidráulica de transición, la cual permite una distribución uniforme del flujo dentro del sedimentador.
- Zona de sedimentación: constituida por un canal rectangular con volumen, longitud y condiciones de flujo adecuados para que sedimenten las partículas. La dirección del flujo es horizontal y la velocidad es la misma en todos los puntos, funcionando mediante la variante de flujo pistón.
- Zona de salida: constituida por un vertedero, canaletas o tubos con perforaciones que tienen la finalidad recolectar el efluente sin perturbar la sedimentación de las partículas.
- Zona de recolección de lodos: constituida por una tolva con capacidad para depositar los lodos sedimentados, y una tubería y válvula para su evacuación periódica.

Entre los criterios para el diseño de un sedimentador (OPS, 200) se tiene:

- El periodo de diseño, teniendo en cuenta criterios económicos y técnicos es de 8 a 16 años.
- El número de unidades mínimas en paralelo es de dos (2) para efectos de mantenimiento.
- El periodo de operación es de 24 horas por día.
- El tiempo de retención será entre 2 - 6 horas.
- La carga superficial será entre los valores de 2 - 10 m³ /m² /día.
- La profundidad del sedimentador será entre 1,5 – 2,5 m.
- La relación de las dimensiones de largo y ancho (L/B) será entre los valores de 3 - 6.
- La relación de las dimensiones de largo y profundidad (L/H) será entre los valores de 5 - 20.
- El fondo de la unidad debe tener una pendiente entre 5 a 10% para facilitar el deslizamiento del sedimento.
- La velocidad en los orificios no debe ser mayor a 0,15 m/seg para no crear perturbaciones dentro de la zona de sedimentación.
- Se debe aboquillar los orificios en un ángulo de 15° en el sentido del flujo.
- La descarga de lodos se debe ubicar en el primer tercio de la unidad, pues el 80% del volumen de los lodos se deposita en esa zona.
- Se debe efectuar experimentalmente la determinación del volumen máximo que se va a producir.
- El caudal por metro lineal de recolección en la zona de salida debe ser igual o inferior a 3 L/seg.
- Se debe guardar la relación de las velocidades de flujo y las dimensiones de largo y altura

$$\frac{L}{H} = \frac{V_H}{V_s}$$

- La sección de la compuerta de la evacuación de lodos (A_2) debe mantener la relación.

$$A_2 = \frac{A_s \times \sqrt{H}}{4850 \times t}$$

Donde t es el

- La ubicación de la pantalla difusora debe ser entre 0,7 a 1,00 m de distancia de la pared de entrada.
- Los orificios más altos de la pared difusora deben estar a 1/5 o 1/6 de la altura (H) a partir de la superficie del agua y los más bajos entre 1/4 ó 1/5 de la altura (H) a partir de la superficie del fondo.

2.2 Coagulación - Flocculación

Estos son procesos que se aplican comúnmente en plantas de tratamientos de aguas residuales tanto por su facilidad operativa como por su costo bajo. Básicamente se trata de la adición de agentes coagulantes químicos que provocan la desestabilización eléctrica de las partículas, a la vez que cancelan sus cargas eléctricas, generando una compresión de las capas difusas que se encuentra alrededor de los coloides; para luego formar aglomeraciones llamadas flóculos (Ávila & Rodríguez, 2020).

Los coagulantes son compuestos químicos que cuando son adicionados a las aguas, producen una reacción química con los componentes del agua, para formar un precipitado de gran volumen y muy absorbente, que generalmente está conformado por el hidróxido metálico del coagulante usado.

Entre los coagulantes más utilizados para la desestabilización de las partículas y la producción del flóculo se encuentran el sulfato de aluminio, el cloruro de aluminio, el sulfato férrico, el aluminato de sodio, el cloruro férrico, el sulfato férrico, el sulfato ferroso y como ayudantes de flocculación, los polielectrolitos. Entre estos, los más utilizados son las sales de aluminio y de hierro, que al ser adicionados al agua producen reacciones complejas y forman precipitados (Andía, 2000).

Principios de la coagulación - floculación

Un coloide se refiere a una suspensión de estabilidad alta, la cual es difícilmente sedimentable y causa turbiedad y color en las aguas residuales. Presenta un tamaño menor respecto a otras partículas que están presentes en el agua y para lograr desestabilizarla y anular su carga eléctrica se debe adicionar un coagulante que produzca una nube iónica alrededor del coloide que la neutralice y esta pueda aglutinarse formando flóculos (Ávila & Rodríguez, 2020).

Mecanismos de coagulación - floculación

La coagulación puede producirse por 4 mecanismos fisicoquímicos diferentes, los cuales de acuerdo a Andía (2000), son los siguientes:

- Absorción y neutralización de cargas: mecanismo que ocurre cuando se adiciona en exceso el coagulante, que por lo general es inorgánico, las cargas se invierten y la partícula se reestabiliza, pues originalmente son cargas negativas y atraen cargas positivas, que se adhieren a la capa del coloide.
- Captura de precipitado (barrido): al adicionar agentes coagulantes a aguas con baja turbiedad, el coagulante “atrapa” el coloide formando una red de tres dimensiones y formando flóculos. Para aguas con turbiedad alta se debe adicionar mayor concentración del agente coagulante.
- Adsorción y puente entre partículas: al utilizar como coagulantes polímeros de gran peso molecular, estas interactúan con la superficie coloidal (adsorción). El polímero forma un puente con el coloide, pues por su gran tamaño puede llegar a absorber varias partículas.
- Compresión por doble capa: cuando dos partículas semejantes se aproximan, se produce una fuerza de repulsión con un potencial de difusión que va a depender de la distancia que las separa, al adicionar un coagulante esta fuerza disminuye por la atracción que ejercen las cargas opuestas que este proporciona, llamadas Fuerzas de Van Der Waals, que dependen de la partícula, de la densidad y de los átomos.

Tipos de floculación

- Pericinéctica: la cual se produce por el movimiento de las moléculas de agua, que a su vez es inducido por la energía térmica, también es conocido como movimiento browniano.
- Ortocinéctica: ocurre gracias a la colisión de las partículas, que es causada por el movimiento del agua e inducida por energías externas al agua de origen mecánico o hidráulico (Andía, 2000).

Factores que influyen en la coagulación - floculación

Con la intención de optimizar la coagulación, se deben considerar los factores como el pH, la turbiedad, el color, las sales disueltas, la temperatura del efluente, las condiciones y tipos de mezcla, el coagulante y los sistemas para la dosificación del coagulante, pues la interrelación entre estos permite predecir la dosificación adecuada de los coagulantes que deben ser adicionados al agua (Andía, 2000).

Usos principales del proceso de coagulación y floculación

Generalmente, estos procesos son utilizados para propiciar la sedimentación de partículas coloidales que son difíciles de filtrar durante el tratamiento de las aguas, para eliminar la turbidez del agua, la cual causa una gran dificultad al momento de remover sustancias orgánicas e inorgánicas; además, se elimina el color y facilita la eliminación de sustancias tóxicas y de los organismos patógenos, realizando esta remoción en un menor tiempo (Ávila & Rodríguez, 2020).

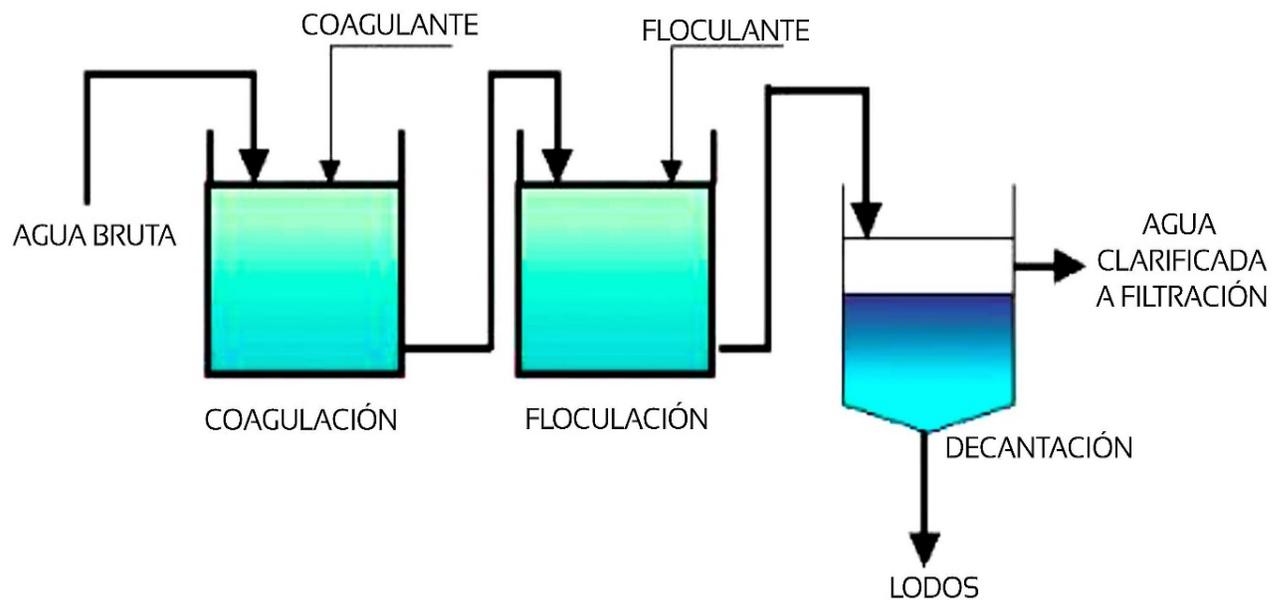
Equipos de coagulación – floculación

El proceso de coagulación-floculación debe ser realizado en tanques que posean equipos de agitación, considerando que inicialmente para la coagulación se necesita una agitación o mezcla rápida a fin de lograr la dispersión adecuada del coagulante en el agua y así propiciar la colisión entre partículas. Un exceso de agitación no afectará la coagulación, pero con una mezcla insuficiente la coagulación será incompleta, generalmente el tiempo de coagulación es de 1 a 3 minutos

Seguidamente, en un tanque que también posea equipo de agitación pero que gire lentamente para no romper los micro flóculos, sino para propiciar que estos aumenten de tamaño. Una vez que los flóculos hayan alcanzado la resistencia y el tamaño óptimo, el agua estará lista para la separación por sedimentación, flotación o filtración. En aguas residuales con alta carga, este proceso puede durar hasta 5 minutos (Figura 24).

Figura 24.

Disposición adecuada de equipos para la coagulación – floculación.



Fuente: <http://www.elaguapotable.com/coagulacion-floculacion.htm>

En este tanque de floculación también se puede llevar a cabo la decantación, o bien puede realizarse en un tanque exclusivo para este fin, tal como se puede apreciar en la Figura 24 la disposición óptima de equipos para el proceso de coagulación - floculación (Degrémont, 1979). Tal como se planteó, la finalidad de este tratamiento es eliminar los sólidos en suspensión, a través de procesos de sedimentación simple por gravedad o asistida por sustancias químicas. Los agentes químicos más empleados son los compuestos de aluminio, polielectrolitos floculantes y sales de hierro para completar el proceso. Logrando la precipitación de los sólidos en estado de coloides hasta en un 70% o en suspensión muy finos. Este proceso es reconocido como un tratamiento mecánico.

CAPITULO VI

TRATAMIENTO SECUNDARIO APLICADO A LAS AGUAS RESIDUALES

1. Introducción

En las últimas décadas, se han desarrollado diversos procesos físicos, químicos y biológicos para la depuración de las aguas residuales, sin embargo, los tratamientos biológicos son preferidos en la medida que sea posible su aplicación, puesto que ofrecen excelentes rendimientos y sus costos de operación y mantenimiento suelen ser menores a otros tipos de tratamientos. Su efectividad se basa en la capacidad que tienen de degradar por completo los contaminantes presentes en el agua residual, para transformarlos en sustancias inocuas y muchas veces aprovechables (Arnáiz et al, 2000).

Según la composición de las aguas residuales, su depuración va a requerir de tratamientos primarios, secundarios y hasta terciarios y según el objetivo que se busque va a depender el tipo de tratamiento a utilizar, ya que para el caso de aguas residuales domésticas, lo que se busca es reducir la cantidad de materia orgánica presente y para aguas residuales de origen industrial, el objetivo es reducir la cantidad de compuestos tanto orgánicos como inorgánicos presentes, las cuales generalmente van a requerir de un tratamiento previo para eliminar compuestos tóxicos para los microorganismos encargados de depurar las aguas.

El objetivo del tratamiento biológico de las aguas residuales, es la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales no sedimentables y la estabilización de la materia orgánica presente, para lo que se requiere de bacterias que son las responsables de descomponer esta materia orgánica que puede llegar a ser muy alta, pero para que el tratamiento biológico sea efectivo, se requiere que exista la cantidad de nutrientes necesaria, además de la presencia de otros factores que intervienen en la biología del proceso (Yara 2023).

Para que el sistema trabaje correctamente la cantidad de nutrientes (nitrógeno y fósforo), no debe ser ni muy baja ni muy alta, ya que en ambos casos representa un problema. Una concentración deficiente de estos nutrientes, no ofrece una depuración de calidad del agua, además de fomentar el crecimiento de bacterias no deseadas, puede ocurrir la hidrólisis de lodo, el arranque del proceso tomará más tiempo y en los sistemas anaeróbicos la producción de biogás será menor. Por el contrario, un exceso de nutrientes ocasiona un crecimiento biológico no deseado, mayor producción de lodo, ocurre una absorción excesiva de fósforo y representa mayores costes químicos (Yara, 2023).

Resulta muy importante considerar el diseño bien pensado de estos procesos biológicos, con el fin de lograr un tratamiento efectivo de las aguas residuales, considerando factores importantes como el caudal a tratar, el pH, la temperatura, factores ambientales en el caso del lagunaje, contenido de carga orgánica, composición del lecho (filtro percolador), velocidad de rotación (en caso de los biodiscos), sustancias tóxicas que degraden los lodos (lodos anaerobios), entre otros, ya que como se verá más adelante, algunos de estos procesos de tratamiento no admiten modificaciones de las variables una vez diseñados.

En el presente capítulo se describirán los principales tratamientos biológicos utilizados en el proceso de depuración de las aguas residuales, dependiendo de su clasificación (aerobios o anaerobios), detallando cada uno de estos procesos, indicando su objetivo, origen, equipos utilizados, ventajas y desventajas que ofrecen cada uno de estos tratamientos.

2. Tratamiento biológico o secundario aplicado a las aguas residuales

El tratamiento biológico o secundario para aguas residuales, consiste en la eliminación de nutrientes y materia orgánica, ya que estas suelen contener elementos considerados contaminantes, los cuales pueden estar suspendidos o disueltos. Este tratamiento se realiza por medio de unos procesos que emplean microorganismos para eliminar componentes que tienen un alto porcentaje de solubilidad en el agua, siendo la clave de estos procesos, la capacidad que tienen los microorganismos de consumir la materia orgánica y los nutrientes como nitrógeno y fósforo, presentes en el agua residual. Este tipo de tratamiento es uno de los más comunes debido a su bajo costo, fácil aplicación y efectividad (Telwesa, 2021).

En un inicio, este tipo de tratamiento, solo tenía como objetivo la remoción de la materia orgánica de las aguas residuales, con los años, sus aplicaciones abarcan otros usos como la nitrificación, desnitrificación o eliminación de fósforo. Todas las reacciones que ocurren en los tratamientos biológicos están asociadas a organismos vivos que se desarrollan por medio de los contaminantes del agua, la cual utilizan como fuente de energía, transformándolos en biomasa (nuevos microorganismos), dióxido de carbono y otros compuestos. A esta fuente de energía presente en las aguas a depurar se le denomina sustrato y el consumo de sustrato se relaciona directamente con la cantidad de biomasa generada en estos procesos (Ferrer et al, 2008).

Estos microorganismos responsables del tratamiento biológico de las aguas, se pueden clasificar en autótrofos y heterótrofos. Siendo los autótrofos aquellos que son capaces de sintetizar la materia orgánica presente a partir de sustancias minerales y los heterótrofos son aquellos organismos que requieren de la materia orgánica para su desarrollo y mantenimiento. Adicionalmente, estos microorganismos se pueden clasificar en aerobios, anaerobios y facultativos. Los aerobios solo utilizan oxígeno, en cambio, los anaerobios solo pueden reproducirse en condiciones de ausencia de oxígeno molecular y los facultativos utilizan el

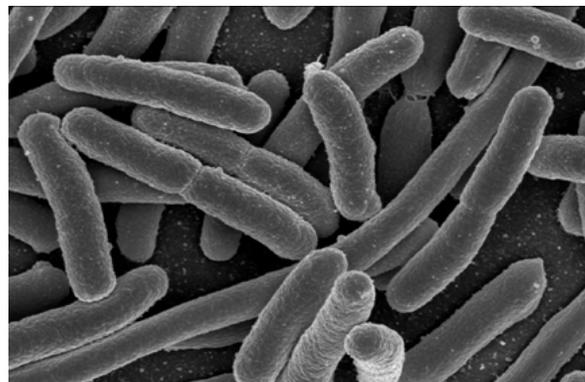
oxígeno cuando está presente, pero también pueden utilizar otro aceptor de electrones en ausencia del mismo.

A continuación, se describen los microorganismos utilizados en la depuración de aguas residuales mediante tratamientos biológicos:

- 1) Bacterias: estas pueden ser autótrofas o heterótrofas e intervienen en diversos procesos de depuración, siendo el más importante el de eliminación de materia orgánica vía aerobia, sin embargo, también intervienen en procesos de descomposición anaerobia, en los de desnitrificación, nitrificación y acumulación de fósforo en sistemas de eliminación de nutrientes en plantas de lodos activados, en los cuales constituyen más del 90% de la biomasa. En su forma aislada, las bacterias son muy pequeñas, imposibilitando separarlas del agua tratada, pero bajo condiciones adecuadas, las bacterias se desarrollan formando flóculos, que sedimentan y en este punto sí es posible separarlas en los procesos de lodos activados. Es importante destacar que, en los procesos de tratamiento biológico, hay bacterias que podrían ocasionar problemas operacionales ya que, en lugar de formar flóculos, desarrollan filamentos que dificultan la sedimentación. También hay algunas bacterias que generan la formación de grandes cantidades de espuma en los equipos del sistema de tratamiento (Figura 25).

Figura 25.

Bacterias removedores de materia orgánica



Fuente: <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2008/11/28/108008>

2) Protozoos: estos son microorganismos heterótrofos que viven en su mayoría libremente en la naturaleza, sin embargo, algunas especies pueden ser parásitas. Generalmente, son organismos aerobios o anaerobios facultativos, aunque se han encontrado algunos tipos anaerobios. Se alimentan de bacterias, de otros microorganismos o de la materia orgánica disuelta sin competir con las bacterias por el sustrato soluble, por lo que constituyen un pequeño porcentaje de la biomasa generada en los fangos activados. Son muy necesarios para la eliminación de coliformes y patógenos, para la clarificación del efluente y como contribución en el proceso de floculación de la biomasa. Los protozoos se clasifican en cuatro grupos básicos: (Figura 26)

- ✓ Los flagelos son largos filamentos que se mueven a modo de látigo.
- ✓ Los seudópodos son prolongaciones del citoplasma.
- ✓ Los cilios son filamentos cortos y muy numerosos que se agitan.
- ✓ Las amebas.

Figura 26.

Protozoos



Fuente: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/protozoos.asp

3. Hongos: la gran mayoría de estos microorganismos son aerobios estrictos, resisten valores de pH bajos y sus requerimientos de nitrógeno son más bajos que lo de las bacterias. Aunque pueden consumir materia orgánica disuelta, no compiten con las bacterias en los sistemas de cultivo en suspensión. En ciertas condiciones proliferan generando fangos con deficientes cualidades de sedimentación, su presencia es más frecuentes en sistemas de cultivo fijo donde conforman gran parte de la biomasa (Figura 27).

Figura 27.

Hongos de importancia en las aguas residuales

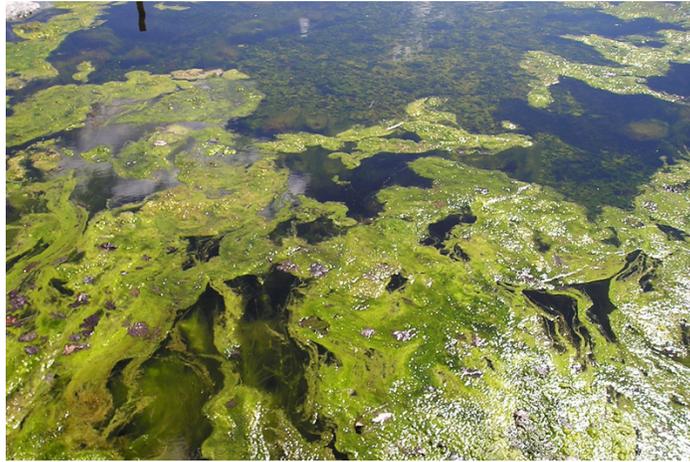


Fuente: <https://ecohabitar.org/los-hongos-son-capaces-de-limpiar-aguas-contaminadas-por-minas-de-carbon/>

4. Algas: son organismos fotosintéticos, la mayoría, unicelulares. Su uso en los procesos de tratamiento biológico no es tanto por su capacidad de depurar, sino como fuente de oxígeno en sistemas extensivos, por lo que no disminuyen el contenido en materia orgánica (Figura 28)

Figura 28.

Presencia de algas en las aguas



Fuente: <https://bmproyectosysoluciones.wordpress.com/2020/01/06/algas-mejoran-el-proceso-de-tratamiento-de-las-aguas-residuales/>

5. Rotíferos: son organismos aerobios y multicelulares modificados con un aparato rotador, que emplean para atrapar alimentos. Ejercen una acción predatoria sobre el resto de los organismos presentes en el medio (Figura 29).

Figura 29.

Rotíferos



Fuente: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Investigan-nuevos-nematodos-presentes-en-aguas-depuradas>

6. Nemátodos: al igual que los rotíferos, actúan como predadores de organismos inferiores y en los procesos de lodos activados constituyen la cima de la pirámide trófica (Figura 30)

Figura 30.

Nematodos



Fuente: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Investigan-nuevos-nematodos-presentes-en-aguas-depuradas>.

3. Clasificación de los tratamientos biológicos

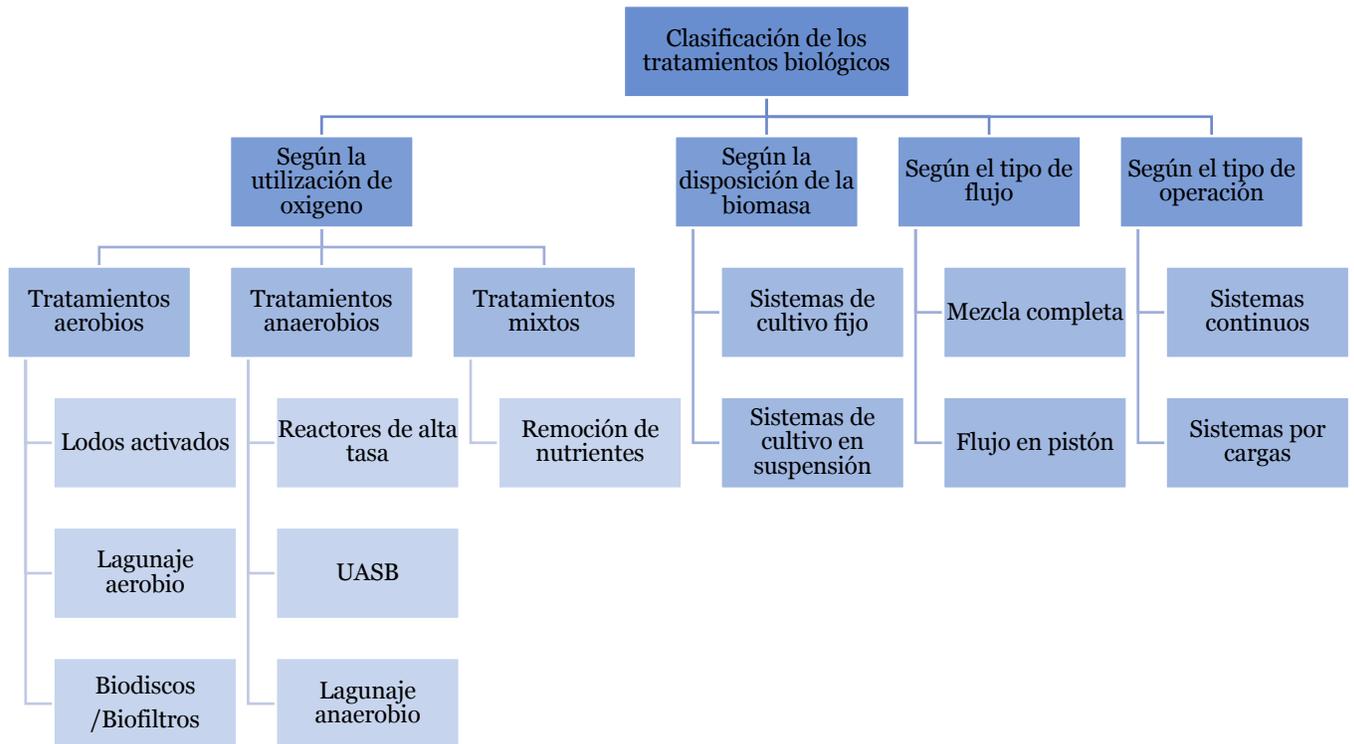
Los tratamientos secundarios tienen varias clasificaciones y una de ellas es que pueden subdividirse en 3 categorías:

- Tratamientos biológicos de tipo natural: son aquellos tratamientos secundarios de agua cuyos requerimientos mecánicos y de instalación son mínimos.
- Tratamientos biológicos de instalación: son aquellos tratamientos secundarios de agua que conllevan unos equipos de operación y que requieren de unas instalaciones adecuadas.
- Tratamientos de separación de sólidos suspendidos de naturaleza biológica: son aquellos tratamientos que se aplican para el procesado de los residuos obtenidos en la depuración de las aguas residuales.

En la figura que se muestra a continuación se presenta la clasificación de los tratamientos biológicos:

Figura 31.

Clasificación de los tratamientos biológicos



Fuente: Elaboración propia (2023).

Detalladamente los tratamientos biológicos aplicados a las aguas residuales se pueden clasificar según la utilización de oxígeno en:

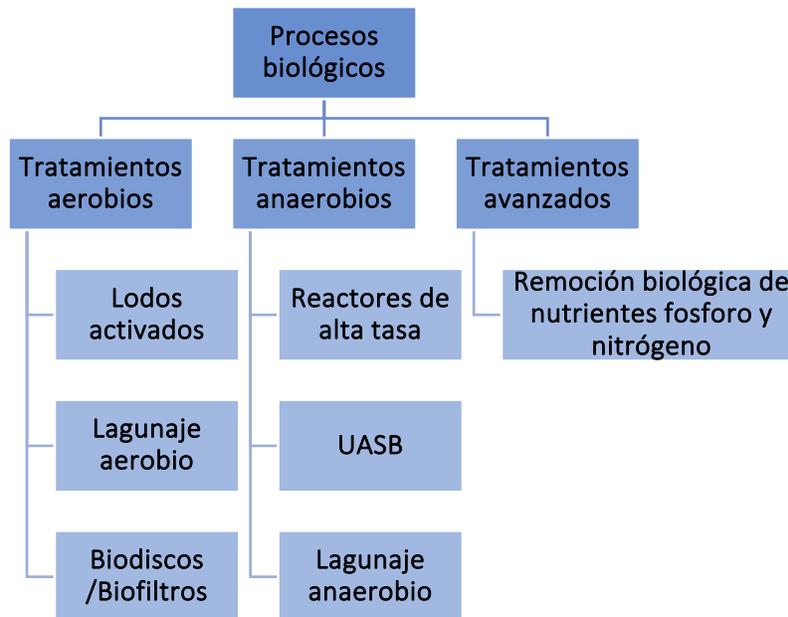
- **Tratamientos aerobios:** los microorganismos obtienen su energía (catabolismo) oxidando sustancias, predominantemente orgánicas, en presencia de oxígeno.
- **Tratamientos anaerobios:** es un proceso microbiológico que se desarrolla en ausencia de oxígeno disuelto. Consiste en una descomposición de la materia orgánica, que genera como productos finales un gas de alto contenido energético (biogás) y un lodo residual.

- **Tratamientos combinados:** son denominados tratamientos mixtos ya que combinan los procesos aerobios con los anaerobios. En este tipo de tratamientos los organismos responsables de la remoción de los contaminantes pueden funcionar en presencia o ausencia de oxígeno y son llamados organismos facultativos.

Los tratamientos biológicos para las aguas residuales, se pueden dividir en procesos aerobios y procesos anaerobios, tal como se muestra en la Figura 32.

Figura 32.

Clasificación de los tratamientos biológicos de aguas residuales



Fuente: Elaboración propia, (2023).

Los sistemas más extendidos son los aerobios porque depuran más rápidamente el agua residual. Esto es así debido a que el rendimiento energético que obtienen los microorganismos en el proceso bioquímico de oxidación anaeróbica es más bajo que el que se logra por el proceso aerobio; por ello, la tasa de reproducción de las bacterias anaeróbicas, y por extensión la masa celular originada es inferior, lo que se traduce en una menor velocidad de tratamiento del agua residual. Además, la puesta en marcha de los sistemas anaerobios es muy lenta y delicada (es difícil eliminar todo el oxígeno, resulta complicado lograr el muy bajo potencial redox requerido) y los efluentes que se obtienen deben someterse a un postratamiento que acabe de degradar la materia orgánica presente y también conseguir la desnitrificación cuando sea necesaria (Metcalf & Eddy, 1995).

3.1 Tratamientos aerobios aplicados a las aguas residuales

Los tratamientos aplicados inicialmente a las aguas residuales van dejando restos de partículas sólidas que no logran ser retiradas y que deben eliminarse durante los tratamientos secundarios, además de, la materia orgánica disuelta. Esto se logra aplicando en la etapa secundaria del tratamiento, procesos biológicos de depuración aerobia, los cuales están definidos como los procesos de degradación realizados por microorganismos en presencia de oxígeno, que actúan transformando la materia orgánica e inorgánica que se encuentra en el agua residual bien sea disuelta, suspendida o coloidal, en gases y material celular que puede luego ser separado por sedimentación de forma fácil.

Es decir que, los objetivos principales del tratamiento aerobio son la transformación de la materia orgánica, la coagulación y la eliminación de los sólidos no sedimentables coloidales, logrando también, en casos particulares, la eliminación del nitrógeno y el fósforo y la disminución de los microorganismos fecales y patógenos que puedan estar presentes en las aguas residuales.

Los tratamientos biológicos aerobios son los tratamientos secundarios más comúnmente utilizados para reducir la contaminación por materia orgánica presente en las aguas residuales. Puede ser aplicado por distintos procedimientos,

empleando para esto lechos bacterianos, lodos activados y percoladores. Cuando las fuentes de las aguas residuales son pequeñas son utilizadas las llamadas tecnologías blandas, entre las que se encuentran las lagunas aerobias, los filtros verdes, los lechos de turba y los contractores biológicos giratorios.

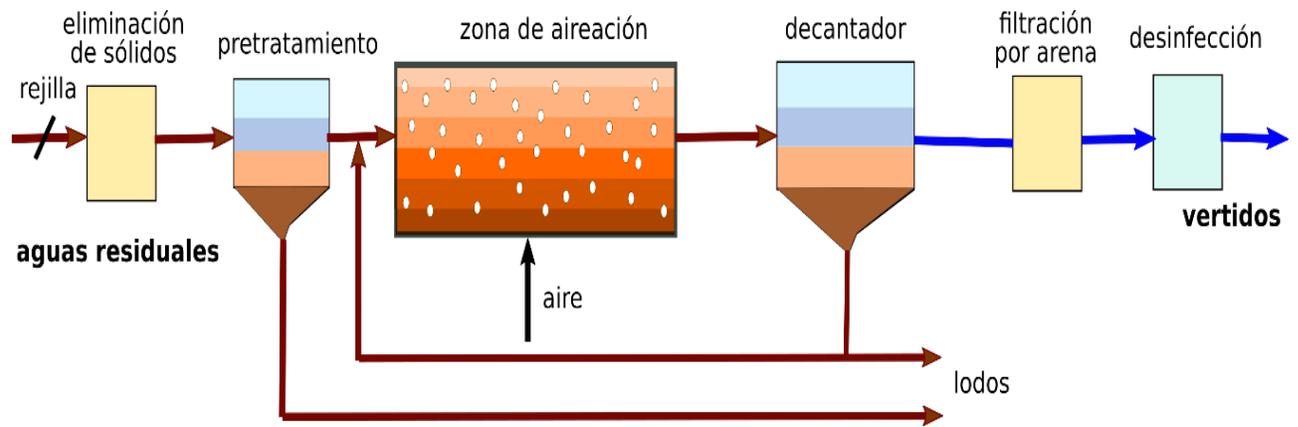
En un sistema aerobio para el tratamiento de aguas residuales, hay una etapa previa que se encarga de eliminar las materias sólidas no biodegradables antes de iniciar el tratamiento. Luego, hay una etapa de aireación donde el trabajo lo realizan los microorganismos que comienzan la degradación de la materia orgánica a compuestos más simples, para luego separar por decantación los lodos formados, en algunos casos se hace recircular esta agua para optimizar el proceso de depuración y evacuar el exceso de lodos, para finalmente desinfectar el agua clarificada (Acuatecnica, 2019).

Los principales procesos aerobios que se utilizan para el tratamiento biológico de las aguas residuales se describen a continuación:

- 1) Lodos activados: su principal objetivo es disminuir el contenido de materia orgánica en el agua residual y con ello su volumen, además de descomponer la materia orgánica en compuestos orgánicos más estables y en compuestos inorgánicos (digestión). Son una mezcla de aguas residuales y microorganismos la cual, por medio de la aireación, absorbe el oxígeno y se eliminan contaminantes, simulando las reacciones biológicas que se producen en los cuerpos de agua receptores. En los procesos de tratamiento que utilizan lodos activados, el cultivo de bacterias está disperso en forma de flóculos dentro de un reactor biológico, que no es más que un depósito donde hay agitación y aireación, en el cual las bacterias consumen la materia orgánica presente en el agua residual. La aireación es necesaria, ya que proporciona el oxígeno requerido por las bacterias aerobias para poder metabolizar el sustrato (Figura 33).

Figura 33.

Sistema de tratamiento de aguas residuales

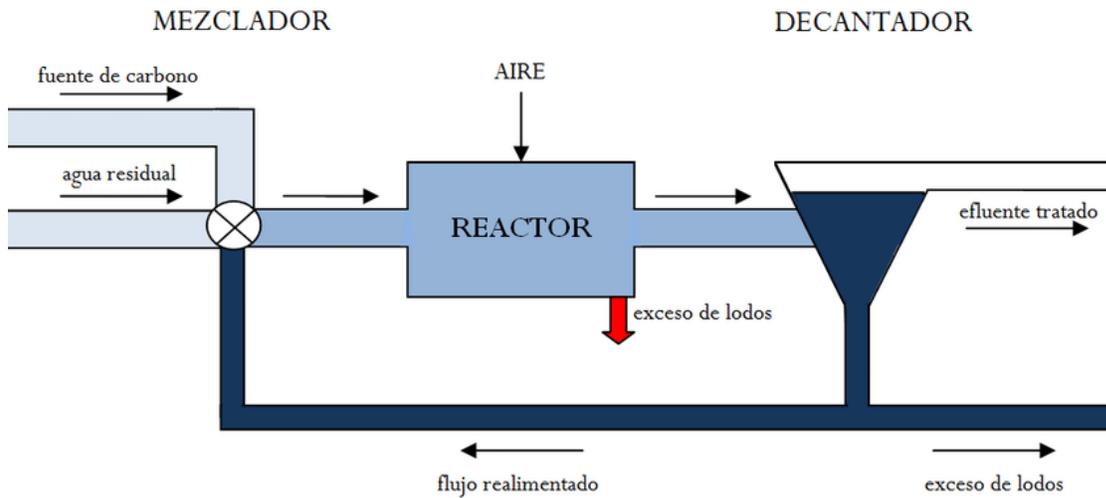


Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-del-proceso-de-lodos-activados_fig1_305851565

Tras un determinado tiempo de contacto entre el lodo activado y el agua tratada, este licor de mezcla se conduce a un decantador o clarificador donde ocurre la separación del agua depurada de los fangos, los cuales son devueltos al reactor biológico (Figura 34).

Figura 34.

Proceso de lodos activados



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-del-proceso-de-lodos-activados_fig1_305851565

Este tipo de tratamiento tiene su origen en Inglaterra, en 1914 y se utiliza para tratar aguas residuales de origen municipal o industrial, para su operatividad requiere de los siguientes componentes: reactor biológico, tanque de sedimentación, sistema de recirculación y tubería de desecho.

- El reactor biológico constituye el primer paso del proceso biológico, donde el agua residual entra en contacto con los lodos activados gracias a la agitación, de esta manera los microorganismos se mezclan con el líquido y se inicia la oxidación de la materia orgánica presente, para ello se inyecta constantemente oxígeno para activar a las bacterias, la fuente de aireación puede ser por medio de un soplador con difusores, sistemas de aireación mecánica o inyectando oxígeno puro.
- En el tanque de sedimentación ocurre la separación de los sólidos biológicos suspendidos en el agua tratada.

- El sistema de recirculación se encarga de regresar al reactor biológico una parte de los sedimentos con el fin de mantener la concentración de los microorganismos, este sistema está compuesto por tuberías y bomba.
- Finalmente, la tubería de desecho se encarga de purgar los lodos que no son recirculados al reactor biológico. Dado que los microorganismos se reproducen, los lodos activados crecen, por lo que es necesario eliminar una parte para mantener la concentración adecuada en el reactor biológico, este procedimiento se denomina purga (Mendoza et al, 2012).

Este tipo de tratamiento tiene como ventaja que ofrece excelentes resultados al remover hasta el 85% de DBO y sólidos suspendidos, además, en un sistema de lodos activados, el agua no se desperdicia en ningún momento, ya que por un lado está el agua que es depurada completamente y que puede ser utilizada para actividades de la empresa o comunidad donde se tenga el sistema y por otro está el agua que se vuelve a utilizar dentro del mismo tratamiento para la generación de los lodos. Sin embargo, el agua residual a tratar en este tipo de procesos requiere un tratamiento previo y no excluye cantidades significativas de fósforo, metales pesados, compuestos orgánicos no biodegradables, bacterias ni virus.

Otras potenciales desventajas que pueden presentar los sistemas de lodos activados tienen que ver con parámetros operacionales y de diseño, por ejemplo, el tiempo de retención hidráulica puede demorar hasta varios días para poder obtener buenos resultados en el tratamiento, por otro lado, en los procesos biológicos, la idea es maximizar el tiempo que el lodo pasa en el sistema y en este tipo de procesos, los tiempos de retención de los lodos, suele ser bajo. Otro parámetro es el tamaño, puesto que los reactores biológicos tienden a ser bastante grandes, ocupando gran espacio de terreno. En cuanto al volumen y características de agua a tratar, se tiene que, si ocurre alguna variación, puede provocar que la calidad del tratamiento disminuya o se altere, por lo que, si se decide comenzar a tratar aguas de una nueva fuente, lo más probable es que se deba rediseñar el sistema.

También hay que considerar el costo de eliminar el lodo sobrante, ya que, a mayor cantidad de lodos a desechar, mayor será el costo asociado a la eliminación. En la etapa de sedimentación, puede darse que los sólidos no se compacten adecuadamente, quedando el lodo con alto contenido de agua y el sobrenadante con mayor turbidez de la deseada y finalmente, no hay que dejar de lado el factor humano, ya que este tipo de sistemas requiere supervisar parámetros que van más allá de una simple medición de pH o detectar fallas mecánicas, este tipo de proceso requiere operadores altamente calificados que puedan constatar la eficiencia de las bacterias y los protozoos en el lodo con el fin de evitar alteraciones en el proceso (Génesis Water Tech, 2019).

2) Reactor biológico por carga secuencia (SBR)

El reactor por carga secuencial (*Sequencing Batch Reactor*, SBR) es un sistema de lodos activados para tratamiento del agua residual que utiliza ciclos de llenado y descarga. En este sistema el agua residual entra en una tanda a un reactor único, recibe tratamiento para remover componentes indeseables y luego se descarga. La homogenización de caudales, la aireación y la sedimentación se logran en ese reactor único. Para optimizar el desempeño del sistema, se utilizan dos o más reactores en una secuencia de operación predeterminada.

Los sistemas SBR han sido utilizados con éxito para tratar aguas residuales tanto municipales como industriales. Estos sistemas son especialmente efectivos para aplicaciones de tratamiento de agua residual caracterizadas por caudales reducidos o intermitentes (EPA, 2000).

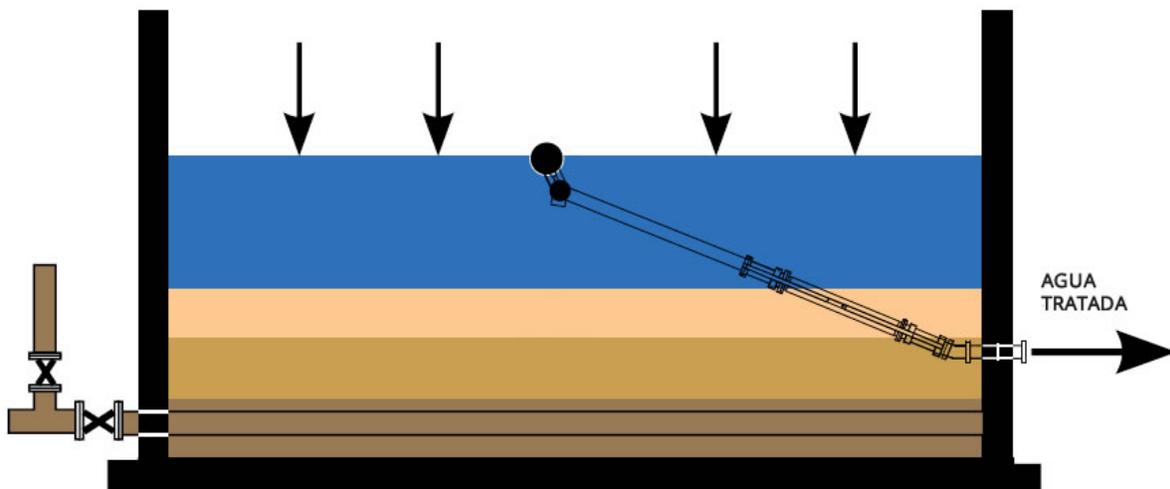
Los SBR son simplemente sistemas de lodos activados que operan “en el tiempo en lugar del espacio”. La diferencia entre las dos tecnologías es que los SBR logran la homogeneización de caudales, el tratamiento biológico y la sedimentación en un tanque único usando una secuencia de tiempo controlada. Este tipo de reactor realiza también, en algunos casos, la sedimentación. En un sistema convencional de lodos activados estos procesos serían realizados en tanques separados (EPA, 1999).

En un reactor discontinuo secuencial SBR o reactor por carga secuencial, los procesos unitarios que intervienen son idénticos a los de un proceso convencional de lodos activados. En ambos sistemas intervienen la aireación y la sedimentación-clarificación. No obstante, existe entre ambos una importante diferencia. En las plantas convencionales, los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, mientras que, en los SBR, los procesos tienen lugar en el mismo tanque (Metcalf & Eddy, 1995).

Cabe decir que los procesos de lodos activados secuenciados (llenado, reacción, sedimentación, vaciado) no son nuevos. A principios del siglo XX se estudiaron ya estos procesos, que ayudaron a conocer mejor el proceso de fangos activos. Concretamente fueron Arden y Lockett (1914) y Mohlmann (1917) los que desarrollaron el proceso de fangos activos partiendo de procesos secuenciados.

Figura 35.

Reactor biológico por carga secuencial (SBR)



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Eschema-del-proceso-de-lodos-activados_fig1_305851565

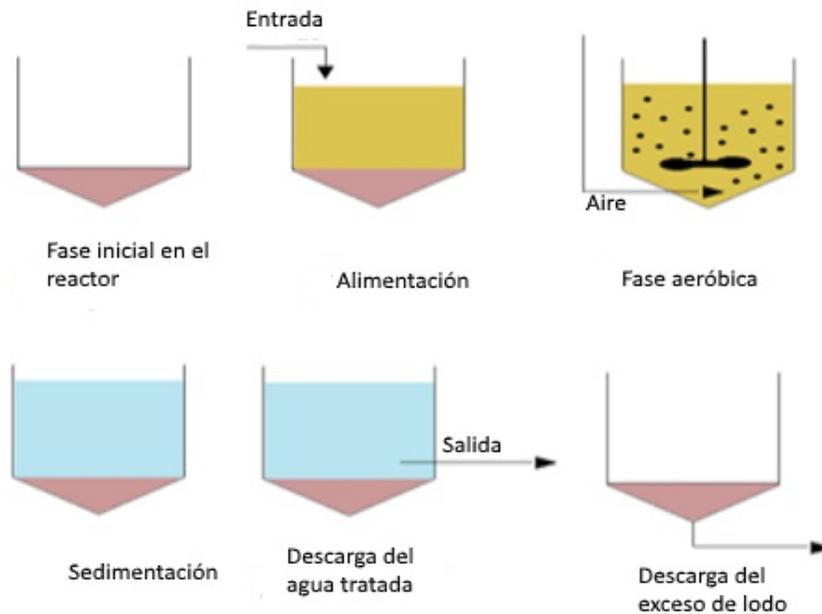
Sin embargo, en aquellos años el proceso continuo era más fácil de operar, puesto que una operación secuenciada requiere de instrumentos de control de los que no se disponía en aquella época. Además, la preocupación era la eliminación de únicamente la materia carbonosa contenida en el agua residual, por lo que no se tenían que establecer diferentes condiciones (aerobias, anóxicas, anaerobias) como ocurre en el caso de la eliminación de nutrientes. Han sido, por tanto, las nuevas técnicas de control de procesos, la necesidad de eliminar nutrientes y la aparición masiva de problemas de operación en el proceso continuo (mala decantación del lodo) los desencadenantes de que se despertara el interés de nuevo por el proceso secuenciado. Se puede decir que entre las décadas de los 70 y 80 se volvió a plantear la tecnología SBR, siendo los profesores Peter Wilderer y Robert Irvine, junto con el Doctor Mervyn Goronzy, los responsables de los desarrollos más importantes de dicha tecnología.

Funcionamiento del SBR

Anteriormente se comentó que el SBR no es un proceso continuo, sino que opera periódicamente. Durante este estudio llamaremos fases a cada una de las etapas de las que consta un ciclo. Las fases de las que se compone un ciclo son: llenado, reacción, sedimentación y vaciado como se muestran en la Figura 36.

Figura 36.

Esquema básico de un ciclo en un reactor por carga secuencial.



Fuente: Freytez et al. (2019).

Descripción de cada fase:

- **Llenado:** es la fase en la cual se introduce en el reactor un nuevo volumen de agua residual. El llenado puede ser estático (sin agitación ni aireación) o con agitación.
- **Reacción:** el contenido del reactor es homogéneamente mezclado. Esto se puede conseguir mediante agitador mecánico sumergido (agita, pero no airea) o mediante aireación por difusores o eyectores. La fase de reacción se puede subdividir en sucesivas fases de agitación y de aireación en función de los objetivos perseguidos (eliminación de materia orgánica, eliminación conjunta de materias orgánicas y nutrientes).
- **Sedimentación:** en esta fase se detienen la agitación y la aireación, estando cerradas también las válvulas de entrada y salida del reactor. El reactor actuará de decantador, observándose una zona de agua clarificada y otra de fangos.

- **Vaciado:** parte del agua clarificada es retirada del reactor y se realiza la purga del exceso de lodos.

Además de estas fases, en función del tipo de instalación es posible realizar una fase de reposo tras el vaciado antes de que comience un nuevo ciclo de operación. Por otra parte, al igual que en el proceso convencional de lodos activados se tendrá que efectuar una purga periódica de fango en exceso, debido a las reacciones anabólicas de los microorganismos del lodo activado. El hecho de someter a la biomasa a fases en las que hay mucho sustrato para inmediatamente después someterla a una fase con muy poco sustrato, hace que las bacterias filamentosas tengan menor oportunidad de supervivencia en la biomasa, de forma que el proceso tiene menos problemas en la fase de sedimentación.

Ventajas y desventajas de los sistemas SBR

Algunas de las ventajas y desventajas de los sistemas SBR se enumeran a continuación:

Ventajas

- La homogeneización de caudales, la sedimentación primaria (en la mayoría de los casos), el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria pueden lograrse en un tanque reactor único.
- Flexibilidad de operación y control.
- Área superficial mínima.
- Ahorro potencial de inversión de capital por la eliminación de sedimentadores y otros equipos.

Desventajas

- Se requiere un nivel mayor de sofisticación (en comparación a los sistemas convencionales) de las unidades de programación temporal y controles, especialmente en sistemas de mayor tamaño.

- Un nivel más alto de mantenimiento (comparado con los sistemas convencionales) asociado con el tipo más sofisticado de controles, interruptores automáticos y válvulas automáticas.
- Descarga potencial de lodos flotantes o sedimentados durante la fase de descarga o decantación del reactor en algunas configuraciones de SBR.
- Taponamiento potencial de los dispositivos de aireación durante ciclos operativos específicos dependiendo del sistema de aireación utilizado por el fabricante.

Aplicación del proceso SBR a aguas residuales industriales

Los sistemas SBR son utilizados típicamente para caudales iguales o menores a 5 millones de galones por día (mg/d). La operación más sofisticada requerida para las plantas de SBR de mayor tamaño tiende a desestimular el uso de ese tipo de plantas para caudales mayores. Debido a que esos sistemas tienen una superficie relativamente pequeña, son muy útiles en áreas en donde se tienen limitaciones de terreno. Además, los ciclos del sistema pueden ser fácilmente modificados para remoción de nutrientes si esto fuera requerido en el futuro. Esto hace que los sistemas SBR sean extremadamente flexibles para adaptarse a los cambios en las normas regulatorias de parámetros del efluente tales como la remoción de nutrientes. Los sistemas SBR son también muy efectivos en términos de costo de cuando se requieren tratamientos adicionales al biológico, tales como la filtración (EPA, 1999).

Las ventajas de aplicar el proceso SBR al tratamiento de aguas residuales industriales, en lugar de aplicar el proceso convencional son varias:

- Mayor actividad de los microorganismos, ya que pasan de periodos de muy bajas cargas orgánicas a periodos de elevada concentración de alimento, favoreciendo así su activación.
- Mayor capacidad para mantener elevadas concentraciones de biomasa, ya que la sedimentación, al ser estática, no se ve impedida a concentraciones de hasta 6 g/l.

Su empleo para el tratamiento de aguas residuales de la industria alimentaria (bodegas, industrias lácteas, cárnicas) se realiza ya a nivel industrial desde hace años. Al ser tan biodegradables estas aguas residuales, podría ser empleado un tratamiento biológico convencional por lodos activados, teniendo la ventaja el SBR del ahorro de espacio, fundamentalmente (EPA, 1999).

3) Lagunas aerobias: las lagunas aerobias también son conocidas como lagunas de oxidación, lagunas de estabilización o lagunas de maduración y son lagunas poco profundas que se utilizan para remover la materia orgánica, eliminar microorganismos patógenos que representan un peligro para la salud y su efluente puede ser reutilizado para otros propósitos, como por ejemplo el riego de cultivos (Figura 37)

Figura 37.

Lagunas aerobias

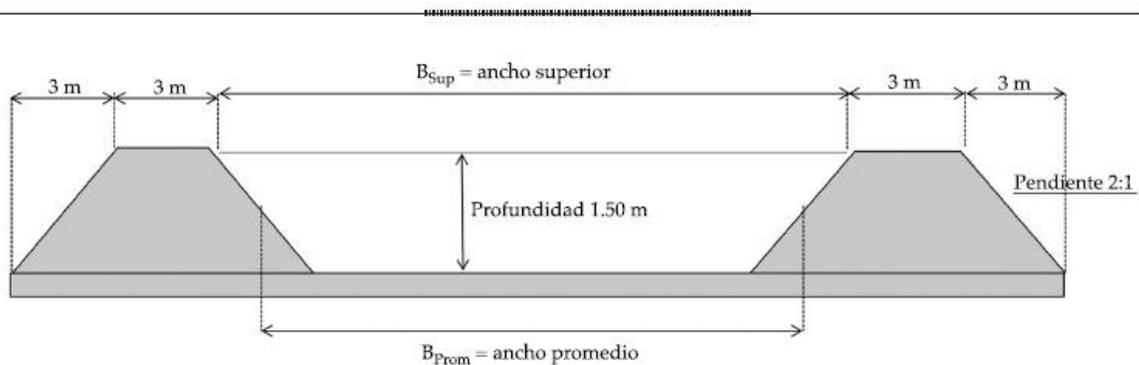


Fuente: <https://colombiaverde.com.co/geografia/hidrografia/laguna-aerobica/>

Son un sistema abierto, aerobio, donde algas y bacterias son las encargadas de proveer oxígeno al sistema, esta oxigenación ocurre en el fondo de la laguna, razón por la cual presentan una coloración verdosa y es gracias a este proceso natural que la calidad del efluente final del sistema mejora notablemente. Para su construcción se requiere hacer la excavación y formar los terraplenes, además de un sistema de tuberías y válvulas. El paso previo a su diseño es ubicar el lugar donde se construirá, además de contemplar las entradas, salidas y terraplenes, en el lugar donde se realizará la excavación, se debe retirar todos los árboles, arbustos, piedras, maleza y todo aquello que impida la excavación, el terreno debe estar lo más llano y uniforme posible. La profundidad de la laguna puede variar entre 1 y 2 metros y los terraplenes deben tener la misma altura que tenga la profundidad y el ancho debe ser de 1 metro. La tubería de entrada se localiza a 0,5 metros de altura desde la base de la laguna y la tubería de salida debe estar a la misma profundidad de la laguna, con el fin de evitar filtraciones o contaminación por aguas subterráneas, la excavación se recubre con algún plástico de alta densidad (Figura 38).

Figura 38.

Corte transversal de una laguna aerobia



Fuente: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222015000200006

En su diseño es importante considerar que el sistema de estanque debe estar protegido contra inundaciones, que se requiere un pretratamiento físico compuesto de rejillas y sedimentador y que el terreno debe ser lo suficientemente extenso para prever ampliaciones en un futuro. Las lagunas aerobias se utilizan para aguas residuales que han sido sometidos a un tratamiento y que contienen relativamente pocos sólidos en suspensión, pueden ser aguas residuales domésticas o provenientes de industrias como mataderos, granjas porcinas, entre otros.

Como ventajas, las lagunas de oxidación ofrecen una elevada estabilización de la materia orgánica, la eliminación de microorganismos patógenos es muy superior a la alcanzada mediante otros métodos de tratamiento, se pueden utilizar para el tratamiento de aguas residuales industriales con altos contenido biodegradable, es un tratamiento económico, no consume energía y la biomasa que se genera en el proceso de lagunaje es de gran valor una vez que se ha separado del efluente. Además, requiere de menor cantidad de recursos por lo que tienen un costo de implementación bajo, no requiere gran cantidad de personal para su operación, es un sistema bastante independiente y es un tratamiento amigable con el ambiente.

En cuanto a las desventajas de este tipo de tratamiento es que ocupan gran extensión de terreno, como se mencionó en los pasos para su construcción, además hay presencia de materia en suspensión por las altas concentraciones de fitoplancton y en épocas de verano las pérdidas de agua por evaporación son considerables. Por otro lado, no es recomendable para poblaciones que superen los 2000 habitantes y para que el agua tratada sea completamente potable, requiere de rigurosos procesos de desinfección (Tito, 2020). Durante la operación de las lagunas de oxidación, se pueden presentar ciertos inconvenientes que se resumen a continuación en la Tabla 7, donde se presenta además la causa y la solución a dicho inconveniente.

Tabla 7.

Problemáticas que se pueden presentar en las lagunas de oxidación

Problemática	Causa	Posible solución
	Mala ubicación de entradas y salidas.	Considerar los regímenes de los vientos. Rediseñar posición de entradas y salidas. Instalar más entradas y salidas.
	Laguna con deficiente morfología.	Colocar entradas y salidas de manera que el flujo sea perpendicular a la orientación del viento.
	Vientos que ocasionan corrientes.	
Anomalías en el caudal.	Estratificación térmica.	Colocar entradas y salidas a diferentes profundidades para evitar la estratificación térmica.
	Presencia de plantas acuáticas.	Eliminar todas las plantas acuáticas que se generen.
	Acumulación de lodos.	Retirar depósitos de lodos formados.
Presencia de insectos o mosquitos.	Presencia de plantas acuáticas.	Eliminar todas las plantas acuáticas que se generen. Criar peces.

Fuente: Tito, (2020).

4) Biodiscos: también conocido como Contador Biológico Rotatorio (CBR), es un tratamiento biológico secundario utilizado para la remoción de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y para el pulido de efluentes nitrificados. Tiene su origen en Alemania en 1900 y eran fabricados en madera, hasta 1950 que se realizaron pruebas con discos de plástico y casi al mismo tiempo comenzaron a construirse de poliestireno expandido. En 1957 comenzaron a fabricarse para el uso en plantas de tratamiento de aguas residuales y en Alemania en 1969 fue puesta en marcha la primera planta de tratamiento de aguas residuales (Figura 39)

Figura 39.

Biodiscos



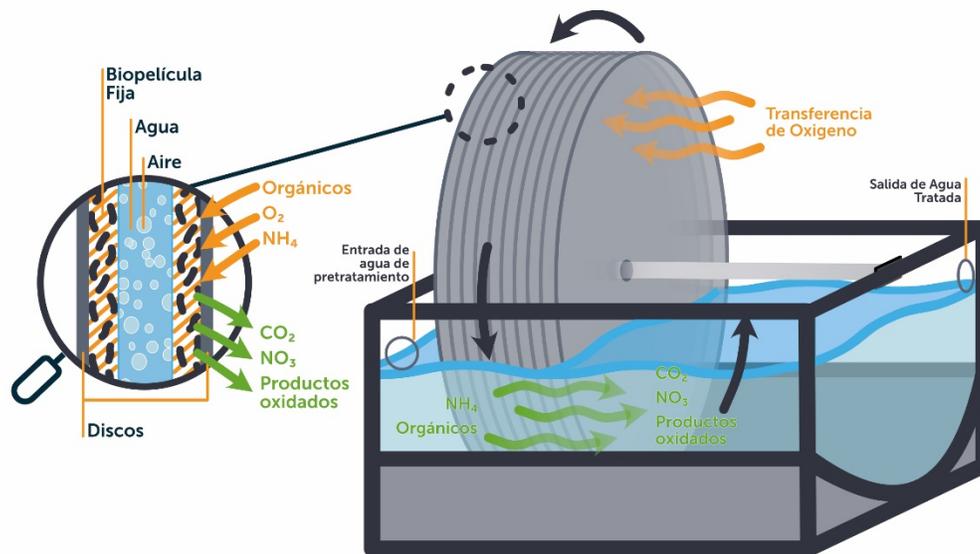
Fuente: <https://www.cornare.gov.co/noticias-corporativas/rionegro-primer-municipio-de-colombia-en-instalar-una-planta-con-biodiscos-para-tratamiento-de-agua-residual-domestica/>

El biodisco remueve la materia orgánica soluble y coloidal presente en el agua residual, el proceso consiste en disponer una serie de discos de plástico de 3 a 4 m de diámetro, sobre un eje horizontal en un tanque de concreto. Los discos giran y parte de su área superficial está en contacto con en el agua residual del tanque de concreto. Los microorganismos del agua residual se fijan y reproducen en la superficie de los discos, cubriéndolos con una película biológica (Martínez, 2019). A medida que giran los discos, la película de biomasa adherida en la superficie de estos

se mueve dentro y fuera del agua residual, esta rotación de los discos permite la transferencia de oxígeno, mantener la biomasa en condiciones aerobias, eliminar el exceso de sólidos de los discos debido al esfuerzo cortante y mantener la suspensión de los sólidos arrastrados (Figura 40).

Figura 40.

Funcionamiento de los biodiscos



Fuente: <https://es.biorotor.com/como-funciona-biorotor/>

El diseño de un sistema de biodiscos requiere de ejes para el soporte de estos, la longitud de estos ejes oscila entre los 1,52 m y los 7,62 m, se utiliza polietileno de alta densidad como medio de soporte, el cual puede ser corrugado aumentando la superficie. Los biodiscos giran por la acción de unos mecanismos de transmisión sobre el eje central, donde se puede utilizar aire para impulsar el giro y la velocidad se puede regular mediante dispositivos de variación. Estos discos generalmente se cubren con un material de plástico con fibra de vidrio, esto con el fin de protegerlos

de los rayos UV, de las bajas temperaturas, del medio ambiente y para controlar la proliferación de algas (Correa & Mocha, 2021).

Entre las ventajas que presentan los biodiscos, es que en comparación con otros procesos de tratamiento, estos son silenciosos, además de eliminar la sedimentación del agua antes de entrar al biodisco, sin afectar la capacidad de remoción de la DBO, también se controlan moscas y malos olores, se recuperan más rápido de la entrada de tóxicos al proceso que cualquier otro proceso biológico, no necesita equipo de retrolavado, es un sistema que se puede ampliar fácilmente solucionando problemas de sobrecarga, no hay formación de espumas y el requerimiento de espacio es bajo (Martínez, 2019). Además, no se requiere de personal especializado para su operación, su consumo de energía es bajo, su funcionamiento es sencillo y se obtienen muy buenos resultados (Correa & Mocha, 2021).

Con respecto a sus desventajas, no se cuenta con parámetros de diseño estandarizados, por presentar tres fases (gas, líquido y sólidos) es complejo definirlo mediante un modelo matemático simple, el tiempo de estabilización del proceso es alto y su costo es elevado.

5) Filtros percoladores: la filtración biológica es un proceso donde la materia orgánica presente en las aguas residuales es descompuesta por la biomasa que se encuentra en la superficie del medio filtrante. En el interior de este medio predominan condiciones anaerobias y en el exterior, condiciones aerobias y el grupo biológico presente en el filtro está compuesto principalmente de protistas, los cuales incluyen bacterias facultativas, aerobias, anaerobias, hongos, algas y protozoos (Jaramillo & Paredes, 2019).

En el caso de los filtros percoladores o biofiltros, es un proceso de tratamiento biológico en el cual se hace circular de manera descendente, las aguas a tratar a través de un relleno, sobre el que se desarrolla una biopelícula, acogiendo a los organismos responsables de los procesos de depuración. Este relleno o lecho filtrante, está formado por materiales sintéticos de diversos tamaños o diversos tipos de roca y no cumple funciones de tamizado, sino para permitir el contacto de

la biomasa adherida en la superficie del material filtrante con el agua residual a ser tratada, dando lugar a una oxidación biológica (Figura 41)

Figura 41.

Filtro percolador



Fuente: <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/filtros-percoladores.htm>

Las aguas residuales son pretratadas antes de entrar a este sistema y al salir del proceso, pasan por un proceso de decantación y finalmente, salen ya tratadas. El origen de este tipo de tratamiento, data de 1891 aproximadamente en Massachusetts y para la década de los 40, más de la mitad de las plantas de tratamiento en Estados Unidos, utilizaban lechos bacterianos. El equipo requerido para este proceso de tratamiento, consta de las siguientes partes:

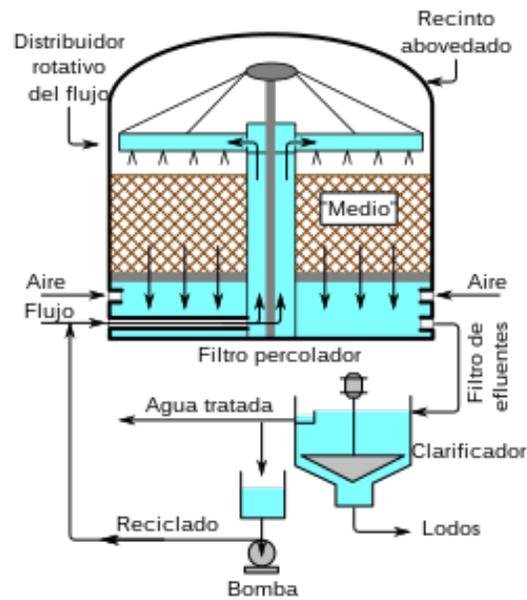
- Sistema de distribución: este sistema proporciona una carga hidráulica uniforme sobre la superficie del filtro y se utilizan aspersores para la distribución del agua residual.
- Empaquetadura: es lo que se conoce como el relleno del filtro y representa el medio de soporte de la biomasa que se forma en el proceso. Para su selección se considera la superficie específica y la cantidad de huecos, ya que, a mayor superficie específica, mayor será la cantidad de biomasa por unidad de volumen

y a mayor proporción de huecos en el empaque, se dispondrá de mayores valores de carga hidráulica y existe un riesgo menor de que se tapen y se inunde. En este sentido, el fin del relleno del filtro, es ofrecer un soporte estable para la formación de biomasa, además de proporcionar la máxima área superficial al flujo del agua residual a ser tratada.

- Sistema recolector: la recolección del efluente tratado se realiza a través de un drenaje en el fondo del lecho bacteriano.
- Proceso microbiológico: en este proceso, como se mencionó antes, se forma una capa microbiológica en la que se distinguen dos partes, una aerobia y otra anaerobia, la parte aerobia es la que está en contacto con el agua residual y donde se reproduce la materia orgánica y el oxígeno en esta parte se lleva a cabo el proceso de depuración, mientras que en la parte anaerobia, los microorganismos entran a una fase endógena de crecimiento, puesto que carecen de una fuente de energía externa y pierden la capacidad de sostenerse en el lecho, por lo que ocurre un proceso de desprendimiento.
- Otras variables: hay ciertas variables externas que influyen en la eficiencia de los filtros percoladores, las mismas se muestran en la Tabla 8, Figura 42.

Figura 42.

Partes de un filtro percolador



Fuente: <https://www.gedar.com/residuales/tratamiento-biologico-aerobio/filtros-percoladores.htm>

Tabla 8.

Variables externas del filtro percolador

Variable	Rango adecuado
Temperatura	30 °C – 40 °C
Oxígeno disuelto	1 mg/L – 2 mg/L
pH	6.5 – 8.5

Fuente: Jaramillo & Paredes, (2019).

Por otro lado, los filtros percoladores se clasifican en los siguientes tipos, según la carga de agua a procesar:

- Baja carga: son prototipos sencillos y de funcionamiento seguro, en los cuales se genera un efluente constante estable. En este tipo de filtros predominan las bacterias nitrificantes, por lo que el efluente contiene bajas cantidades de amoníaco y es rico en nitritos y nitratos.
- Alta carga: en este tipo de filtros se suelen utilizar como lecho filtrante piedras y materiales sintéticos de forma circular. Funcionan con caudal continuo y el rendimiento de eliminación es similar a los de baja y media carga.
- Tasa baja: pueden alcanzar eficiencias de remoción de DBO entre el 90% y el 95% y además producen un efluente nitrificado.
- Tasa intermedia: en estos filtros las cargas hidráulicas y orgánicas pueden aumentarse, pero se observa una reducción importante de la eficiencia en el proceso de remoción de materia orgánica. En este tipo de filtros la nitrificación se realiza de manera parcial y puede ocurrir en ocasiones la inundación del lecho debido al excesivo crecimiento biológico, la cual puede solucionarse empleando medios filtrantes de mayor diámetro.
- Tasa alta: en estos tipos de filtros existe un aumento considerable de la carga orgánica y de la carga hidráulica, por lo que la eficiencia de remoción de materia orgánica es aún menor que en los filtros de tasa baja, además, suele presentarse poca nitrificación en el proceso y generalmente se utilizan como etapa previa a otros tratamientos biológicos.
- Tasa súper alta: en estos filtros el lecho filtrante permite establecer diversas estructuras de diseño, lo que posibilita el aumento de la profundidad del lecho, por lo que se pueden aplicar cargas orgánicas e hidráulicas superiores, la eficiencia de remoción de materia orgánica es similar a la de los filtros de tasa alta, también se presenta poca nitrificación y pueden utilizarse para el tratamiento de aguas residuales con altos valores de DBO₅ o como unidades de pretratamiento de otros procesos biológicos.

En general, entre las ventajas de los filtros percoladores destacan: el reducido consumo de energía, son de operación muy sencilla y los elementos que se necesitan son fáciles de conseguir, tienen capacidad para tratar grandes caudales, además, por ser un reactor de flujo pistón, cada nivel de relleno se va adaptando a las características del agua que lo va atravesando, lo que lo hace más efectivo que un reactor de carga completa. En cuanto a las desventajas que presenta este tipo de sistema, la principal es que no admite dimensionamiento, ya que son muy pocas las variables que se puedan cambiar una vez diseñado, la inversión inicial es alta y ocupa mayor espacio que por ejemplo un sistema de lodos activados (Salas, 2022).

3.2 Tratamientos anaerobios aplicados a las aguas residuales

Un tratamiento anaerobio es aquel que se caracteriza por desarrollarse en ausencia de oxígeno y se utiliza con el objetivo de eliminar materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, además de eliminar compuestos que contienen Nitrógeno y Fósforo. La fuente de energía proviene del CO₂ o de la propia materia orgánica y el producto que se obtiene de la reacción de reducción del carbono es el metano. A continuación, se describen los tratamientos anaerobios empleados en la depuración de aguas residuales:

1) Reactores UASB: las iniciales UASB significan Upflow Anaerobic Sludge Blankett o Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente, son reactores de altas tasa y son los más utilizados en el tratamiento de aguas residuales debido a la capacidad que tienen para retener altas concentraciones de lodo en condiciones anaeróbicas.

Tienen su origen a mediados de los años 70 en Holanda y se utilizaron a nivel industrial por primera vez en Alemania en una industria azucarera. (Márquez & Martínez, 2011). Su funcionamiento consiste en dirigir los efluentes líquidos, generalmente por gravedad y hacerlos pasar por un sistema de retención de los sólidos más grandes (etapa previa), de allí fluyen al tanque ecualizador donde se

corrige el pH en caso de ser necesario. La mayoría de las veces se deben añadir nutrientes (Fósforo y Nitrógeno), para luego bombear el líquido al reactor UASB con manto de lodo. El efluente entra al reactor anaerobio por la parte inferior, en flujo ascendente, atravesando un lecho de lodo denso y de alta actividad. Dentro del reactor el perfil de sólidos es variable, desde muy denso en el lecho, hasta un lodo más disperso y liviano, cercano al tope del reactor. Dentro del reactor la mezcla del lodo y el agua es impulsada tanto por el flujo ascendente y como por las burbujas del gas que se genera (Figura 43).

Figura 43.

Reactor UASB



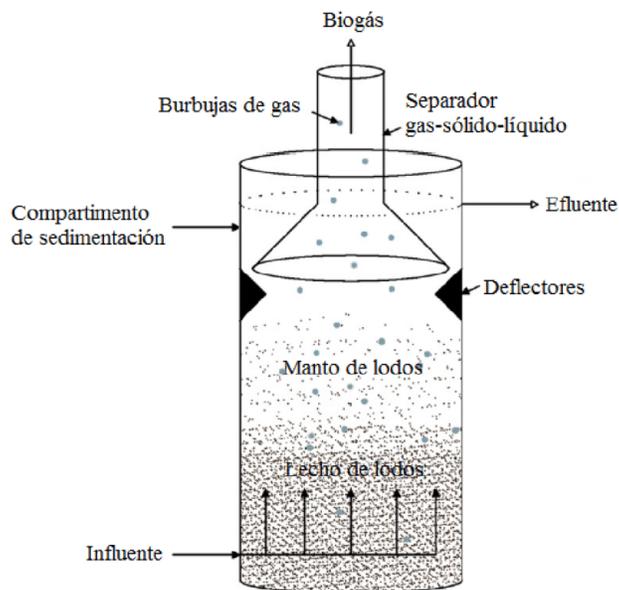
Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-de-un-Reactor-UASB-20_fig1_318283641

El efluente industrial sale del reactor por la parte de un decantador interno, ubicado en la parte superior y mediante un dispositivo de separación de gases y sólidos, que está debajo del decantador, se evita que el flujo ascendente de los gases que se forman, arrastre las partículas que se desprenden de la manta de lodo, las cuales regresan a la cámara de digestión. El principio fundamental del proceso de este tipo

de tratamiento, es la generación de una biomasa con alta actividad microbológica, ofreciendo un alto rendimiento en los procesos de estabilización, tomando en cuenta los límites para las reacciones anaerobias y un tiempo de retención hidráulica relativamente bajo, el líquido es dirigido para un tratamiento posterior, en el cual se continúa con la oxidación de la materia orgánica. El reactor UASB generalmente debe recibir el exceso de lodo del sistema de post tratamiento, por lo que el lodo generado y almacenado en el reactor UASB debe ser retirado del fondo con el fin de no comprometer la flora bacteriana (Goli et al., 2019) (Figura 44).

Figura 44.

Partes de un reactor UASB



Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Esquema-de-un-Reactor-UASB-20_fig1_318283641

Las ventajas y desventajas de este tipo de reactor se presentan a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9.

Ventajas y desventajas de los reactores UASB

Ventajas	Desventajas
Buena estabilización del efluente.	Baja remoción de nitrógeno, fósforo y patógenos.
Baja producción de lodo.	Se requiere de un post tratamiento.
Menor requerimiento de nutrientes.	No se puede utilizar en el tratamiento de ciertos efluentes.
Se obtiene metano como producto final.	La velocidad de crecimiento de las bacterias metanogénicas es baja.
Bajos costos de implementación.	Requiere mayor tiempo de retención hidráulica.
Posibilidad de regeneración de la biomasa.	Podrían generarse malos olores y corrosión.
Bajo consumo de energía.	Baja remoción de DBO.
Permite elevadas cargas orgánicas.	

Fuente: Águas Claras Engenharia, (2023).

2) Reactores de alta tasa: los reactores de alta tasa o digestores de alta tasa, tienen su origen alrededor de la década de los años 30, cuando los digestores convencionales se comenzaron a mezclar y calentar para mejorar la digestión de los sólidos presentes en las aguas residuales, dando paso a la creación de los digestores completamente mezclados y desde entonces, no ha parado el desarrollo de esta metodología de tratamiento de aguas residuales, diferenciándose dos principales tipos de digestores: sin acumulación de biomasa y con acumulación de biomasa.

Los primeros se emplean generalmente en la estabilización de lodos primarios y secundarios, originados en el tratamiento de aguas residuales y también para el tratamiento de efluentes agrícolas e industriales con un alto grado de sólidos en suspensión. Estos reactores son tanques generalmente circulares que están

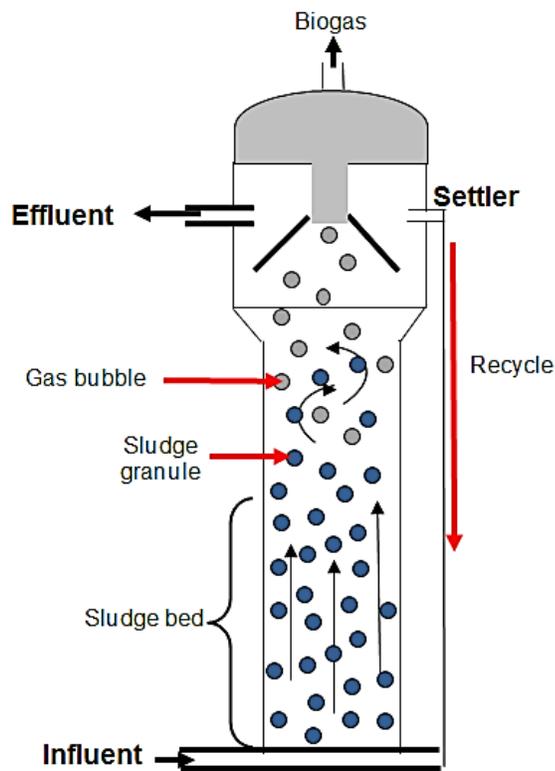
recubiertos con concreto reforzado, en los cuales las paredes inferiores suelen estar inclinadas con el fin de favorecer la sedimentación y la eliminación de los sólidos más concentrados. En cuanto a su recubrimiento, este puede ser fijo, flotante o de membrana y según la existencia de dispositivos de mezcla y de la cantidad de etapas, se pueden clasificar a su vez en: digester anaeróbico de lodos de baja velocidad, de alta velocidad en una etapa y de alta velocidad en dos etapas.

En este tipo de digestores el tiempo de retención hidráulica puede oscilar entre los 15 y 30 días, por lo que no resultan tan económicos para el tratamiento de aguas residuales con baja concentración de sólidos, para solucionar este inconveniente, surgen los digestores anaerobios con acumulación de biomasa, en los cuales el desarrollo de la biomasa puede ser de manera suspendida o fija, en el reactor UASB, descrito anteriormente, el crecimiento de la biomasa se da de forma suspendida, sin embargo, con una modificación en el UASB, surge el reactor RAB (Reactor Anaeróbico de Baffles), el cual se origina al agregar deflectores verticales en un reactor anaerobio de flujo pistón para tratar una suspensión de algas con alto porcentaje de sólidos, mejorando la capacidad del reactor, al mantener una metanogénesis de lento crecimiento lento.

Otras variantes del UASB son los reactores EGSB (Reactor Anaerobio de Lecho de Lodo Granular Expandido) y RIC (Reactor Anaerobio con Recirculación Interna), el primero es muy similar al UASB, con la diferencia que utiliza otro tipo de lodo granular y el grado de expansión del lecho de lodo es diferente debido a las altas tasas hidráulicas que se aplican, por otro lado, el RIC está formado por dos reactores UASB dispuestos en serie, con un separador de gas en el lazo, con el fin de aumentar la eficiencia (Figura 45).

Figura 45.

Reactor Anaerobio de Lecho de Lodo Granular Expandido

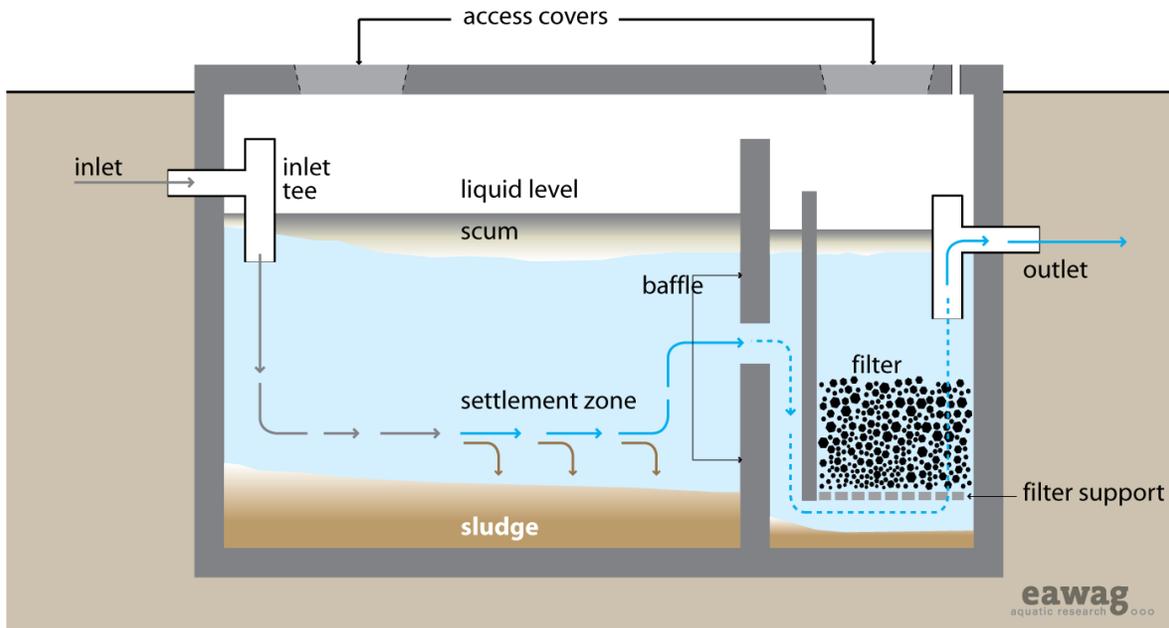


Fuente: <https://flower.com.pe/tratamiento-anaerobio-de-aguas-residuales/>

Otro reactor de crecimiento fijo es el FAFA (Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente), desarrollado a finales de los 60, estos reactores tienen un material de relleno estacionario, donde los sólidos biológicos se mantienen dentro de los intersticios y esta biomasa es la que degrada el sustrato presente en las aguas residuales, en estos reactores el Tiempo de Retención de Sólidos promedio es generalmente mayor a 20 días, mientras que el Tiempo de Retención Hidráulica es bastante bajo, entre 0,5 y 1,5 días. Estos reactores tienen una gran aplicación en el tratamiento de diferentes tipos de efluentes tanto industriales como domésticos y aunque los primeros desarrollos fueron con flujo ascendente (los más utilizados), también funcionan con flujo descendente (Figura 46).

Figura 46.

Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente

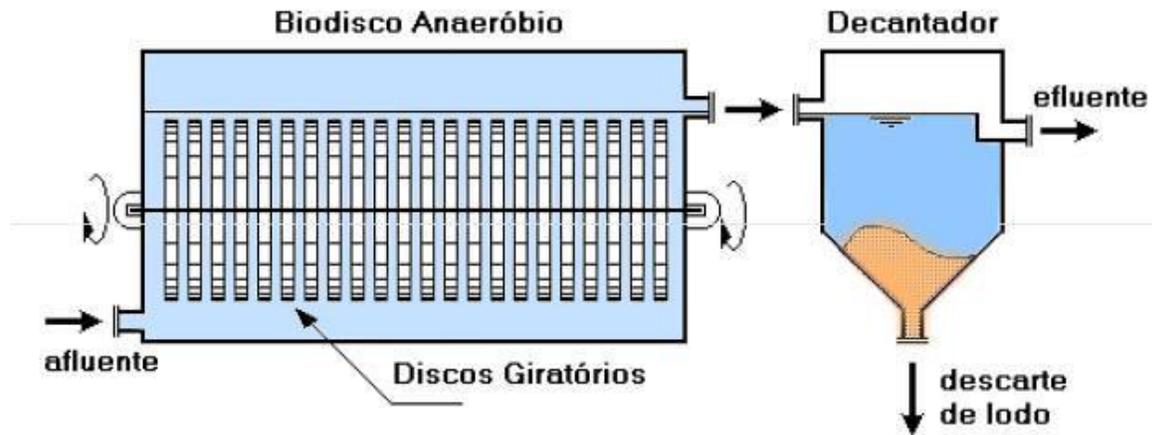


Fuente: https://akvopedia.org/wiki/Filtro_Anaerobico

Por otro lado, se encuentra el reactor de lecho giratorio, también conocido como biodisco anaerobio, el cual fue desarrollado en 1980, con una configuración similar a la de los biodiscos aeróbicos, con la diferencia que el tanque está cubierto para evitar el contacto con el aire. En este tipo de reactor la inmersión de los discos suele ser mayor, pero al comprobarse que el verdadero efecto lo hacía la biomasa suspendida entre los discos y no la adherida, se ha dejado de utilizar este método (Figura 47).

Figura 47.

Reactor de lecho giratorio o biodisco anaerobio

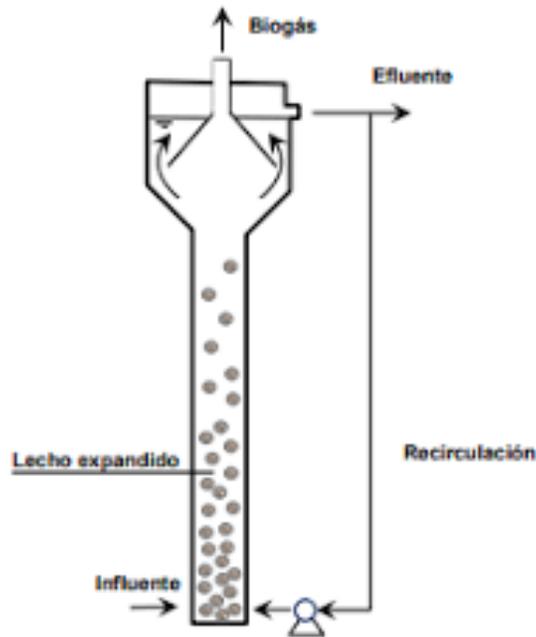


Fuente: https://akvopedia.org/wiki/Filtro_Anaerobico

Luego está el Reactor Anaerobio de Lecho Expandido, desarrollado en 1981, consiste en un proceso de crecimiento adjunto y lecho expandido, en los cuales, en el interior de una estructura en forma de cilindro, hay soportes inertes (de arena, grava, carbón, PVC, etc.) que llegan a ocupar el 10% del volumen del tanque, cuyas partículas son un poco más grandes que las usadas en los reactores de lecho fluidizado. Este tipo de reactor se consideró el primer proceso anaeróbico capaz de tratar aguas residuales diluidas a temperatura ambiente y ha demostrado ser muy eficiente en el tratamiento de aguas residuales de muy baja concentración, además, sus tiempos de retención hidráulica está por el orden de los 30 – 60 minutos y ofrecen una eficiencia de eliminación de DQO del 70% (Figura 48).

Figura 48.

Reactor Anaerobio de Lecho Expandido

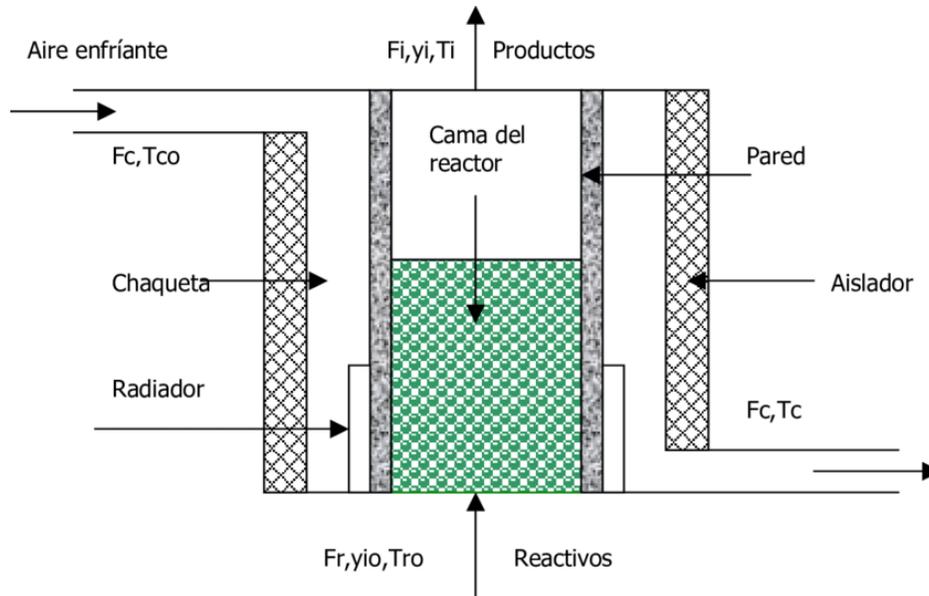


Fuente: https://akvopedia.org/wiki/Filtro_Anaerobico

Una variación del diseño anterior es el Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado con Crecimiento Adherido, el cual es el mismo que el de Lecho Expandido, solo que varía el tamaño de las partículas del medio de soporte y las tasas de expansión. En el Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado, la velocidad ascendente del líquido debe ser lo suficientemente alta para fluidizar el lecho. La tasa de recirculación que se requiere en este tipo de reactor es alta, por lo que las partículas no mantienen una posición fija en el lecho. La expansión de partículas muy finas, garantiza un área de superficie muy grande para el desarrollo de una biomasa uniforme. Este sistema ofrece una eficiencia de eliminación de DQO entre 70% - 90% (Figura 49).

Figura 49.

Reactor Anaerobio de Lecho Fluidizado

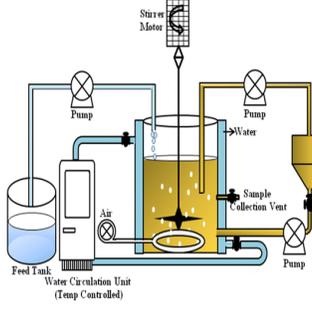
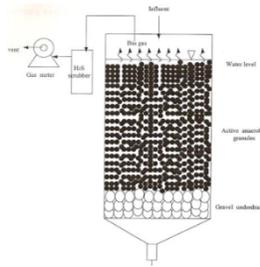
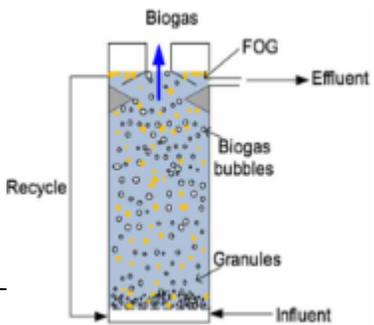


Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-1-Reactor-de-lecho-fluidizado-FBR_fig1_272353763

Es importante enfatizar que uno de los mayores éxitos en el desarrollo de tecnologías para el tratamiento anaerobio de aguas residuales, fue la introducción de los reactores de alta tasa, ya que, en este tipo de reactores, la tasa de retención de biomasa y la tasa de retención hidráulica. Están desacopladas, permitiendo un alto porcentaje de retención de biomasa con muy baja pérdida de bacterias, además de una alta eficiencia en la remoción de DQO y unos tiempos de retención hidráulica bastante bajos, sin olvidar sus diseños compactos (González, 2020).

Tabla 10.

Resumen de los reactores de alta tasa

Reactor		Descripción	Imagen	Fuente
Siglas	Nombre			
CSTR	Tanque agitado continuo	Su agitación es constante para producir el efecto purificador ya que al estar cerrado, el efluente en constante movimiento con la biomasa se garantiza una salida de flujo de agua de características controladas.		Ugazhendi et al (2017)
Digestor de Lecho Fijo		Posee un lecho fijo, conocido como Biofiltros, cuyo material permite fluir desde arriba de la unidad donde está la biomasa adherida el efluente, garantizando el contacto necesario para su purificación.		Lim, n f
EGSB	Lecho granular expandido de flujo ascendente o fluidizado	Los reactores de lodo granular expandido son considerados como una evolución de los reactores UASB. Poseen dos zonas de		Basitere et al. (2020)

tratamiento, en la parte inferior del reactor ocurre la digestión anaeróbica, mientras que la zona superior ocurre la sedimentación. La biomasa se mantiene en suspensión.

Fuente: Elaboración propia, (2023).

3) **Lagunaje anaerobio:** en este tipo de lagunas, el tratamiento del agua se lleva a cabo por la acción de bacterias. Debido a la alta carga orgánica presente y el corto periodo de retención del agua residual, la cantidad de oxígeno disuelto se mantiene muy bajo o inexistente durante todo el año. El objetivo es retener la mayor cantidad de sólidos en suspensión, que se van incorporando a la capa de lodos acumulados en el fondo de la laguna y eliminar parte de la carga orgánica (Figura 50).

Figura 50.

Laguna anaerobia



Fuente: <https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/definicion-y-caracteristicas-de-las-lagunas-de-oxidacion/>

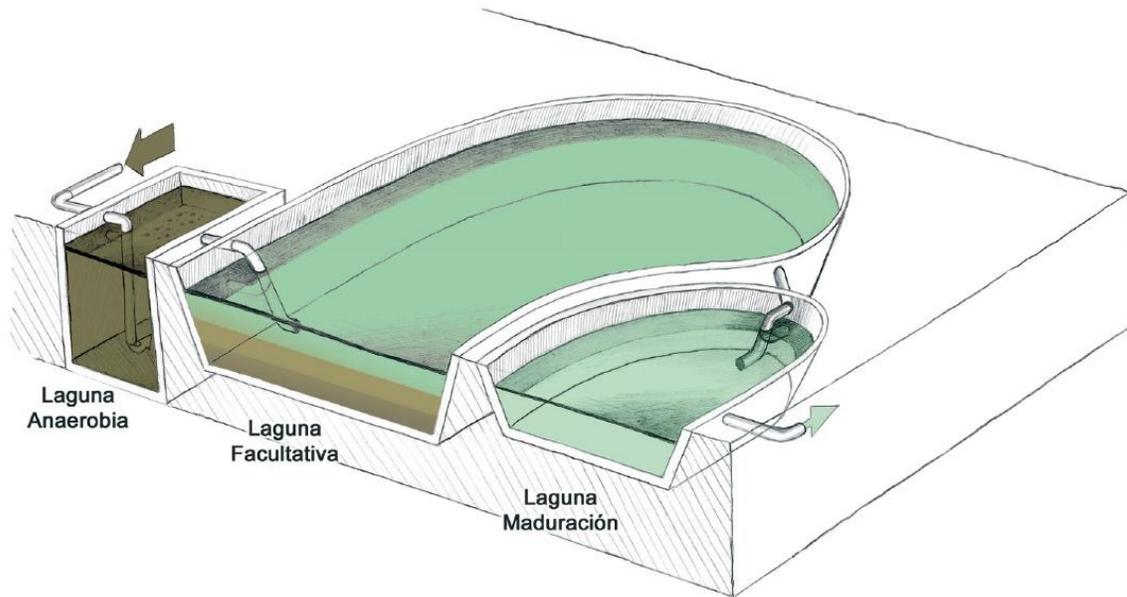
Las etapas que ocurren en estas lagunas para la estabilización son:

- Hidrólisis de compuestos orgánicos complejos e insolubles en otros compuestos más sencillos y solubles en agua.
- Formación de ácidos: los compuestos orgánicos generados en la hidrólisis son utilizados por las bacterias generadoras de ácidos, transformándolos en ácidos orgánicos volátiles.
- Formación de metano: bacterias formadoras de metano actúan y se genera metano y dióxido de carbono.

Las lagunas anaerobias generalmente reciben cargas de 225 a 600 kg de $\text{DBO}_5/\text{ha} \cdot \text{día}$ con un tiempo de retención hidráulica entre 20 y 50 días, con rendimientos en la reducción de la DBO_5 del 50 al 85%. Estas lagunas actúan como un digestor anaeróbico abierto sin mezcla y debido a las altas cargas orgánicas que reciben, el efluente aún contiene gran cantidad de materia orgánica, por lo que se requiere de otro proceso de tratamiento. En cuanto al mecanismo de degradación, de la materia orgánica, se diferencian dos etapas que dependen del grupo de bacterias desarrolladas, las reacciones son lentas y generan malos olores (Gaitán & Zavaleta, 2021). Estas lagunas suelen tener una profundidad entre 2 – 5 metros y se diseñan considerando la carga volumétrica (Figura 51).

Figura 51.

Esquema de lagunaje



Fuente: <http://depuranatura.blogspot.com/2011/05/lagunas-anaerobias.html>

Requisitos para su implantación:

- Necesidades de superficie:
- ✓ Son necesarios del orden de 7-10 m²/hab-eq de superficie para su implantación.
- ✓ Es preciso impermeabilizar las balsas para evitar infiltraciones y contaminaciones del terreno.

Dentro de las ventajas y desventajas de las lagunas anaerobias se pueden mencionar:

Ventajas

1. Bajos costes de inversión, sobre todo si el terreno es suficientemente impermeable, y facilidad constructiva.

2. Consumo energético nulo, si el agua a tratar puede llegar por gravedad a la depuradora.
3. Ausencia de averías mecánicas al carecer de equipos.
4. Escaso y simple mantenimiento, que se limita a retirar los residuos del Pretratamiento y a mantener la superficie de las Lagunas libre de flotantes, para evitar la proliferación de mosquitos.
5. Escasa producción de fangos, experimentando éstos una alta mineralización, a consecuencia de los elevados tiempos de retención con los que se opera, lo que facilita enormemente su manipulación y evacuación.
6. Gran inercia, lo que permite una fácil adaptación a cambios de caudal y de carga orgánica.
7. Alto poder de abatimiento de microorganismos patógenos.

Desventajas

1. Para la implantación de Lagunas Facultativas y de Maduración, se precisan grandes extensiones de terreno.
2. Dada su estrecha dependencia de las condiciones climáticas, la implantación de este sistema de depuración puede verse limitada en zonas frías o de baja radiación solar.
3. En el caso de las Lagunas Anaerobias se desprenden olores desagradables, que obliga a situarlas en lugares alejados de las zonas habitadas.
4. Recuperación lenta cuando se produce el deterioro del sistema biológico.
5. Efluentes finales con sólidos en suspensión (microalgas).
6. Pérdidas de agua por evaporación.

Criterios de diseños de las lagunas anaerobias

Tabla 11.

Criterios de diseño

Parámetro	Valor
Tiempo de retención (días)	2-3
Carga volumétrica (g DBO ₅ /m ³ d)	150-200
Carga orgánica superficial (kg DBO ₅ /hab*m ² *d)	-
Profundidad media del sustrato (m)	3-5

Fuente: Elaboración propia, (2023).

Tabla 12.

Rendimiento esperado de las lagunas anaerobias

Parámetro	Eliminación (%)
Sólidos en suspensión	50-60
DBO ₅	40-50
N	5-10
P	0-5
Coliformes fecales	30-70

Fuente: Elaboración propia, (2023).

Necesidades de mantenimiento y operación:

1. Retirada periódica de los flotantes en la superficie de las lagunas.
2. Purga de lodos acumulados en el fondo de las lagunas, con una periodicidad de 5-10 años.
3. Revisión de los taludes de tierra y reparación de los daños ocasionados en los mismos.

4. Si las lagunas se encuentran impermeabilizadas con lámina plástica y se detectasen roturas en la misma, se han de reparar inmediatamente.

Existen diversas restricciones que se aplican a la descarga de las aguas residuales generadas de manera doméstica o industrial, por lo que los sistemas requeridos para su tratamiento deberán ser diseñados en función de cada caso y de los contaminantes presentes en esas aguas. Los procesos de tratamiento biológico son un componente importante en muchos sistemas de tratamiento de aguas residuales, puesto que se consideran una de las formas más eficientes de eliminar el contenido orgánico en las aguas residuales.

Como se observó, existen varios tipos de tratamientos para la depuración de las aguas residuales, además de diversas etapas también (pretratamiento y postratamiento), en donde las etapas secundarias generalmente consisten en sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales, existiendo varias opciones. Para seleccionar el tratamiento adecuado se deben tomar en cuenta determinados factores con el fin de elegir la solución óptima. En este sentido, se debe considerar principalmente:

1. Área ocupada.
2. Costos de construcción.
3. Costos operativos.
4. Tiempo de retención hidráulica.
5. Tiempo de retención de lodo.

Es así como ante la diversidad de opciones existentes, la selección del tratamiento y el diseño de los sistemas biológicos para el tratamiento de aguas residuales, se puede someter a un sistema de ponderación, el cual estará sujeto a cambios según los criterios que la organización considere más relevante. Es importante remarcar que las aguas residuales presentan una gran cantidad de contaminantes que tienen un efecto negativo en el medio ambiente si llegan a ser descargadas sin el debido tratamiento, pudiendo afectar el desarrollo natural de los ecosistemas, lo que ha generado la implementación de diversos métodos de tratamiento, entre ellos, el biológico, el cual ofrece grandes ventajas en comparación con otros tipos, puesto

que genera efluentes de gran calidad, son más resistentes a las variaciones de temperatura, se controlan fácilmente, se adaptan para recibir grandes caudales a tratar, la mayoría de los tratamientos descritos no requieren de mucho espacio, son más económicos y son sistemas ideales para eliminar de manera eficiente, el contenido orgánico presente en las aguas residuales.

CAPITULO VII

TRATAMIENTOS AVANZADOS APLICADOS A LAS AGUAS RESIDUALES

1. Introducción

Por lo general el Tratamiento Avanzado es aplicado a los efluentes de los procesos secundarios de tratamientos de aguas residuales, y cada vez es más utilizado por el hecho de que estas aguas comúnmente contienen cargas significativas de DBO causantes de problemas severos en la recepción de las mismas; además, de altos niveles de nutrientes favorables al crecimiento de algas y a la eutrofización, tales como los fosfatos y el nitrógeno, que pueden originar que la biomasa de las algas se acumule excesivamente, se descomponga y agote el oxígeno disuelto del agua.

Otra razón importante para la aplicación del Tratamiento Avanzado de las aguas residuales es que estas, pueden convertirse en una importante fuente de agua disponible, debido a que es más fácil de tratarla hasta llegar a los parámetros de agua potable, que procesar el agua subterránea salada o el agua de mar. Sin embargo, un impedimento de esto es la opinión pública general, puesto que la idea de utilizar el agua que una vez fue residual aún no es totalmente aceptada, aunque en algunas ciudades lo que normalmente se realiza para el suministro de agua es extraerla de ríos aguas abajo, luego que otras ciudades han descargado sus aguas residuales tratadas a estos cuerpos (Manahan, 2022).

Tal como se expresó anteriormente, es importante eliminar del agua residual los compuestos orgánicos causantes de DBO, así como también el fósforo y el nitrógeno, pues estos son iones nutrientes para algas, pero, además, resulta necesario retirar de estas aguas los patógenos, incluyendo los virus y los residuos farmacéuticos con sus subproductos.

A pesar de los avances en los tratamientos de las aguas residuales, todavía existen algunas discrepancias acerca de la clasificación de estos tratamientos; a tal punto

que, algunos autores colocan los tratamientos avanzados en el nivel terciario. Sin embargo, en esta entrega se ubicarán las diferentes tecnologías desarrolladas en un nivel aparte de los tratamientos, es decir, que la eliminación biológica de nitrógeno y fosforo, la adsorción sobre carbón activado, la filtración sobre medio granular y la precipitación química, estarán clasificados como Tratamientos Avanzados, la desinfección se incluirá en el Tratamiento Terciario o Final.

2. Eliminación biológica de nitrógeno y fósforo

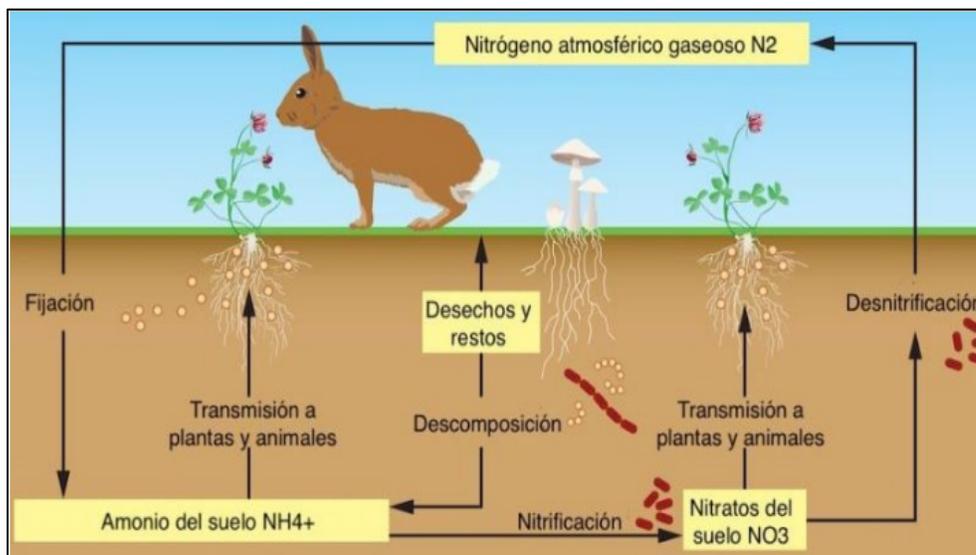
Fundamentalmente, los tratamientos biológicos de las aguas residuales consisten en el empleo de microorganismos para eliminar la materia orgánica, tanto soluble como insoluble, y nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Esta depuración se logra gracias al trabajo de una gran cantidad de bacterias, por lo que es importante satisfacer las demandas nutricionales y metabólicas, así como condiciones ambientales que puedan afectar a los microorganismos (Urrutia, 2021).

2.1 Nitrógeno

El nitrógeno se encuentra en la naturaleza tanto en su forma orgánica, como en su forma inorgánica; en la atmosfera principalmente en su forma diatómica (N_2) en un 78% (v/v) de la composición de esta; en las capas del suelo en su forma orgánica, en productos del metabolismo de algunos organismos multicelulares y de la descomposición de restos de animales y vegetales, como urea, amidas, ácido úrico y aminas. En las aguas, el nitrógeno es encontrado en forma inorgánica, como nitratos (NO_3^-), nitritos (NO_2^-) y amonio (NH_4^+) y esto se atribuye al ciclo bioquímico del nitrógeno, presentado en la Figura 38, y a las actividades antropogénicas principalmente las industriales y agrícolas (Villa, 2022) (Figura 52).

Figura 52.

Ciclo del nitrógeno.



Fuente: Enciclopedia Concepto (2023).

El problema principal de la presencia de nitrógeno en cuerpos de agua es la eutrofización, ya que esta propicia la proliferación de fitoplancton, que, a su vez, originan efectos tóxicos en los seres vivos que habitan en este ecosistema (Villa, 2022). De acuerdo a lo expresado por Urrutia (2021), el exceso de fitoplancton y otras especies vegetales en las aguas, impiden que la luz solar llegue a las capas más profundas de estas, alterando el proceso fotosintético y trayendo como consecuencia que los organismos que dependen de la fotosíntesis para subsistir mueran, cayendo hasta el fondo, donde son descompuestos por bacterias las cuales agotan el oxígeno, dificultando la sobrevivencia de las especies.

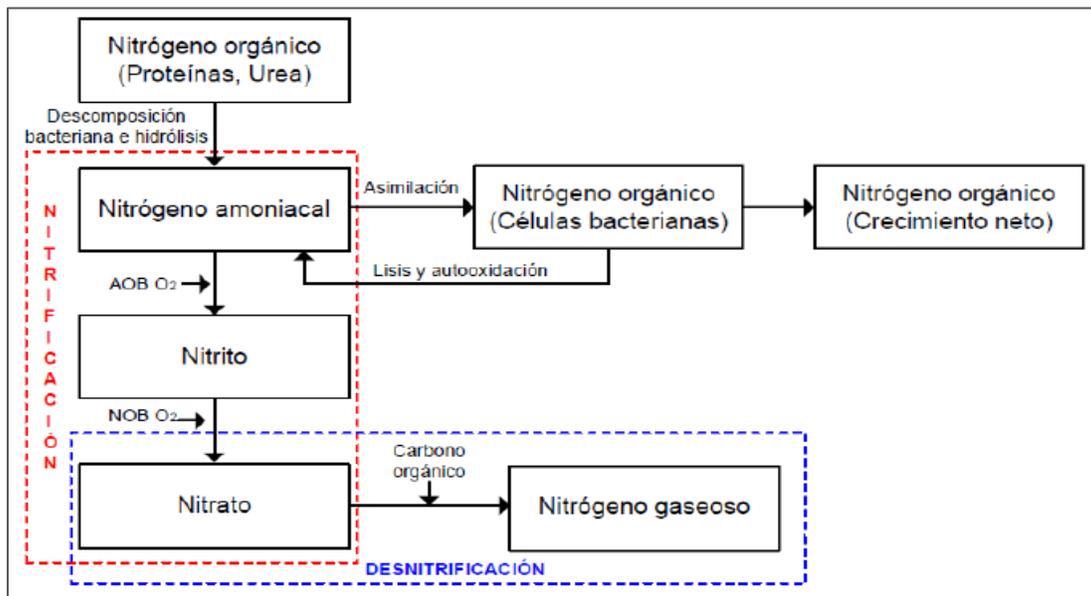
Algunos organismos tienen la capacidad de fijar el nitrógeno atmosférico hasta convertirlo en amonio para obtener energía, entre estos, los fijadores en vida libre como las bacterias anaerobias *Clostridium*, las aerobias *Azotobacter*, las facultativas *Klebsiella*, las arqueobacterias *Methanosarcina*, las fotosintéticas *Rhodospirillum* y

las cianobacterias *Oscillatoria*; también se encuentran los fijadores en simbiosis como las proteobacterias *Rhizobium* y *Bradyrhizobium* denominados rizobios, los actinomicetos *Frankia*, las cianobacterias *Nostoc* y *Anabaena* y las β -proteobacterias *Ralstonia* (Villa, 2022).

Por otra parte, existe un proceso de eliminación biológica de nitrógeno que se desarrolla en dos fases, las cuales son nitrificación y desnitrificación (Ver Figura 53), y es a través de este que se elimina el nitrógeno de las aguas residuales.

Figura 53.

Transformación del nitrógeno por nitrificación y desnitrificación



Fuente: Sánchez (2021).

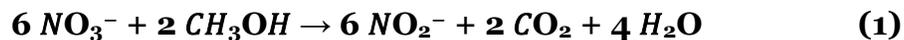
Este proceso es realizado por unas bacterias autótrofas que pueden oxidar el nitrito (NO_2^-) y el amonio (NH_4^+) hasta nitrato (NO_3^-), y por algunos organismos heterótrofos que tienen la capacidad de usar los nitratos y/o nitritos como receptores de electrones en condiciones anaerobias para descomponer la materia orgánica (Sánchez, 2021).

Durante la nitrificación, la cual ocurre en dos pasos, el amonio es primeramente oxidado a nitrito por la actividad de bacterias amonio-oxidantes (1) y luego, es transformado a nitrato por medio de la actividad de bacterias nitrito-oxidantes (2), acidificándose a su vez el medio (Sánchez, 2021).



Con respecto a la desnitrificación, se tiene que esta es realizada por un grupo más heterogéneo de bacterias, llamadas desnitrificantes, las cuales son principalmente heterótrofas facultativas, que son capaces de usar el nitrato (NO_3^-) como receptor de electrones en sustitución del oxígeno, cuando están en condiciones de anoxia; en esta reacción los electrones son dados por la materia orgánica y el nitrógeno obtenido de la nitrificación es transformado en nitrógeno gaseoso que es desprendido a la atmósfera (Sánchez, 2021).

Para que ocurra la desnitrificación, primeramente (1) el nitrato (NO_3^-) se reduce a nitrito (NO_2^-); después el nitrito (NO_2^-) se reduce a óxido nitroso (N_2O) y, finalmente (2), a nitrógeno gaseoso (N_2) que es liberado al ambiente (Sánchez, 2021).



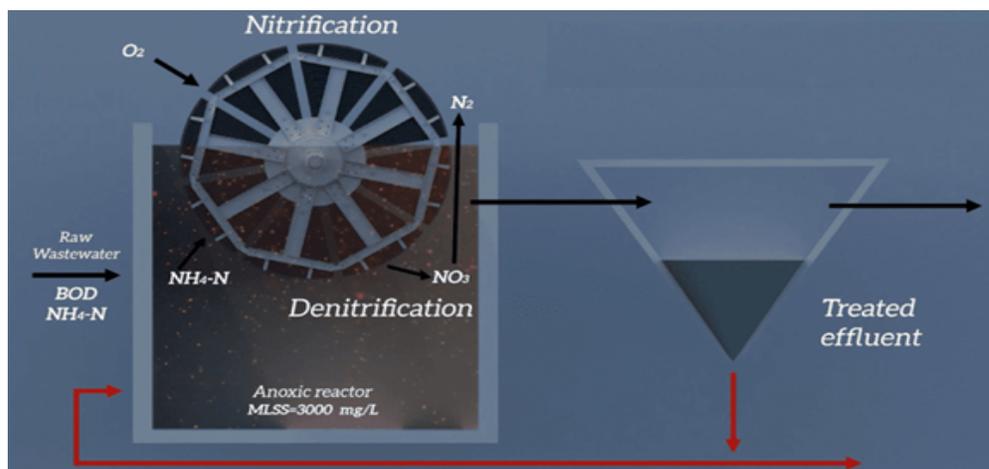
Para eliminar de forma biológica el nitrógeno de las aguas residuales, generalmente se utiliza un reactor biológico con una cantidad de microorganismos que tienen la capacidad de degradar la materia orgánica y transformar el nitrógeno amoniacal como actividad metabólica para su desarrollo. Dentro de este reactor se debe suministrar a los microorganismos las condiciones necesarias para su supervivencia y reproducción, como nutrientes, temperatura, pH y oxigenación. Las ventajas que poseen los reactores con respecto a efectividad, diseño y precio lo convierten en una

de los principales tratamientos avanzados para la eliminación de compuestos orgánicos de las aguas residuales y se utilizarán combinaciones de procesos dependiendo de las características iniciales de las aguas residuales y del nivel de purificación que se quiera obtener (Villa, 2022).

Otra tecnología ampliamente utilizada para la remoción de nitrógeno de aguas residuales son los Contactores Biológicos Rotativos (CBR). Estos son sistemas de tratamiento en los cuales los microorganismos se encuentran adheridos a un lecho o material de soporte, que gira a una velocidad entre 1 a 2 rpm sumergiendo aproximadamente el 40% de su superficie en el agua a depurar y al exponerse de forma alternativa al agua durante la fase de inmersión, la capa de biomasa adherida al lecho utiliza como sustrato la materia orgánica soluble; posteriormente en la fase al aire, toma el oxígeno para su respiración. Una modalidad de esta tecnología son los biodiscos, donde el lecho para la fijación microbiana está constituido por un grupo de discos de material plástico de 1 a 5 m de diámetro (Salas, 2022). En estos equipos la desnitrificación se logra según se plantea en la Figura 54 y una imagen real de estos se observa en la Figura 55.

Figura 54.

Eliminación de nitrógeno en CBR.



Fuente: Salas (2022).

Figura 55.

Montaje de un Biodiscos en la EDAR de Bélgida (Valencia).



Fuente: Salas (2022).

2.2 Fósforo

El Fósforo es un elemento químico cuyo nombre proviene del latín *phosphōrus*, que significa “portador de luz”, su símbolo es P, su peso atómico es de 30,97376 y su número atómico es 15; es perteneciente al grupo de los no metales, su aspecto es incoloro y en la naturaleza se encuentra habitualmente en estado sólido, en organismos vivos o como un combinado de fosfato inorgánico, pero no en su estado fundamental (Urrutia, 2021).

Es el único macronutriente que no es encontrado en la atmósfera y está ubicado en el onceavo lugar respecto a la abundancia en la corteza de la tierra, principalmente en sedimentos, rocas sedimentables, y en materia orgánica, cuya fuente principal está constituida por residuos de animales, plantas y microorganismos los cuales liberan compuestos de fosfolípidos, ésteres y ácidos nucleicos (Cerón & Aristizábal, 2012).

Es muy necesario en procesos químicos y fisiológicos de la naturaleza, en la transferencia de energía y en la fotosíntesis; además, junto al nitrógeno es parte de los nutrimentos esenciales primarios para el funcionamiento de las plantas. La

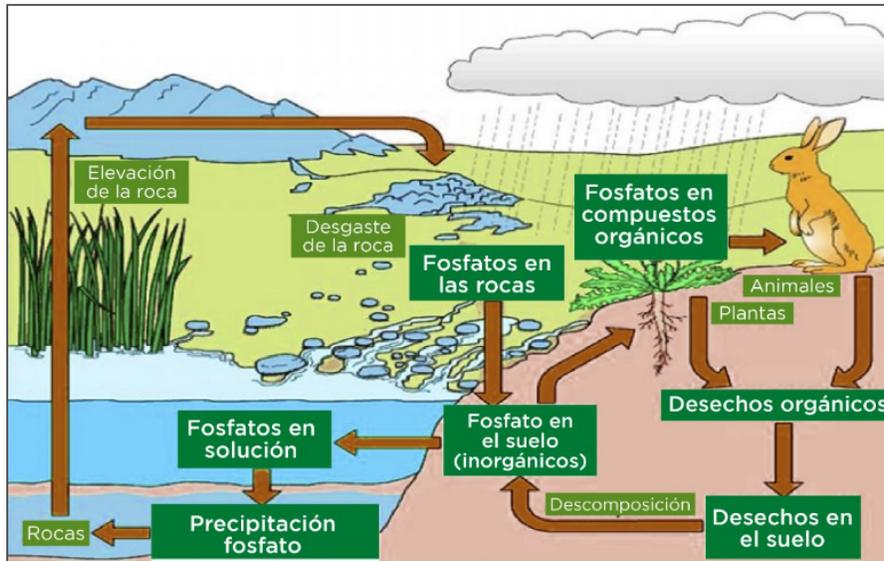
circulación de este elemento químico en la naturaleza, en un ecosistema determinado, ocurre mediante el ciclo fosfórico el cual forma parte de los ciclos biogeoquímicos, útiles y necesarios para mantener un balance que permita que sean reciclados diferentes elementos químicos, los cuales de no existir las cadenas tróficas de ecosistemas, no serían posibles (Urrutia, 2021).

Sin embargo, aunque es muy importante y necesario, el ciclo del fósforo es un ciclo lento al ser comparado con los del nitrógeno, el agua y el carbono, debido a que este elemento no forma compuestos volátiles que puedan desplazarse fácilmente del agua a la atmósfera y nuevamente a la tierra donde se origina (Cerón & Aristizábal, 2012).

El ciclo del fósforo en la naturaleza (Figura 56), según Urrutia (2021), inicia cuando los fosfatos en las rocas, a causa de la erosión, la meteorización, el desgaste y la mineralización es transformado y convertido en compuestos inorgánicos, para luego ser transportado por arrastre y sedimentación, desde los depósitos naturales, a los cuerpos acuíferos y otros ecosistemas. Las plantas, tanto las terrestres como las algas y fitoplancton, se encargan de absorber el fósforo de los suelos y aguas marinas y mediante la cadena alimentaria, es transmitido a los animales, donde es almacenado. De allí, a través de las excretas o de la descomposición de cadáveres de animales, los fosfatos retornan al suelo, siendo aprovechado por plantas o llevado al mar por lluvias y escorrentías; también ocurre que, luego de la descomposición y por procesos de fosilización, el fósforo nuevamente logra formar parte de minerales sedimentarios.

Figura 56.

Ciclo del Fósforo.



Fuente: Inti Fertilizantes, (2020).

Es importante señalar que actualmente, a causa de que el ciclo fosfórico ocurre a escalas geológicas, es sometido a fuertes actividades antropogénicas, donde recibe flujos de agua dulce y de nutrientes tanto minerales, como orgánicos que provienen de diversas fuentes (agrícolas, urbanas, aguas servidas domésticas y efluentes industriales), las cuales causan el aumento de nutrientes de origen antrópico, que a su vez producen la alteración del ciclo del fósforo. Particularmente, un aumento excesivo de fósforo y nitrógeno, originan el fenómeno conocido como la eutrofización, causando a su vez, la reproducción acelerada de algas en las aguas. Estas algas impiden el paso de la luz a las profundidades acuáticas y alteran el proceso fotosintético, por lo que la vegetación que vive por debajo de la superficie de las aguas muere y cae hasta el fondo de las aguas, donde es descompuesta por bacterias que consumen oxígeno, de manera que reducen su concentración en las aguas a un nivel tal, que impide la sobrevivencia de especies características de ese ambiente (Urrutia, 2021).

Por lo anteriormente expuesto, se considera que la contaminación de los recursos acuíferos por fósforo es un gran problema ambiental, por lo que es necesario aplicar tratamientos avanzados a las aguas residuales para eliminar este nutriente, a fin de prevenir la eutrofización de los cuerpos de aguas. Entre los tratamientos más utilizados se encuentra la precipitación química con la utilización de sales de hierro y aluminio donde los fosfatos disueltos se convierten en fosfatos no disueltos y se eliminan de las aguas residuales como materia sólida (Figura 57).

Figura 57.

Eliminación de fósforo por precipitación química.



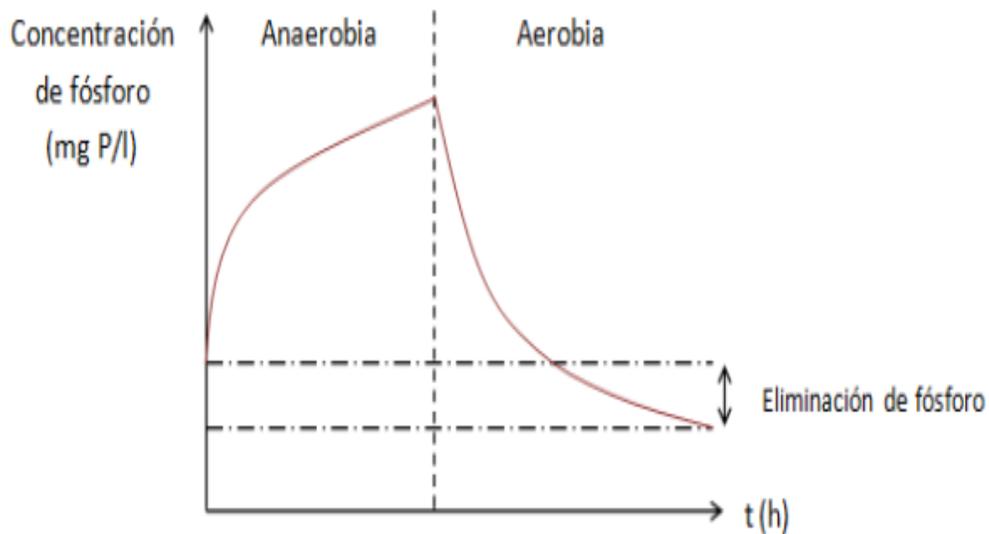
Fuente: <https://abionik.com/es/productos/las-aguas-residuales-tratamiento/tecnologia-de-dosificacion/plantas-de-precipitacion-de-fosfatos>

Existen también métodos biológicos que se fundamentan en la alternancia de las condiciones anaerobias y aerobias (Suárez, 2019). En trabajos de investigación desarrollados a lo largo de los años, se ha demostrado la utilidad de los microorganismos en la liberación y acumulación del fósforo en sistemas de lodos activados; además, en otros estudios, en los que se utilizaron reactores discontinuos

tipo SBR (*Sequencing Batch Reactor*), se demostró la variación en la concentración del fósforo inorgánico y soluble, de forma creciente en la fase anaerobia y decreciente en la aerobia, tal como se puede observar en la Figura 57 (Sánchez, 2021). Los microorganismos utilizados en la eliminación biológica de fósforo, son aquellos que pueden acumular este elemento de manera intracelular, los cuales son denominados bacterias PAO (*Polyphosphate Accumulating Organisms*). Estas bacterias poseen una tasa de crecimiento muy lenta, comparada con otras bacterias, por lo tanto, necesitan una ventaja que les permita competir con las de su especie (Sánchez, 2021) (Figura 58).

Figura 58.

Perfil de fósforo inorgánico en fase anaerobia y fase aerobia.



Fuente: Sánchez, (2021).

Los tratamientos biológicos logran eliminar entre un 20 y un 30% de fósforo, gracias a que las bacterias PAO lo utilizan en la síntesis celular y en el transporte de la energía; pero se ha observado que bajo ciertas condiciones estos microorganismos acumulan más fósforo del que necesitan, que puede ser eliminado al separar de las aguas residuales las células que lo contienen. Las condiciones que favorecen la proliferación de las bacterias PAO según Sánchez (2021) son:

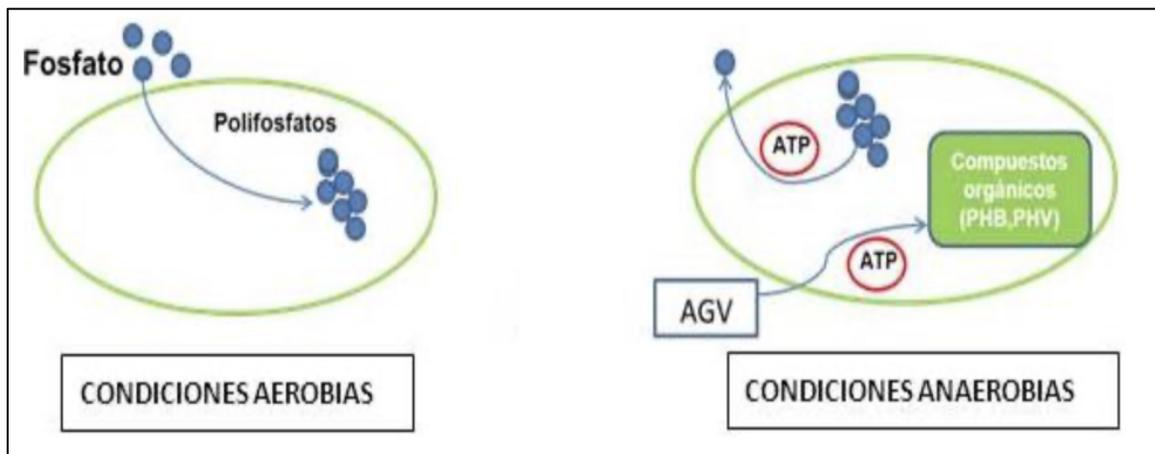
- Alternabilidad de condiciones anaerobias y aerobias dentro del SBR.
- Alta concentración de ácidos grasos volátiles en el agua residual.

El metabolismo de estos microorganismos se desarrolla en dos fases o etapas, una primera fase anaerobia, en la cual no hay presencia de oxígeno, de nitritos, ni de nitratos, y en la que las bacterias PAO asimilan ácidos grasos volátiles (AGV) y los almacenan intracelularmente en forma de polihidroxialcanotatos (PHA), utilizando para esto la energía producida a causa de la oxidación del glucógeno y de los polifosfatos que se encuentran en el interior de las células. De manera que, en esta fase anaerobia, se destruye glucógeno y polifosfatos, se generan productos de almacenamiento de polihidroxibutirato (PHB) en las bacterias PAO, los cuales aumentan a medida que el polifosfato disminuye y se libera el fósforo en forma de ortofosfatos (Suárez, 2019).

Por otra parte, en la fase aerobia, las bacterias no compiten por el sustrato, sino que consumen sus reservas internas. Los polihidroxibutiratos (PHB) se metabolizan y la energía producida por la oxidación de estos PHB es usada para el crecimiento de células nuevas y para formar enlaces de polifosfatos. El ortofosfato liberado se une a los polifosfatos dentro de las células bacterianas, que al convertirse en biomasa es eliminada del reactor con los lodos residuales, por lo que finalmente el fósforo es eliminado de las aguas residuales, tal como se observa en las Figuras 59 y 60 (Suárez, 2019). En la Figura 60 se observa una planta de eliminación biológica del fósforo.

Figura 59.

Eliminación biológica del fósforo.



Fuente: GMGestions, (2020).

Figura 60.

Planta de eliminación biológica del fósforo.



Fuente: Salas (2022).

2.3 Adsorción sobre carbón activado

El proceso de adsorción utilizando como adsorbente carbón activado es un tratamiento avanzado de aguas residuales aprobado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), de Estados Unidos como uno de los mejores sistemas de tratamiento para eliminar contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos, contenidos en esas aguas (Peco, 2020).

Durante el proceso de adsorción las moléculas a eliminar son retenidas en la superficie del sólido, que en este caso es el carbón activado, a causa de las fuerzas de atracción que participan en el proceso; en el caso particular del tratamiento de efluentes, consiste en la eliminación de un contaminante orgánico soluble, que en este proceso es llamado adsorbato, a través de la unión a una superficie, que es llamado adsorbente. El proceso inverso a la adsorción se le conoce como desorción (Peco, 2020).

Tipos de adsorción

Según las fuerzas de atracción aplicadas existen dos tipos de adsorción, las cuales son: adsorción física y adsorción química. La adsorción física, también llamada fisisorción, es aquella en la cual se aplican fuerzas de unión de naturaleza física entre el adsorbato y el adsorbente, un ejemplo de estas son las fuerzas de Van der Waals. Con respecto a la adsorción química, llamada quimisorción, esta tiene lugar cuando las fuerzas aplicadas son de naturaleza química, como por ejemplo las fuerzas covalentes (Peco, 2020).

Variables que influyen en el proceso de adsorción

Bonilla (2017), afirma que las variables más importantes que afectan a la adsorción son la temperatura, el pH, el tiempo de contacto y el tamaño de la partícula. Las cuales se explican seguidamente.

- Temperatura: en general, cuanta más alta es la temperatura, más rápido se alcanza el equilibrio, sin embargo, se adsorben menos impurezas. Es decir, que, de no ser el tiempo importante, se lograría una mayor adsorción a temperaturas más bajas. Esto rara vez es práctico a escala industrial, por lo que elevar la temperatura,

en caso de ser posible, generalmente es beneficioso. Además, es importante señalar que el aumento de temperatura no es directamente proporcional a la cantidad de impurezas adsorbidas.

- Valor de pH: muchos compuestos que imparten color, cambian en estructura al ocurrir variaciones de pH, es decir, que dependen del pH. Además, la adsorción es más eficiente a pH bajo, por lo cual, si el comportamiento es incierto, es mejor no modificar el pH y utilizar un carbón activado que trabaje con un valor de pH cercano al del proceso.
- Tiempo de contacto: la adsorción se desarrolla de manera muy rápida al principio de la operación, pero con el tiempo disminuye la velocidad hasta que se detiene cuando alcanza un punto de equilibrio.
- Tamaño de partícula de carbón: debido a que la superficie de adsorción del carbón es interna, el tamaño de las partículas no tiene nada que ver con la capacidad de adsorción de este, pero afecta la velocidad para llegar al equilibrio. De manera que las desventajas de las partículas muy pequeñas son para el carbón granular, una mayor caída de presión para el carbón en polvo baja filtrabilidad.

Etapas del proceso de adsorción

El proceso de adsorción se desarrolla en tres etapas (Peco, 2020):

- Macrotransporte: se refiere al movimiento que realiza el adsorbato por los macroporos del carbón activado.
- Microtransporte: referido al movimiento que realiza el adsorbato a través de los microporos del adsorbente.
- Adsorción: se refiere a la retención o fijación del adsorbato en la superficie del carbón activado.

Ventajas de la adsorción

La adsorción es el método más utilizado para eliminar los contaminantes en soluciones acuosas residuales debido a que presenta las siguientes ventajas (Peco, 2020):

- Es de baja sensibilidad a los tóxicos.

- Asequibilidad en el coste.
- Alta calidad.
- Utiliza adsorbentes comunes como el carbón activado, el gel de sílice, las resinas sintéticas y la alúmina.

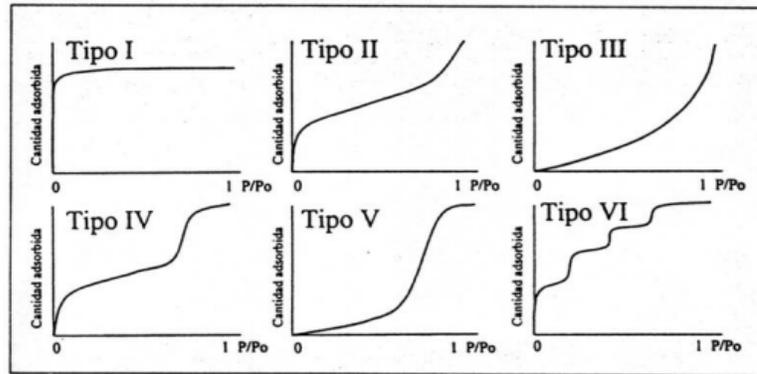
2.4 Isotermas de adsorción

Cuando se realiza un estudio concreto de un proceso de adsorción, es necesario saber algunos datos de la velocidad y el equilibrio con que este es alcanzado. Esta información es obtenida a través de las isotermas de adsorción correspondientes, las cuales mostrarán la capacidad que tiene un adsorbente de una molécula específica para adsorberla. Las isotermas de adsorción reflejan de manera gráfica la cantidad adsorbida en moles adsorbidos / gramos de adsorbente, respecto a la cantidad remanente en equilibrio. Además, la forma en que se presentan las isotermas, permiten inferir la clase de interacción que se produce entre el adsorbente y el adsorbato, pues éstas han sido clasificadas en el aspecto de la forma particularmente (Peco, 2020).

Tal como se puede observar en la Figura 61, se presentan los tipos de isotermas de adsorción establecidas por la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) para la obtención de información del equilibrio y la velocidad del proceso.

Figura 61.

Isotermas de adsorción.



Fuente: <http://www.uco.es/>

Las isotermas de adsorción aportan información de un proceso según su tipo, de la siguiente manera (Peco, 2020):

- La Isotherma Tipo I, la cual también es conocida como la Isotherma de Langmuir en monocapa, es aquella en la cual la cantidad que se adsorbe va aumentando hasta alcanzar un valor límite. Es típica de una adsorción química.
- La Isotherma Tipo II: esta se refiere a una adsorción de tipo física y en multicapas.
- La Isotherma Tipo III se refiere a una adsorción de tipo física y en multicapas, pero es común en sistemas de baja adsorción.
- La Isotherma Tipo IV es típica de un material con porosidad, pues se da la adsorción de la primera capa, además de un apilamiento de estas, es decir, multicapas.
- La Isotherma Tipo V al igual que la anterior, es típica de un material con porosidad, y se produce la adsorción de la primera capa, además del apilamiento de estas (multicapas).

- La Isoterma Tipo VI se refiere a la adsorción en multicapas, pero con una saturación de la anterior.

Generalmente, en los procesos de adsorción la isoterma de tipo I, también es conocida como isoterma de Langmuir, quien postuló un modelo fundamentado en una serie de suposiciones básicas (Peco, 2020), que se mencionan a continuación:

- 1) Como el adsorbente posee centros activos uniformes y equivalentes, estos son ocupados por una sola molécula.
- 2) La energía no depende del grado de ocupación que tenga la monocapa y es igual para cada lugar de adsorción.
- 3) El equilibrio que se establece es dinámico.
- 4) Cuando las moléculas chocan con la superficie, pueden suceder dos cosas: (i) dado que el centro activo está vacío, se adsorbe y libera energía. (ii) alternativamente, no forma un complejo porque el sitio activo está unido a una molécula.
- 5) El proceso de adsorción es localizado.

2.5 Carbón activado

El carbón activado es un complejo polímero orgánico que posee una gran superficie específica y excelente conductividad eléctrica. Se trata de un material carbonáceo, es decir, que su mayor constituyente es el carbono, altamente poroso, que presenta una alta capacidad de adsorción (Bonilla, 2017).

Este material es capaz de mejorar las características físicas de los fluidos, tales como olor, sabor y color; también puede reducir la materia orgánica natural, impidiendo la formación de productos resultados de la oxidación y la desinfectación como los trihalometanos, y la eliminación de algunos contaminantes emergentes como los antibióticos (Peco, 2020).

Las propiedades de adsorción del carbón activado se deben principalmente a la superficie específica que presenta, al alto grado de reactividad, al tamaño de los poros, que están involucrados directamente con el acceso de las moléculas al interior, pues los macro poros que tienen baja superficie específica, funcionan como conductos de entrada al interior, donde se consiguen los meso y micro poros, en los cuales se desarrolla la adsorción. De manera que, un carbón activado de excelente calidad debe poseer una micro porosidad significativa, pero adicionalmente, una macro y una meso porosidad tal, que permitan el ingreso y difusión de los granos al interior de la partícula de forma rápida (Bonilla, 2017).

Características del carbón activado

Entre las características fundamentales que debe poseer un carbón activado para ostentar una buena calidad adsorbente están:

- Área superficial interna que oscile entre los 1200 - 1500 m²/g.
- Alto grado de porosidad.
- Tamaño de los poros.
- Distribución de los poros.

Según lo expresado por Bonilla (2017), la porosidad del carbón activado está referida a la presencia de poros o huecos vacíos de diferentes tamaños, que están clasificados según la IUPAC de acuerdo a su diámetro en:

- Microporos: con un diámetro menor de 2 nm, tamaño que es adecuado para adsorber moléculas muy pequeñas. En estos poros es donde se produce propiamente la adsorción, gracias a que son responsables del valor elevado de la superficie interna.
- Mesoporos: su diámetro oscila entre 2 y 50 nm y estos son los que adsorben moléculas de tamaño intermedio.
- Macroporos: cuyo diámetro es superior a los 50 nm y son los encargados de adsorber las moléculas de gran tamaño.

Tratamiento de las aguas residuales por adsorción con carbón activado

El tratamiento de aguas residuales contaminadas con carbón activado se considera técnicamente un proceso viable, eficaz y económico. Generalmente, es un tratamiento avanzado que se utiliza para eliminar compuestos orgánicos refractarios, sulfuros y metales pesados. Para el desarrollo del proceso de adsorción, es necesario que las aguas residuales o efluentes fluyan a través de los lechos de carbón activado, contenidos en filtros por ejemplo (Figura 62), para que la materia contaminante sea adsorbida, considerando que las variaciones de las condiciones del proceso como pH, temperatura, tiempo de contacto, dependerán de los contaminantes presentes en el efluente y la concentración de cada uno de ellos (Bañuelos, 2015).

Figura 62.

Equipos para la adsorción con carbón activo.



Fuente: <https://controlvi.com/sistemas-de-adsorcion-carbon-activo/>

2.6 Filtración sobre medio granular

La filtración sobre un medio granular es una operación de separación de sólidos que se fundamenta en la capacidad que posee un lecho filtrante de retener sólidos en el seno o volumen, aunque también se puede realizar simultáneamente la eliminación superficial (Mirafuentes, 2021).

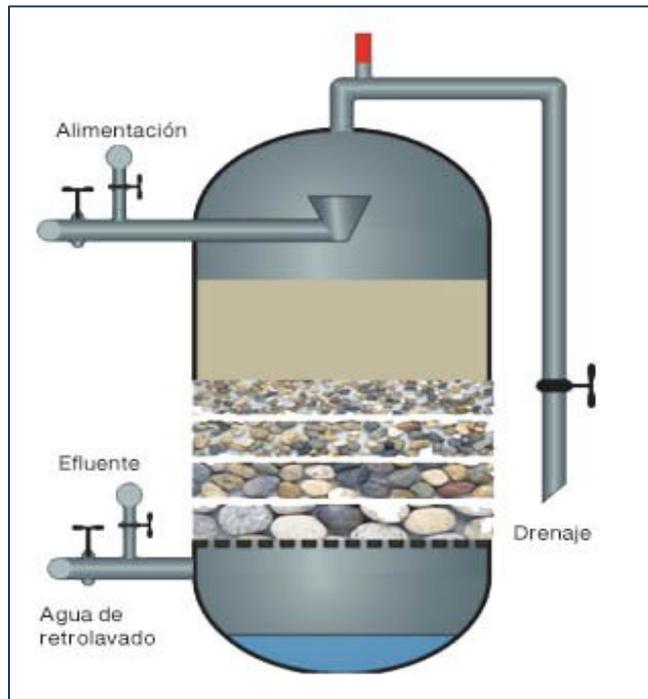
Medio granular

De acuerdo a lo expresado por Arévalo (2007), un medio granular es un material filtrante que esta compuesto principalmente de partículas macroscópicas capaces de interactuar entre sí, por la intervención de fuerzas de contacto. Los granos varían en tamaño desde las décimas de milímetros hasta los centímetros o metros en algunas aplicaciones industriales o geológicas.

El medio granular más comúnmente utilizado dentro de filtros para remover sólidos suspendidos es un lecho de grava y arena y es llamado así, porque está compuesto de capas de grava y capas de arena tal como se observan en la Figura 63, que se encargan de retener las partículas suspendidas en el agua residual (Rocha Castro, 2010) .

Figura 63.

Filtro con medio granular.



Fuente: Carbotecnia (2021).

Mecanismos de la filtración sobre medio granular

Según Mirafuentes (2021), entre los mecanismos a través de los cuales se desarrolla la filtración se encuentra básicamente tres:

- (i) Retención por tamizado mecánico: es el mecanismo principal de la eliminación de sólidos suspendidos en el proceso de filtrado sobre medios granulares, en el cual las partículas a filtrar que son más grandes que los poros del medio granular son retenidas de forma mecánica, efecto que no solo ocurre en la superficie del medio, sino también en el interior del lecho granular.
- (ii) Transporte de las partículas: los sólidos en suspensión deben ser transportados a través del medio granular y esto se desarrolla a su vez, mediante la interacción de diferentes mecanismos o sistemas, bien sea que estos actúen simultáneamente o no; sin embargo, la relevancia de cada uno dependerá de las

características tanto de las aguas como del medio granular (Mirafuentes, 2021). Estos sistemas son los siguientes:

- **Sedimentación:** en este mecanismo o sistema el medio filtrante se considera como un tubo decantador y se presenta solo cuando el material en suspensión es mayor a $1\ \mu\text{m}$, y su velocidad de sedimentación es alta.
- **Fuerza centrífuga:** se presenta cuando el agua dentro del filtro circula por las canales con un movimiento curvilíneo, de modo que se generan fuerzas de inercia que a su vez causan que las partículas choquen unas con otras, formando flóculos.
- **Intercepción:** cuando el escurrimiento durante la filtración es de flujo laminar, las partículas suspendidas circulan por las líneas de la corriente y como estas tienen una densidad muy cercana a la del agua, son removidas cuando las líneas de la corriente están muy cercanas entre sí y las partículas se interceptan. Este sistema se hace más eficiente a medida que la cantidad de partículas aumenta, pues chocan con el medio granular quedando adheridas en su superficie.
- **Difusión:** ocurre cuando los sólidos en suspensión de menor dimensión realizan movimientos erráticos que promueven los choques y favorecen la formación de flóculos y la adherencia de las partículas al medio granular.
- **Impacto inercial:** este mecanismo se da cuando las líneas de las corrientes al acercarse a los granos del medio filtrante divergen ocasionando que los sólidos suspendidos que mantienen su trayectoria inicial chocan con el material granular, adhiriéndose a este.
- **Acción hidrodinámica:** mecanismo que se produce cuando las partículas que floculan son de un tamaño igual o mayor a $10\ \mu\text{m}$ y la velocidad de escurrimiento es constante, por lo que dichas partículas serán sometidas a velocidades tangenciales y variables, en direcciones perpendiculares al escurrimiento.

- Cernido: ocurre cuando los sólidos suspendidos tienen un tamaño superior a los poros del medio granular, por lo cual quedan atrapadas en los espacios entre los granos del medio. Esto sucede solo en las capas superficiales del medio filtrante y con partículas resistentes al flujo constante.

(iii) Mecanismos de adherencia: la adherencia o fijación de las partículas transportadas a los granos del material filtrante dependerá fundamentalmente de las características de ambos y esto se logrará solo si las partículas resisten la fuerza del flujo sobre ellas. Este mecanismo es posible gracias a fenómenos de acción en la superficie de los granos filtrantes y pueden ser controlados por medio de parámetros físico-químicos, como los fenómenos de Adsorción Física, las Fuerzas de Van der Waals, las Fuerzas Electrostáticas y la Adsorción Química.

Factores que influyen en la filtración en medio granular

La eficiencia de la filtración en medio granular está directamente relacionada con las características de: la suspensión, la hidráulica del proceso y del medio granular filtrante (Mirafuentes, 2021). Las cuales se explican seguidamente.

- Características de la suspensión: los tipos de partículas suspendidas, el tamaño de partículas suspendidas, la densidad de partículas suspendidas, la temperatura del agua por filtrar y el pH del afluente tratado, influyen significativamente en la eficiencia del proceso; pues partículas de gran tamaño, peso y densidad pueden causar pérdidas de carga. Por otra parte, en cuanto a la temperatura, se tiene que un aumento de esta disminuye la viscosidad en el recurso facilitando la sedimentación de las partículas mayores de 1 μm ; y, con respecto al pH del afluente se tiene que el mismo afecta la capacidad del intercambio iónico entre los granos del medio filtrante y las partículas suspendidas.
- Características de la hidráulica del proceso: entre estas características se pueden mencionar la carga hidráulica disponible, la tasa de filtración, el método de control de los filtros y la calidad del efluente; pues, aunque las tasas de filtración sean bajas, no necesariamente se asegura que el agua filtrada sea de mayor calidad.

- Características del medio granular filtrante: el tipo de filtro y el material filtrante se deben seleccionar de acuerdo a las características del agua a tratar y de la calidad esperada de esta, a la salida del filtro. Además, se deben considerar otras particularidades como el peso específico del medio filtrante y el espesor de las capas filtrantes.

Tratamiento de aguas residuales por filtración en medio granular

Durante el tratamiento de aguas residuales por filtración con medios granulares el agua se hace pasar a través de equipos de filtración (Figura 64), generalmente a presión, con la finalidad de que las partículas que no hayan podido retirarse en tratamientos anteriores, como la sedimentación por ejemplo, se adhieran o fijen físicamente al material filtrante empleado por sí mismas y, de este modo, obtener un recurso hídrico adecuado para ser utilizado en diferentes actividades humanas, agrícolas o industriales, o que pueda ser vertido al ambiente sin causar daño en los ecosistemas (Ramírez & Ospina, 2020).

Figura 64.

Equipos para filtración en medio granular.



Fuente: <https://es.genesiswatertech.com/entrada-en-el-blog/gu%C3%ADa-breve-y-sencilla-aplicaciones-de-filtraci%C3%B3n-de-medios-granulares-municipales-y-comerciales/>

2.7 Precipitación química

La precipitación química es un tratamiento utilizado para retirar contaminantes, principalmente metales suspendidos, de las aguas residuales, hasta los niveles permitidos que no causan daño al ambiente. Para lograr el objetivo del tratamiento, el pH del efluente debe ser ajustado, con la adición de compuestos químicos, los cuales reaccionan con los iones metálicos que se encuentran disueltos promoviendo que estos se conviertan en precipitados insolubles y puedan ser retirados con facilidad del efluente por sedimentación o filtración (Martínez & Peña, 2019).

Se puede decir entonces, que la precipitación química es un tratamiento que se desarrolla en tres etapas: la coagulación, la floculación y la sedimentación o decantación (Figura 65). Esta precipitación se logra debido a que con la adición de los agentes precipitantes y la mezcla rápida a la que es sometido el efluente para la dispersión de estos, las fuerzas de las partículas contaminantes se debilitan promoviendo el choque entre ellas, lo que a su vez origina que las partículas se agrupen para así formar otras de tamaño mayor, es decir que, se produce una coagulación.

Luego de un tiempo predeterminado de mezcla rápida, es necesario disminuir la velocidad de la agitación, para evitar que se destruyan los flóculos ya formados y se generen otros de mayor tamaño, denominándose esta etapa como floculación. Finalmente, debido al tamaño de las partículas, los flóculos formados se separan, observándose fácilmente dos fases, una sólida formada por los flóculos y una líquida, es decir que ha ocurrido la sedimentación (Martínez & Peña, 2019).

Factores que afectan a la precipitación química

Es importante tener en cuenta que existen factores que afectan la precipitación química, y por lo tanto resulta necesario que estos puedan ser de alguna forma controlados o monitoreados de manera que, la eliminación de los contaminantes pueda desarrollarse eficientemente. Estos factores según Martínez & Peña (2019) son los siguientes:

- **Cinética del proceso:** pues de esta va a depender la concentración del agente químico que se agregará, así como también la temperatura y la agitación o mezcla constante.
- **Caudal del efluente:** dato necesario para poder determinar la dosificación correcta del agente químico.
- **Temperatura:** factor muy importante a considerar pues, con el incremento de la temperatura, se incrementa la solubilidad de las sustancias sólidas y se disminuye la solubilidad de los gases.
- **Composición del efluente:** con esta información se determina el reactivo que se utilizará, pues cada metal disuelto necesita un reactivo diferente y una dosis correcta.
- **Efecto salino:** cuando en las aguas a tratar existe la presencia de sales diferentes a las solubles y la disolución está saturada, se produce un incremento en la solubilidad del precipitado.
- **Constante de solubilidad:** esta constante que también es conocida como K_{sp} , es una constante de equilibrio que permite establecer la solubilidad de un compuesto, considerando que, a menor valor menor de K_{sp} , menor es la solubilidad del compuesto tratado.
- **Efecto del ion común:** cuando en una disolución donde se encuentra un ion en equilibrio ocurre un cambio de la concentración por causa de una sal, se produce un desplazamiento del equilibrio iónico.

Productos utilizados en la precipitación química

Los agentes químicos utilizados en el tratamiento de aguas residuales por precipitación química deben ser capaces de formar un precipitado voluminoso y absorbente con los contaminantes del agua. Existen agentes químicos tanto de tipo orgánico, como inorgánico, y entre los más usados se encuentran los derivados de las sales de aluminio, de hierro y algunos polielectrolitos. Además, estos precipitantes químicos deben lograr la desestabilización de las partículas, para que ocurra una interacción entre ellas, y promover una agrupación de estas para reforzar así la floculación (Alvarado & Mayancela, 2022).

De acuerdo a Alvarado & Mayancela (2022), algunos de los más utilizados actualmente son:

- Sulfato de Aluminio: también conocido como alumbre, este compuesto de fórmula química $Al_2(SO_4)_3$, es uno de los mayormente usados en el tratamiento de aguas residuales, pues es económico, accesible y proporciona excelentes resultados. Trabaja a valores de pH entre 6 y 8 y por lo general, produce flóculos pequeños, utilizándose efectivamente en la precipitación de fósforo y coloides orgánicos.
- Cloruro Férrico: este precipitante químico, también llamado tricloruro de hierro, pertenece a los haluros metálicos y su fórmula química es $FeCl_3$. Posee propiedades muy características que le proporcionan una gran versatilidad y alta capacidad para la formación de flóculos, aunque tiene la desventaja de transmitir color a las aguas en tratamiento. Es efectivo en amplios rangos de pH y temperatura, y puede formar iones trivalentes de gran peso molecular, siendo esto muy favorable durante la coagulación
- Policloruro de Aluminio: este agente precipitante, conocido también por sus siglas PAC, es muy utilizado en el tratamiento de aguas residuales industriales gracias a que mejora la remoción de turbidez, produce menos residuos de aluminio, brinda un costo menor en su operación y una reducción de lodos en un 25% y hasta más, al ser comparado con otros productos como el cloruro de aluminio, el sulfato de aluminio, el cloruro férrico y el sulfato férrico.

Tratamiento de aguas residuales por precipitación química

Este tratamiento es muy frecuente en la depuración de las aguas residuales, sobre todo si se quiere obtener una recuperación de compuestos (Beleño et al., 2022). En términos generales, el tratamiento es realizado en un sistema como el mostrado en la Figura 67, provisto para el proceso de coagulación de tanques equipados con impulsores giratorios que permiten realizar la mezcla rápida y para la floculación con palas agitadoras para realizar la mezcla lenta. Además, posee un equipo para sedimentación con unidades clarificadoras que tienen placas inclinadas o tubos, funcionando por gravedad.

Durante el proceso el efluente a tratar entra al sistema, donde se adiciona la dosis necesaria del agente precipitante, previamente determinado a través de una prueba de jarras (Figura 68), para preceder a realizar la mezcla rápida, por un tiempo determinado, y seguidamente la mezcla lenta, luego de la cual se realiza la sedimentación. Los lodos son retirados y se procede, según los contaminantes precipitados, a un tratamiento posterior para la recuperación de los productos o a la disposición final de los lodos.

Figura 65.

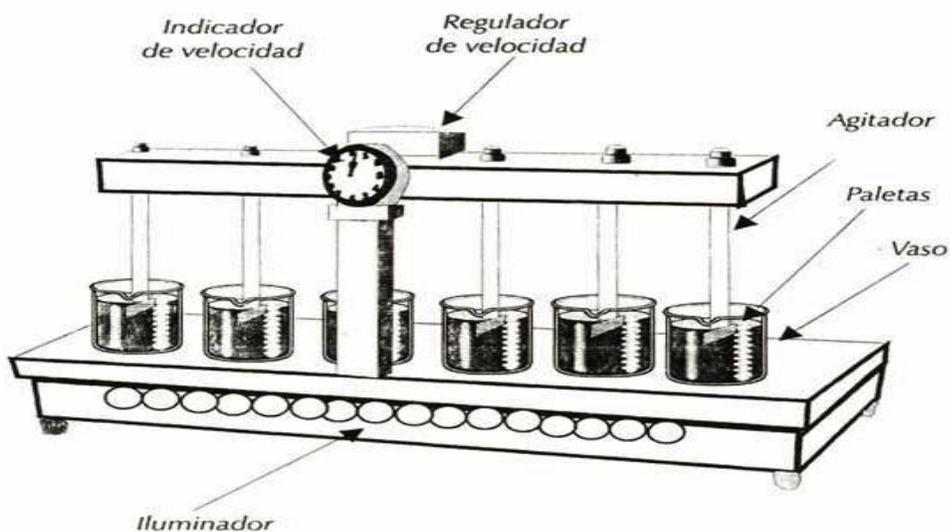
Precipitación química en las aguas residuales



Fuente: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-precipitacion-quimica.html>

Figura 66.

Prueba de jarras.



Fuente: <https://repositorio.sena.edu.co/>

En vista que, algunos efluentes industriales son difíciles de purificar y eliminar algunos contaminantes a lo largo del tren de tratamiento debido a la procedencia de sus contaminantes, es necesaria la aplicación de tratamientos avanzados de aguas residuales que purifiquen lo más posible el efluente. Aunque, los tratamientos primario, secundario y terciario eliminan la mayoría de sólidos suspendidos, materia orgánica y otros contaminantes, han resultado ser insuficientes para el reciclaje industrial de las aguas.

Es por esto, que se han incluido en las plantas de tratamiento una serie de procesos adicionales para tratamientos avanzados de las aguas residuales, con la finalidad de lograr remociones orgánicas más eficientes y mayor eliminación de sólidos y así eliminar totalmente tanto la materia orgánica como la inorgánica; logrando además recuperar un alto porcentaje de agua.

CAPITULO VIII

TRATAMIENTO TERCIARIO O FINAL

1. Introducción

En líneas generales, el tratamiento terciario es el procedimiento más completo de todos los tratamientos aplicados, sin embargo, su utilización no es común debido a su alto costo. Principalmente, consiste en la aplicación de procesos físicos y químicos combinados, usando precipitaciones, filtraciones y cloraciones, a fin de disminuir drásticamente el contenido de carga orgánica, especialmente nitratos y fosfatos a la salida del efluente, con la ventaja que las aguas residuales sometidas a un tratamiento terciario no permitirán un crecimiento microbiano importante.

En algunos países, un porcentaje considerable de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) tienen la capacidad tecnológica para aplicar tratamientos terciarios, posibilitando la reutilización del agua, estimándose que entre un 7 y un 13% del agua residual mundial, es tratada y reutilizada, es decir aproximadamente 400 hm³ por año (Asociación Española de Desalación y Reutilización, 2019).

Sin embargo, debido que, para poder ser reutilizada, un agua residual debe ser sometida adicionalmente a tratamientos que mejoren su calidad luego de salir de los tratamientos de depuración, porque, si bien es cierto, estos tratamientos disminuyen la carga de los contaminantes presentes en las aguas residuales de manera que estas puedan ser vertidas a cauces naturales, la calidad no las califica como recurso hídrico opcional.

Estos tratamientos adicionales, son los conocidos como terciarios, y generalmente pueden ser aplicados en las mismas instalaciones o plantas de los anteriores tratamientos o EDAR, seguidamente del tratamiento secundario, más específicamente en la sección de regeneración o desinfección del agua, también conocida como ERA (Estación de Regeneración de Agua). En esta sección se implementan los procedimientos avanzados para depuración, que persiguen reducir la carga residual de contaminantes, los sólidos en suspensión, la turbidez y los

microorganismos patógenos como virus y bacterias, asegurando la calidad del agua a nivel sanitario.

Por otra parte, se tiene que la selección del tratamiento terciario va a depender principalmente de dos factores, el primero se refiere a los procesos aplicados anteriormente, es decir, tratamientos primario y secundario; y el segundo, se trata de la calidad esperada del agua regenerada, de manera que cumpla con los requerimientos para su reutilización y con la normativa legal vigente.

Estos tratamientos van a diferenciarse en la complejidad de los procesos, lo que repercutirá en los costos de inversión, en el mantenimiento de las plantas de tratamiento y en el precio del agua tratada o regenerada, por lo que el aspecto económico, aunque no está entre los factores principales de selección, también es importante a la hora de la elección del tratamiento terciario a aplicar.

Las técnicas en que los tratamientos terciarios se fundamentan pueden ser agrupadas o clasificadas de manera resumida, tal como se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13.

Técnicas de tratamientos terciarios.

Técnicas	Tratamientos
Filtración	Filtración profunda, Filtración superficial.
Tecnologías de membranas	Microfiltración, Ultrafiltración, Nanofiltración, Ósmosis inversa, Biorreactores de membranas (MBR), Electrodiálisis.
Técnicas de desinfección	de Cloración con Cl ₂ , Cloración con ClO ₂ (NaClO ₂), Radiación UV.
Oxidación avanzada	Electro-oxidación, Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂), Ozonación (O ₃), Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) u Ozonación (O ₃) combinado con Radiación UV.
Otras técnicas terciarias	Adsorción con carbón activado, Intercambio iónico, Desmineralización, Desorción de aire (Stripping),

Fuente: modificada de Morillo (2020).

Sin embargo, a continuación, se detallará solo el más comúnmente utilizado en la etapa terciaria del tratamiento de aguas residuales, la desinfección.

2. Desinfección

Con la función principal de eliminar microorganismos patógenos en las aguas residuales que pueden representar un peligro para la salud, se incluye un proceso de desinfección en el tratamiento terciario. El cual puede realizarse de diferentes formas: con la adición de productos químicos como el peróxido de hidrógeno, el hipoclorito de sodio, el dióxido de cloro y el ozono, con la aplicación de radiación ultravioleta y de ultrasonido, y por fotocatalisis.

Este tratamiento es la etapa final antes de realizar la distribución de las aguas residuales tratadas al ambiente, puede ser alcanzado con la adición de cloro, la radiación ultravioleta y la ozonización, por lo cual, estos serán los tratamientos explicados a continuación. Por otra parte, cuando un agua residual no se somete a un tratamiento desinfección, difícilmente puede arrojar valores con menores a 1000 coliformes fecales/100 mL, el cual es un parámetro de calidad requerido para poder reutilizar el agua para riego de zonas agrícolas o áreas verdes que puedan ser usadas por el público.

2.1 Dosificación de cloro

Con este proceso se busca mantener el agua desinfectada en un depósito final antes de la distribución, con la aplicación de químicos para evitar la proliferación de microorganismos y además hacerla apta para su reutilización.

El reactivo químico más utilizado en la desinfección de las aguas ha sido el cloro en sus múltiples combinaciones, esto se debe fundamentalmente a que una solución de este compuesto puede llegar a eliminar una población entera de la bacteria *Escherichia coli* en aproximadamente un minuto en aguas cristalinas. Para las aguas residuales, sin embargo, el proceso es un poco más complicado, necesitando mayor tiempo de reacción, puesto que influyen varios factores tales como los planteados por AGRUPAL (2020):

- Las aguas residuales industriales contienen una importante concentración de materia orgánica susceptible a oxidación, por lo que el cloro reaccionará también con esta carga, al igual que con las bacterias. De manera que, el cloro se desgastará con el contenido orgánico, quedando una importante cantidad de microorganismos sobreviviendo en el efluente, y apareciendo en los análisis de coliformes fecales.
- Los sólidos suspendidos presentes actuarán como una barrera física, pues si las bacterias se resguardan dentro de las partículas en suspensión, el agente químico desinfectante tardará en alcanzar los microorganismos patógenos, mientras permanece en el agua.
- Las radiaciones ultravioleta solares catalizan la transformación del cloro en sus formas activas en ion cloruro, de manera que una porción de cloro se consumirá sin reaccionar.
- El aumento de la temperatura ocasiona un aumento en la velocidad de las reacciones.
- Un valor alto de pH causará un aumento en el tiempo de reacción del cloro con el agua o que se necesite mayor cantidad de cloro, pero si el pH es realmente alto, se deberá aplicar una neutralización previamente, lo que podría hacer que este proceso de desinfección sea inviable.
- Una concentración constante de cloro es difícil de lograr debido a que tanto el caudal como los parámetros de las aguas residuales son variables. Lo ideal en estos casos son los sistemas de cloración controlados por bucles de retroalimentación con medidores de flujo y de parámetros de salida como cloro residual, redox, entre otros.

2.2 Equipos para la dosificación de cloro

Los sistemas para la cloración incluyen un sistema automático de medición y control de la dosificación de cloro libre mediante sonda de cloro libre o de redox o dosificación de cloro (Figura 67) proporcional al caudal de agua depurada mediante la instalación de un contador emisor de impulsos (Belzona, 2010).

Además, para la aplicación de este tratamiento es necesario disponer de un depósito exclusivo para realizar la cloración ya que se requiere un tiempo de contacto adecuado del cloro con el agua para asegurar la desinfección.

Figura 67.

Sistema automático de medición y control de la dosificación de cloro.



Fuente: Hidritec (2016).

3. Radiación UV

El tratamiento de aguas residuales mediante rayos ultravioleta (UV) es un método rápido y efectivo para desinfectar el agua de consumo humano, sin la necesidad de utilizar productos químicos, ni someter el efluente a altas temperaturas. Tanto al ser utilizado como tratamiento único o como complemento a un tratamiento multi-

etapas, la luz UV sigue siendo una tecnología eficaz para la desinfección final de las aguas residuales (Vieta, 2019).

Este tratamiento logra que los efluentes tratados cumplan con las normas de reconocidas organizaciones defensoras de la salud pública como la EPA (Agencia de Protección Ambiental de USA) y la OMS (Organización Mundial de la salud), tanto que, la Water Quality Association (Asociación para la calidad del Agua) con sede en USA, considera a los equipos que utilizan luz UV como uno de los más efectivos métodos para la purificación del agua (Vieta, 2019).

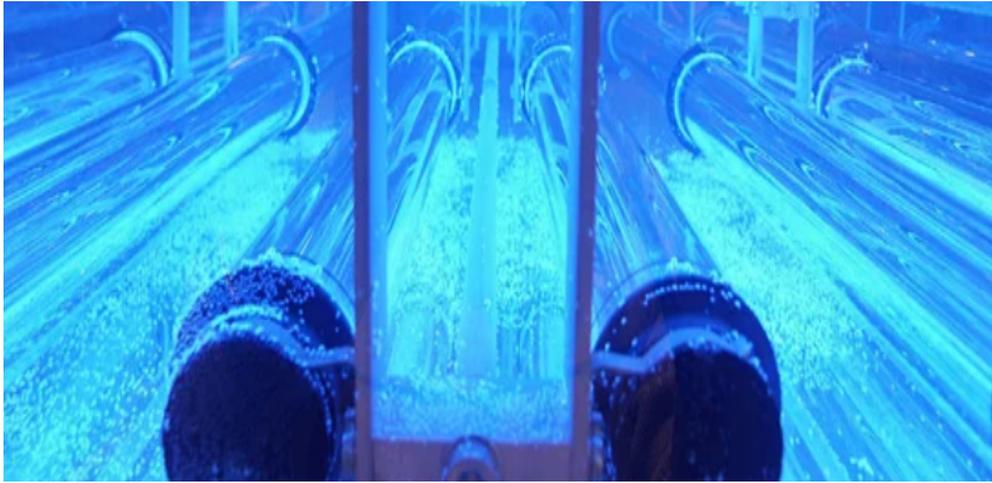
Una de las ventajas de este tratamiento es que no deja residuos o subproductos, de manera que es idóneo para aguas con las que entrarán en contacto personas, animales o vegetación. Sin embargo, una condición importante es que el agua a tratar tenga bajo contenido de turbidez y de sólidos, para que las radiaciones puedan actuar con propiedad; además, requiere un mantenimiento continuo de las lámparas. Estas radiaciones UV tienen la característica particular de que el intervalo de sus longitudes de ondas comprendido entre 200 y 300 nanómetros, es clasificado como bactericida, logrando inactivar bacterias, virus y hasta protozoos.

3.1 Equipos para radiación UV

La desinfección con radiación ultravioleta (UV) utiliza una lámpara de vapor de mercurio para transmitir energía electromagnética al material genético del microorganismo. Cuando esta radiación UV penetra en la pared celular del microorganismo, destruye la habilidad de reproducción de la célula. Estas lámparas actúan mediante la emisión de radiación hacia el flujo de agua, la cual circula sin detenerse por el interior de los purificadores, que contienen estas lámparas (Figura 68).

Figura 68.

Lámpara de vapor de mercurio con radiación ultravioleta (UV).



Fuente: <https://www.hidrotecocr.com/uso-lamparas-luz-ultravioleta-uv-tratamiento-agua/>

4. Ozonización

El tratamiento de las aguas residuales por ozonización tuvo su inicio en EEUU a finales de los 70 y comienzos de los 80, sustituyendo al cloro en el proceso de desinfección. Actualmente, es recomendado para los pre-tratamientos estándar según las normas de la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

El ozono es un compuesto formado por tres átomos de oxígeno, por lo que es un potente oxidante y desinfectante al ser capaz de mejorar la composición de las aguas de vertidos industriales, oxidando compuestos químicos de diversa naturaleza, descomponiéndolos y convirtiéndolos en compuestos sin toxicidad. En algunos casos, se combina el Ozono con radiación UV para atacar algunos compuestos y acelerar el tiempo de reacción (Pérez M. , 2013).

La desinfección con ozono incluye los siguientes mecanismos de (United States Environmental Protection Agency [EPA], 1999):

- La oxidación o destrucción directa de la pared de la célula con la salida de componentes celulares fuera de la misma.

- Las reacciones con los subproductos radicales de la descomposición del ozono.
- El daño a los componentes de los ácidos nucleicos (purinas y pirimidinas).
- La ruptura de las uniones de carbono-nitrógeno que conduce a la despolimerización

4.1 Equipos para la ozonización

La desinfección con ozono se realiza mediante una descarga eléctrica en corona, semejante a los relámpagos, donde el ozono generado (Figura 69) se mezcla a las aguas residuales en depósitos diseñados para tal fin (Figura 70) para lograr la desinfección deseada (Pérez M. , 2013).

Figura 69.

Generador de ozono de alta capacidad.



Fuente: <https://ucsp.edu.pe/fabrican-primer-generador-alta-capacidad-ozono-pais/>

Figura 70.

Aplicación de ozono en aguas residuales.



Fuente: <https://topozono.com/aplicaciones-del-ozono/aguas-residuales-en-las-edar/>

En conclusión, se puede decir que el tratamiento terciario tiene como finalidad fundamental lograr la remoción de nutrientes como el nitrógeno y fósforo. De esta manera se evita que la descarga del agua residual, tratada previamente, cause una eutrofización o crecimiento desmedido de algas en lagunas, lagos o cuerpos de agua de poca circulación, puesto que ello ocasiona el agotamiento del oxígeno disuelto con impactos negativos en la vida acuática del cuerpo de agua receptor. El uso de los efluentes provenientes de plantas de tratamiento terciario puede ser como riego de zonas agrícolas, en crianza de peces y en otras actividades productivas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuatecnica. (2019). Sistema aerobio para tratamiento de aguas residuales. <https://acuatecnica.com/sistema-aerobio-para-tratamiento-de-aguas-residuales/>
- Aguamarket. (2021). Aguamarket.com. Recuperado el 18 de enero de 2022, de www.aguamarket.com
- Alvarado, M., & Mayancela, E. (2022). Optimización del proceso de coagulación-floculación en el tratamiento de agua residual generada en la cuba de decapado en la empresa Galvánica Cía. LTDA. del cantón Cuenca. Ecuador: Universidad de Cuenca - Facultad de Ciencias Químicas.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua: coagulación - floculación. Lima: SEDAPAL.
- APHA AWWA WEF. (1995). Métodos estándar para el examen de agua y aguas residuales. 19.^a edición, Asociación Estadounidense de Salud Pública, Washington DC. <https://scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1372279>
- Arnáiz, C., Isac, L. & Lebrato, J. (2000). Tratamiento biológico de aguas residuales. Revista Tecnología del Agua. https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/Pasar/Tratamiento_biologico_edar.pdf
- Ávila, A., & Rodríguez, A. (2020). Optimización de los procesos de coagulación - floculación en el tratamiento de agua potable a partir de la investigación documental de coagulantes en el proceso de potabilización. . Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Baeza Gomez, E. C. (2018). Informe Tratamiento de Aguas Residuales. Congreso Nacional de Chile, Asesoría Técnica Parlamentaria. Valparaíso: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

- Bas, E. (2017). ¿Qué es y cómo combatir el SULFURO de hidrógeno (H₂S) o gas de alcantarilla? AGUASRESIDUALES.INFO. <https://www.aguasresiduales.info/expertos/tribuna-opinion/que-es-y-como-combatir-el-sulfuro-de-hidrogeno-h2s-o-gas-de-alcantarilla-9kMea>
- Beleño, A., Coll, J., De la Hoz, J., Donado, A., Reyes, J., Castellar, G., y otros. (2022). Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Metalúrgica. J. Comput. Electron. Sci.: Theory Appl., 19-33.
- Belzona. (2010). Tratamientos de aguas residuales. Miami: Belzona Inc.
- Bermeo, M., Bonilla, S., & Coloma, T. (2017). Neutralización: aplicado a aguas residuales. Guayaquil - Ecuador: Grupo Compás.
- Bonilla, L. (2017). Tratamiento de aguas residuales de textilera utilizando carbón activado. Guayaquil -Ecuador: Grupo Compás.
- BOSS TECH. (2020). Página web BOSS TECH. Recuperado el 11 de Noviembre de 2022, de Pagina web BOSS TECH: <https://bosstech.pe>
- Carbotecnia. (2022). pH ¿Qué es y cómo afecta en el agua? <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/que-es-el-ph-del-agua/>
- Centro Europeo de Postgrado y Empresa. (2022). Ceupe magazine. Recuperado el 11 de Noviembre de 2022, de Ceupe magazine: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-el-desbaste.html>
- Cerón, L., & Aristizábal, F. (2012). Dinámica del ciclo del nitrógeno y fósforo en suelos. Revista Colombiana de Biotecnología, 285-295.
- Correa, B. & Mocha, J. (2021). Tratamiento de aguas residuales mediante biodiscos en la planta de beneficio Reina del Cisne, El Pache – Portovelo – El Oro [Tesis de Grado]. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/20119/1/UPS-CT009044.pdf>

- Crites, & Tchonaboglous. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales*. Mc Graw Hill.
- Degrémont. (1979). *Manual técnico del agua* (4. ed.). España: Degrémont .
- Díaz, F. (2013). *Convenios y Protocolos Ambientales*. Revista Ecosocialista.
- Díaz, Y., Salgado, L., Contreras, R. G., González, F., & Toledo, H. (2020). *Eliminación simultánea de contaminantes en fase gaseosa y líquida mediante biofiltración*. Centro Azúcar, vol. 47, N° 2., 52-62.
- Ecomar Fundación. (2020). *¿Qué son las aguas residuales?*
<https://fundacionecomar.org/que-son-las-aguas-residuales/>
- EPA. (1999). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Reactores secuenciales*. Washington D.C: United States Environmental Protection Agency.
- EPA. (2000). *Wastewater Technology Fact Sheet*. Washington: Municipal Technology Branch.
- Ferrer, P. G., & Seco, T. A. (2008). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. Alfaomega Grupo Editor.
- Gaitán, P. & Zavaleta, G. (2021). *Propuesta de planta de tratamiento de aguas residuales mediante lagunas anaerobias en el Centro Poblado Cerrito la Virgen – distrito Huanchaco 2021 [Tesis de Grado]*. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo, Perú.
http://repositorio.upao.edu.pe/bitstream/20.500.12759/9004/1/REP_PAULO.GAITAN_GERARDO.ZAVALETA_PLANTA.DE.TRATAMIENTO.DE.AGUAS.pdf
- Génesis Water Tech. (2019). *7 desventajas del proceso de lodos activados para municipios y organizaciones*. <https://es.genesiswatertech.com/blog-post/7-disadvantages-of-using-an-activated-sludge-process-for-your-municipality-or-company/>

- Goli, A., Shamiri, A., Khosroyar, S., Talaiekhosani, A., Sanaye, R., & Azizi, K. (2019). A Review on Different Aerobic and Anaerobic Treatment Methods in Dairy Industry Wastewater. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, 7(2), 113-141.
- González, R. (2020). Digestores anaerobios. Solución con alta eficiencia energética y bajo costo, para residuos domésticos, de la agricultura y de la industria. https://www.researchgate.net/profile/Roberto-A-Gonzalez/publication/341557242_DIGESTORES_ANAEROBIOS_Solucion_con_alta_eficiencia_energetica_y_bajo_costo_para_residuos_domesticos_de_la_agricultura_y_de_la_industria/links/5ec7262f299bf1c09ad25e17/DIGESTORES-ANAEROBIOS-Solucion-con-alta-eficiencia-energetica-y-bajo-costo-para-residuos-domesticos-de-la-agricultura-y-de-la-industria.pdf
- Grupo Acura. (2022). Lodos activados: qué son y en qué consiste este proceso. <https://grupoacura.com/es/blog/lodos-activados/>
- Hach. (2015). Fósforo. <https://es.hach.com/parameters/phosphorus#>
- Iagua. (2018). Eliminación del nitrógeno en las aguas residuales. <https://www.iagua.es/noticias/aema/eliminacion-nitrogeno-aguas-residuales#>
- Iagua. (2022). Recuperado el 11 de Noviembre de 2022, de iagua: <https://www.iagua.es>
- Induanálisis. (2019). Calidad del agua. https://www.induanalisis.com/seccion/laboratorio/calidad_del_agua_12
- Jaramillo, A. & Paredes, J. (2019). “Evaluación de la eficiencia de un sistema de dos filtros percoladores en serie para el tratamiento de aguas residuales domésticas en la urbanización Santa Lucía – Morales, 2018 [Tesis de Grado]. Universidad Peruana Unión. Tarapoto, Perú. <https://repositorio.upeu.edu.pe/handle/20.500.12840/1832>

- Manahan, S. E. (29 de octubre de 2022). LibreTexts libraries. Obtenido de Tratamiento avanzado de aguas residuales y reciclaje: <https://status.libretexts.org/>
- Marín, R. (2014). Características físicas, químicas y biológicas de las aguas. Córdoba: Empresa Municipal de Aguas de Córdoba S.A.
- Márquez, M. & Martínez, S. (2011). Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente (RAFA's o UASB) Antología. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/M%C3%81RQUEZ%20Y%20MART%C3%8DNEZ%202011%20Reactores%20Anaerobios.pdf
- Martínez, P., & Peña, J. (2019). Propuesta para un sistema de tratamiento de aguas residuales generadas en el proceso del Taller de Electroquímica perteneciente a la Fuerza Aérea Colombiana Madrid - Cundinamarca. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América.
- Mass, K., & Medrano, Y. (2013). Tratamiento de aguas residuales a partir de digestión anaerobia. Cartagena, Colombia: Universidad de Buenaventura.
- Mendoza, M., & Vigil, J. (2012). Evaluación físico-química y microbiológica de cuatro niveles de lodos ordinarios en la elaboración de compost. Ciudad Universitaria: Universidad del Salvador. Facultad de Ciencias Agronómicas.
- Metcalf, E., & Eddy, H. I. (1995). Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización. (Vol. 4). New York: McGraw-Hill.
- Mirafuentes, D. (2021). Tecnologías de separación por filtración y su uso en aguas de desecho doméstico . Toluca-México: Universidad Autónoma del Estado de México - Facultad de Química.
- Molina, A., & Villatoro, R. (2006). PROPUESTA DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES EN BENEFICIOS HUMEDOS DE CAFE. San Salvador: UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

- Muñoz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales. Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Nebel, B. J., & Wright, R. T. (1999). Ciencias ambientales: ecología y desarrollo sostenible. Pearson educación.
- ONU Hábitad y OMS. (2021). Progresos en el tratamiento de las aguas residuales. Estado mundial y necesidades de aceleración del indicador 6.3.1. de los ODS. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamiento Humanos 9.
- Ordoñez, A., Fitz, E., Espinosa, T., González, M. & Velázquez, N. (2017). Determinación de concentración de metano con sensores semiconductores. https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20Matematicas%20aplicadas%20a%20la%20Agronomia%20T-I/HCMA_TI_7.pdf
- Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua. París: UNESCO.
- Paulino, C., Apella, M., Pizarro, R. & Blesa, M. (2010). La contaminación biológica del agua y la desinfección solar. Ciencia e Investigación. 60 (4). 12 – 28. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/62992/CONICET_Digital_Nro.0a510b31-61bf-46af-8f17-9c287494f6ea_d-14-30.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Peco, A. (2020). Eliminación de contaminantes emergentes del agua mediante adsorción sobre materiales de carbón activados. Jaén: Universidad de Jaén.
- Pérez, M. (2013). Recuperación de aguas residuales. Tratamientos con ozono. Madrid: Cosemar Ozono.
- PNUMA. (2015). Economic Valuation of Wastewater - The Cost of Action and the Cost of No Action. Nairobi: Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente.
- PNUMA/ORPALC. (2005). Aguas Internacionales. Proyecto Ciudadanía Ambiental Global 2005. México D.F.: PNUMA.

- Pratt, G. (2022). Peligros del gas en las aguas residuales. Crowcon.
<https://www.crowcon.com/es/blog/gas-hazards-in-wastewater/>
- Raffo, E. & Ruiz, E. (2014). Caracterización de las aguas residuales y la demanda bioquímica de oxígeno. Datos Industriales , 17 (1), 71-80.
<https://www.redalyc.org/pdf/816/81640855010.pdf>
- Ramalho, R. S. (1996). Tratamiento de aguas residuales. Reverté.
- Ramírez, L., & Ospina, D. (2020). Revisión conceptual de medios filtrantes para el proceso de filtración del recurso hídrico . Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- Rocha Castro, E. (2010). Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas 1era edición. México: Editorial: Departamento Editorial de la UACH.
- Salas, J. (2022). A vueltas con la eliminación de nitrógeno en la tecnología de biodiscos. Recuperado el 07 de julio de 2023, de Tratamiento del agua:
<https://www.iagua.es/blogs/juan-jose-salas/vueltas-eliminacion-nitrogeno-tecnologia-biodiscos>
- Sánchez, K. (2021). Estudio de alternativas para la eliminación de nutrientes en la EDAR del Valle de la Orotava (Tenerife, Canarias). . Tenerife: Universidad Politécnica de Valencia.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial de México. (1981). Análisis de agua - Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la nmx-aa007-1980).
<https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFsr/NMX-AA-007-SCFI-2000.pdf>
- Secretaría de Economía de México. (2001). Análisis de agua - Determinación de turbiedad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba (cancela a la nmx-aa-038-1981).
<https://faolex.fao.org/docs/texts/mex52033.doc>

- Sela, G. (2022). La alcalinidad del agua. Cropaia. <https://cropaia.com/es/blog/la-alcalinidad-del-agua/>
- Sica. (2021). Importancia del análisis de agua en efluentes. <https://www.sicamedicion.com.mx/blog/tecnologias/importancia-del-analisis-de-agua-en-efluentes/#>
- Suárez, V. (2019). Análisis de alternativas para la eliminación de nutrientes en la EDAR "La Poveda" (Rivas-VaciaMadrid, Madrid). Madrid: Universidad Politécnica de Valencia.
- Sustainable Sanitation and Water Management. (2020). pagina web Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox. Recuperado el 11 de Noviembre de 2022, de pagina web Sustainable Sanitation and Water Management Toolbox: <https://sswm.info/>
- Tavares. R. (2011). Las aguas residuales no tratadas contienen virus desconocidos hasta la fecha. Madrid Blogs. <https://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2011/11/21/131691#>
- Telwesa. (2021). Tipos de tratamientos biológicos para aguas residuales. <https://telwesa.com/tipos-de-tratamientos-biologicos-para-aguas-residuales/>
- Tito, B. (2020). Tipos de Lagunas de oxidación ventajas y desventajas. Ingeniería Ambiental. <https://ingenieriaambiental.net/lagunas-de-oxidacion/>
- Tuholske, C.; Halpern, B.; Blasco, G.; Villasenor, J.; Frazier, M. y Caylor, K. (2021). Mapping global inputs and impacts from of human sewage in coastal ecosystems. *PLoS ONE*, 16(11). doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0258898>
- Uribe, D., Cárdenas, F., & Cadena, F. (2010). Derecho internacional ambiental. Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano.

- Urrutia, N. (2021). Eliminación de fósforo de aguas servidas mediante tecnologías convencional y no convencional: una aproximación desde balance de materia. Chile: Universidad de Concepción.
- Veolia. (2021). Aguas residuales: cómo se reutilizan y cuál es su importancia. <https://golatam.veoliawatertechnologies.com/es/blog/aguas-residuales-como-se-reutilizan-y-cual-es-su-importancia>
- Vieto, J. (2019). Uso de lámparas de luz Ultravioleta (UV) para tratamiento de agua. Costa Rica: HIDROTECO S.A. .
- Villa, J. (2022). Evaluación de un Reactor Aerobio/Anóxico para la eliminación biológica de Nitrógeno en Lixiviados de Relleno Sanitario Pichacay. Ecuador: Universidad Católica de Cuenca.
- WWAP. (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Aguas Residuales: el recurso desaprovechado. París, Francia: UNESCO.
- Yara. (2023). Tratamiento biológico de aguas residuales – Nutrientes. [https://www.yara.com.co/productos-quimicos-nitrogenados-y-soluciones-medioambientales/tratamiento-de-aguas-residuales/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales-nutrientes/#:~:text=Los%20tratamientos%20biol%C3%B3gicos%20para%20oaguas,org%C3%A1nica%20\(BOD%2C%20COD\).](https://www.yara.com.co/productos-quimicos-nitrogenados-y-soluciones-medioambientales/tratamiento-de-aguas-residuales/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales-nutrientes/#:~:text=Los%20tratamientos%20biol%C3%B3gicos%20para%20oaguas,org%C3%A1nica%20(BOD%2C%20COD).)

Estefania Freytez Boggio

Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Decanato de agronomía, Programa de Ingeniería Agroindustrial.

estefaniafreytez@ucla.edu.ve, estefaniafreytez@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0002-6133-5555>

Estefanía Freytez Boggio nació en Barquisimeto, estado Lara, Venezuela en 1983. Graduada de Ingeniero agroindustrial en el año 2006 en la Universidad Centro-Occidental Lisandro Alvarado. Magíster en Ingeniería Ambiental en la Universidad de Carabobo en el año 2016. Para el 2021, recibió el grado de Doctora en Ingeniería en la Universidad de Carabobo. Entre 2007 y 2008, fue profesora en la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Ezequiel Zamora, dictando los cursos de Desechos Agroindustriales y Agroindustria Vegetal. Para el año 2008, fue profesora en el Instituto Tecnológico Apure, dictando el curso de Agroindustria Vegetal. Entre 2008 y 2010, se desempeñó como jefa de despacho en el Ministerio del Poder Popular para la Agricultura y Tierras, gestionando proyectos agrícolas y trabajando en conjunto con el Instituto Nacional de Agricultura y Tierras. Desde 2010 hasta la actualidad, es profesora del Programa de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, impartiendo las asignaturas de Residuos Agroindustriales I y II, y la optativa de Higiene y Seguridad Industrial, destacándose en el tratamiento de aguas residuales generadas por las agroindustrias y en el manejo integral de los residuos sólidos. Desde 2014 hasta la actualidad es miembro activo del Centro de Hidrología y es autora de artículos y libros publicados.

Nelly Esther Flores Tapia

Dirección de Investigación y Desarrollo, Facultad de Ciencias, Alimentos y Biotecnología, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.

ne.flores@uta.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0851-8117>

Nelly Esther Flores Tapia, nacida en Loja, Ecuador, es una ingeniera química graduada por la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador. Continuando su búsqueda de conocimiento, obtuvo un Máster en Electroquímica, Ciencia y Tecnología en la Universidad de Barcelona, donde prosiguió sus estudios culminando con éxito su Doctorado en Electroquímica, Ciencia y Tecnología. Su enfoque y devoción se orientan hacia la descontaminación de aguas residuales industriales y el tratamiento de desechos sólidos industriales, áreas en las que se ha destacado como una experta en métodos electroquímicos y soluciones sostenibles. En la actualidad, Nelly Esther Flores Tapia ejerce como Profesora en la Facultad de Ciencias, Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato, ubicada en Ambato, Ecuador. En este rol, comparte su amplio conocimiento y experiencia con las nuevas generaciones de profesionales, contribuyendo al desarrollo y formación de futuros expertos en su campo.

María José Andrade Albán

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) – Facultad de Salud Pública, Carrera de Nutrición y Dietética.

maria.andrade@epoch.edu.ec; majoandrade62@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5874-4390>

Nació en Riobamba, en 1986. Ingeniera en Alimentos, Magíster en Gestión de la Producción Agroindustrial, títulos otorgados por la Universidad Técnica de Ambato. Docente de grado de instituciones de Educación Superior como la Universidad Técnica de Ambato y Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en materias como Microbiología de Alimentos, Química General, Bromatología de Alimentos (2011 – 2013), Sostenibilidad Ambiental, Calidad e Inocuidad de los Alimentos, Emprendimiento, Tecnología de Alimentos (2014 – 2023). Docente Investigador, con trayectoria y participación en varios proyectos de investigación y vinculación, autora y coautora de publicaciones científicas, ponente en eventos académicos, directora y miembro de trabajos de titulación. Ha formado parte de la Comisión de Evaluación y Aseguramiento de la calidad (2016-2023); ha alcanzado méritos académicos y empresariales.

Paúl Roberto Pino Falconí

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) – Facultad de Salud Pública, Carrera de Gastronomía.

ORCID: 0000-0002-60181267

paul.pino@epoch.edu.ec, paulrobertoam@hotmail.com

Nacido en Riobamba – Chimborazo, Ingeniero en Industrias Pecuarias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Licenciado en Ciencias de la Educación de la Universidad del Pacífico. Estudios de Posgrado en la Università Degli Studi Di Parma, Universidad de Buenos Aires (UBA), Instituto Argentino de Normalización y Certificación (IRAM) y Foro de la Alimentación, la Nutrición y la Salud (FANUS). Con conocimientos y experiencia en producción de alimentos, desarrollo de nuevos productos alimenticios, Bromatología y Toxicología de alimentaria, Nutrición Humana, Gestión de Calidad e Inocuidad Alimentaria y Formulación y Evaluación de proyectos agroindustriales y agropecuarios. Desempeña desde 2015 hasta la actualidad funciones de docencia en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en materias como Bioquímica de los Alimentos, Análisis sensorial, Materia Prima Vegetal, Procesamiento de Conservas Vegetales, Química Culinaria, Tecnología de Alimentos, Confeitería y Chocolatería, Antropología de los Alimentos, ha realizado a nivel universitario actividades de gestión, vinculación e investigación, siendo Director de proyectos de Investigación y generando publicaciones como libros y artículos científicos.

ISBN: 978-9942-33-734-4



compAs
Grupo de capacitación e investigación pedagógica



@grupocompas.ec

compasacademico@icloud.com